



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO PROBABILISTA PARA OBTENER LA CURVA
CARACTERÍSTICA DEL SUELO**

TESIS

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

(MECÁNICA DE SUELOS)

PRESENTA

M.C. GUSTAVO GALLEGOS FONSECA

DIRECTOR

DR. EDUARDO ROJAS GONZÁLEZ

QUERÉTARO, QRO., JUNIO DE 2011



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Doctorado en Ciencias (Mecánica de Suelos)

MODELO PROBABILISTA PARA OBTENER LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL SUELO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

(MECÁNICA DE SUELOS)

Presenta:

M.C. GUSTAVO GALLEGOS FONSECA

Dirigido por:

Dr. EDUARDO ROJAS GONZÁLEZ

SINODALES

Dr. Eduardo Rojas González
Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

Dr. Paul Garnica Anguas
Vocal

Dra. Teresa López Lara
Suplente

Dr. Jaime Horta Rangel
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luís Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Santiago de Querétaro, Qro.
Junio de 2011
México

RESUMEN

A la fecha se han propuesto diferentes ecuaciones para determinar los esfuerzos efectivos en suelos no saturados, con el propósito de simular los esfuerzos de estos materiales. En este trabajo se desarrollo un modelo sólido poroso que permite determinar los esfuerzos en un suelo no saturado. Para ese propósito, el suelo es considerado una estructura bimodal, lo cual significa que éste consta de una micro y macro estructura. El modelo sólido poroso consta de una red de poros que simulan la estructura de los sólidos. Esta red está formada por poros, sitios, enlaces y partículas sólidas. Cada uno de estos elementos presenta una distribución logarítmica normal, la cual es obtenida de la distribución de tamaño de poro y de partícula del material. Así, esos elementos son distribuidos aleatoriamente en la red. Mediante la ecuación de Laplace, se establecen las condiciones para el llenado o secado de los poros a determinada succión, esto permite establecer la probabilidad de que un poro de cierto diámetro sea llenado o secado. De este modo es posible determinar la curva característica del suelo. Con este modelo también es posible obtener los parámetros requeridos para determinar los esfuerzos de suelos no saturados, sujetos a cierta succión.

Esta investigación se dividió en dos partes principales: la experimental y la teórica. En la parte experimental los parámetros esenciales del suelo fueron medidos y se determinó la curva característica en trayectoria de secado y humedecimiento. También se determinaron los esfuerzos de este material a diferentes succiones para las trayectorias de secado y humedecimiento.

La parte teórica muestra el desarrollo del modelo sólido poroso y establece el procedimiento para obtener los parámetros requeridos.

Finalmente, se comparan los resultados experimentales y numéricos, con el propósito de evaluar la capacidad del modelo, para predecir los esfuerzos de suelos no saturados.

(Palabras clave: Parámetro de Bishop, sólido, sitio, enlace y conectividad)

SUMMARY

Different equations to determine the effective stress in unsaturated soils have been proposed in order to simulate the strength of these materials. Through this work, a solid-porous model is developed that allows determining the strength of unsaturated soils. To that purpose, the soil is considered as a bimodal structure meaning that it consists in a micro and a macrostructure. The solid-porous model consists in a network of pores that simulates the structure of soils. This network is formed by pores, sites, bonds and solid particles. Each of these elements shows a normal logarithmic size distribution which is obtained from the grain and pore size distributions of the material. Then these elements are distributed at random in the network. By using the Laplace equation which states the condition for the size of a pore to fill or dry at certain suction, it is possible to establish the probability for a pore of certain size to fill or dry. Thus the soil-water characteristic curves of the soil can be simulated. With this model it is also possible to obtain the parameters required to determine the strength of unsaturated soils subject to certain suction.

This research is divided in two main parts: the experimental and the theoretical. In the experimental part the essential parameters of the soil are measured and the soil-water characteristic curve at wetting and drying is determined. Also the strength of the material at different suctions and for wetting and drying paths is measured.

The theoretical part shows the development of the probabilistic solid-porous model and establishes the procedure to obtain the required parameters.

Finally, the experimental and numerical results are compared in order to evaluate the capability of the model in predicting the strength of unsaturated soils.

(Key words: Bishop's parameter, solid, site, bond and connectivity).

AGRADECIMIENTOS

*Feliz el que haya sabiduría,
el que obtiene inteligencia;
porque son más provechosas que la plata
y rinden mayores beneficios que el oro.*

Proverbios 3;13-14.

Doy gracias a Dios por todos sus beneficios, especialmente por el don precioso de la vida, la salud, la oportunidad de alcanzar estos propósitos tan lejanos e impensables.

Quiero agradecer muy especialmente al Programa de Mejoramiento del Profesorado P.R.O.M.E.P., el cual contribuyó con el apoyo económico para que este trabajo de doctorado se llevara a cabo.

Reconozco infinitamente a la U.A.S.L.P. por todas las facilidades y el apoyo incondicional recibido antes, durante y después del desarrollo de este programa de doctorado.

También quiero extender mi agradecimiento a la Unión de Asociaciones del Personal Académico de la U.A.S.L.P. por las facilidades otorgadas durante la gestión de la Beca P.R.O.M.E.P.

Agradezco enormemente a la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media de la U.A.S.L.P. por la oportunidad y la confianza depositada en su servidor para la elaboración de este trabajo de doctorado.

No quiero pasar por alto agradecer al Dr. Eduardo Rojas González por su apoyo y ejemplo de constancia y tenacidad, así como agradecer su interés y clara dirección para buscar el objetivo de esta investigación.

Extiendo mi gratitud al Dr. Juan Manuel Izar Landeta por su apoyo incondicional para impulsar los estudios de doctorado.

También agradezco al M.B.A. Mario Fernando Ávalos Sékeres por todas las facilidades otorgadas para culminar con los estudios de doctorado.

Expreso mi agradecimiento a la Dra. Milka Elena y al Dr. Jorge Horacio por sus sabios comentarios y su incondicional asesoría cada vez que recurrí a ellos.

De igual forma expreso mi agradecimiento al Dr. José Francisco Horta Rangel por su asesoría para desarrollar la porosimetría mediante el análisis de imagen.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro, la oportunidad concedida para participar en su programa de Doctorado en Ingeniería. Especialmente a la Facultad de Ingeniería, al Laboratorio de Mecánica de Suelos de esta facultad, así como a los señores Juan Manuel Ramírez Moya y José Alejo.

Mi gratitud y respeto al M.C. Julio Cesar Leal Vaca por su motivación y desinteresado apoyo para el desarrollo de este trabajo de investigación, en el que además de encontrar un compañero de clases, encontré a una excelente persona.

Agradezco de forma muy especial a mis padres Severo y Cristina por sus oraciones incansables y la oportunidad de vida que me han regalado.

A mis hermanos María Guadalupe, José Félix y María Luisa les expreso mi agradecimiento por su ejemplo de vida y comprensión.

A mi esposa Lorena Mirella le expreso mi reconocimiento por todo su cariño y comprensión, para que este proyecto de vida se hiciera realidad.

A Gustavo Félix, Jeshúa Israel y Damiano Elihú, les digo gracias por su persona, compañía, cariño y ternura que han traído a mi vida.

A todos ustedes Muchas Gracias...!

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
SUMMARY	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS	12
SIMBOLOGÍA.....	14
OBJETIVOS	19
HIPÓTESIS.....	20
1 INTRODUCCIÓN.....	21
2 CURVA CARACTERÍSTICA.....	25
2.1 Fundamentos teóricos.....	25
2.2 Cilindro extractor	28
2.3 Permeámetro de Perfil Instantáneo	30
2.4 Uso de la técnica del papel filtro para determinar la curva característica	40
2.4.1 Propósito del la técnica del papel filtro	40
2.4.2 Importancia y uso	40
2.4.3 Calibración del papel filtro.....	42
2.4.4 Procedimiento para determinar la succión con el papel filtro.....	44
2.5 Modelos para determinar la curva característica.....	52
3 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	57
3.1 Obtención de la muestra.....	57
3.2 Determinación de las propiedades índices.....	59
3.2.1 Granulometría	59
3.2.2 Límites de consistencia	60
3.2.3 Pesos específico relativo de los sólidos	61
3.2.4 Ensaye Proctor Estándar	62
3.3 Ensaye de consolidación unidimensional con succión controlada	63
3.4 Resistencia del suelo al esfuerzo cortante	67
3.4.1 Ensaye de compresión simple (q_u)	68
3.4.2 Ensaye triaxial consolidado drenado (CD)	70
3.5 Curva característica.....	73

3.6 Porosimetría del suelo	75
3.6.1 Tamaño de poro	76
3.6.2 Análisis de imagen y porosimetría.....	77
3.6.3 Porosimetría	78
3.6.4. Procedimiento utilizado para el análisis de imagen.....	80
4 MODELO PROBABILISTA	85
4.1 Desarrollo del modelo probabilista.....	85
4.2 Descripción del modelo del suelo	86
4.3 Propuesta de un modelo sólido poroso a partir del modelo probabilista	87
4.4 Trayectoria de secado.....	90
4.5 Trayectoria de humedecimiento	91
4.6 Obtención de la curva característica mediante el modelo probabilista.....	92
4.7 Planteamiento del Modelo Sólido Poroso	93
4.7.1 Determinación del volumen del suelo saturado.....	95
4.7.2 Volumen del suelo saturado en trayectoria de secado	95
4.7.3 Volumen del suelo saturado en trayectoria de humedecimiento	96
4.7.4 Análisis del esfuerzo efectivo en un suelo no saturado	96
4.7.5 Determinación del grado de saturación de la fracción no saturada	102
4.7.6 Determinación del parámetro χ de Bishop	103
4.8 Resistencia de los suelos no saturados.....	107
4.8.1 Modelos teóricos de resistencia al esfuerzo cortante existentes	108
5. RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES	112
5.1 Selección del suelo.....	113
5.2 Determinación de las propiedades índices.....	115
5.3 Ensaye de consolidación unidimensional con succión controlada	118
5.4 Resistencia del suelo al esfuerzo cortante	121
5.4.1 Resistencia al esfuerzo cortante experimental.....	121
5.4.1.1 Ensayes de compresión no confinada (q_u).....	121
5.4.1.2 Ensayes triaxiales CD con diferentes esfuerzos de confinamiento ..	125
5.4.1.3 Ensaye triaxial CD para determinar C' y ϕ'	139
5.4.1.4 Ensaye triaxial CD para un $\sigma_3 = 150$ kPa con succión controlada mediante la bomba peristáltica.....	141
5.5 Curva característica.....	145
5.5.1 Resultados experimentales de la curva característica	145

5.6 Curvas de distribución porosimétrica	147
5.7 Resultados del modelo sólido poroso.....	148
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
6.1 Conclusiones	169
6.2 Recomendaciones y limitaciones	171
<i>Referencias utilizadas</i>	173
ANEXO A	180
A.1. Procedimiento utilizado para obtener la curva característica a partir de la porosimetría de un suelo cualquiera.....	180
ANEXO B	191
B.1 Manejo del cilindro extractor de membrana	191
ANEXO C	206
C.1 Procedimiento utilizado para controlar la succión de las probetas de suelo durante el ensaye triaxial con succión controlada.....	206
ANEXO D.....	211
D.1 Uso de la Bomba Peristáltica	211
ANEXO E	223
E.1 Preparación de las muestras para obtener las micrografías.....	223
ANEXO F	227
F.1 Determinación de la curva característica mediante el modelo probabilista apoyándose en la porosimetría por intrusión de mercurio.....	227
F.2 Determinación de la curva característica mediante el modelo probabilista apoyándose en la porosimetría obtenida por análisis de imagen.....	233
ANEXO G.....	238
G.1 Método inverso para determinar la porosimetría	238
G.2 Ejemplo del Método inverso	239

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Procedimientos existentes para determinar la curva característica	27
Figura 2.2 Cilindro extractor de membrana.....	29
Figura 2.3 Permeámetro utilizado por Meerdink <i>et al.</i> , (1996) para el ensaye de Perfil Instantáneo	31
Figura 2.4 Permeámetro de perfil instantáneo.	32
Figura 2.5 Permeámetro de perfil instantáneo.	32
Figura 2.6 Dispositivo para suministrar el agua al permeámetro.	34
Figura 2.7 Pantalla del programa que realiza las mediciones de la succión al suelo, mediante los Psicrómetros de termopar.....	35
Figura 2.8 Curva característica del suelo (Fredlund and Xing 1994).....	36
Figura 2.9 Detalle de la colocación de los Psicrómetros en los puertos de lectura.....	37
Figura 2.10 Lectura de los psicrómetros	38
Figura 2.11 Placa hermética que sella los extremos del permeámetro.....	39
Figura 2.12 Curva de calibración del papel filtro	43
Figura 2.13 Detalle de colocación de los discos de papel filtro para obtener la succión total	45
Figura 2.14 Detalle de colocación de los discos de papel filtro para obtener la succión mátrica.....	45
Figura 3.1 Molde utilizado para elaborar las probetas de suelo	59
Figura 3.2 Probeta de suelo utilizada en el ensaye de consolidación	65
Figura 3.3 Consolidómetro convencional utilizado.....	66
Figura 3.4 Diagrama Mohr Coulomb para el ensaye de compresión simple	69
Figura 3.5 Diagrama de Mohr Coulomb del ensaye triaxial CD (c' y ϕ')	72
Figura 3.6 Rangos de medición de los métodos para determinar el tamaño de poro (Meyer 1997).....	77
Figura 3.7 Muestra de suelo SM instalada dentro del porta muestra	78
Figura 3.8 Microscopio electrónico de barrido utilizado	80
Figura 3.9 Micrografía del suelo SM.....	81
Figura 3.10 Programa para mejorar la calidad de imagen.	81
Figura 3.11 Programa para el conteo de la imagen.....	82
Figura 3.12 Análisis del conteo de una micrografía.....	83
Figura 3.13 Aspecto de la micrografía durante el conteo de los poros, en color azul.....	84
Figura 4.1 a) Imagen de una estructura de suelo (Vulliet <i>et al.</i> (2006)). b). Red de sitios, enlaces y sólidos.....	88
Figura 4.2 Modelo Probabilista para obtener la curva característica	90
Figura 4.3 Modelo Sólido Saturado	94
Figura 4.4 Elemento de un suelo no saturado.....	97
Figura 4.5 Sección transversal de un suelo no saturado.....	98
Figura 5.1 Comportamiento del esfuerzo desviador en función del contenido de agua. ..	115
Figura 5.2 Distribución granulométrica de la mezcla de suelo.....	117
Figura 5.3 Distribución de tamaños de partícula de la mezcla.	118
Figura 5.4 Gráfica de Succión contra esfuerzo de preconsolidación.....	120

Figura 5.5 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye de compresión no confinada en trayectoria de humedecimiento.....	123
Figura 5.6 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye de compresión no confinada en trayectoria de secado.....	124
Figura 5.7 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye de compresión no confinada.	125
Figura 5.8 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de humedecimiento.....	127
Figura 5.9 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de secado.....	128
Figura 5.10 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa.....	129
Figura 5.11 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa en trayectoria de humedecimiento.....	131
Figura 5.12 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa en trayectoria de secado.....	132
Figura 5.13 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa.....	133
Figura 5.14 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento.....	135
Figura 5.15 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado.....	136
Figura 5.16 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa.....	137
Figura 5.17 Comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en trayectoria de humedecimiento, con succión controlada (esfuerzos máximos).....	138
Figura 5.18 Comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en trayectoria de secado, con succión controlada, (esfuerzos máximos).....	138
Figura 5.19 Línea de falla del ensaye triaxial CD, $\phi' = 36.37^\circ$ y $C' = 8.965$ kPa, con el suelo en estado saturado.....	140
Figura 5.20 Esfuerzo desviador contra esfuerzo normal promedio, $M = 1.52$ para $\phi' = 36.37^\circ$ y $C' = 0.00865$ MPa.....	141
Figura 5.21 Círculo de esfuerzo obtenidos mediante el ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento, con succión controlada mediante la bomba peristáltica.....	143
Figura 5.22 Círculo de esfuerzo obtenidos mediante el ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado, con succión controlada mediante la bomba peristáltica.....	144
Figura 5.23 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa, con succión controlada mediante la bomba peristáltica.....	144
Figura 5.24 Curvas características del suelo en trayectoria de secado y humedecimiento.....	146
Figura 5.25.Porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen.....	148
Figura 5.26 Curva característica teórica obtenida con M.P.....	151
Figura 5.27 Curva del Factor de Saturación del suelo obtenido con M.P.....	153
Figura 5.28 Curva del Grado de Saturación no Saturado obtenida con el M.P.....	156
Figura 5.29 Parámetro χ de Bishop en trayectoria de secado y humedecimiento.....	158

Figura 5.30 Esfuerzos cohesivos en trayectoria de secado y humedecimiento.....	161
Figura 5.31 Esfuerzo Cortante en trayectoria de secado y humedecimiento	163
Figura 5.32 Distribución de tamaño de poro obtenida mediante el M.S.P.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.0 Lecturas obtenidas mediante los psicrómetros.....	38
Tabla 2.1 Concentración de soluciones de sal, para evaluar la succión del suelo.....	43
Tabla 2.2 Hoja de datos para evaluar la succión del suelo	51
Tabla 2.3 Concentrado de los resultados del ensaye de la curva de retención.	52
Tabla 3.1 Pesos específicos relativos típicos de algunos suelos.	62
Tabla 3.2 Métodos para determinar la porosidad total (Mikhail and Robens 1983).	79
Tabla 3.3 Métodos para determinar la porosidad abierta (Mikhail and Robens 1983).	79
Tabla 5.0 Información recuperada con cada uno de los ensayes.....	112
Tabla 5.0 (Continuación) Información recuperada con cada uno de los ensayes.....	113
Tabla 5.1 Características de los especímenes de suelo.	113
Tabla 5.2 Resultados de los ensaye de compresión simple vs contenido de agua	114
Tabla 5.3 Propiedades índices del suelo de Ciudad Fernández, Uriangato y la mezcla de estos.....	115
Tabla 5.4 Distribución granulométrica de la mezcla de suelo.....	116
Tabla 5.5 Porcentaje Retenido de partículas de cada diámetro.	117
Tabla 5.6 Especímenes utilizados en trayectoria de secado.....	118
Tabla 5.7 Especímenes utilizados en trayectoria de humedecimiento.	119
Tabla 5.8 Esfuerzos de preconsolidación obtenidos en trayectoria de secado.....	119
Tabla 5.9 Esfuerzos de preconsolidación obtenidos en trayectoria de humedecimiento.	120
Tabla 5.10 Resultados de los ensayes de Compresión no Confinada en trayectoria de humedecimiento.	121
Tabla 5.11 Resultados de los ensayes de Compresión no Confinada en trayectoria de secado.....	122
Tabla 5.12 Resultados de los ensayes triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de humedecimiento.	126
Tabla 5.13 Resultados de los ensayes triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 50$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado.....	126
Tabla 5.14 Resultados de los ensayes triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento	129
Tabla 5.14 (Continuación) Resultados de los ensayes triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento.	130
Tabla 5.15 Resultados de los ensayes triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado.....	130
Tabla 5.16 Resultados del ensaye triaxial (CD) con $\sigma_3 = 150$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento.....	134
Tabla 5.17 Resultados del ensaye triaxial (CD) con $\sigma_3 = 150$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado.	134
Tabla 5.18 Resultados del ensaye triaxial (CD) con $\sigma_3 = 150$ kPa.	139
Tabla 5.19 Resultados del ensaye triaxial (CD) con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento.	142
Tabla 5.20 Resultados del ensaye triaxial (CD) con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado.	142
Tabla 5.21 Curva característica en trayectoria de humedecimiento.	145
Tabla 5.22 Curva característica en trayectoria de secado.....	146
Tabla 5.23 Porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen.....	147
Tabla 5.24 Curva característica teórica en trayectoria de humedecimiento.....	149

Tabla 5.25 Curva característica teórica en trayectoria de secado.	150
Tabla 5.26 Fracción saturada en trayectoria de humedecimiento.	152
Tabla 5.27 Fracción saturada en trayectoria de secado.	152
Tabla 5.27 (Continuación) Fracción saturada en trayectoria de secado.	153
Tabla 5.28 Grado de saturación no saturado del suelo en trayectoria de humedecimiento.	154
Tabla 5.29 Grado de saturación no saturado del suelo en trayectoria de secado.	155
Tabla 5.30 Parámetro de Bishop en trayectoria de humedecimiento.	157
Tabla 5.31 Parámetro de Bishop en trayectoria de secado.	157
Tabla 5.31 (Continuación) Parámetro de Bishop en trayectoria de secado.	158
Tabla 5.32 Esfuerzo cohesivo en trayectoria de humedecimiento.	159
Tabla 5.33 Esfuerzo cohesivo en trayectoria de secado.	160
Tabla 5.34 Esfuerzo cortante en trayectoria de humedecimiento.	162
Tabla 5.35 Esfuerzo cortante en trayectoria de secado.	162
Tabla 5.35 (Continuación) Esfuerzo cortante en trayectoria de secado.	163
Tabla 5.36 Porosimetría obtenida mediante el Modelo Sólido Poroso.	164

SIMBOLOGÍA

- ψ .- Es la succión total del suelo
- T_s .- Es la tensión superficial del agua del suelo
- Lec. Max.- Lectura máxima en microvolts
- t.- Temperatura en grados centígrados
- ψ (Mpa).- Succión total en MPa
- R.- Constante de los gases ideales, 8.31432 Joules/mole·Kelvin
- T.- Temperatura absoluta, en grados Kelvin (K)
- v.- Volumen de 1000 moles de agua líquida, 0.018 m³
- R_h .- Humedad relativa, en fracción
- M_f .- Masa del papel filtro seco, en gr
- M_2 .- Masa seca total, en gr
- T_h .- Masa del contenedor caliente, en gr
- M_w .- Masa del agua en el papel filtro, en gr
- T_c .- Masa del contenedor frío, en gr
- M_1 .- Masa del papel filtro húmedo, en gr
- wf.- Contenido de agua del papel filtro
- Ww.- Peso del agua del papel filtro
- Wf.- Peso del papel filtro
- m.- Pendiente de la curva de calibración del papel filtro
- b.- Constante de la curva de calibración del papel filtro
- ψ_m .- Succión mátrica
- θ_w .- Contenido volumétrico de agua
- q.- Parámetro del suelo para el modelo de Garner 1958
- n.- Parámetro del suelo para el modelo de Garner 1958

ψ^b .- Succión correspondiente al valor de entrada de aire del suelo

λ .- Índice de distribución de tamaño de poro

m.- Parámetros del suelo utilizados en el modelo de van Genuchten 1980

p.- Parámetro del suelo utilizados en el modelo de van Genuchten 1980

n.- Parámetro del suelo utilizados en el modelo de van Genuchten 1980

a_1 .- Parámetro del modelo de Williams *et al.* 1983

b_1 .- Parámetro del modelo de Williams *et al.* 1983

e.- Relación de vacíos

a_2 .- Parámetro del modelo de Mckee and Bum (1984)

b_2 .- Parámetro del modelo de Mckee and Bumb (1984)

a_3 .- Parámetro del modelo de Mckee and Bum (1987)

b_3 .- Parámetro del modelo de Mckee and Bum (1987)

θ_r .- Contenido volumétrico de agua residual del modelo de Fredlund and Xing (1984)

θ_s .- Contenido volumétrico de agua saturado del modelo de Fredlund and Xing (1984)

a.- Parámetro del suelo para el modelo de Fredlund and Xing (1984)

n.- Parámetro del suelo para el modelo de Fredlund and Xing (1984)

m.- Parámetro del suelo para el modelo de Fredlund and Xing (1984)

Ss.- Peso específico relativo de los sólidos

% n.- Porosidad del suelo

% ω .- Contenido de agua

γ_m .- Peso específico de la muestra de suelo

γ_d .- Peso específico seco de la muestra de suelo

σ_1 .- Esfuerzo principal mayor

σ_3 .- Esfuerzo principal menor

S.U.C.S.- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SP.- Arena mal graduada

SM.- Arena limosa

P.V.S.M.- Peso volumétrico seco máximo

μm .- micra

mm.- Milímetro

A.S.T.M.- American Society of Testing Materials

U_a .- Presión del aire de poro

U_w .- Presión del agua de poro

π .- Succión osmótica

R.- Constante universal de los gases (8.31432 J/mol K)

T.- Es la temperatura absoluta en grados kelvin

M_w .- Es el peso molecular del agua (18.016 kg/kmol)

ρ_w .- Es el peso unitario del agua en kg/m^3 en función de T

G_w .- Grado de saturación del suelo

P_c .- Esfuerzo de preconsolidación

τ .- Resistencia al esfuerzo cortante del suelo

c.- cohesión del suelo

σ .- esfuerzo normal

ϕ .- ángulo de fricción interna del suelo

(q_u) .- Ensaye de compresión simple

UU.- Ensaye triaxial no consolidado no drenado

CU.- Ensaye triaxial consolidado no drenado

CD.- Ensaye triaxial consolidado drenado

n.- Porosidad del suelo

V_p .- Volumen de vacíos

V.- Volumen total

nm.- Nanómetros

kN.- Kilonewton

C.- Conectividad del modelo probabilista

rb_1 .- Radio del enlace uno

rb_2 .- Radio del enlace dos

r_{st} .- Radio de sitio

α .- Ángulo de contacto suelo agua

r.- Radio crítico de poro

L_{SD} .- Factor de probabilidad de que un sitio se encuentre saturado en un proceso de secado

L_{BD} .- Factor de probabilidad de que un enlace se encuentre saturado en un proceso de secado

L_{SI} .- Factor de probabilidad de que un sitio se encuentre saturado en un proceso de humedecimiento

L_{BI} .- Factor de probabilidad de que un enlace se encuentre saturado en un proceso de humedecimiento

$S(R_c)$.- Distribución de sitios saturados

$B(R_c)$.- Distribución de enlaces saturados

$1-S(R_c)$.- Distribución de sitios no saturados

$1-B(R_c)$.- Distribución de enlaces no saturados

S_{WD} .- Grado de saturación obtenido en trayectoria de secado

S_{WI} .- Grado de saturación obtenido en trayectoria de humedecimiento

Gw_{min} .- Grado de saturación mínimo obtenido de la curva característica

Gw_{max} .- Grado de saturación máximo obtenido de la curva característica

Gw_{corr} .- Grado de saturación corregido

μ_b .- Diámetro promedio de enlaces

σ_B .- Desviación estándar de enlaces

μ_S .- Diámetro promedio de sitios

σ_S .- Desviación estándar de sitio

V_S .- Volumen de sitios

V_B .- Volumen de enlaces

R_c .- Radio crítico

MP.- Modelo probabilista

L_{PD} .- Factor de probabilidad de que los sólidos se encuentren saturados durante un proceso de secado

L_{PI} .- Factor de probabilidad de que los sólidos se encuentren saturados durante un proceso de secado

V_B^S .- Volumen de enlaces saturados

V_S^S .- Volumen de sitios saturados

V_p^s .- Volumen de sólidos saturados

V^v .- Volumen saturado

f^s .- Fracción saturada

V.- Volumen total del suelo

S_w^u .- Grado de saturación no saturado

σ' .- Esfuerzo efectivo

$\sigma-U_a$.- Esfuerzo neto

χ .- Parámetro de Bishop

$\sigma_1-\sigma_3$.- Esfuerzo desviador

τ .- Esfuerzo cortante del suelo

min.- minuto

c' .- Cohesión efectiva del suelo

ϕ' .- ángulo efectivo de fricción

p.- Esfuerzo medio

DTS.- Distribución de tamaño de sólidos

DTP.- Distribución de tamaño de poros

$A_{equivalente}$.- Área equivalente de un poro del suelo

OBJETIVOS

Analizar el comportamiento mecánico e hidráulico que experimenta un suelo sin potencial osmótico, bajo diferentes magnitudes de succión mátrica.

- I. Identificar un material libre de sales
- II. Conocer el comportamiento de su resistencia al esfuerzo cortante bajo diversos valores de succión al utilizar, el ensaye triaxial consolidado drenado (CD), en trayectoria de secado y humedecimiento.
- III. Desarrollar un Modelo Probabilista Sólido-Poroso, que permita obtener la curva característica de un suelo y los parámetros para determinar los esfuerzos equivalentes tomando como información de soporte los datos recabados de porosimetría y granulometría. El modelo estará compuesto por poros y sólidos. Los poros a su vez estarán formados por macroporos, sitios y enlaces.
- IV. Modelar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo a partir de los esfuerzos equivalentes obtenidos mediante el Modelo Probabilista Sólido-Poroso y el modelo de Bishop (1959).
- V. Inferir la porosimetría del suelo a partir de la curva característica.

HIPÓTESIS

Es posible desarrollar una descripción estadística simplificada del sistema de poros y sólidos de un medio apoyándose en un modelo compuesto por tres tipos de elementos los sitios o cavidades, enlaces o gargantas y partículas o sólidos. Sin embargo, se debe considerar los siguientes puntos:

- El tamaño de los poros y sólidos del suelo presentan una distribución logarítmica normal, lo que permitirá reproducir la muy compleja estructuración del esqueleto de poros encontrado en el suelo. Además se debe tomar en cuenta que no se presenta la succión osmótica en el suelo.
- Se considera que las partículas sólidas no absorben humedad y que el modelo no contiene burbujas de gas aisladas, ni que estas se pueden formar en la parte saturada o durante el proceso de humedecimiento o secado.
- Tanto los sitios como los sólidos son esferas (círculos), los enlaces son cilindros (rectángulos), y el llenado de los sitios con agua, es gobernado por la ecuación de Laplace.

Esto permite desarrollar un modelo sólido poroso en el que es posible reproducir las curvas características del material y obtener su porosimetría teórica.

También se considera que a través del concepto de esfuerzos equivalentes es posible simular el comportamiento de los esfuerzos cortantes de un suelo. Con el fin de determinar los esfuerzos equivalentes, se requiere del modelo sólido-poroso para su determinación y el modelo de Bishop (1959), para analizar suelos en estado no saturado.

1 INTRODUCCIÓN

La mecánica de suelos es una de las áreas de la ingeniería muy socorrida, esto se debe a que el suelo es el material de construcción por excelencia presente en todas las obras de ingeniería de diferentes formas. Así mismo, es el material sobre el cual se desplantará la edificación, así como el material con el cual se han fabricado los elementos prefabricados que decoran las edificaciones, etc. Es por ello que la mecánica de suelos, en general, tiene un lugar muy especial en la ingeniería.

Por lo anterior, la mecánica de suelos saturados estudia el comportamiento de los suelos en los que solamente están presentes dos fases constituyentes, la sólida y la líquida. Así pues, el conocer la interrelación entre cada una de estas fases ha permitido determinar el comportamiento de los suelos saturados en los análisis de flujo, cambios de volumen y resistencia.

En cambio, la mecánica de suelos no saturados se enfoca al estudio de los suelos que se encuentran fuera de los cuerpos de agua, pero que aún así, cuentan con la fase líquida presente en ellos. En este tipo de suelos se localizan las tres fases constitutivas: sólida, líquida y gaseosa, Fredlund and Rajardho (1993). De la misma manera que en el caso de los suelos saturados conocer la interrelación entre cada una de las fases permitirá poder predecir el comportamiento de este tipo de suelos.

Al hablar de un suelo no saturado se asume que en él está presente la materia en sus tres estados, además la estructura de los sólidos guarda un especial acomodo, a decir los sólidos de sólidos y glomérulos de sólidos, Alonso y Gens, (1987); esto significa que los grumos, presentan a su vez una estructura de un tamaño mucho al caso anterior.

Numerosos investigadores han observado que la macro estructura influye en el comportamiento mecánico, mientras que la micro-estructura influye en el

comportamiento hidráulico, ya que esta última siempre permanece saturada, Vulliet *et al.*, (2006).

En la mecánica de suelos no saturados, existe una relación especial entre la fase líquida y la fase gaseosa. Entre ellas se ha señalado que existe una cuarta fase conocida como capa contráctil, Fredlund and Rajardho, (1993). A ésta se le atribuyen los esfuerzos y los cambios de volumen que el suelo desarrolla.

Por ello se ha mencionado que a un mismo grado de saturación en el suelo le corresponden diferentes magnitudes de succión, Fredlund and Xing, (1994). Al desarrollar un análisis minucioso del comportamiento del grado de saturación y de la succión que éste desarrolla, es posible construir la relación entre ellos que se conoce como curva característica, además, ésta curva es posible obtenerla en trayectoria de secado y humedecimiento.

En la actualidad existen numerosos modelos que pueden predecir la curva característica, sin embargo, estos modelos se encuentran restringidos a un tipo de suelo en particular y a un rango específico de succión, aunado a lo anterior, no reproducen el efecto de la histéresis que experimenta el suelo al ir en trayectoria de secado y de humedecimiento, (Rojas, 2006).

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento mecánico e hidráulico que un suelo sin potencial osmótico exhibe a diferentes magnitudes de succión.

Así pues, se realizaron varios ensayos de laboratorio como fue la identificación del suelo, obtención de sus propiedades índices, ensaye Proctor estándar, ensaye del peso específico relativo de los sólidos, ensayos de compresión simple, ensaye triaxial y el ensaye de consolidación, con el fin de apreciar el comportamiento mecánico del suelo. Por otro lado, se determinó la calibración del papel filtro, se determinó la curva característica así como la distribución porosimétrica del suelo, que sirvió para validar el comportamiento hidráulico del suelo.

Para la obtención del grado de saturación de la fracción no saturada y fracción saturada del suelo, se requirió implementar un modelo que consta de dos partes. El primero es un Modelo Probabilista (M.P.) que se encuentra constituido

por los sitios y enlaces, que permiten plantear cuatro expresiones matemáticas para obtener el grado de saturación del suelo en cualquier diámetro; además, mediante el modelo de Laplace es posible determinar para cada uno de esos diámetros la magnitud de la succión correspondiente. El grado de saturación, así como la succión, se pueden determinar en ambas trayectorias. Con esta información es posible construir la curva característica también en ambas trayectorias.

El segundo modelo llamado Modelo Sólido Poroso (M.S.P.) incluye los tres tipos de elementos que son los sitios, los enlaces y los sólidos. Mediante estas tres distribuciones es posible hacer el desarrollo matemático para determinar el grado de saturación no saturado, la fracción saturada del suelo y los parámetros con los cuales es posible determinar el parámetro χ , utilizado para conocer los esfuerzos equivalentes de un suelo no saturado mediante el modelo de Bishop (1959). Por otro lado, se utiliza el modelo de Coulomb-Terzaghi para predecir la resistencia del suelo en ambas trayectorias.

Este trabajo se conforma por la introducción y cinco capítulos más: en el segundo capítulo se abordará lo relativo a la curva característica del suelo y, los procedimientos experimentales existentes para obtenerla. También se presentan los procedimientos teóricos para predecir la curva característica que se ha desarrollado.

En el tercer capítulo se presenta el desarrollo experimental que se siguió para lograr los objetivos de ésta investigación. En primer lugar se aborda la selección del suelo, la determinación de sus propiedades índices, la determinación de la resistencia del suelo mediante los ensayos de compresión simple y triaxiales CD, en ambas trayectorias, así como obtención de la cohesión y el ángulo de fricción efectivo, seguido de la determinación del esfuerzo de pre-consolidación. Además se realizó la calibración del papel filtro, se determinó la curva característica mediante la técnica de papel filtro y del cilindro extractor de membrana y finalmente se determinó la porosimetría del suelo.

En el capítulo cuatro se describe el planteamiento del modelo matemático, en sus dos partes, en la primera se describe el Modelo Probabilista y en la segunda el Modelo de Sólidos Poroso.

En el capítulo cinco se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante los ensayos que se mencionan en el capítulo tres.

Por último, en el capítulo seis se presentan las conclusiones que se obtuvieron del presente trabajo y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

2 CURVA CARACTERÍSTICA

En esta sección se expondrá en primer lugar los fundamentos teóricos que soportan el concepto de curva característica, después se abordarán las técnicas existentes para determinarla experimentalmente y por último se presentan algunos de los métodos existentes para pronosticar esta curva.

2.1 Fundamentos teóricos

A lo largo de la historia de la mecánica de suelos numerosos investigadores han estado interesados en entender y predecir el comportamiento de las distintas estructuras del suelo.

La primera contribución importante a la mecánica de suelos se le atribuye a Coulomb (1776), quien publicó un importante tratado sobre la falla de los suelos, posteriormente Rankine (1857) publicó un artículo sobre los posibles estados de esfuerzo en el suelo.

Otra contribución de igual importancia al desarrollo de la teoría de la mecánica de suelos fue hecha por Karl Terzaghi (1936), que entre muchas otras cosas analizó un elemento esencial de la mecánica de suelos, la influencia de la presión del agua de poro en su comportamiento.

La curva característica del suelo (CCS) es una función importante en la mecánica de los suelos no saturados para el diseño y análisis de alguna estructura de tierra, Richard, (1965). Sin embargo su obtención no es fácil y requiere de un tiempo prolongado.

La relación existente entre el grado de saturación y la succión del suelo es una parte esencial de la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo; esta relación es llamada de varias maneras, Klute, (1986), curva característica del suelo, curva de retención o curva de presión capilar. La curva característica es la

base del comportamiento ingenieril de un suelo no saturado. Rojas (2006), indica que ésta es una medición practicada al suelo, y puede ser utilizada para derivar otras funciones como la permeabilidad, los esfuerzos de corte y los cambios de volumen. Además, es una referencia del estado de esfuerzos por el que otras propiedades son calculadas, ya que es una función clave y útil en el análisis numérico de estructuras de suelo.

En la actualidad, la curva característica del suelo se ha entendido que es una propiedad única, y depende de varios factores como: la estructura del suelo, la distribución de los sólidos, la distribución de los poros, y la historia de humedecimiento y secado, a partir de donde se inicie.

Así la curva característica es la base del comportamiento ingenieril de un suelo no saturado, en este sentido Fredlund and Rahardjo (1994), Md Addul *et al.* (2009), señalan que la curva característica define la capacidad del suelo para almacenar o rechazar agua.

En cambio Johari *et al.* (2006) señalan que en muchos casos la curva característica es el soporte fundamental de modelos utilizados en la mecánica de los suelos no saturados para predecir el comportamiento del suelo, debido a que ésta describe la variación de la succión ocasionada por los cambios en el contenido de agua.

Así mismo, Johari *et al.* (2006) señalan que existen varias formas para determinar la curva característica del suelo, algunos son procedimientos directos y otros son indirectos. Dentro de los procedimientos directos, para determinar la curva característica, se podrán citar dos de ellos, el primero es el procedimiento mediante el cilindro extractor de membrana y el segundo es el método de perfil instantáneo. En lo que respecta a los procedimientos indirectos se encuentra la técnica de papel filtro, (ver figura 2.1.) Así pues, la obtención de la curva característica mediante experimentación resulta costosa y requiere de largos periodos de tiempo.

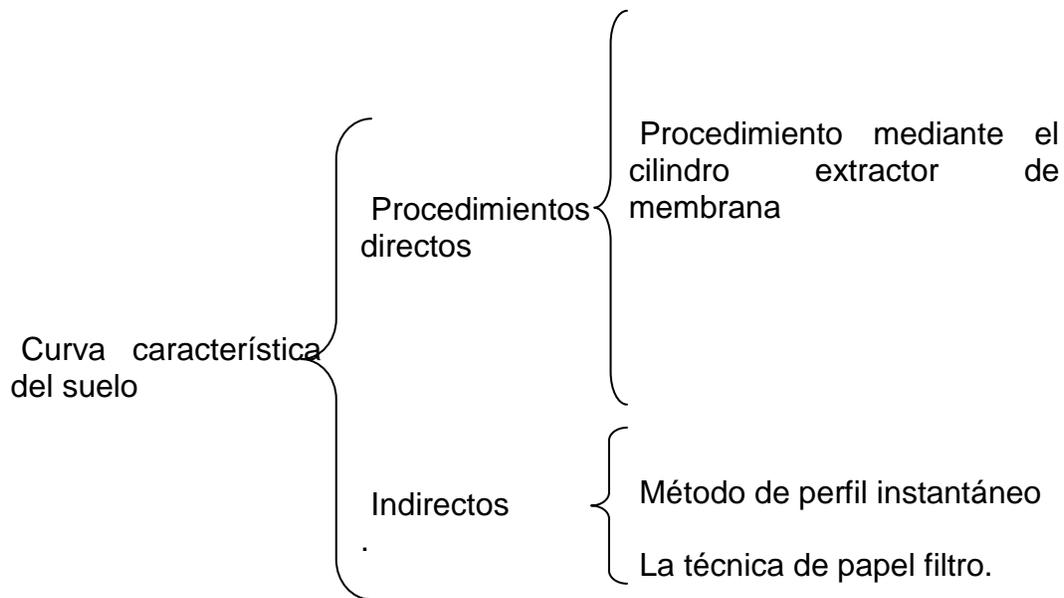


Figura 2.1 Procedimientos existentes para determinar la curva característica

Además, el mismo Johari *et al.* (2006) mencionan que los procedimientos que existen para determinar la curva característica se pueden clasificar de la siguiente manera:

Grupo 1: Se caracteriza porque su contenido de agua para los diferentes valores de succión está correlacionada con las propiedades específicas del suelo como el D_{10} , es decir, el diámetro correspondiente al 10 % que pasa, y la porosidad. Este proceso generalmente requiere de un análisis de regresión seguido por un ajuste de curva (Hutson and Cass 1987; Aubertine *et al.*,1998).

Grupo 2: Aquí se incluyen los métodos que correlacionan parámetros de ecuaciones analíticas con propiedades básicas como la distribución de tamaño de

partícula y la densidad seca, usando un análisis de regresión lineal. Las contribuciones importantes en este grupo son los trabajos de Cresswell and Paydar (1996) and Tomasella and Hodnett (1998).

Grupo 3: En este se incluyen los procedimientos que se basan en la modelación físico empírica de la curva característica. Esta aproximación convierte la distribución de tamaño de partícula en una distribución de tamaño de poro, la cual está relacionada con la distribución del contenido de agua y asociada a presión de poro. Las aportaciones más importantes son los trabajos de Fredlund *et al.* (1997) and Zapata *et al.* (2003).

Grupo 4: En este apartado se incluyen los métodos de inteligencia artificial como redes neuronales, programas genéticos y otros métodos de aprendizaje de máquina.

Con base a los procedimientos existentes para determinar la curva característica y las diferentes clasificaciones de los métodos para este mismo propósito, es importante no perder de vista lo que Rojas (2006) menciona, que el poder conocer la manera en la que el agua se encuentra distribuida dentro del suelo, permitirá a los ingenieros resolver un sin número de problemas geotécnicos. Dado que la dinámica del agua dentro de un suelo no saturado está muy relacionada con las fuerzas de atracción molecular, responsables del agua adherida a la superficie de los sólidos (como ejemplo el agua higroscópica y agua adsorbida a las partículas del suelo) y a la tensión superficial de la interface con el aire, causante de la retención capilar; Bear, (1972): Marshall *et al.*, (1996).

En atención a los procedimientos señalados por Johari *et al.* (2006) se describe uno de los métodos directos y un procedimiento indirecto para determinar la curva de retención en esta investigación.

2.2 Cilindro extractor

La idea de un cilindro extractor de membrana de presión tiene sus orígenes desde el año de 1939 en los Estados Unidos de Norte América, en el laboratorio de Salinidad en Riverside, California.

El “Extractor de Membrana de Presión” fue originalmente diseñado para remover el agua del suelo durante la realización de análisis químicos, lo anterior demostró que es una herramienta poderosa, para estudiar la relación fundamental de la cantidad de agua del suelo y la fuerza que se desarrolla en él. Por ello el extractor de membrana de presión hace posible caracterizar al suelo por su humedad retenida.

Para este propósito se diseñó una cámara de presión especial que cuenta con una membrana de celulosa porosa fina, material que permite el flujo de agua a través de sus poros, pero no el flujo del aire, por lo que requiere niveles de presión constantes dentro de la cámara.

Este dispositivo permite remover con facilidad la humedad de las muestras de suelo bajo condiciones controladas para cualquier humedad de los poros, en el rango de saturado a seco.

Los detalles acerca de cómo desarrollar el ensaye de la curva característica mediante el cilindro extractor de membrana se detallan en el Anexo B.

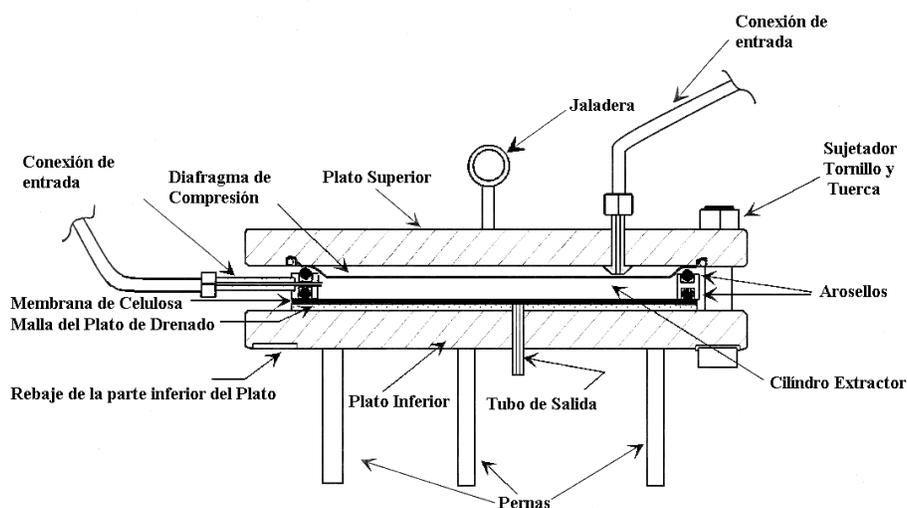


Figura 2.2 Cilindro extractor de membrana

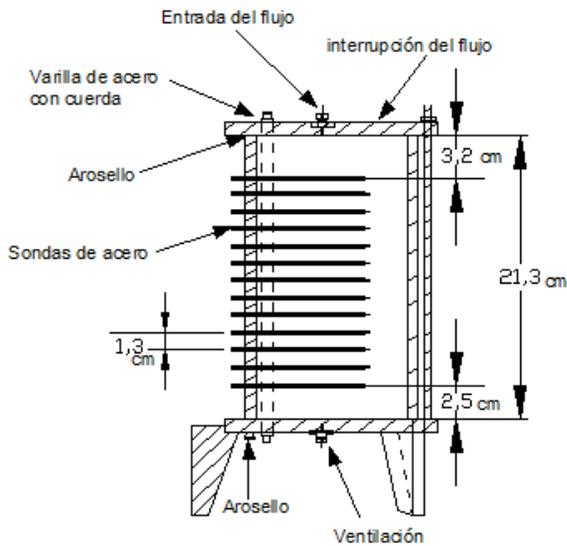
2.3 Permeámetro de Perfil Instantáneo

En la determinación la curva característica es posible utilizar el permeámetro de perfil instantáneo para determinar el contenido de agua presente en el suelo y la magnitud de la succión en forma simultánea, y así determinar la curva característica en secado y en humedecimiento.

El método del Perfil Instantáneo es un método de estado variable que puede ser utilizado tanto en el laboratorio como in situ, para este propósito se requiere de un espécimen de suelo cilíndrico el cual es sometido a un flujo de agua constante en uno de sus extremos, para modificar la magnitud de su succión (figura 2.3). Con el fin de conocer el grado de saturación del suelo se mide el agua que se introdujo y el tiempo necesario para aplicarla, en forma simultánea se determina la magnitud de la succión que el suelo registra en cada uno de los puertos de lectura, mediante el uso de los psicrómetros de termopar.

Con el gasto de agua adicionado al suelo y las relaciones volumétricas de este, se determina el grado de saturación del suelo, en el intervalo de tiempo correspondiente, y la magnitud de la succión que se obtiene con los psicrómetros. Una vez determinados ambos parámetros se construye la curva característica del suelo en la trayectoria correspondiente. Además, el método de ensaye puede presentar diversas variantes. Las principales variantes son el suministro de flujo, la medición de la succión y la velocidad de flujo, que pueden o no medirse a la vez. Con este dispositivo es posible obtener la medición de la succión y la velocidad de flujo en varios puntos situados a lo largo del espécimen utilizando diversos procedimientos, Klute, (1972).

VISTA LATERAL



VISTA EN PLANTA

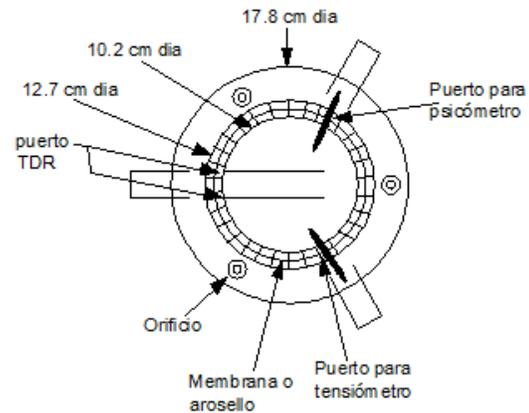


Figura 2.3 Permeámetro utilizado por Meerdink et al. (1996) para el ensaye de Perfil Instantáneo

El método más reciente es el que emplea la medición simultánea del perfil del contenido de agua y la succión, Meerdink *et al.*, (1966); Malichi *et al.*, (1992). El ensaye normalmente se realiza en un permeámetro de pared rígida orientado vertical u horizontalmente. Un esquema del permeámetro utilizado por Meerdink y otros autores (1996) se muestra en las figuras 2.3 y 2.4.

Durante el desarrollo del ensaye se determina el contenido volumétrico de agua (grado de saturación) y la succión mátrica (o total) que se indujo en el suelo, en dos o más puntos a lo largo del espécimen. La succión es posible medirla con tensiómetros si la succión es menor a 90 kPa o con psicrómetros de termopar si la succión varía de 100 a 8000 kPa. Las mediciones se efectúan en varios puntos, sin embargo, se pueden obtener resultados favorables si sólo son utilizados uno o dos puntos de medición, para poder hacer comparaciones véase la figura 2.5.



Figura 2.4 Permeámetro de perfil instantáneo



Figura 2.5 Permeámetro de perfil instantáneo

En la figura 2.6 se presenta el dispositivo utilizado para suministrar el agua, el cual proporciona el agua a un gasto constante (determinado previamente).

Cuando el ensaye se desarrolla por extracción, el volumen de agua que se encuentra dentro del espécimen se remueve mediante la aplicación de un proceso de drenaje por gravedad, aplicando succión o mediante evaporación. Es adecuado aplicar el drenaje por gravedad o succión en los suelos cuarzosos muy permeables y cuando este tipo de suelo está cercano al contenido de agua residual. Por el contrario no se recomienda el drenaje gravitacional para suelos con gran contenido de partículas finas, debido a que cuando el suelo presenta una succión igual a la del valor de entrada del aire, no se presentará flujo. En suelos arcillosos la evaporación es el único método de extracción práctico para obtener la curva característica cuando el suelo presenta contenidos de agua inferiores al de saturación.

A diferencia del ensaye anterior, el ensaye por absorción se desarrolla induciendo agua en uno de los extremos del espécimen a una velocidad muy baja que como resultado provoca una variación muy suave en el contenido de agua del suelo. Durante el ensaye, el agua puede ser suministrada utilizando un sistema de goteo, aunque resulta más conveniente aplicarla utilizando una bomba de flujo como la que se muestra en la figura 2.6. Daniel (1982), Abu-Hejlich *et al.* (1993), Meerdink *et al.* (1996), Hudson *et al.* (1996), y Hamilton *et al.* (1981), señalan que inducir el agua con una velocidad constante permite obtener resultados óptimos.



Figura 2.6 Dispositivo para suministrar el agua al permeámetro de perfil instantáneo

Cuando se desarrolla el ensaye de la curva característica por absorción o secado, se determina el contenido volumétrico de agua (o grado de saturación) y la succión en forma independiente. Cuando el flujo de agua se presenta en posición horizontal los efectos del gradiente de la carga gravitacional son despreciables. Además la succión de la muestra y la velocidad de flujo varían con el tiempo, durante el ensaye. Para realizar la lectura de la succión del suelo se tiene que utilizar tensiómetros o psicrómetros. El gradiente de la succión se obtiene con las mediciones de la succión realizadas por el sistema de lecturas en cada intervalo de tiempo, tal como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.7 Pantalla del programa que realiza las mediciones de la succión al suelo, mediante los Psicrómetros de termopar

El otro procedimiento para obtener la curva característica, es por extracción, consiste en provocar la evaporación del agua del suelo por medio de calor, buscando que el agua salga del espécimen. El espécimen está expuesto a la atmósfera en el extremo opuesto al frente de calentamiento. Una vez que el flujo empieza, la succión del suelo aumenta en forma marcada hasta el final del proceso de evaporación de acuerdo con Wind, (1968). Si la velocidad de evaporación se reduce para retardar la terminación del ensaye los gradientes de succión que experimenta el suelo serán menores. De forma contraria el proceso también se puede acelerar mediante el paso del aire a través de la superficie utilizando un ventilador (Arya *et al.*,1975), pero este procedimiento no es recomendable, debido a que las condiciones no son isotérmicas e inducen también flujo de agua, Van Grinser *et al.*, (1985).

Los cambios en el contenido volumétrico de agua están relacionados con los cambios en la succión y también con la trayectoria de secado o humedecimiento, como se puede apreciar en la curva característica de la figura 2.8.

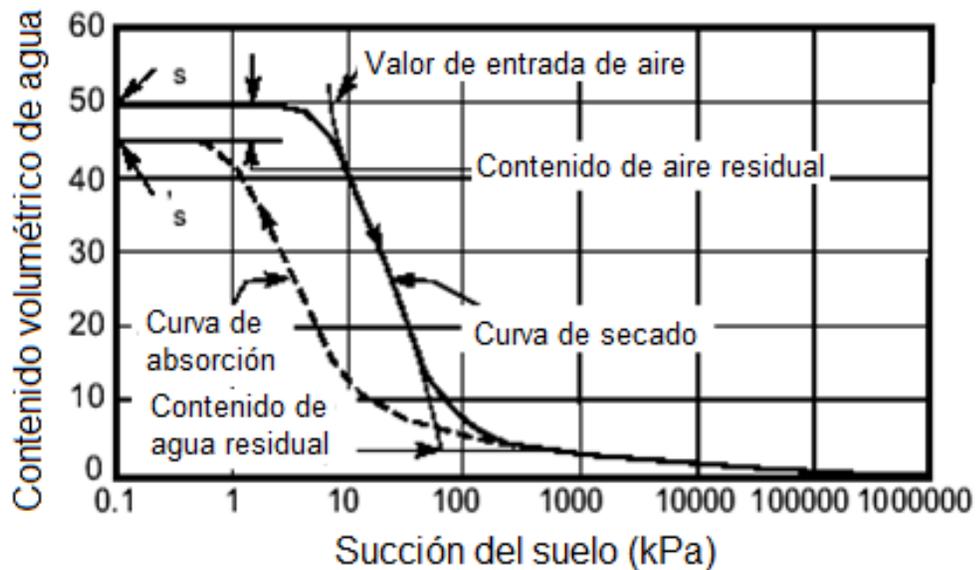


Figura 2.8 Curva característica del suelo (Fredlund and Xing 1994)

Con la finalidad de obtener la curva de retención en trayectoria de humedecimiento se utilizó el procedimiento del perfil instantáneo por absorción, que presenta su aplicación en un intervalo de tiempo específico.

A continuación se describe un ensaye de la curva característica utilizando el proceso de humedecimiento (absorción), para este propósito el espécimen de suelo a ensayar se introduce en el permeámetro, en cada extremo del suelo se le coloca un disco de papel filtro, después se colocan las tapas y se instalan las agujas hipodérmicas en ambas tapas. En una de estas agujas se instala la manguera que suministrará el agua, mientras que la otra aguja mantiene al espécimen de suelo a la presión atmosférica. La finalidad de los discos de papel filtro es provocar que el frente de humedecimiento del suelo abarque la totalidad del diámetro del espécimen. Una vez instalada la muestra se inicia el proceso de humedecimiento a un gasto constante durante el tiempo de desarrollo del ensaye y se inicia en forma simultánea la determinación de las lecturas de succión con las cuales se conocerá la magnitud de la succión que el suelo presenta en ese preciso instante.

Cabe aclarar que el permeámetro cuenta con varios puertos de lectura ubicados a lo largo de las paredes del permeámetro que sirven para la instalación

de los psicrómetros. Los tensiómetros o psicrómetros se introducen en los puertos de lectura del permeámetro y a la vez en el suelo; podemos observar que la figura 2.9 ilustra cómo quedan instalados en los puertos de medición. El aparato que registra las lecturas debe ser colocado en una cámara de temperatura controlada con alta humedad relativa, en el momento que los psicrómetros están siendo utilizados.

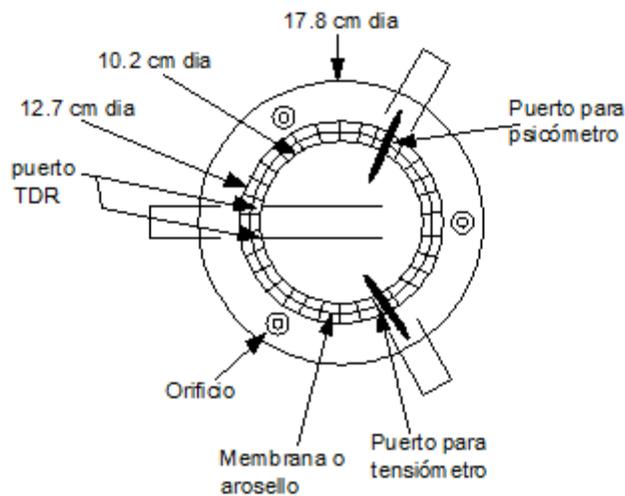


Figura 2.9 Detalle de la colocación de los psicrómetros en los puertos de lectura

Durante el ensaye por absorción (trayectoria de humedecimiento) el espécimen de suelo inicia en estado no saturado hasta alcanzar condiciones de saturación. Al iniciar el ensaye se recomienda determinar la succión varias veces hasta observar que no se presenten variaciones significativas en su valor, es decir hasta que se alcancen las condiciones de equilibrio.

Las condiciones de equilibrio inicial del espécimen son alteradas por una inyección de agua lenta, la velocidad del suministro del agua puede ser seleccionada de tal forma que la succión cambia lentamente a lo largo de la muestra.

En la tabla 2.0 se presenta una serie de lecturas que se obtienen en una determinación de la succión realizada al suelo. Las velocidades de flujo comúnmente satisfactorias están en el rango de 0.2 a 5 cm³/día, según Daniel

(1983). La succión puede ser medida a varios intervalos de tiempo por ejemplo a cada 24 hrs como se muestra en la tabla 2.0 y en la figura 2.10. Durante el desarrollo de un ensaye se debe prever que no se presente un exceso de humedad cercano a la saturación en cualquier parte del suelo y, además se debe considerar que los psicrómetros deben ser remplazados con tensiómetros cuando la succión del suelo sea menor de 0.09 Mpa.

Tabla 2.0 Lecturas obtenidas mediante los psicrómetros

	106	11	20.0	14.1	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	Ψ MPa	
1	109	21.6	-9.8	19.7	19.3	17.6	7.2	3.6	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	19.7	5.4	
2	111	21.6	-5.5	14.2	14.1	13.7	11.2	3.0	0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	14.2	3.9
3	114	21.5	-5.9	17.1	15.8	12.1	3.6	0.4	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4	-1.5	17.1	4.7
5	118	21.5	-6.4		11.8	10.3	7.2	2.5	-0.2	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.5	-1.5	-1.6	-1.7	-1.7	-1.8	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9	-2.0	-2.0	-2.1	-2.1	11.8	3.3	
6	109	21.4	-8.8	17.4	15.6	10.4	4.0	1.0	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7	-1.8	-1.8	-1.9	-1.9	-2.1	-2.2	-2.3	-2.4	-2.5	17.4	4.8
7	111	21.4	-8.3	13.4	12.1	10.5	8.2	5.3	2.6	0.9	0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	-1.6	-1.7	-1.8	-1.9	-2.0	-2.1	-2.2	-2.2	13.4	3.7	
4	114	21.4	-6.2	19.7	6.8	0.4	-0.1	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	-1.6	-1.7	19.7	5.5

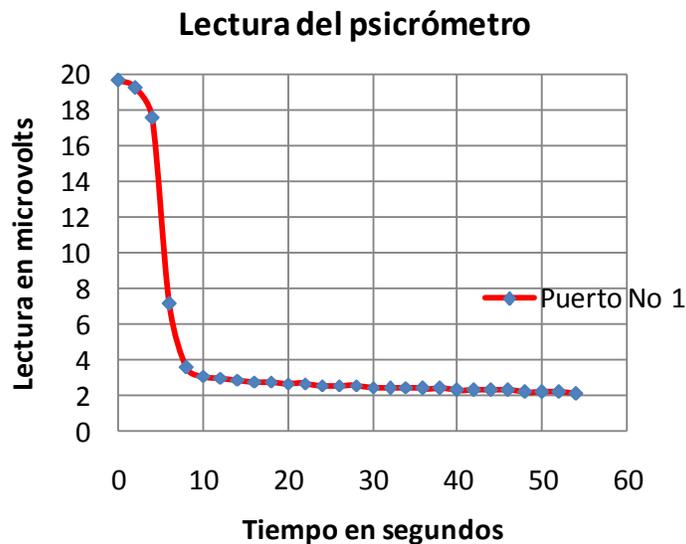


Figura 2.10 Lectura de los psicrómetros

Con la información de la tabla 2.0 fue posible conocer que en el puerto No. 1, la temperatura a la cual se desarrolló la medición fue de 21.6°C y la lectura máxima del voltaje registrado por el psicrómetro fue de 19.70 micro volts. Apoyándonos en la ecuación 2.1 se determinó que la succión del suelo para este grado de saturación fue de 5.42 MPa, respectivamente. Es importante mencionar que para cada lectura efectuada con los psicrómetros se debe conocer su grado de saturación, y para saber el grado de saturación es necesario que antes de

iniciar el ensaye se conozca el peso específico de la muestra, su contenido de agua y la densidad de los sólidos.

$$\psi \text{ (Mpa)} = \frac{\text{Lec.Max.}}{4} \cdot \frac{0.325 + 0.027 * t}{1}$$

Ec. 2.1

Donde

Lec. Max = Lectura máxima en micro volts

T = Temperatura en grados centigrados

ψ = Succión total en MPa.



Figura 2.11 Placa hermética que sella los extremos del permeámetro

La lectura que se presenta en la tabla 2.0 corresponde a un grado de saturación específico, sin embargo hay que desarrollar una serie de lecturas durante todo el proceso de humedecimiento, al determinar en forma simultánea su correspondiente grado de saturación. El ensaye termina en un lapso de dos a tres semanas, cuando la presión del agua de poro a la entrada del permeámetro (punto de suministro de agua) empieza a ser positiva. La presión del agua de poro positiva significa la presencia de agua por las paredes del permeámetro o alrededor de los psicrómetros. Al finalizar el ensaye, el espécimen de suelo se divide en varias secciones para medir el grado de saturación final. El grado de

saturación obtenido a lo largo del espécimen es graficado contra su correspondiente succión para cada una de las determinaciones, y el resultado es una curva característica como la de la figura 2.8.

2.4 Uso de la técnica del papel filtro para determinar la curva característica

Dentro de los procedimientos existentes para determinar la curva característica existen dos opciones, los procedimientos directos que se mencionaron con anterioridad y los procedimientos indirectos, la técnica del papel filtro corresponde a esta última clasificación.

2.4.1 Propósito de la técnica del papel filtro

Para determinar la curva característica mediante la técnica del papel filtro se explicará detalladamente en qué consiste el proceso.

Antes que nada es necesario aclarar que en esta técnica el papel filtro trabaja como un sensor pasivo para evaluar el potencial de succión mátrica y total, el potencial es una medida de la energía libre del agua de poro o esfuerzo de tensión, desarrollado en el agua de acuerdo a la designación ASTM D 5298 - 03.

Aquí el disco de papel filtro se instala dentro de un recipiente hermético que contiene a un espécimen de suelo por espacio de siete días, dando el tiempo suficiente para que la presión del vapor del agua de poro del espécimen, la presión del vapor de agua en el papel filtro y la presión del vapor de agua en el interior del recipiente alcancen el equilibrio. En esas condiciones se determina el contenido de agua del papel filtro húmedo, posteriormente se hace uso de la curva de calibración y se determina la magnitud de la succión del espécimen. La curva de calibración relaciona el contenido de agua del papel filtro con la succión aplicada a la solución salina.

2.4.2 Importancia y uso

La succión es la medida de la energía del agua de poro del suelo, en términos prácticos, es la medida de afinidad del suelo para retener agua. Su

determinación provee información acerca los cambios de volumen, la deformación y los esfuerzos característicos del suelo, (ASTM D 5298 – 03). Además, la succión del suelo se encuentra relacionada con el contenido de agua, a través de la curva característica (ver el método de ensaye ASTM D 2325 o el D 2216). La técnica de papel filtro es recomendable para esta determinación de forma simple y económica para rangos de succión de entre 10 y 1000000 kPa.

El papel filtro recomendable para obtener la succión del suelo puede ser el Whatman No 42, el Fisherbrand 9-790^a, el Schleicher and Schuell No 589, o el Robinson Blanco. El diámetro aconsejable es de 5.50 cm (2.2 in). Cuando se prevé que el papel filtro estará sometido a un ambiente húmedo por un periodo de tiempo superior a 14 días se sugiere proporcionarle un tratamiento rápido en formaldehído en una concentración al 2 %, previo a su uso, para evitar el crecimiento de organismos o la descomposición biológica, para ello se deben extremar precauciones en el manejo del formaldehído.

Los recipientes recomendables para guardar a los especímenes deben ser de 120 a 240 ml (4 a 8 onzas) de capacidad, de vidrio o de metal (libres de óxidos), los recipientes se deben tratar para evitar la oxidación. Para mantener el espécimen y el papel filtro dentro de los recipientes también deben ser protegidos con cinta de aislar. Además, se requieren contenedores metálicos alternativos para ser utilizados durante la determinación del contenido de agua del papel filtro, su volumen debe ser de 70 ml (2 onzas) de capacidad, con tapa y estar rotulados con un número. Para transportarlos se debe utilizar guantes de asbesto limpios, y debe evitarse el contacto con cualquier material grasoso que provoque errores en las mediciones.

Otros accesorios complementarios son los contenedores de aislamiento que son cajas de aproximadamente 0.03 m³ (1 ft³) de capacidad con poliestireno aislante o cualquier otro material capaz de mantener una temperatura con variación de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, cuando la temperatura externa cambia en $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Además se utiliza la balanza granataria con una capacidad máxima de 20 gr y una precisión de 0.0001 gr. y un desecador o recipiente de tamaño adecuado que contenga gel de sílice.

La succión puede ser determinada a los distintos suelos y en los diferentes entornos medioambientales, por ejemplo para evaluar los procesos hidrológicos, el potencial que presenta la contracción, los esfuerzos de corte, el esfuerzo en sitio y la conductividad hidráulica de suelos no saturados.

2.4.3 Calibración del papel filtro

La curva de calibración del papel filtro debe hacerse para cada marca y lote del papel filtro que se utilice, es decir, si se utiliza el papel Whatman No 42 y de un determinado lote, se debe hacer una curva de calibración, al terminarse este lote y empezar uno nuevo se debe de determinar nuevamente su curva de calibración. La obtención de la curva de calibración del papel filtro se realiza tomando en cuenta las siguientes recomendaciones.

Los discos de papel filtro se deben instalar en un recipiente hermético que contenga una solución salina (Cloruro de Potasio o de Sodio), de molaridad conocida. Los discos de papel filtro se deben suspender en por lo menos 50 cm³ de solución de sal, en el contenedor hermético, apoyados sobre algún material inerte como puede ser un tubo de plástico o mallas de acero inoxidable.

El cálculo de la succión de la solución que propiciará la humedad relativa - que será atrapada por el papel filtro dentro del contenedor, se realiza mediante la ecuación No 3.2.

$$\psi = \frac{RT}{v} \log R_h \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde

ψ = Succión en kPa

R = Constante de los gases ideales, 8.31432 Joules/mole·Kelvin

T = Temperatura absoluta, en grados Kelvin (K)

V = Volumen de 1000 moles de agua líquida, 0.018 m³

R_h = Humedad relativa

Sin embargo la ASTM D 337 proporciona algunos valores de concentraciones salinas para obtener diferentes magnitudes de succión tal y como se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Concentración de soluciones de sal, para evaluar la succión del suelo

Succión en kPa	Succión en Log kPa	Succión en pF	Succión en atm	Succión en Rh	20 °C	
					Gr NaCl	KCl
					1000 ml	1000 ml
					Agua	Agua
-98	1.99	3.00	-0.97	0.99927	1.30	1.70
-320	2.49	3.50	-3.02	0.99774	3.80	5.30
-980	2.99	4.00	-9.68	0.99278	13.10	17.00
-3099	2.49	4.50	-30.19	0.97764	39.00	52.70
-9800	3.99	5.00	-96.77	0.93008	122.50	165.00

Las curvas de calibración típicas para papeles filtro como Whatman No 42 y Schleicher and Schuell No 589, constan de dos partes: 1) El segmento superior representa la humedad retenida que rodea a la superficie de las partículas. 2) El segmento inferior representa la humedad retenida por las fuerzas capilares o de tensión superficial entre las partículas (figura 2.12).

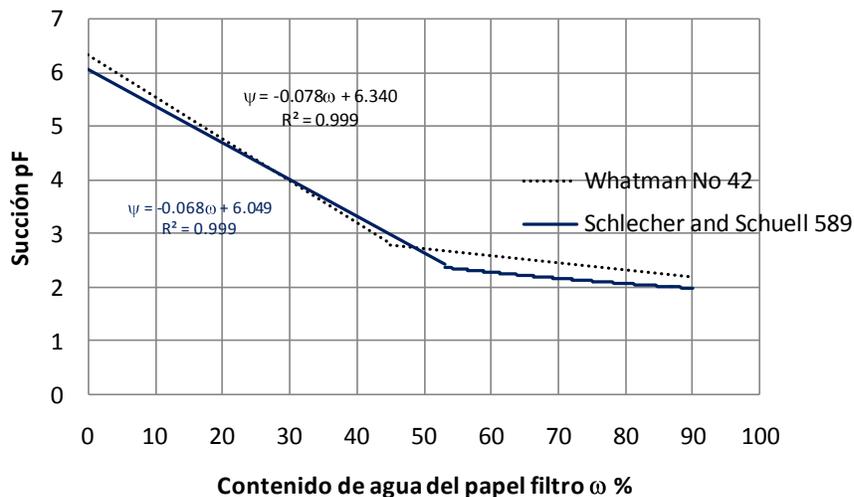


Figura 2.12 Curva de calibración del papel filtro

La curva de la figura 2.12 es útil para obtener la succión mátrica y total. Las variaciones que se presentan cuando la succión supera los 100 kPa son

menores al 2 %. Los suelos alterados presentan poco efecto para succiones superiores a los 20 kPa.

2.4.4 Procedimiento para determinar la succión con el papel filtro

Para determinar la magnitud de la succión del suelo mediante el papel filtro se sigue el siguiente procedimiento:

Preparación del papel filtro.- Los discos de papel filtro seleccionados se deben someter a un proceso de secado, en un horno, por lo menos 16 hrs previas al ensaye. Posteriormente se deben almacenar los discos de papel filtro dentro de un desecador que contenga un material desecante (gel de sílice) hasta que sean utilizados los discos.

Determinación de la succión.- La succión total será medida cuando el disco de papel filtro no se encuentre en contacto con el espécimen de suelo, la transferencia de humedad estará limitada a la transferencia de vapor que se encuentra dentro del contenedor del espécimen, (véase la figura 2.13). Por otro lado la succión mátrica será medida cuando el papel filtro se encuentre en contacto directo con el suelo, (figura 2.14). Al estar en contacto directo el papel filtro y el suelo permitirán la transferencia del fluido, pero además también se transferirán las sales que pueden estar disueltas en el agua de poro.

Colocación del suelo y el papel filtro.- En primer lugar se coloca un suelo o un fragmento de una muestra de 200 a 400 gr en el recipiente hermético. El espécimen de suelo deberá casi llenar el recipiente hermético para reducir el tiempo de equilibrio y minimizar los cambios de succión en el espécimen.

Medición de la succión total.- Posteriormente se remueven los discos de papel filtro del contenedor e inmediatamente se colocan sobre el espécimen, separándolo del espécimen mediante una malla de alambre o un arosello u otro dispositivo inerte de mínima superficie de contacto entre el papel filtro y el suelo, (figura 2.13). Los discos de papel filtro deberán presentar un doble hacia arriba, para poder ser removidos del contenedor, mediante las pinzas.



Figura 2.13 Detalle de colocación de los discos de papel filtro para obtener la succión total

Medición de la succión mátrica.- Se recomienda colocar una pila de tres discos de papel filtro en contacto con el suelo, como se muestra en la figura 2.14. El disco más externo previene de la contaminación al disco del centro, usado para el análisis de la succión mátrica. El disco de papel filtro externo deberá ser de un diámetro ligeramente mayor al disco de papel filtro del centro, siempre procurando que este disco tenga un diámetro 3 o 4 mm menor que el disco de papel filtro externo, para prevenir que quede en contacto directo con el suelo.



Figura 2.14 Detalle de colocación de los discos de papel filtro para obtener la succión mátrica

Equilibrio de la succión.- Colocar la tapa del recipiente hermético y sellar con una capa de cinta de aislar, en esas condiciones se debe colocar el recipiente hermético dentro del contenedor aislado y en un sitio en el cual las variaciones de temperatura sean inferiores a $\pm 3^{\circ}\text{C}$. La temperatura típica nominal es de 20°C . Bajo las condiciones anteriores la succión del papel filtro y el espécimen dentro del recipiente hermético deberá alcanzar el equilibrio en un tiempo mínimo de siete días. Algunas recomendaciones dadas para este propósito por la ASTM son las siguientes:

1.- Cuando el papel filtro requiera ser colocado en campo, deberá ser secado al horno durante la noche, posteriormente debe ser almacenado en un contenedor con material desecante para reducir la posibilidad de que el papel filtro atrape humedad. La humedad presente en el papel filtro antes del ensaye provoca que las fibras se expandan y alteren los espacios vacíos, esto puede causar modificaciones en la curva de calibración del papel filtro. Para evitar lo anterior se debe mantener el recipiente hermético aislado, tapándolo en el campo durante los días calientes del verano y colocándolo en un área caliente durante los fríos días de invierno. También se debe colocar el contenedor con los recipientes herméticos sellados en un cuarto con temperatura controlada de 20°C al regreso del campo.

2.- El equilibrio de la succión entre el suelo, los discos de papel filtro y el aire, dentro del recipiente hermético se espera que se logre durante un periodo mínimo. Por otro lado, se puede reconocer que el proceso de equilibrio depende de la succión inicial del suelo, de la humedad relativa inicial en el aire, de la masa del suelo y del espacio libre del contenedor. El periodo de siete días es suficiente para condiciones normales en mecánica de suelos; sin embargo, bajo muchas otras condiciones el equilibrio podrá ser completado en menor tiempo. Así, se podrá evitar la condensación durante la medición de la succión, por lo que en esas condiciones es necesario contar con un termostato de control.

El control de la temperatura de las muestras durante el equilibrio asegurará que los efectos de la condensación se minimicen. Si se almacenan los contenedores que contienen los recipientes herméticos, las muestras de suelo y

los discos de papel filtro en una caja térmica (por ejemplo caja de unisel) hecha de poliestireno aislante recubierta con vermiculita aislante o algún material alrededor del contenedor ayudará a minimizar las fluctuaciones térmicas. En esas condiciones es posible limitar las fluctuaciones a 0.01°C de forma semejante a un sistema aislado.

Determinación de la masa de los contenedores de papel filtro.- Al final del periodo de equilibrio, se debe determinar la masa del contenedor metálico frío con una aproximación de 0.0001 gr, designándose como T_c (tara fría), antes de retirar el recipiente hermético del contenedor de aislamiento donde se encuentra el espécimen. Posteriormente se debe colocar cada uno de los dos discos de papel filtro dentro de un contenedor metálico auxiliar para determinar su masa individual M_1 (tara fría + disco de papel filtro húmedo), si se desea determinar la succión total, o en su caso únicamente el disco central de una pila de tres discos de papel filtro cuando se pretenda determinar la succión mátrica.

Traslado de los discos de papel filtro.- Se traslada cada disco de papel filtro utilizando un par de pinzas, desde el recipiente hermético al contenedor metálico auxiliar o bolsa de plástico para determinar la masa (M_1). Este proceso deberá completarse en un tiempo de 3 a 5 segundos. La clave para una medición exitosa del contenido de agua del papel filtro es minimizar la pérdida de agua del papel filtro durante su traslado desde el recipiente hermético a la balanza, para determinar su masa (antes del secado al horno). Se ha observado que cuando el papel filtro se expone al ambiente del cuarto de temperatura constante con humedad relativa entre el 30 y el 50 %, durante un periodo de 5 a 10 segundos, este presenta una pérdida de masa del 5 % o más.

Contenedor metálico auxiliar.- Colocar la tapa removible sobre el contenedor metálico auxiliar (sin cerrar), previo al momento en el que se instala éste en el horno de secado. Se debe tener cuidado de sellar el contenedor hermético después de trasladar el papel filtro de los recipientes herméticos al contenedor metálico auxiliar, para asegurar que el aire del ambiente no altere las

condiciones de humedad del espécimen de suelo o del papel filtro que aún se encuentren en él. Repetir esta recomendación para el segundo papel filtro utilizando un segundo contenedor metálico auxiliar previamente determinada la masa, en el caso que se desee determinar la succión mátrica y total en forma simultánea.

Bolsas de plástico auxiliar.- De forma semejante a lo antes comentado, cuando se requiera utilizar bolsas de plástico auxiliares se recomienda trasladar rápidamente los discos de papel filtro a la bolsa de plástico auxiliar de masa inicial ya conocida, para después sellarla inmediatamente. Repetir este procedimiento en cada uno de los discos de papeles filtro que se requiera manejar. Inmediatamente después de colocar cada uno de los discos de papel filtro en su correspondiente contenedor se les determina su masa M_1 , previo al secado, con una aproximación de 0.0001 g.

Contenedor metálico auxiliar.- Colocar el contenedor metálico con el disco de papel filtro en un horno a 110°C con la tapa sin cerrar, para permitir que escape la humedad. El contenedor deberá permanecer en el horno por lo menos 2 hrs., como mínimo, posteriormente se cierra la tapa de cada contenedor y se mantiene en el horno por espacio de 15 minutos más para permitir el equilibrio de la temperatura. A continuación se remueve el contenedor metálico auxiliar del horno de secado, con el papel filtro dentro, y entonces se determina la masa seca total M_2 con una aproximación de 0.0001 gr. Inmediatamente después de retirar el papel filtro se determina la masa del contenedor caliente que contuvo el papel filtro T_h con una aproximación de 0.0001 gr. Repetir este procedimiento para cada uno de los contenedores adicionales. En lo que respecta a la temperatura de equilibrio la ASTM se hace la siguiente recomendación:

Si los contenedores que almacenan los discos de papel filtro son metálicos, deberán ser colocados sobre un bloque de metal por aproximadamente 30 segundos hasta que se enfríen. El bloque de metal actúa como disipador de calor y éste atenuará las variaciones de la temperatura durante la determinación de la masa.

Bolsa de plástico auxiliar.- Se utiliza como una alternativa para colocar los discos de papel filtro cuando se van a introducir en el horno de secado.

Cuando todo el proceso experimental ha quedado concluido se determina el contenido de agua del papel filtro como a continuación se desarrollará.

Una vez que las masas M_2 y T_h han sido determinadas, se debe desechar el papel filtro. Bajo ningunas circunstancias se deberá volver a utilizar el papel filtro ya seco para rehusarse nuevamente en el desarrollo de otro ensaye de evaluación de la succión del suelo, debido a que acarrearía errores.

Cálculos para cada papel filtro:

$$M_f = M_2 - T_h \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde

M_f = Masa del papel filtro seco, en gr

M_2 = Masa seca total, en gr

T_h = Masa del contenedor caliente, en gr

M_w = Masa del agua en el papel filtro, en gr

T_c = Masa del contenedor frío, en gr

M_1 = Masa del papel filtro húmedo, en gr

El contenido de agua del papel filtro se determina mediante la ecuación 2.5.

$$w_f = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde

w_f .- Contenido de agua del papel filtro

M_w .- Masa del agua

M_f .- Masa del papel filtro

Para convertir el contenido de agua del papel filtro a succión se utiliza la ecuación 2.6.

$$\psi = mw_f + b \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde

ψ .- Succión

m .- Pendiente de la curva

b .- Constante de la curva

Una curva de calibración del papel filtro, como la presentada por la ecuación 2.6, es única para cada tipo de papel filtro y consta de una línea con una pendiente muy inclinada y la otra con pendiente plana (figura 2.12). La succión determinada a partir de la curva de calibración deberá ser tomada como el promedio de las succiones evaluadas del contenido de agua si se utilizan dos papeles filtros para determinar la succión. Los resultados deberán ser descartados si la diferencia entre los dos papeles filtros excede 0.5 kPa.

La tabla 2.2 es un ejemplo de la hoja de datos para evaluar la succión del suelo usando papel filtro. El reporte del contenido de agua correspondiente a la succión total del suelo debe de contener la temperatura de medición y el tiempo de

equilibrio de la humedad del disco de papel filtro. Así mismo, se debe mencionar el método de calibración del papel filtro y la densidad del suelo.

Además, se debe incluir el reporte de la salinidad del agua de poro y se evaluará la succión osmótica para determinar la succión mátrica.

$$\psi_m = \psi - \psi_s$$

Ec 2.7

Donde

ψ_m - Succión mátrica

ψ - Succión total

ψ_s - Succión osmótica

Tabla 2.2 Hoja de datos para evaluar la succión del suelo

EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN UTILIZANDO PAPEL FILTRO									
Pozo No	_____				Fecha de ensaye:	_____			
Fecha de muestreo:	_____				Ensayado por:	_____			
Muestra No:	_____								
Profundidad	_____								
Hoja de humedad No	_____								
Círculo de papel filtro	Superior	Superior	Superior	Superior	Superior	Superior	Superior	Superior	
Círculo de papel filtro	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	
Masa de la tara fría	T_c								
Masa del papel filtro humedo + Masa de la tara fría	M_1								
Masa del papel filtro seco + Masa de la tara caliente, gr	M_2								
Masa de la tara caliente, gr	T_h								
Masa del papel filtro seco, gr ($M_2 - T_h$)	M_f								
Masa del agua en el papel filtro, gr ($M_1 - M_2 - T_c + T_h$)	M_w								
Contenido de agua del papel filtro en %	W_f								
Succión del suelo pF	ψ								
Grado de saturación	% G_w								

Determinación del grado de saturación del suelo.- En la determinación del grado de saturación del suelo que alcanzó el equilibrio con los discos de papel

filtro es necesario conocer el peso volumétrico del suelo, el contenido de agua del suelo y el peso específico relativo de los sólidos.

Una vez determinado la succión del suelo y el grado de saturación, se elabora en una tabla semejante a la mostrada en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Concentrado de los resultados del ensaye de la curva de retención

Trayectoria de secado		Trayectoria de humedecimiento	
ψ kPa	G_w %	ψ kPa	G_w %

2.5 Modelos para determinar la curva característica

La curva característica experimental reportada por diferentes autores y para diferentes suelos, muestra una histéresis permanente. Esto significa que no existe una relación única entre la presión capilar y el contenido de agua (o grado de saturación), ya que esto depende de la distribución del tamaño de poro y de la historia de humedecimiento y secado del suelo.

La distribución del agua dentro del suelo guarda una especial relación con su resistencia al corte, sus cambios de volumen, sus esfuerzos desarrollados y su distribución de tamaños de los poros Matyas and Rdhakrishna, (1968); Murray, (2002); Wheeler *et al.*, (2003); Li (2003). Ya se han propuesto un gran número de ecuaciones empíricas para simular la curva característica (Fredlund and Xing, 1994); sin embargo, ninguna de ellas ha satisfecho totalmente las necesidades de los ingenieros, la razón es que se han desarrollado para tipos de suelo específicos y para rangos de succión determinados. Lo anterior se debe a diferentes factores: la existencia de poros de diferente tamaño, sus interconexiones y el proceso de saturación y secado que presenta valores de succión diferentes (histéresis).

Así, la obtención de la curva característica del suelo es un proceso laborioso. De este modo, los resultados obtenidos de la curva característica mediante aproximaciones numéricas permitirán facilitar el análisis de diferentes problemas geotécnicos en ingeniería mediante sus funciones.

Las consideraciones en las que las ecuaciones se apoyan así como la forma de la curva característica del suelo dependen de lo siguiente (J. D. Nelson and D. J. Miller, 1991).

- De la distribución del tamaño de las partículas del suelo.
- De la distribución del tamaño de los poros del suelo.
- De la estructura del suelo.

Algunos modelos que se han presentado en la literatura para modelar la curva característica son los siguientes:

Gardner (1958) propuso una ecuación para la función de permeabilidad, ésta permite simular la curva característica, es un caso especial de la ecuación de van Genuchten (1980), y se puede observar la ecuación 2.8.

$$\theta = \frac{1}{1 + q\psi^n} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Brooks and Corey en (1964) propusieron una expresión para obtener el contenido de agua normalizada, la cual requiere conocer el valor de entrada de aire y el índice de distribución de tamaño de poro, de acuerdo con la ecuación 2.9.

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad \text{Ec. 2.9}$$

Van Genuchten en (1980) propuso una relación entre la succión y el contenido de agua normalizada, en la que se requieren tres parámetros de ajuste de suelo que son p , n y m . (Ec. 2.10).

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + \psi^n} \right]^m \quad \text{Ec. 2.10}$$

Así mismo, Williams *et al.* (1983) propusieron una relación lineal entre el logaritmo del contenido volumétrico de agua y el logaritmo de la succión, esta expresión se utilizó para describir la curva característica de muchos suelos de Australia, su expresión es la Ec. 2.11.

$$\ln \psi = a_1 + b_1 \ln \theta \quad \text{Ec. 2.11}$$

Mckee and Bumb (1984) sugirieron una relación exponencial entre el contenido volumétrico de agua normalizado y la succión. La expresión rinde resultados satisfactorios para valores de succión superiores al valor de entrada de aire del suelo. Sin embargo, no se recomienda utilizar en valores de saturación muy bajos o cercanos a la saturación del suelo, ver ecuación 2.12.

$$\theta = e^{-\frac{\psi - a_2}{b_2}} \quad \text{Ec. 2.12}$$

En años recientes McKee and Bumb (1987) and Bumbo (1987), propusieron una relación entre el contenido de agua normalizado y la succión, esta expresión no se recomienda en rangos de succión elevados, (Ec 2.13).

$$\theta = \frac{1}{1 + e^{\frac{\psi - a_3}{b_3}}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Fredlund and Xing (1994) plantearon un modelo general para la curva característica del suelo, el cual utiliza un programa de computo para determinar los parámetros de ajuste de dicho modelo. Aquí se considera que la forma de la

curva característica depende de la distribución del tamaño de poro, como se aprecia en la ecuación 2.14.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Los modelos anteriormente presentados dan buenos resultados en un cierto rango de succión pero generalmente presentan limitaciones al inicio y al final de la curva. Además ninguno de estos modelos puede simular el fenómeno de histéresis. Por otro lado Fredlund *et al.* (1997), mencionaron que la curva característica es única para cada tipo de suelo y es posible determinarla a partir de la distribución del tamaño de poro. Así mismo Simms and Yankful (2001) señalan que es posible determinar la distribución del tamaño de los poros apoyándose en la curva característica, por consiguiente. También Simms and Yanful (2000) mejoraron un método para estimar la curva característica del suelo en trayectoria de secado a partir de la distribución del tamaño de poro.

Es bien sabido que un suelo está constituido por los sólidos y los vacíos; para el propósito de esta investigación es necesario aclarar que dentro de los vacíos se encuentran los enlaces, poros y macroporos, las partículas de suelo son la fracción sólida. Además, se ha visto que tanto los sólidos como los poros de un suelo presentan aproximadamente una distribución logarítmica normal de acuerdo a Simms and Yankful (2005).

Otros modelos que pretenden reproducir la curva característica se han basado en la distribución del tamaño de poro, Fredlund and Xing, (1994). Es claro que la distribución del tamaño de las partículas DTS de un suelo pueden estar relacionada con su distribución de tamaño de poro DTP, sin embargo, esta no es la única relación debido a que la distribución del tamaño de los poros depende de la estructura de las partículas sólidas.

Más recientemente Simms and Yanful (2003) propusieron una red de poros capaz de simular la curva característica, los cambios de volumen y la distribución del tamaño de poros del suelo, basados en los datos de poro y la

distribución de tamaño de partícula. Sin embargo, estos modelos no pueden simular la histéresis, la cual es crucial para la construcción de un modelo constitutivo hidromecánico para suelos no saturados.

Es así que en esta investigación se busca desarrollar un modelo probabilista sólido-poroso que permita obtener la curva característica apoyándose en la información de la granulometría (sólidos) y la porosimetría del suelo (vacíos). El modelo está formado por poros y sólidos, los poros incluyen macro poros, sitios y enlaces. Este modelo permitirá definir la manera en la que el agua está presente en un medio poroso con determinadas características. También este modelo podrá ensamblarse en un modelo constitutivo para suelos no saturados y en la solución de problemas de geotecnia como lo es la estabilidad de taludes, esfuerzos de expansión, capacidad de carga, entre otros.

3 METODOLOGÍA EMPLEADA

En esta parte se plantean las técnicas usadas para el desarrollo de este trabajo, en el que se decidió utilizó el método científico inductivo deductivo. La siguiente sección se analiza en dos partes, la primera parte se refiere al comportamiento mecánico del suelo que incluye las Propiedades Índices, Peso Específico Relativo de los Sólidos, Ensaye Proctor Estándar, las Relaciones Fundamentales del Suelo, Ensayes de Consolidación y Ensayes Triaxiales.

La segunda parte comprende el ensaye de la Curva Característica y la determinación de la Distribución Porosimétrica.

3.1 Obtención de la muestra

Con el propósito de poder obtener suelos que permitan revisar el comportamiento de su resistencia al esfuerzo cortante, al variar la magnitud de la succión, se recuperaron distintas muestras de suelo del estado de San Luis Potosí y, aunque no todas fueron apropiadas para los requerimientos de esta investigación, en la búsqueda se identificaron dos materiales que sí cumplieron con los requisitos. Así, los suelos utilizados en esta investigación son de origen transportado y se obtuvieron en dos sitios diferentes; el primero de ellos se obtuvo en el lecho del río Verde a la altura de la comunidad “Cruz del Mezquite” en el municipio de Ciudad Fernández, S. L. P. El segundo suelo se extrajo de un banco de material de préstamo localizado en el km 5+000 de la carretera Uriangato-Yuriria, en el estado de Guanajuato. El muestreo fue aleatorio y se practicó en forma alterada, posteriormente las muestras se transportaron al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro, de acuerdo con el procedimiento ASTM D 4220-00.

Con los suelos anteriormente mencionados se elaboraron distintas mezclas y con cada una de ellas se fabricaron especímenes de suelo a los cuales se les practicó el ensaye de compresión simple (ASTM D 2166-00). La razón de este procedimiento fue la observación del comportamiento del esfuerzo desviador alcanzado por los especímenes de suelo ensayados cuando se varía su contenido de agua, desde el estado saturado hasta el estado seco, teniendo como antecedente el caso reportado por Cunningham *et al.* (2003) donde presentan los esfuerzos desviadores obtenidos mediante ensayes triaxiales a succión controlada.

Para desarrollar los ensayes de compresión simple fue necesario elaborar especímenes de suelo remoldeados con su contenido de agua óptimo y su peso específico seco máximo, además las probetas se fabricaron en 5 capas, cada una de las capas se compactó con presión estática (Figura 3.1), teniendo especial cuidado en desarrollar una unión adecuada entre cada una de ellas para que la probeta resultara homogénea. El molde con el que se fabricaron los especímenes fue un cilindro metálico con tuerca al fondo con 3.60 cm de diámetro y 12.00 cm de altura, además en la compactación se usó un vástago de 3.55 cm de diámetro por 12 cm de largo.

Una vez fabricado el lote total de probetas, se seleccionaron distintos contenidos de agua, desde saturado hasta seco, con la finalidad de poder revisar el comportamiento del suelo. Con los contenidos de agua ya seleccionados, a cada una de las probetas se le sometió a un proceso de secado parcial, hasta que alcanzaron el contenido de agua previamente seleccionado. Con las probetas ya preparadas, se les sometió al ensaye de compresión simple, (de acuerdo con la norma ASTM D 2166-00).



Figura 3.1 Molde utilizado para elaborar las probetas de suelo

3.2 Determinación de las propiedades índices

Para clasificar el suelo seleccionado se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ASTM D 2487-00, para este proyecto se realizó el ensaye Granulométrico combinado (mallas e hidrómetro) ASTM D 422-63 y los Límites de Atterberg ASTM D 4318-00.

3.2.1 Granulometría

Para cualquier propósito de ingeniería es común utilizar algún tipo de análisis granulométrico ya que, mediante este análisis, se pueden determinar las cantidades relativas de los diferentes tamaños de partículas presentes en el suelo (Gravas, Arenas y Finos), lo cual es representativo de la masa del suelo (Comisión Nacional del Agua 1980). Así, la granulometría se puede determinar por medio de mallas, por el hidrómetro o por ambos.

Cuando el suelo presenta menos de un 12 % de finos sólo se recomienda efectuar el análisis por mallas, sin embargo, cuando el porcentaje de finos supera al 12 % es recomendable realizar el análisis por hidrómetro Bowles (1980). El

análisis de las partículas mediante el hidrómetro obedece al interés de conocer la cantidad de partículas inferiores a la malla No 200 y hasta 0.001 mm para poder determinar el porcentaje de arcillas presentes en este suelo, ya que el comportamiento de un suelo cohesivo depende del tipo y porcentaje de arcillas presentes en él, de su historia geológica y del contenido de agua.

La información que presenta este análisis da una idea del posible comportamiento que el suelo puede experimentar ante la acción de cargas externas o ante variaciones en su contenido de agua (Bowles, 1980), debido a que cuando se encuentra en contacto el suelo con el agua, pueden tener lugar los cambios de volumen, de permeabilidad o de resistencia. Además, esta información puede utilizarse para deducir el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo.

El análisis granulométrico no presenta información sobre la forma de las partículas, la información que presenta es una gráfica que muestra el porcentaje de partículas que pasan la malla en el eje de las ordenadas, contra el diámetro de la partícula (en escala logarítmica) graficado en el eje de las abscisas, esto permite visualizar fácilmente la distribución de los sólidos presentes.

3.2.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia son los estados por los que el suelo transita al variar su contenido de agua desde seco a líquido, también son conocidos como límites de Atterberg (Juárez, 1990). Dentro de ellos, dos estados tienen especial importancia para este trabajo, el límite líquido y el límite plástico. El límite líquido es la frontera entre el estado plástico y el líquido, su determinación consiste en conocer el contenido de agua de una pasta de suelo que se coloca en un copa metálica, a la pasta se le practica una ranura, y posteriormente, a la copa con el suelo ranurado se le hace golpear contra la base de la copa, mediante un excéntrico. Cuando la pasta cierra su ranura a lo largo de $\frac{1}{2}$ pulgada después de experimentar 25 golpes se dice que el suelo se encuentra en su límite líquido.

Así mismo, el límite plástico es la frontera entre el estado semi-sólido y el plástico, también es el contenido de agua que el suelo presenta cuando la masa de suelo es rodada hasta alcanzar un diámetro de 3 mm; si al conseguir este diámetro el suelo se agrieta, se dice que el suelo ha alcanzado el límite plástico.

El principal propósito en determinar los límites de consistencia es identificar el suelo y clasificarlo. Así pues, mediante el límite líquido de un suelo es posible inferir su comportamiento volumétrico, ya que éste depende del tipo de suelo, también es una medida de la resistencia al corte del suelo para un determinado contenido de agua. Por su parte, el límite líquido aumenta su valor en la medida en la que el tamaño de las partículas disminuye. Para facilitar la identificación del suelo también es importante determinar el valor de su índice de actividad, esto permitirá conocer el tipo de arcillas presentes.

3.2.3 Pesos específico relativo de los sólidos

El peso específico relativo de los sólidos se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua a 4° C, (tabla 3.1).

Durante el desarrollo de este trabajo se requirió determinar frecuentemente el grado de saturación que los distintos especímenes de suelo alcanzaron en el momento del ensaye. La medición del peso de las probetas se realizó mediante una balanza granataria con 0.01 gr de aproximación, el volumen se determinó midiendo la altura y el diámetro de la probeta. Sin embargo, para determinar el volumen de los sólidos presentes en la muestra de suelo, fue necesario contar con el peso específico relativo de los sólidos, por consiguiente se realizó su determinación. El peso específico relativo de los sólidos también se requiere durante el desarrollo del análisis granulométrico mediante el hidrómetro, además, es utilizado para realizar la clasificación preliminar de los minerales presentes en un suelo.

Tabla 3.1 Pesos específicos relativos típicos de algunos suelos

Tipo de suelos	Peso específico relativo de los sólidos (S_s)
Arena	2.65 - 2.67
Arena limosa	2.67 - 2.70
Arcilla inorgánica	2.70 - 2.80
Suelo con mica o hierro	2.75 - 3.00
Suelos orgánicos	Variable puede ser inferior a 2.00

Fuente: Bowles (1980)

3.2.4 Ensaye Proctor Estándar

Con el objetivo de obtener una serie de especímenes con idénticas condiciones, a partir de las muestras de suelo recuperadas de manera alterada, se utilizó el procedimiento de compactación Proctor Estándar para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo. Someter al suelo a un proceso de curado previo a la realización del ensaye Proctor Estándar permite obtener curvas de compactación más uniformes.

El ensaye consiste en densificar al suelo dentro de un cilindro metálico por medio de un martillo que le proporciona una energía específica. El suelo previamente se prepara con distintos contenidos de agua, como resultado se obtendrá el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo. La forma más común de presentar los datos es por una curva que muestra en el eje de las ordenadas el peso específico seco y en el eje de las abscisas el contenido de agua.

En esta curva se identifica el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo, así como las ramas seca y húmeda que servirán de referencia en la elección del contenido de agua de fabricación de las probetas, esta selección permite que los especímenes de suelo muestren un comportamiento frágil o dúctil, según sea el problema que se pretenda analizar. En el caso que nos compete, se seleccionó la rama seca para reproducir en el suelo una estructura floculada, debido a que esta estructura es más frecuente encontrarla en suelos donde se

construye las vías terrestres o en la zonas áridas y semi áridas, dado que el propósito de estas estructuras es provocar que los suelos alcancen las máximas resistencias y que presenten las mínimas deformaciones.

Por otro lado, se ha visto que en los suelos con un contenido abundante de arena, las curvas de compactación son más tendidas. Además, los factores más conocidos que afectan la densidad del suelo son los siguientes:

- Temperatura
- Tamaño del molde
- Distribución de los golpes en la capa de suelo
- Cantidad excesiva de suelo en el molde
- Tipos de suelo (solo los suelos cohesivos pueden ser compactados por impactos)
- Cantidad de procesamiento (mezclado, curado, manipulación)

3.3 Ensaye de consolidación unidimensional con succión controlada

En la actualidad está creciendo el interés por diseñar herramientas para suelos no saturados con el objetivo de controlar la succión, tal es el caso de la técnica de equilibrio de vapor y el método osmótico. Richards (1974) apunta que la succión es el potencial del agua del suelo y además señala que están presentes tres componentes; la componente capilar, la componente del agua adsorbida en los minerales y la succión osmótica. Sin embargo, en ingeniería sólo se suelen manejar las componentes mátrica y osmótica.

La succión mátrica es considerada como la componente dominante de la succión total, en los suelos cohesivos (Fredlund and Rahardjo 1993). Además, se considera que la succión osmótica permanece constante aunque se presenten cambios en el contenido de agua, siempre y cuando se mantengan constantes los fluidos que la provocan. Lo anterior no siempre se cumple, cuando se presentan arcillas con minerales activos, el agua de adsorción es fuertemente dependiente de la distancia entre las láminas de arcilla y el contenido de agua, así la succión total se escribe como:

$$\psi = (U_a - U_w) + \pi \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde

$(U_a - U_w)$ = Succión mátrica

π = Succión osmótica.

La succión total del suelo está relacionada con la humedad relativa, de acuerdo con la ley de Kelvin, según lo menciona Fredlund and Rahardjo (1993), como se presenta en la ecuación 3.2.

$$\psi = \frac{-RT}{M_w \left(\frac{1}{\rho_w} \right)} \ln RH \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde

R = Es la constante universal de los gases (8.31432 J/mol K)

T = Es la temperatura absoluta en grados Kelvin

M_w = Es el peso molecular del agua (18.016 kg/kmol)

ρ_w = Es el peso unitario del agua en kg/m^3 , en función de T

RH = Es la humedad relativa medida.

En el desarrollo de esta parte de la investigación se utilizaron consolidómetros convencionales de anillo fijo, apegándose a los estándares de la American Society of Testing Materials ASTM D 2435–03. Los especímenes utilizados se fabricaron teniendo cuidado de mantener su peso específico seco máximo y su correspondiente contenido de agua óptimo, respectivamente. Todas las probetas se fabricaron en 2 capas y cada capa se compactó mediante presión

estática hasta alcanzar el peso volumétrico señalado. Entre cada una de las capas de suelo colocado se tuvo la precaución de escarificar su superficie antes de agregar la siguiente capa para lograr la homogeneidad de la probeta, (figura 3.2).



Figura 3.2 Probeta de suelo utilizada en el ensaye de consolidación

Sin perder de vista el interés por conocer los esfuerzos de preconsolidación que exhibe el suelo a diferentes magnitudes de succión, se elaboró un lote de especímenes, la mitad de ellos se ensayaron en trayectoria de secado, mientras la otra mitad fueron ensayados en trayectoria de humedecimiento. Las magnitudes de succión se determinaron mediante la curva característica, para este propósito se buscó seleccionar distintos grados de saturación que cubrieran la totalidad de la curva característica, desde saturado hasta seco. Así, se buscó que en ambas trayectorias los especímenes presentaran los grados de saturación seleccionados. Una vez conocido el grado de saturación del suelo y apoyándose en la curva característica de este suelo, se dedujo la succión correspondiente. Durante la realización del ensaye de consolidación en trayectoria de secado, a la mitad de especímenes se les proporcionó un secado parcial hasta alcanzar el grado de saturación seleccionado previamente.

De la misma manera se desarrolló el ensaye de consolidación pero ahora en trayectoria de humedecimiento, la otra mitad de probetas se sometieron a un proceso de secado total y a partir de ahí, se les adicionó agua con un aspersor hasta que las probetas alcanzaron el grado de saturación seleccionado.

Cuando los especímenes preparados para las trayectorias de secado y humedecimiento alcanzaron las condiciones previamente establecidas, se les colocó dentro del consolidómetro convencional de anillo fijo en una cámara de temperatura controlada a $20^{\circ} \text{C} \pm 1$. Así pues, a cada uno de los especímenes se les determinó sus relaciones fundamentales, con las cuales fue posible conocer el grado de saturación (contenido volumétrico de agua) y apoyándose en la curva característica se infirió la magnitud de la succión inicial de cada probeta. Por otra parte, se aplicó la técnica del papel filtro al final del ensaye para determinar la succión (ASTM D 5298-03), el consolidómetro utilizado aparece en la figura 3.3.

Bajo las condiciones antes mencionadas, se aplicó a cada probeta la serie de cargas y se obtuvieron las distintas deformaciones del suelo que permitieron determinar la curva de compresibilidad con la cual se determinó el valor de su esfuerzo de pre consolidación correspondiente, el procedimiento para obtener el esfuerzo de pre consolidación fue establecido por el Dr. Arthur Casagrande, y presentado por Juárez (1990).



Figura 3.3 Consolidómetro convencional utilizado

3.4 Resistencia del suelo al esfuerzo cortante

La resistencia de un suelo al esfuerzo cortante en general se expresará mediante el modelo de Coulomb-Terzaghi, esta información es muy importante en la determinación del grado de estabilidad de las estructuras de suelo, la expresión es la que se presenta en la ecuación 3.3 (Comisión Nacional del Agua, 1990).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \qquad \text{Ec. 3.3}$$

Donde

τ = Resistencia al esfuerzo cortante del suelo

c = Cohesión del suelo

σ .- esfuerzo normal

ϕ .- Ángulo de fricción interna del suelo.

Al ensayar un mismo suelo se pueden obtener muy diversos valores de la cohesión así como del ángulo de fricción interna. Estos valores dependen del estado que presenta el material en cuanto a la relación de vacíos con que se prepararon los especímenes, el grado de saturación, la velocidad del ensaye y el procedimiento que se siga para realizar el ensaye (Comisión Nacional del Agua, 1990).

Para poder conocer el comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en las distintas condiciones en las que se pueden presentar en campo, como es el caso del análisis de estabilidad de cortinas, bordos, cortes, cimentaciones, etc, es necesario desarrollar alguno de los diferentes tipos de ensayos triaxiales siguientes:

- a) Ensaye de compresión simple
- b) Ensaye triaxial no consolidado no drenado, conocido como UU
- c) Ensaye triaxial consolidado no drenado, conocido como CU
- d) Ensaye triaxial consolidado drenado, conocido como CD

3.4.1 Ensaye de compresión simple (q_u)

En este ensaye se le aplica una carga creciente a un espécimen de suelo en la dirección del esfuerzo principal mayor hasta que se alcanza la falla en el espécimen. Con las lecturas de las cargas aplicadas, y las lecturas de deformación, se construye la gráfica esfuerzo desviador contra deformación unitaria. A partir de esta gráfica se determina la magnitud del esfuerzo desviador máximo y con este valor se elabora la gráfica de los esfuerzos de Mohr, (figura 3.4), es así que con esta gráfica y el ángulo de falla, es posible determinar la magnitud del esfuerzo cortante máximo alcanzado por el suelo antes de la falla. Además es posible determinar la cohesión del suelo mediante la (Ec 3.4) que se basa en que el esfuerzo principal menor σ_3 es cero y el ángulo de fricción interna ϕ del suelo, se supone cero.

Se ha visto que este tipo de ensaye no proporciona resultados de resistencia confiables, debido a que la restricción lateral se pierde cuando la muestra se extrae del suelo, también se debe a que las condiciones internas del suelo no pueden controlarse (grado de saturación y presión de poro), al igual que la fricción que se desarrolla entre los extremos de la muestra y las placas de carga (Bowles, 1980). Sin embargo, este método es ampliamente utilizado para conocer la resistencia al corte de un suelo cohesivo de forma rápida y económica (ASTM D 2166 – 00).

$$c = \frac{q_u}{2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde

q_u = Esfuerzo desviador soportado por el suelo.

c = Cohesión del suelo

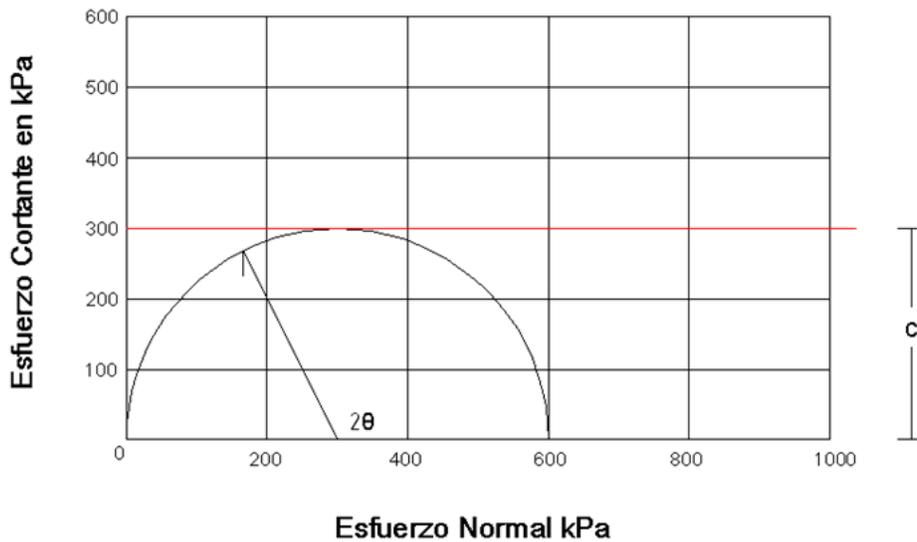


Figura 3.4 Diagrama Mohr Coulomb para el ensaye de compresión simple

Debido a que el interés de este ensaye es conocer los esfuerzos cortantes que el suelo exhibe a diferentes magnitudes de succión, se elaboró un lote de especímenes; la mitad de ellos se ensayaron en trayectoria de secado, mientras la otra mitad se ensayaron en trayectoria de humedecimiento. Las magnitudes de succión se determinaron mediante la curva característica, para este propósito se seleccionaron los distintos grados de saturación que cubrieran la totalidad de la curva característica, desde saturado hasta seco. Así mismo, se intentó que en ambas trayectorias los especímenes presentaran los grados de saturación seleccionados. Una vez conocido el grado de saturación del suelo y apoyándose en la curva característica de este suelo, se dedujo la succión correspondiente. Durante la realización del ensaye de compresión simple en trayectoria de secado la mitad de especímenes estuvieron bajo un secado parcial hasta alcanzar el grado de saturación seleccionado previamente.

De la misma manera se desarrolló el ensaye de compresión simple, pero ahora en trayectoria de humedecimiento. La otra mitad de probetas se sometieron

a un proceso de secado total y a partir de este proceso se les adicionó agua mediante un aspersor hasta que alcanzaron el grado de saturación seleccionado previamente.

Cuando los especímenes preparados para las trayectorias de secado y humedecimiento alcanzaron las condiciones previamente establecidas se montaron en el marco de carga y se les aplicó el esfuerzo desviador hasta llegar a la falla. El marco de carga se encuentra instalado dentro de una cámara de temperatura controlada a $20^{\circ} \text{C} \pm 1$. Previamente a cada uno de los especímenes se les determinó sus relaciones fundamentales, con las cuales fue posible conocer el grado de saturación (contenido volumétrico de agua) y, apoyándose en la curva característica se infirió la magnitud de la succión inicial de cada probeta. Por otra parte se aplicó la técnica del papel filtro al final del ensaye para determinar la succión, de acuerdo con ASTM D 5298-03.

3.4.2 Ensaye triaxial consolidado drenado (CD)

Con la finalidad de poder reproducir los cambios en la resistencia al esfuerzo cortante que los suelos parcialmente saturados experimentan durante los cambios de humedad exhibidos en las diferentes épocas del año, se desarrolló una serie de ensayos triaxiales CD para distintas magnitudes de succión y diferentes esfuerzos de confinamiento en las trayectorias de secado y humedecimiento. Se inició con practicar el ensaye en estado saturado para determinar ϕ' y c' . Después se utilizaron dos procedimientos para controlar la succión, el primero fue mediante secado al horno y el segundo mediante flujo de vapor y secado al horno (para este propósito véase el Anexo C).

El ensaye triaxial CD también llamado ensaye lento, se inicia al instalar una muestra en la cámara triaxial, posteriormente se abre la válvula de drenado y se continua con la aplicación de la presión de confinamiento (hasta consolidar la probeta) durante 24 hrs. Después con la válvula de drenaje, aún abierta, se aplica el esfuerzo desviador a una velocidad de 0.001 mm/min hasta llevar al espécimen de suelo a la falla. El esfuerzo desviador se debe de aplicar siempre con una tasa

de velocidad baja durante todo el proceso para que los parámetros del suelo no se alteren. Debido a la necesidad de hacer un control muy detallado de este ensaye y al tiempo de realización tan prolongado que conlleva éste, sólo es económicamente justificable para grandes proyectos. Este ensaye permite conocer los parámetros verdaderos del suelo (ϕ y c). El aspecto de una gráfica de esfuerzos de Mohr-Coulomb típica de estos ensayes se muestra en la figura 3.5.

El propósito de esta serie de ensaye triaxial CD, fue conocer el comportamiento de los esfuerzos cortantes que el suelo exhibe a diferentes magnitudes de succión, para esto se elaboró un lote de especímenes: la mitad de ellos se probaron en trayectoria de secado, mientras la otra mitad se ensayaron en trayectoria de humedecimiento. Las magnitudes de succión registradas durante el ensaye fueron inferidas mediante la curva característica, para lo cual se seleccionaron distintos grados de saturación para cubrir la totalidad de la curva característica. Así mismo, se buscó que en ambas trayectorias los especímenes de suelo presentaran los grados de saturación seleccionados. Para la realización de los ensayes triaxiales CD en trayectoria de secado, a la mitad de especímenes se les proporcionó un secado parcial hasta alcanzar el grado de saturación seleccionado previamente. De la misma manera se desarrolló el ensaye triaxial en trayectoria de humedecimiento, con la otra mitad de probetas, a las que se sometió a un proceso de secado total y a partir de ahí se les adicionó agua mediante un aspersor hasta que las probetas alcanzaron el grado de saturación seleccionado previamente.

De la misma manera se desarrollo el ensaye triaxial en trayectoria de humedecimiento, con la otra mitad de probetas, que se sometieron a un proceso de secado total y a partir de ahí se les adicionó agua mediante un aspersor hasta que alcanzaron el grado de saturación seleccionado anteriormente.

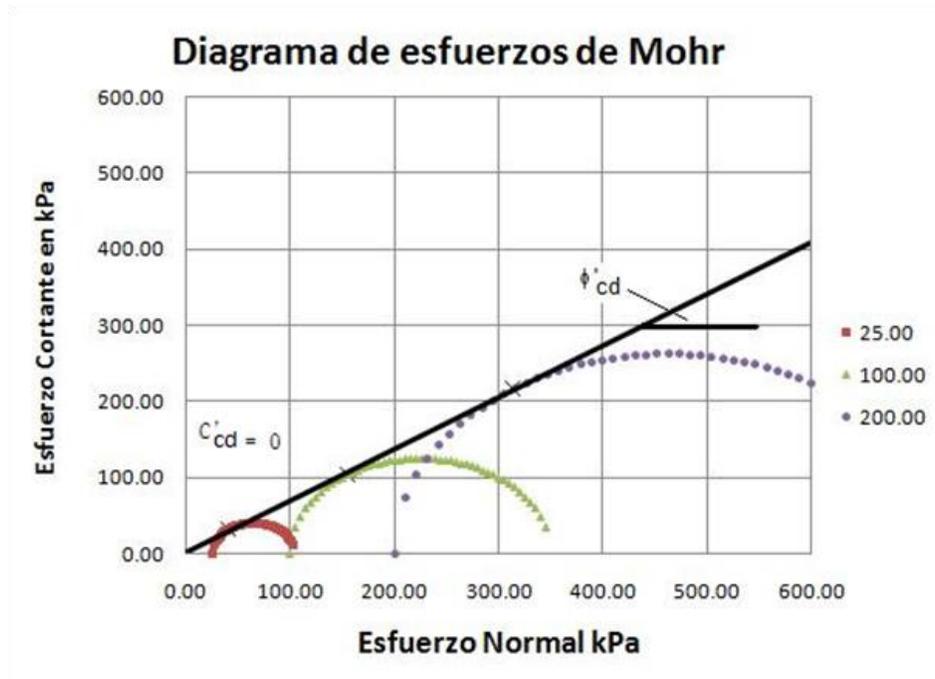


Figura 3.5 Diagrama de Mohr Coulomb del ensaye triaxial CD (c' y ϕ')

Los especímenes de suelo fueron elaborados en 5 capas, cada capa de suelo fue compactada mediante presión estática buscando reproducir un peso específico $\gamma_m = 18.01 \text{ KN/m}^3$ y un contenido de agua $\omega = 21 \%$, con el propósito de reproducir muestras homogéneas. Las presiones de confinamiento utilizadas durante la serie de ensayos triaxiales fueron 50, 100 y 150 kPa en trayectoria de secado y humedecimiento. Una vez que los especímenes fallaron, a cada espécimen se le determinó su correspondiente magnitud de succión mediante la técnica del papel filtro. El papel filtro también fue calibrado mediante la norma ASTM D 5298-003. De este modo, con la información del grado de saturación de cada uno de los especímenes y su correspondiente esfuerzo cortante, se construyó la curva de esfuerzos cortantes contra el grado de saturación en ambas trayectorias, tal y como se observa en esta primera parte donde se presentan todos los procedimientos que permitieron apreciar el comportamiento mecánico de este suelo.

En la segunda parte se examinan las pruebas que aportan los elementos necesarios para analizar el comportamiento hidráulico del suelo, para ello, se abordan los ensayos de la curva característica y el ensayo de porosimetría del suelo.

3.5 Curva característica

En esta sección se presenta la segunda parte de la metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación al estar enfocada en obtener el comportamiento hidráulico del suelo estudiado. Como es sabido, la curva característica del suelo o curva de retención se define como la relación existente entre la succión que el agua del suelo desarrolla y su correspondiente grado de saturación. Así pues, se introdujo en el laboratorio de investigación de caminos en Inglaterra (Corey y Coleman, 1948; Croney *et al.*, 1950). La importancia de la succión en la explicación del mecanismo del comportamiento de suelos no saturados relacionados con problemas de ingeniería (Edlefsen y Anderson, 1943) se refirieron a la succión como un estado de la energía libre del agua del suelo. La energía libre puede ser medida en términos de la presión del vapor del agua (Richards, 1965). Actualmente para la medición de la succión existen varios procedimientos, sin embargo, en el presente trabajo solo se menciona la técnica del papel filtro por ser la apropiada para obtener la curva característica del suelo.

En esta técnica, el papel filtro se somete a un proceso de secado (110 °C) por al menos 16 hrs. previas al ensayo. Posteriormente se coloca una fracción del suelo de 200 a 400 gr en un recipiente hermético, procurando que el suelo casi llene el recipiente hermético para reducir el tiempo de equilibrio y minimizar los cambios de succión en el espécimen. Una vez cerrado el recipiente, se sella con cinta para aislar y se coloca dentro de un contenedor aislado, este último debe permanecer en un sitio donde la temperatura típica nominal sea 20°C y las variaciones de temperatura sean inferiores a $\pm 3^{\circ}\text{C}$, por un tiempo mínimo de siete días. En estas condiciones el papel filtro alcanza su equilibrio y por consiguiente se debe determinar la masa del contenedor metálico frío con una aproximación de 0.0001 gr (T_c = tara fría), enseguida se coloca cada disco de papel filtro dentro de

un contenedor metálico para determinar su masa individual ($M_1 = \text{tara fría} + \text{disco de papel filtro húmedo}$). Una vez medido el papel filtro húmedo, se procede a obtener su masa seca por lo que se debe de colocar dentro del contenedor metálico y sobre éste la tapa removible (sin cerrar), después se instalan en el horno de secado (a $110\text{ }^\circ\text{C}$) por un periodo de 2 hrs. A partir de ese momento, se sella el contenedor y se mantiene por un espacio de 15 min. más, posteriormente se extrae el contenedor metálico con el papel filtro dentro y se pesa para determinar la masa seca total M_2 con una aproximación de 0.0001 gr. Después se retira el papel filtro y se determina la masa del contenedor caliente que contuvo el papel filtro T_h con una aproximación de 0.0001 gr (en un tiempo no mayor de 5 min).

Es importante señalar cuatro recomendaciones durante la determinación de esta prueba: a) La succión total será medida cuando el disco de papel filtro no se encuentre en contacto con el espécimen de suelo, para esto se utiliza un arosello. B) La succión mátrica será medida cuando el papel filtro se encuentre en contacto directo con el suelo. C) Los discos deberán presentar un doble hacia arriba para poder ser removido, con las pinzas. D) Colocar una pila de tres discos de papel filtro en contacto con el suelo, procurando que el disco de papel filtro del centro presente un diámetro 3 o 4 mm menor que los discos de papel filtro externos.

Cuando ha quedado determinado el peso del disco de papel filtro húmedo y seco se obtiene el contenido de agua del papel filtro mediante las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5. Posteriormente se establece la succión que el suelo presentó mediante la ecuación 3.6 de la curva de calibración correspondiente. De manera adicional se obtienen las relaciones volumétricas y gravimétricas y con ellas se conoce el grado de saturación (contenido volumétrico de agua). Finalmente con la serie de pares ordenados (succión y grado de saturación), desde seco hasta saturado, se construye la curva característica correspondiente.

3.6 Porosimetría del suelo

Conocer la distribución porosimétrica del suelo ayuda a entender mejor su comportamiento, gracias a que el suelo es un material poroso constituido por un esqueleto sólido y vacío que influye en su comportamiento. Por tal motivo es importante entender, en primera instancia, el concepto de la porosidad que se define como la fracción, n , del volumen específico aparente de la muestra que es atribuida a los poros:

$$n = \frac{V_p}{V} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde

n = Porosidad del medio

V_p = Volumen de poros específico

V = Volumen específico aparente del medio

El valor de esta fracción depende claramente del método usado para determinar el volumen específico aparente del medio (V), ésta excluye los vacíos inter-partículas y el método usado para evaluar el volumen de poro específico (V_p) de la muestra que es obtenida (adsorción y condensación capilar, desplazamiento de fluidos, ultrasónicos, etc.).

De acuerdo con Meyer (1997), existen varios métodos para determinar la porosimetría de cualquier material poroso, sin embargo, tanto sus procedimientos como sus alcances son muy diversos. Algunos de estos métodos sólo tienen acceso a los poros abiertos (por ejemplo los métodos que utilizan fluidos); mientras que otros métodos pueden penetrar en los poros cerrados y abiertos (por ejemplo los métodos que utilizan adsorción o dispersión de radiación electromagnética). Como consecuencia un valor de porosidad medido, depende del estado físico del material y del método experimental utilizado para su determinación. Además, para un método dado el valor determinado experimentalmente, depende del tamaño de la probeta (desplazamiento de fluidos,

adsorción) o de la medición (estereológica). Para distinguir estos tres casos deberá de notarse si el volumen específico (V_p) es debido a poros abiertos, a los cerrados o a ambos tipos de poros, en este último caso producirán la porosidad total.

3.6.1 Tamaño de poro

El tamaño de poro, así como el área específica, no tiene una definición precisa. Los problemas para el área específica son complicados aunado al hecho de que la forma de los poros es altamente irregular y variable en los sistemas de redes de poros interconectados. Por consiguiente, el volumen de poro detectado depende de la manera en la que es encontrado.

Para hacer un análisis de los poros usualmente se utilizan formas y tamaños idealizados. En la práctica el número de formas de los poros es limitado a cilindros, prismas, cavidades, grietas o esferas. Cuando se consideran formas esféricas, los poros son los espacios más cercanos a los vacíos que se forman entre las esferas sólidas al estar en contacto unas con unas con otras.

El rasgo más preciso para identificar un poro es el tamaño de sus dimensiones referido al ancho, espesor de poro en forma de grieta o el diámetro de un poro cilíndrico. Con la finalidad de evitar ambigüedades en la escala, se recomienda utilizar el diámetro de un poro cilíndrico como su ancho. Con el propósito de facilitar el entendimiento se recomienda utilizar algunas de las siguientes convenciones (McNaught, 1997; Meyer, 1997).

Micro-poros: diámetro < 2 nm

Meso-poros: 2 nm < diámetro < 50 nm

Macro-poros: diámetro > 50 nm

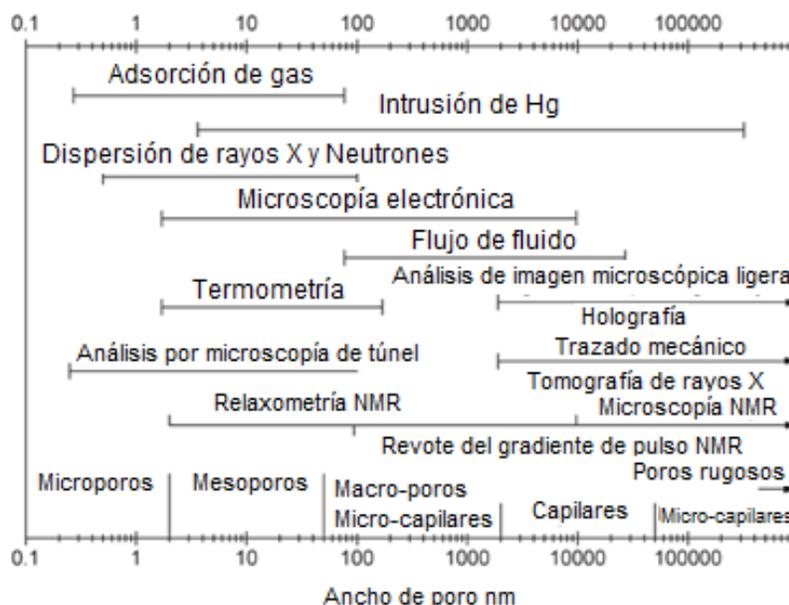


Figura 3.6 Rangos de medición de los métodos para determinar el tamaño de poro (Meyer, 1997)

En la tabla 3.2 se presentan los métodos para determinar la porosidad total, y en la tabla 3.3 se muestran los métodos para determinar la porosidad abierta.

3.6.2 Análisis de imagen y porosimetría

La porosimetría es una distribución de poros obtenida a partir del análisis de imagen utilizando un tamizado morfológico, según lo refiere Luengo Hendricks (2004). Esta técnica es muy semejante al tamizado de polvos de acuerdo a un sistema de mallas estándares de laboratorio. Cuando se utilizan mallas de laboratorio los sólidos se pasan a través de las mallas, iniciando por las que tienen diámetros mayores hasta las de diámetros pequeños, así las partículas grandes se quedan en las primeras mallas y las partículas pequeñas pasan a las mallas siguientes. Mediante la medición de las partículas retenidas en cada malla es posible obtener la distribución de las partículas. De forma análoga, los poros se analizarán en forma decreciente iniciando por los macro-poros, continuando por

los meso-poros y finalizando con los micro-poros, de modo que sea posible cuantificar la presencia de cada uno de ellos con respecto de la sumatoria total de los poros, esto es con finalidad de obtener el porcentaje correspondiente de cada uno de los vacíos presentes en el medio poroso.

Mediante la técnica de análisis de imagen es posible desarrollar un análisis de la estructura de los poros en distintas zonas de la muestra. Una alternativa para analizar la estructura de los materiales porosos es mediante el análisis morfológico de micrografías propuesto por Matheron (1975). Esta técnica de procesamiento de imagen puede ser de utilidad en el análisis de tamaño de poro. De ahí que el proceso de identificación de los poros existentes en el suelo se realizará de la siguiente forma:

3.6.3 Porosimetría

En primer lugar se fabricó una muestra con el suelo en estudio buscando reproducir un γ_m de 18.01 kN/m^3 para una humedad $\omega = 21 \%$, dicha muestra se instaló dentro de un porta muestra tal y como se aprecia en la figura 3.7.



Figura 3.7 Muestra de suelo SM instalada dentro del porta muestra

Tabla 3.2 Métodos para determinar la porosidad total (Mikhail and Robens 1983)

Procedimiento	Rango de tamaño de poro	Consideración	Ventajas	Desventajas
Calculo de la densidad aparente	Total		De cálculo fácil y de propiedades comúnmente conocidas.	
Dispersión de rayos X con ángulo pequeño	$0.50 \text{ nm} \leq d \leq 100 \text{ nm}$		Método de corta duración.	Características especiales
Dispersión de neutrones con ángulo pequeño	$0.5 \text{ nm} \leq d \leq 100 \text{ nm}$		Método de poco tiempo	De características especiales, limitado a centros nucleares
Análisis cuantitativo de imagen	$d \geq 20 \text{ nm}$	Poros esféricos	Poros grandes que puedan ser medidos por inspección óptica, también la microscopía puede ser medida por análisis de fotografía TEM	Se limita a poros grandes, presenta errores significativos en materiales de granos de cuarzo, en información espacial del áreas se requiere gran esfuerzo matemático.
Sistema de análisis de imagen	$d \leq 20 \text{ nm}$		Medición de tamaño de poros de forma irregular, se aplica en secciones de ceramografía, figuras, micro fotos, vistas gráficas.	Información de áreas subjetiva.

Tabla 3.3 Métodos para determinar la porosidad abierta (Mikhail and Robens 1983)

Procedimiento	Rango de tamaño de poro	Consideración	Ventajas	Desventajas
Impregnación de Xileno y agua	$d \leq 100 \text{ nm}$		Método simple, de poca duración	No se aplica para determinar la distribución de tamaño de poro en especímenes de diámetro pequeño.
Impregnación de metal líquido			Red de poros verdaderos	No se aplica en la medición del tamaño de poros en el carbón incendiario.
Penetración de aire/Helio	Algunos manómetros dependen totalmente del gas aplicado		Método de muy corto tiempo, de 1 min, de buena reproductividad, no influye el tipo de muestra.	No se aplica en la obtención de la distribución de tamaño de poro.
Adsorción de N_2	$d < 50 \text{ nm}$		Presenta correlación con el área superficial del BET	Programa de evaluación complicado.
Intrusión de mercurio	$4 \text{ nm} < d \leq 60 \text{ nm}$	Poros cilíndricos	Muy usable, datos comparables, gran rango de distribución de tamaño de poros.	Riesgo de rotura de las paredes del poro, los poros grandes son llenados a presión atmosférica.

Una vez fabricadas las probetas y colocadas en el porta muestra se procedió a instalarlas en los porta objetos, del microscopio electrónico de barrido (figura 3.8), éste se empleo a bajo vacío con la intención de no alterar las condiciones de humedad en las muestras, además se obtuvo las micrografías a 100X, 500X, 1000X, 3000X y 6000X aumentos como se aprecia en la figura 3.9.

3.6.4. Procedimiento utilizado para el análisis de imagen

Con las micrografías correspondientes se procedió a analizar las imágenes mediante el siguiente procedimiento:

1. Se seleccionaron las micrografías obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido.
2. A cada una de las micrografías se les da un tratamiento de nitidez con la finalidad de apreciar la forma de las partículas sólidas y la de los poros presentes en el suelo (observe la figura 3.10).



Figura 3.8 Microscopio electrónico de barrido utilizado

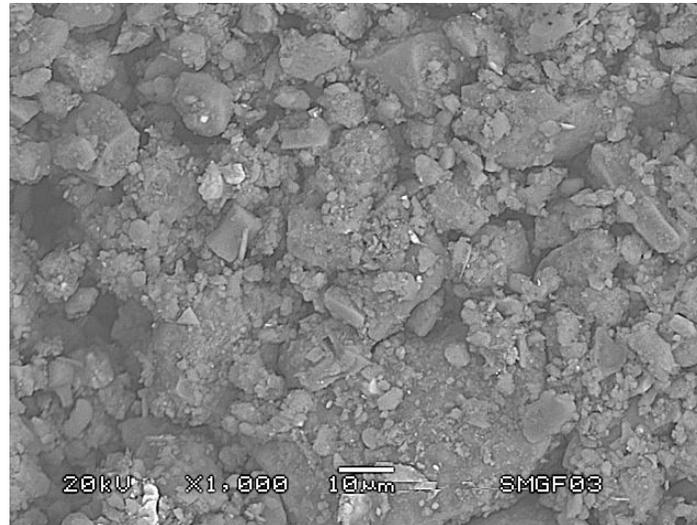


Figura 3.9 Micrografía del suelo SM



Figura 3.10 Programa para mejorar la calidad de imagen

3. Mediante un programa de conteo de imagen (como el que se muestra en las figuras 3.11 y 3.12), es posible cuantificar la superficie total de la micrografía, así como la de cualquier área seleccionada sobre ella, para esto es necesario proporcionar la escala de la imagen. De esta

manera cada uno de los poros seleccionados es cuantificado sin importar su forma, su tamaño o sus unidades. El programa mantiene el área total de la micrografía, también la de cada uno de los poros seleccionados, así como la sumatoria de las áreas seleccionadas. Con el área total y el área de los poros (A_v) es posible conocer el área de los sólidos (A_s). De esta manera usando la expresión de la relación de vacíos ($e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{A_v}{A_s}$) es posible comparar su valor obtenido con el determinado experimentalmente. Esta revisión permite conocer el momento en el que el análisis de la imagen ha terminado. Finalmente, el programa proporciona un archivo con el listado del área de los poros y su diámetro equivalente.

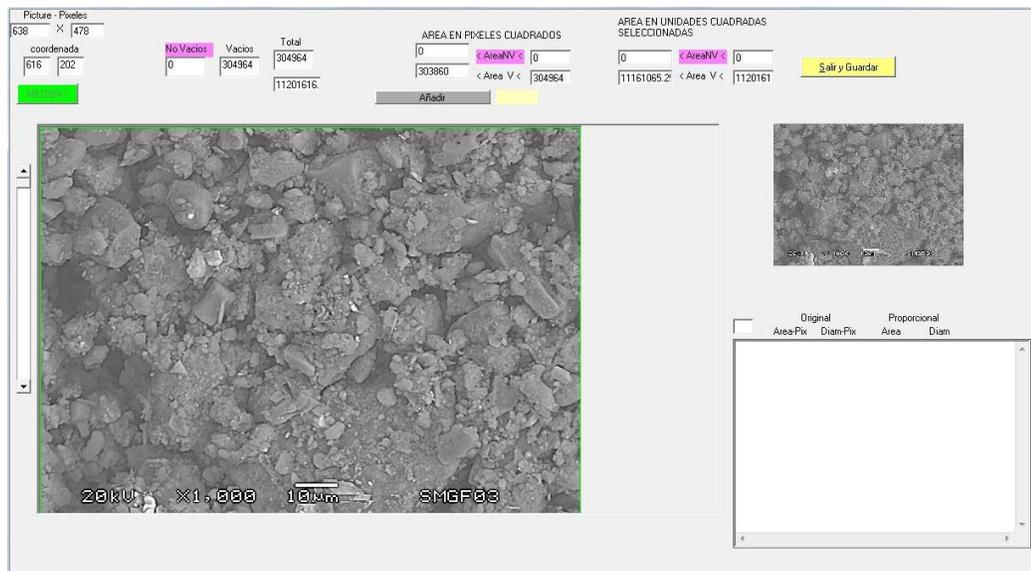


Figura 3.11 Programa para el conteo de la imagen

4. Una vez que se tiene el listado de diámetros de cada uno de los poros se efectúa un análisis estadístico, la información de los diámetros de poro es posible obtenerla de una o varias micrografías integradas. Para este propósito fue necesario identificar el diámetro máximo y mínimo con

la intención de establecer el ancho de clase y el correspondiente punto medio de cada clase, y así efectuar un análisis de la distribución de éstos.

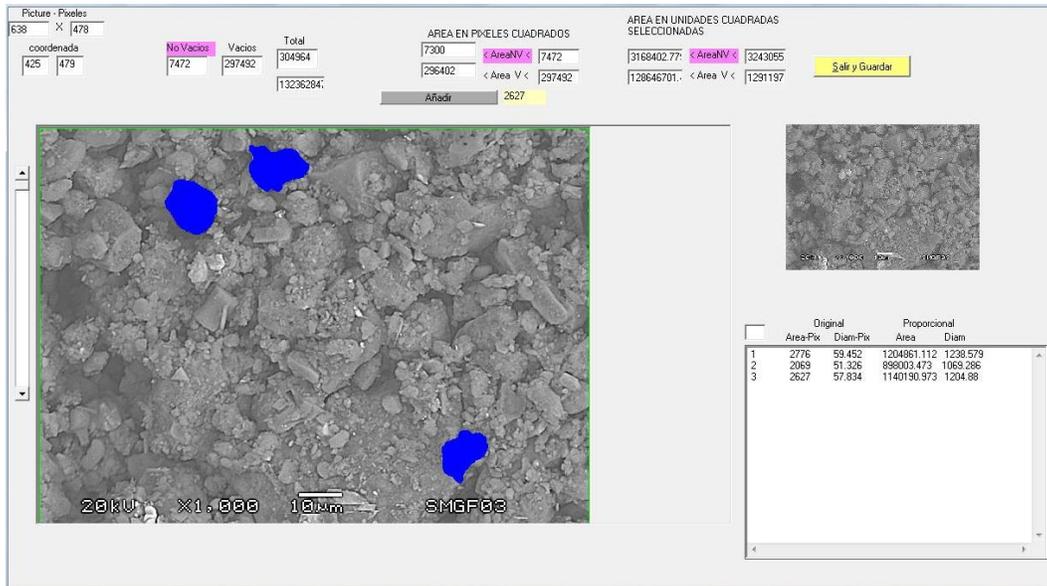


Figura 3.12 Análisis del conteo de una micrografía

Después se efectuó una depuración de las clases en las cuales no se entró poros y por otro lado al efectuar un análisis numérico se obtuvo la porosimetría del suelo.

Las micrografías analizadas para poder obtener esta distribución porosimétrica fueron las de 500X, 1000X, 3000X y 6000X, de las cuales se obtuvieron los datos integrados.

Se menciona que la micrografía de mayor tamaño fue la de 500X. A partir de esta micrografía se encontró un factor de escala para las otras micrografías como resultado del número de veces que la otra micrografía podía caber en la primera.

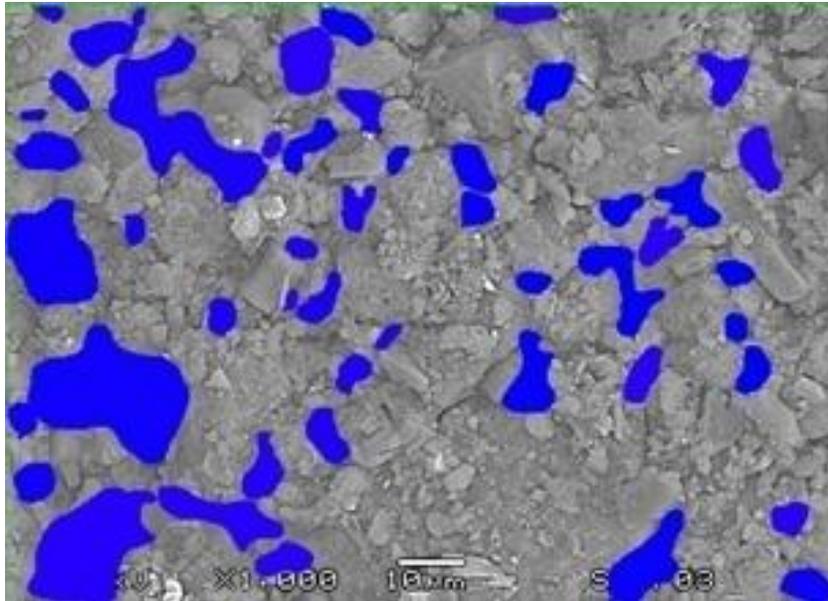


Figura 3.13 Aspecto de la micrografía durante el conteo de los poros, en color azul

5. Finalmente, mediante el programa de conteo de imágenes es posible cuantificar el área de cada uno de los poros encontrados; a partir del área encontrada y considerando que se trata de una circunferencia se determinará el correspondiente diámetro de poro equivalente con la ecuación 3.6.

$$D_{equivalente} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde

A = Área encontrada en cada poro

$D_{equivalente}$ = Diámetro de poro equivalente, encontrado a partir del área de poro determinada mediante el programa de conteo de imagen.

Cada una de las técnicas expuestas en este capítulo servirá de apoyo para responder a las hipótesis planteadas en esta investigación.

4 MODELO PROBABILISTA

En este capítulo se presenta la descripción del modelo numérico utilizado para obtener los parámetros de Bishop. Este modelo se ha propuesto en dos partes, la primera parte corresponde a la descripción del modelo probabilista (MP) utilizado para obtener la curva característica del suelo. En segundo lugar se describe el modelo sólido poroso (MSP), necesario para obtener la fracción saturada del suelo y el grado de saturación no saturado, importantes para la determinación del parámetro χ de Bishop.

4.1 Desarrollo del modelo probabilista

Los suelos no saturados se presentan con más frecuencia en las zonas áridas y semi-áridas de nuestro planeta, en las cuales su evapotranspiración es superior a la precipitación, principalmente en la superficie. Según Meigs (1953) y Dregne (1976) dando origen a cambios de volumen, a esfuerzos de corte y a formas peculiares de comportamientos en cada sitio, lo que hace difícil el poder predecir su comportamiento, como es el caso de los suelos expansivos y colapsibles. Hasta la fecha se ha tratado de analizar el comportamiento particular de cada uno de estos suelos, sin embargo, es necesario pasar a la etapa de un estudio más integral (Alonso *et al.*, 1987).

Un suelo no saturado es un sistema constituido principalmente por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa, las cuales constituyen un esqueleto sólido. En años recientes, investigadores como Fredlund y Morgenstern (1977) han considerado una cuarta fase intermedia entre la líquida y la gaseosa llamada capa contráctil. Por lo anterior, es menester conocer como se encuentran relacionadas cada una de las fases entre sí, debido a que estos aspectos constituye un punto importante dentro del planteamiento de este modelo.

4.2 Descripción del modelo del suelo

Para la solución de múltiples problemas de ingeniería que se presentan en los suelos no saturados como es el caso de las presas de tierra, taludes, excavaciones, bordos, rellenos o en las cimentaciones (Fredlund and Rahardjo, 1993), se requiere conocer las variaciones de la resistencia, sus cambios de volumen, su deformación, su conductividad hidráulica, etc. Una función clave en la resolución de este tipo de problemas y aceptada por todos los geotécnicos es la curva característica del suelo como acertadamente lo señala Fredlund and Xing (1994) y Rojas (2006), debido a que la distribución del tamaño de las partículas se encuentra relacionada con la distribución de tamaño de poro, y a la vez relaciona a cada uno de los comportamientos arriba señalados.

El primer intento de obtener la curva característica del suelo a partir de la distribución del tamaño de poro fue desarrollado por Arya and Paris (1981), apoyándose en la similitud entre la curva de distribución de tamaño de partícula y la curva característica del suelo. Sin embargo, la determinación de la curva característica es muy lenta, requiriendo en algunas ocasiones de varias semanas o hasta meses. Por ello, es necesario contar con un medio que permita analizar el comportamiento del suelo con todos sus constituyentes y variables en un lapso de tiempo reducido. Simms and Yankful (2001) señala que, es posible realizarlo mediante modelos numéricos que permiten simular sus variaciones de forma rápida y confiable para la solución de problemas de ingeniería.

En años recientes uno de esos modelos fue desarrollado por Simms and Yanful (2005), este modelo se encuentra apoyado en una red de sólidos y poros para determinar la conductividad hidráulica, cambios de volumen, la succión y efectos de carga. El modelo es bidimensional y utiliza información de la distribución del tamaño de poro determinada mediante el ensaye de intrusión de mercurio, con dicho modelo es posible predecir la curva característica del suelo.

Así pues, para poder obtener la curva característica del suelo, es adecuado recurrir al uso de un modelo numérico probabilista distinto a los anteriores, por medio del cual se pueda predecir esta función, apoyándose en la

distribución del tamaño de poro. Este modelo toma en cuenta el efecto de la histéresis del suelo, aspecto que en otros modelos no ha sido considerado.

4.3 Propuesta de un modelo sólido poroso a partir del modelo probabilista

Al plantear el modelo sólido poroso se utilizó el modelo probabilista desarrollado por Rojas (2006) el cual es adecuado para obtener la curva característica del suelo en ambas trayectorias. Al apoyarse en la información porosimétrica, el planteamiento de este modelo permitió ensamblarle la distribución de los sólidos para deducir la fracción saturada y el grado de saturación no saturado que permite obtener el parámetro χ de Bishop, necesario en la definición del comportamiento de los suelos no saturados.

Por lo anterior, al basarse en la distribución estadística de los sitios, de los enlaces y de la fracción sólida localizada en una muestra de suelo, es posible plantear el modelo probabilista con sólidos (MSP); la figura 4.1, muestra como se distribuye cada uno de los constituyentes de este modelo. La identificación de los tamaños de poros se desarrolla de acuerdo al criterio de Meyer (1997). Por otro lado el modelo presenta la versatilidad de poder desarrollar análisis en forma bidimensional y tridimensional. Es importante puntualizar que los sitios se encuentran rodeados por los enlaces, a estas uniones se les denomina conectividad (C), así la conectividad del modelo puede ser de $C = 4$ o $C = 6$, cuando se trata de un caso bidimensional o tridimensional.

La conectividad, se refiere al número de enlaces que concurren a un sitio, puede considerarse constante o variable de un sitio a otro. En el caso en que la conectividad de un poro sea nula, significa que el enlace que concurre con ese sitio presenta un radio igual a cero.

Dado que el modelo está integrado por elementos de diversos tamaños, sus elementos deben cumplir con la siguiente restricción geométrica, para los

sitios su restricción es $\sqrt{r_{b1}^2 + r_{b2}^2} \leq r_{st}$, con la intención de evitar que los radio de

los enlaces r_{b1} y r_{b2} se intersecten. Además, el radio del enlace debe ser menor que el radio del sitio.

Las condiciones de conectividad e intersección que debe reunir la red son:

- a) Los sitios y enlaces tendrán su propia distribución de tamaños.
- b) Existirá correlación entre el tamaño de cada uno de los elementos.
- c) Cada uno de los elementos presentará sus limitaciones geométricas.
- d) No se presentará uniformidad en la conectividad.
- e) El tamaño de los sitios siempre debe ser mayor o igual al tamaño de los enlaces.
- f) No se permite la intersección entre dos sitios ubicados en diagonal.

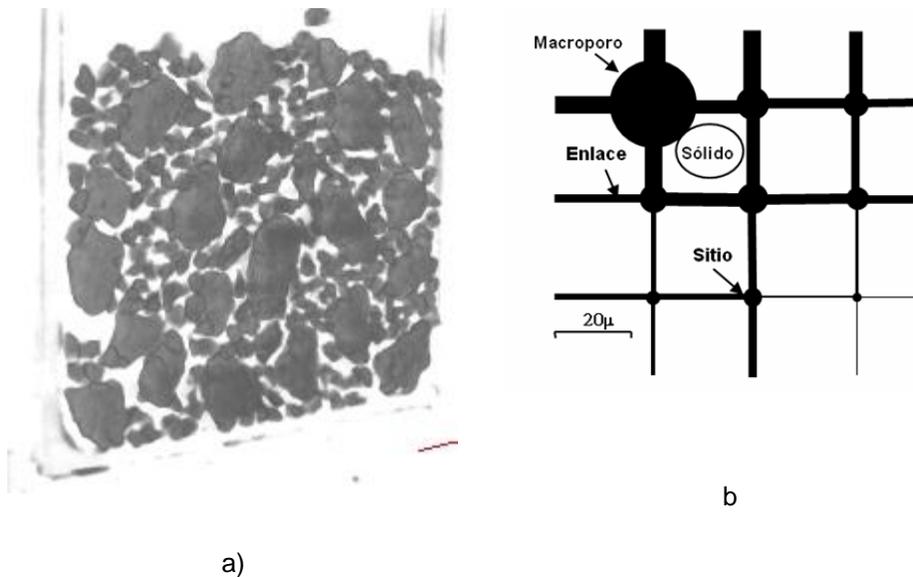


Figura 4.1. a) Imagen de una estructura de suelo (Vulliet *et al.* (2006)). b). Red de sitios, enlaces y sólidos

Partiendo de la idea de que la distribución de tamaño de poros de un suelo presenta una distribución logarítmica normal (Simms and Yanful, 2000), permite reproducir la compleja estructura de los poros del suelo. Al plantear el desarrollo de las expresiones matemáticas del modelo probabilista se predecirá la curva característica del suelo en trayectoria de secado y humedecimiento, en este trabajo se consideró la estructura de un suelo areno-limoso.

Para la reproducción de la estructura del suelo, primero se desarrolla una red que permita considerar la existencia de espacios vacíos (macro-poros) de dimensiones superiores a las de algunas partículas, de espacios vacíos (sitios), de dimensiones menores a las partículas y de enlaces, que unen a cada uno de los macro-poros y sitios (figura 4.1). Se debe tener presente que la distribución del tamaño de poro, y las partículas sólidas serán asignadas en forma aleatoria, apoyándose en la distribución de tamaño de poro y distribución granulométrica del suelo en cuestión, además, se parte considerando que el llenado y vaciado de los poros del suelo obedecen a la ecuación de Laplace:

$$S = U_a - U_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{R_c} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde

S = Succión mátrica desarrollada

T_s = Tensión superficial del agua

α = Ángulo de contacto entre el agua y el suelo el cual es considerado igual a cero al tratarse del contacto agua-suelo

R_c = Radio crítico del poro en análisis

Una vez que se ha definido la red, se plantea la probabilidad de que un sitio o un enlace se sature o se seque en trayectoria de secado o de humedecimiento. Por lo tanto, se debe tener presente que los sitios con radio

menor que el crítico están en posibilidades de saturarse $\frac{2T_s}{R_c} > U_a - U_w$, mientras que aquellos que presentan un radio mayor que el crítico están en posibilidades de

secarse $\frac{2T_s}{R_c} \leq U_a - U_w$, además la conectividad es variable de un sitio a otro. Para esta investigación, el modelo se consideró bidimensional, por lo que los poros se representan por círculos y los enlaces se representan por rectángulos.

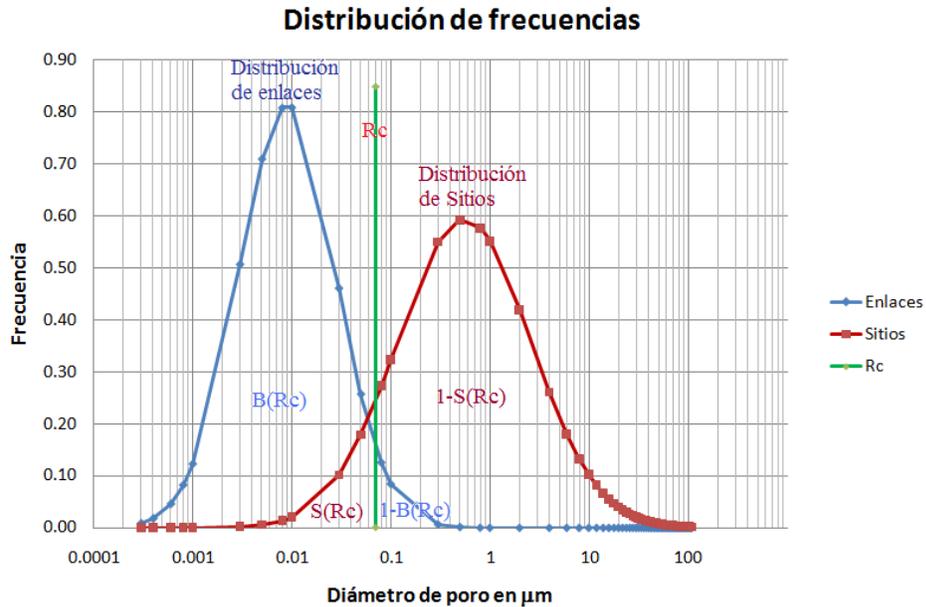


Figura 4.2 Modelo Probabilista para obtener la curva característica

4.4 Trayectoria de secado

Una vez que la red ha quedado definida se procede a determinar la probabilidad de saturación de los sitios y enlaces en la trayectoria de secado (de acuerdo con la figura 4.2).

Un **sitio** de un suelo saturado podrá estar en condiciones de drenar bajo las siguientes consideraciones:

- Si su tamaño es superior al tamaño crítico R_c dado por la ecuación de Laplace. $(1-S(R_c))$.
- O si al menos uno de los enlaces que concurren en este sitio ya se ha drenado. Es decir, que se encuentre en contacto con la fase gaseosa (L_{BD}).

Así la probabilidad de que un sitio L_{SD} se encuentre saturado durante un proceso de secado quedará definida por la ecuación 4.2.

$$L_{SD} = S(R_c) + [1 - S(R_c)] B(R_c) L_{SD}^c \quad \text{Ec 4.2}$$

En cuanto a los enlaces, un **enlace** de un suelo saturado se podrá drenar bajo las siguientes consideraciones:

- a). Si uno de los sitios extremos ha sido drenado $(1-S(R_c))$ y L_{SD} .
- b). Si el enlace tiene un tamaño mayor al crítico R_c dado por la ecuación de Laplace $(1-B(R_c))$.

$$L_{BD} = B(R_c) + [1 - B(R_c)] L_{SD}^2$$

$$L_{BD} = B(R_c) + [1 - B(R_c)] [1 - S(R_c)] L_{BD}^{C-1}$$

Ec. 4.3

4.5 Trayectoria de humedecimiento

Una vez que la red ha quedado definida se procede a determinar la probabilidad de la saturación de los sitios y enlaces en la trayectoria de humedecimiento (figura 4.2).

Un sitio que se encuentra totalmente seco se puede llegar a saturar bajo las siguientes consideraciones:

- a). Si su tamaño es igual o inferior al tamaño crítico R_c dado por la ecuación de Laplace, $S(R_c)$.
- b). Si al menos uno de sus enlaces se encuentra saturado, es decir que se encuentre en contacto con la fase líquida. $(1-(1-L_{SI})^2)$.

$$L_{SI} = S(R_c) + [1 - S(R_c)] L_{BI}$$

$$L_{SI} = S(R_c) + [1 - B(R_c)] [1 - (1 - L_{SI})^2]$$

Ec 4.4

Por otro lado, un enlace que se encuentra totalmente seco se saturará bajo las siguientes consideraciones:

- a) Si uno de los sitios extremos se encuentra saturado $(1-(1-L_{SI}))$.
- b) Si el enlace tiene un tamaño menor o igual al tamaño crítico R_c dado por la ecuación de Laplace, $B(R_c)$.

$$L_{BI} = B(R_c) \left[1 - \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right] - \left(\frac{L_{SI}}{R} \right)^2 \quad \text{Ec. 4.5}$$

4.6 Obtención de la curva característica mediante el modelo probabilista

Apoyándose en la distribución de tamaño de los sitios y enlaces es posible describir los factores de probabilidad en trayectoria de secado y humedecimiento, para un valor de succión determinado. Resolviendo estos factores y asignando los tamaños de poro correspondientes es posible determinar el grado de saturación y su correspondiente succión para ambas trayectorias. Así la curva característica en trayectoria de secado será obtenida por las ecuaciones 4.1 y 4.6.

$$S_{WD} = \frac{L_{SD} V_S \cdot L_{BD} \cdot V_B}{V_S + V_B} \quad \text{Ec. 4.6}$$

De la misma manera la obtención de la curva característica en trayectoria de humedecimiento será obtenida mediante las ecuación 4.1 y 4.7.

$$S_{WI} = \frac{L_{SI} V_S \cdot L_{BI} \cdot V_B}{V_S + V_B} \quad \text{Ec. 4.7}$$

De esta manera, la curva de retención puede ser construida mediante los pares ordenados $\Psi-S_{WD}$ para la trayectoria de secado y $\Psi-S_{WI}$ para la trayectoria de humedecimiento.

Las curvas de retención obtenidas de esta forma requieren en muchos de los casos ser corregidas. Para poder efectuar la corrección de ambas curvas de retención se requiere determinar el grado de saturación mínimo, $G_{w \min}$, y el grado de saturación máximo, $G_{w \max}$, a partir de las curvas experimentales. De modo que el grado de saturación teórico obtenido mediante el modelo probabilista G_w , se corregirá y se obtendrá el grado de saturación corregido $G_{w \text{ corr}}$, mediante la ecuación 4.8.

$$G_{w \text{ corr}} = G_{w \min} + \frac{G_w}{100} (G_{w \max} - G_{w \min}) \quad \text{Ec. 4.8}$$

Con esta primera parte de modelo numérico se tiene la posibilidad de obtener la curva característica teórica corregida en ambas trayectorias.

4.7 Planteamiento del Modelo Sólido Poroso

En este apartado se explica el acoplamiento de la distribución de los sólidos con el modelo probabilista y se plantean los factores de probabilidad para determinar los elementos de suelo saturados en ambas trayectorias. Posteriormente se hace la deducción de la fracción saturada y el grado de saturación no saturado de un suelo parcialmente saturado que permite obtener el parámetro χ , este permite predecir el valor de los esfuerzos efectivos del suelo mediante el modelo de Bishop (1959) usado con cualquier grado de saturación, los valores obtenidos permitirán pronosticar la resistencia del suelo en análisis mediante el modelo de Mohr-Terzaghi.

El volumen de suelo que se encuentra saturado durante un proceso de humedecimiento o secado representa el volumen de todos los sólidos que se encuentran completamente rodeados por poros saturados, más el volumen de dichos poros (cavidades y enlaces). Para obtener este volumen se debe tomar en cuenta lo siguiente: cuando dos cavidades contiguas se encuentran saturadas

durante un proceso de humedecimiento o secado, el enlace que las liga necesariamente también se encuentra saturado. Esto ocurre porque durante el humedecimiento, los enlaces se saturan al mismo tiempo que el sitio a la que confluyen, la razón es que presentan un tamaño inferior. Por otro lado, durante el secado, un enlace no puede drenarse al menos que alguna de las cavidades que conecta ya haya drenado. Así, la probabilidad de tener un sólido saturado (L_{PD} o L_{PI}) dentro de una red de conectividad C en secado o humedecimiento es función únicamente de la probabilidad de que los sitios que rodean a dicho sólido se encuentren saturados y por lo tanto, esta probabilidad es obtenida por medio de las ecuación 4.10 y 4.11 para cada una de las trayectorias.

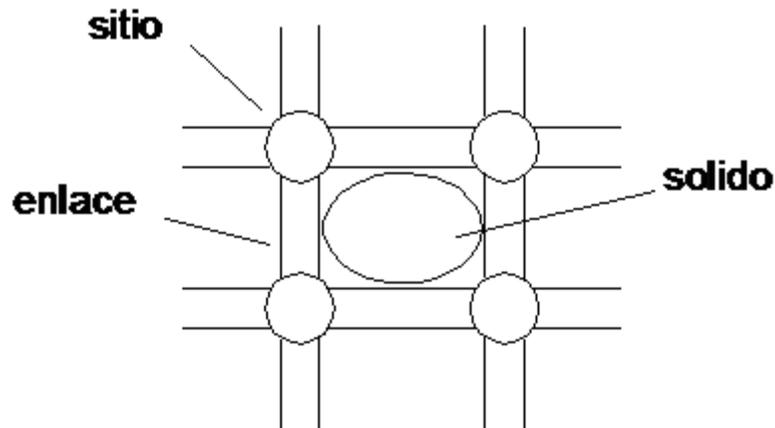


Figura 4.3 Modelo Sólido Saturado

En trayectoria de secado

$$L_{PD} = \left[S \left(\frac{C}{C-1} \right) \left[1 - S \left(\frac{C}{C-1} \right) \left[B \left(\frac{C}{C-1} \right) \left[1 - B \left(\frac{C}{C-1} \right) \left[L_{SD} \right] \right] \right] \right] \right]^{2(C-2)} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde

L_{PD} = Probabilidad de que los sólidos se encuentren saturados durante el proceso de secado.

En trayectoria de humedecimiento

$$L_{PI} = \left(1 - \left(1 - L_{BI} \right)^{2 \left(\frac{R_c}{R_c} \right)^2} \right) \left(1 - \left(1 - L_{SI} \right)^{2 \left(\frac{R_c}{R_c} \right)^2} \right) \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde

L_{PI} = Probabilidad de que los sólidos se encuentren saturados durante el proceso de humedecimiento.

4.7.1 Determinación del volumen del suelo saturado

Una vez que se ha definido el volumen de sitios y enlaces que se encuentran llenos de agua, es posible también conocer el volumen de suelo que se encuentra saturado V^s al estar durante un proceso de humedecimiento o de secado. El volumen saturado comprende el volumen de todos los enlaces, sitios y sólidos que se encuentran saturados. Para obtener este volumen se debe tomar en cuenta lo siguiente: que la fracción saturada tenga sitios y enlaces para secarse o humedecerse, y que las probabilidades que los sitios y enlaces se encuentren saturados (L_{BD} y L_{SD} o L_{BI} y L_{SI}), de esta manera pueden determinarse en el momento que se elija un radio crítico (R_c), así como la probabilidad de que un elemento de suelo se encuentre saturado (L_{PD} o L_{PI}). Por su parte pueden estar expresadas de acuerdo con las ecuaciones 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.10 y 4.11.

4.7.2 Volumen del suelo saturado en trayectoria de secado

El volumen saturado dependerá de dos eventos simultáneos, del secado de los sitios y del secado de los enlaces es decir L_{BD} y L_{SD} , como se puede observar en:

$$V_B^S = L_{BD} V_B$$

$$V_S^S = L_{SD} V_S$$

$$V_P^S = L_{PD} V_P$$

$$V^S = V_B^S + V_S^S + V_P^S \quad \text{Ec. 4.12}$$

4.7.3 Volumen del suelo saturado en trayectoria de humedecimiento

El volumen saturado dependerá de dos eventos simultáneos, del humedecimiento de los sitios y del humedecimiento de los enlaces, es decir, L_{BI} y L_{SI} , así:

$$V_B^S = L_{BI} V_B$$

$$V_S^S = L_{SI} V_S$$

$$V_P^S = L_{PI} V_P$$

$$V^S = V_B^S + V_S^S + V_P^S \quad \text{Ec. 4.13}$$

4.7.4 Análisis del esfuerzo efectivo en un suelo no saturado

Al analizar los esfuerzos que se presentan en el interior de la masa de suelo, se puede mostrar que se le atribuyen a estos esfuerzos dos causas: el peso propio del suelo y a la acción de cargas impuestas sobre el. En la figura 4.4 se observa un elemento de suelo obtenido a la profundidad h en un estrato de suelo en análisis. A partir de aquí, es posible entender que sobre cada una de las caras se experimenta la acción de diferentes esfuerzos en la dirección de los tres ejes coordenados.

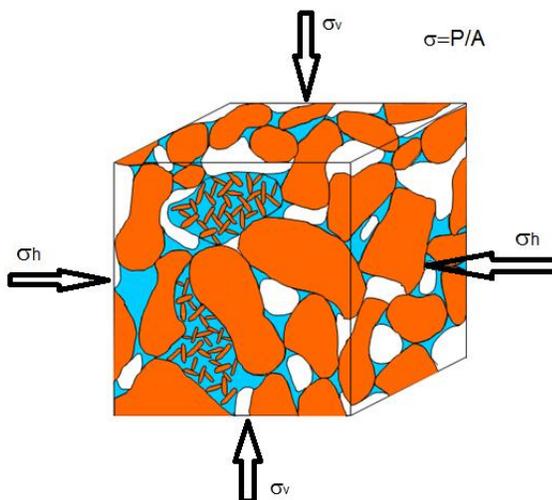


Figura 4.4 Elemento de un suelo no saturado

Si se desea entender el comportamiento de los esfuerzos que el elemento diferencial de suelo no saturado experimenta, debido a la aplicación de cargas externas, se recurre a la siguiente consideración para facilitar la comprensión; si se considera a una cara del elemento diferencial que recibe la acción de las fuerzas externas, que pueden ser analizadas de manera semejante a como Hamilton (1960) analizó los esfuerzos mediante una celda. Así, con el propósito de hacer el análisis de los esfuerzos de este elemento diferencial, sólo se analizarán los esfuerzos que actúan en la cara superior tal y como se presenta en la figura 4.5. Además, se entiende que un esfuerzo queda definido como la fuerza que actúa sobre una superficie dada. El concepto de esfuerzo está asociado a un medio continuo según Lambe and Whitman (2001). Así que, cuando hablamos de los esfuerzos que actúan en un punto, imaginamos las fuerzas que actúan sobre un cubo infinitamente pequeño (elemento diferencial).

Por lo anterior, en la definición de los esfuerzos de la cara superior del elemento diferencial se deben tomar en cuenta las condiciones idealizadas del suelo como son; homogeneidad, isotropía y estructura bimodal, estas serán de utilidad para describir la fracción saturada de suelo y el grado de saturación no saturado. Para lograr lo anterior se necesita apoyarse en el planteamiento del

modelo DSM (Disturbes State Model) de Desai and Wan (2003). En este modelo es posible encontrar enlaces, micro poros, macro poros y sólidos, en el que cada uno de ellos se encuentra distribuido aleatoriamente en el interior de la masa de suelo y además se considera que sobre ellos actúan los esfuerzos externos.

Partiendo de la consideración de el suelo se comporta como un material homogéneo es posible desarrollar un análisis con sólo una fracción de este material, la razón es que se considera representativo del volumen total (véase la figura 4.5).

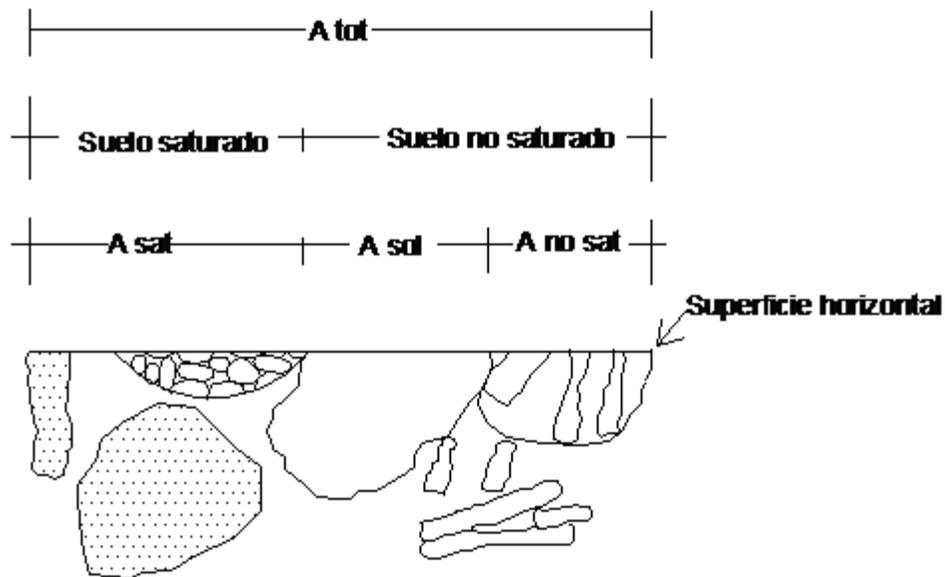


Figura 4.5 Sección transversal de un suelo no saturado

En la figura 4.5 se puede apreciar la existencia de la micro estructura, localizada en los paquetes de suelo, de tamaño pequeño, y una macro estructura encontrada entre las partículas de mayor tamaño. La primera estructura presenta poros entre sus agregados de tamaño muy pequeño y generalmente se encuentran en estado saturado. Por otro lado, la macro estructura involucra partículas de gran tamaño, que pueden ser sólidas o agregado de partículas. El tamaño de los poros pequeños puede llegar a estar cercano al espesor de la capa de agua adsorbida, razón por la cual nunca se secan. A diferencia los poros de

gran tamaño puede estar entre 0.01 a 500 μm , lo que a diferencia de los anteriores, generalmente se encuentra en estado seco, sin embargo, su condición depende en gran medida de la magnitud de la succión presente en él. Por lo antes mencionado, es usual encontrar en un suelo no saturado una parte de este en estado saturado y la otra en estado no saturado, por lo tanto, las partículas se encuentran ligadas por los meniscos.

Al considerar a un suelo como un medio homogéneo e isotrópico que presenta estructura bimodal, el diámetro de sus poros así como su localización en el interior de la masa de suelo es aleatorio, teniendo presente que en una estructura bimodal están presentes la micro y macro estructuras. En la primera estructura se considera que las partículas sólidas se agrupan en forma de paquetes; además se considera despreciable la influencia de la capa contráctil como lo señala Haines (1929) y Murray (2002), así como el área de contacto entre las partículas sólidas de forma semejante a como lo considera la expresión de esfuerzos efectivos de Terzaghi (1936). Todo esto facilitará el análisis de un elemento diferencial que se considerará representativo de la masa de suelo (figura 4.5).

Si se toma en cuenta un espesor de suelo de dimensiones unitarias, como se aprecia en la figura 4.5, en donde el suelo presenta un área total A_t formada por el área saturada A^s y el área no saturada A^u , de modo que $A_t = A^s + A^u$. Además, el área total de la fracción saturada está definida por el área del agua saturada, A_w^s y por los sólidos saturados A_s^s . Así $A^s = A_w^s + A_s^s$. Para esto, es necesario mencionar que las partículas sólidas de la fracción saturada se encuentran en contacto con agua y con otras partículas.

Si se desprecia el área de contacto horizontal entre los sólidos, entonces toda la proyección horizontal del área de los sólidos saturados presentados en esta sección está sujeta a la presión del agua, es decir $A_s^s = A_{sw}^s$. Por lo tanto el área total de la fracción saturada queda definida como la suma de las áreas donde el agua reacciona directamente al igual que la proyección horizontal de los sólidos

comprimidos por el agua, es decir $A^s = A_w^s + A_{sw}^s$. También el área total de la fracción no saturada se obtiene de la suma de las áreas de los sólidos no saturados A_s^u , área del líquido no saturado A_w^u , y del gas no saturado A_a^u o lo que es lo mismo $A^u = A_s^u + A_w^u + A_a^u$. De forma semejante como arriba se señaló los sólidos tienen contacto con las tres fases, pero si el área de contacto horizontal entre los sólidos se desprecia se tendrá $A_s^u = A_{sw}^s + A_{sa}^u$. De esta forma el área total de ambas fracciones -en donde la fase líquida que reacciona resulta ser $A_w = A_w^s + A_{sw}^s + A_w^u + A_{sw}^u$. Así mismo el área total donde la presión del aire reacciona es $A_a = A_a^u + A_{sa}^u = A - A_w$. Por otro lado si se aplica una fuerza vertical F, sobre la superficie horizontal de la figura 4.5, se obtiene un equilibrio al momento en que reacciona cada una de las fases, el cual queda definido mediante la siguiente expresión que:

$$F = \sigma A = \sigma' A + U_a A_a + U_w A_w$$

Donde

σ = Esfuerzo total vertical

σ' = Esfuerzo vertical transmitido a las partículas sólidas.

Además el producto $\sigma' A = \sigma^* A$,

Donde

σ^* = Representa el esfuerzo vertical equivalente, y está relacionado a los esfuerzos soportados por la estructura sólida del suelo.

Por lo antes señalado, éste también se encuentra relacionado con el esfuerzo de corte del material.

Así, la expresión anterior se puede escribir como:

$$\sigma_1 A = \sigma_1^* A + U_a A_a + U_w A_w$$

Además como $A_a = A - A_w$

Resulta entonces que

$$\sigma^* = \sigma_1 - U_a + (U_a - U_w) \left(\frac{A_w}{A} \right)$$

La expresión anterior permite determinar los esfuerzos efectivos en un suelo no saturado, además, en la expresión anterior el parámetro $\frac{A_w}{A}$ representa el parámetro χ de Bishop, expresiones como esta ya han sido propuestas por Matyas and Radhakrisna (1968) y Oberg and Sällfors (1995), para determinar los esfuerzos efectivos de un suelo no saturado.

Además, $\frac{A_w}{A}$ representa una medida del espacio de poro saturado, así que es dependiente del grado de saturación del material, según lo señalan Matyas and Radhakrisna (1968), sin embargo este parámetro es difícil de obtener en la práctica. La forma más conveniente de manejar la relación $\frac{A_w}{A}$ es haciendo uso de las relaciones volumétricas comúnmente usadas en la mecánica de suelos, la relación anterior también puede quedar expresada como sigue:

$$\frac{A_w}{A} = \frac{A^s}{A} + \frac{A_w^u + A_{sw}^u}{A}$$

Donde

$$\frac{A^s}{A} = \text{Representa la relación del área saturada}$$

Dicho en otras palabras, representa la distribución volumétrica de las fases, así que estas áreas corresponden a cada una de las fases, es decir, a su correspondiente volumen, entonces se tendrá que:

$$\frac{A^s}{A} = \frac{V^s}{V} = f^s .$$

Donde

V^s = Representa el volumen de la fracción saturada

V = Volumen del material

f^s = Fracción saturada del suelo

Así la fracción saturada del suelo es la relación que existe entre el volumen del suelo saturado y el volumen total, tal y como se expresa en la ecuación 4.14. La fracción saturada del suelo se determina en forma semejante para las trayectorias de secado y humedecimiento, al utilizar el modelo sólido poroso (MSP).

$$f^s = \frac{V^s}{V} = \frac{V_S^s + V_B^s + V_P^s}{V} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Donde:

V^s .- Volumen del suelo saturado

V_S^s .- Volumen de sitios saturados

V_B^s .- Volumen de enlaces saturados

V_P^s .- Volumen de las partículas saturadas

V .- Volumen total del suelo = $V_B + V_S + V_P$

4.7.5 Determinación del grado de saturación de la fracción no saturada

El grado de saturación de la fracción no saturada representa la relación entre el agua no saturada (V_w^u) y volumen de los vacíos no saturados (V_v^u), este

parámetro es posible determinarlo restándole al grado de saturación del suelo saturado el grado de saturación del suelo no saturado, como se aprecia en las ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$S_w^U = \frac{L_{SD} \left(-Factor S \right) L_{BD} \left(-Factor B \right)}{V_s \left(-Factor S \right) V_B \left(-Factor B \right)}$$

$$S_w^U = \frac{L_{SD} \left[1 - \left(\frac{B}{B_c} \right)^c \right] L_{BD} \left[1 - \left(\frac{S}{S_c} \right)^{c-1} \right]}{V_s \left[1 - \left(\frac{B}{B_c} \right)^c \right] V_B \left[1 - \left(\frac{S}{S_c} \right)^{c-1} \right]}$$

Ec. 4.15.

Además

$$S_w^U = \frac{L_{SI} \left(-Factor S \right) L_{BI} \left(-Factor B \right)}{V_s \left(-Factor S \right) V_B \left(-Factor B \right)}$$

$$S_w^U = \frac{L_{SI} \left[1 - \left(\frac{B}{B_c} \right)^c \right] + L_{BI} \left[1 - \left(\frac{S}{S_c} \right)^{c-1} \right]}{V_s \left[1 - \left(\frac{B}{B_c} \right)^c \right] + V_B \left[1 - \left(\frac{S}{S_c} \right)^{c-1} \right]}$$

Ec. 4.16.

4.7.6 Determinación del parámetro χ de Bishop

La mayoría de los problemas que se presentan en la Mecánica de Suelos requieren del análisis de los esfuerzos y de las deformaciones. La determinación de los esfuerzos cortantes del suelo es y ha sido uno de los puntos fundamentales de toda la mecánica de suelos.

Desde los inicios de esta ciencia, los especialistas han buscado explicar el comportamiento del suelo apoyándose en descripciones matemáticas. La expresión matemática de Coulomb (1776) fue satisfactoria para gravas y arena,

pero no lo fue para limos y arcillas. Visualizando algunas limitantes del modelo de Coulomb, Terzaghi (1936) propuso su teoría de esfuerzos efectivos $\sigma' = \sigma - u_w$, expresión que toma en cuenta los esfuerzos totales y la presión neutra del suelo para determinar la resistencia. Así, el concepto de los esfuerzos efectivos se quedó como base definida en el estudio de la mecánica de los suelos saturados, pero no para los suelos no saturados.

Por tal motivo el análisis de los esfuerzos efectivos en los suelos no saturados requiere de un proceso más complicado que el análisis de los suelos saturados; Bishop (1959) propuso una expresión para determinar los esfuerzos efectivos en este tipo de suelo:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad \text{Ec. 4.17}$$

Donde

σ' = Esfuerzo efectivo

$(\sigma - u_a)$.- Esfuerzo neto

$(u_a - u_w)$.- Succión mátrica

χ = Parámetro relacionado con el grado de saturación del suelo

($\chi = 1$ para el suelo saturado y $\chi = 0$ para el suelo seco)

Posteriormente, Bishop and Bligh (1963) reconsideraron la expresión propuesta para determinar los esfuerzos efectivos y llegaron a la conclusión de que era necesario el uso de las variables del estado de esfuerzos independiente, para analizar los esfuerzos efectivos. Sin embargo, otros investigadores como Bligh (1965), Burland (1964) y (1965) han señalado que los esfuerzos efectivos también dependen de los procesos a los que el suelo ha estado sujeto.

Buscando entender mejor la resistencia al corte del suelo, numerosos investigadores (Khalili and Khabbaz, 1998; Murray, 2002; y Khalili *et al.*, 2004), han realizado un sinnúmero de trabajos para encontrar una ecuación que permitiera

encontrar realmente los esfuerzos efectivos que se presentan en el suelo. Sin embargo, los parámetros del suelo necesarios para encontrar los esfuerzos efectivos parecen difíciles de evaluar. Además, los investigadores se enfrentaron a la dificultad del acoplamiento hidro-mecánico dando lugar a que la ecuación de Bishop se retomara nuevamente para plantear diversos modelos elasto-plásticos para suelos no saturados.

En los últimos años han aparecido innumerables modelos porosos que buscan explicar el comportamiento de los suelos no saturados, tal es el caso del modelo propuesto por Houlsby (1997) para determinar el esfuerzo efectivo en un suelo no saturado, en él, el autor idealizó la estructura de los suelos mediante un sistema de partículas ligadas por meniscos de agua. Otro caso es el modelo poroso propuesto por Simms and Yanful (2005).

Apoyados en la idea de Houlsby, esta la presente investigación propone un modelo que considera que la estructura del suelo es bimodal, y a partir de ella, es posible establecer los esfuerzos equivalentes de un suelo no saturado en forma similar a la expresión de Bishop (1959). En este mismo sentido Rojas señala que el parámetro χ no depende únicamente del grado de saturación de la fracción no saturada, sino también del volumen saturado y no saturado del suelo.

Bishop (1959) estableció su ecuación para esfuerzos efectivos en los suelos no saturados, sin embargo, lo complicado de esta expresión es estimar el valor de su parámetro principal χ . Actualmente la ecuación de Bishop ha retomado importancia, el motivo de esta elección es que el modelo es sumamente apropiado para suelos no saturados. En el apartado 4.7.4 se planteó la expresión de los esfuerzos equivalentes y se pudo estimar que:

$$\chi = \frac{A_w}{A}$$

También se mencionó que

$$\frac{A_w}{A} = \frac{A^S}{A} + \frac{A_w^u + A_{sw}^u}{A}$$

Además si se sabe qué

$$A_s^u = A_{sw}^u + A_{sa}^u$$

y si esta expresión se multiplica por $\frac{A_v^u}{A_v^u} = 1$ entonces tendremos que

$$A_s^u \left(\frac{A_v^u}{A_v^u} \right) = A_s^u \left(\frac{A_w^u + A_a^u}{A_v^u} \right) = A_s^u \left(\frac{A_w^u}{A_v^u} \right) + A_s^u \left(\frac{A_a^u}{A_v^u} \right)$$

por lo anterior se tendrá que

$$A_{sw}^u = A_s^u \left(\frac{A_w^u}{A_v^u} \right)$$

y así retomando que

$$\frac{A_w}{A} = \frac{A^s}{A} + \frac{A_w^u + \left[A_s^u \left(\frac{A_w^u}{A_v^u} \right) \right]}{A} = \frac{A^s}{A} + \frac{A_w^u A^u}{A_v^u A}$$

De modo que si se considera que las área corresponden a los volúmenes se tendrá que

$$\frac{A_w^u A^u}{A_v^u A} = \frac{V_w^u V^u}{V_v^u V} = S_w^u \left(\frac{V^u}{V} \right)$$

por otro lado se sabe que

$$f^s = \frac{V^s}{V}$$

Así se tendrá que

$$S_w^u \left(\frac{V^u}{V} \right) = S_w^u \left(-f^s \right)$$

Y la expresión para determinar el parámetro de Bishop queda como sigue:

$$\frac{A_w}{A} = \chi = \frac{A^s}{A} + \frac{A_w^u + A_{sw}^u}{A} = f^s + S_w^u \left(-f^s \right) \quad \text{Ec. 4.18}$$

Mediante la ecuación 4.18 es posible determinar el parámetro χ de un suelo sujeto a cualquier magnitud de succión, tanto en trayectoria de secado como de humedecimiento.

4.8 Resistencia de los suelos no saturados

El cambio climático está provocando lluvias más intensas y prolongadas en algunas zonas del planeta propiciando cambios en las condiciones de estabilidad de algunas estructuras que habían permanecido estables durante muchos años. Por tal motivo se acude a diseñar adecuaciones en los ensayos que hasta hace algún tiempo se utilizaban para resolver los distintos problemas.

Como lo afirma Sandra *et al.*, (2008), actualmente los ingenieros encuentran dificultad para determinar la resistencia de los suelos no saturados y específicamente para realizar los ensayos triaxiales con medición de la succión, a esto hay que agregarle el tiempo prolongado que implica desarrollar estos ensayos. Por lo anterior, se requieren herramientas que permitan optimizar tiempo en la toma de decisiones.

Coulomb (1776) estableció una teoría de resistencia, en la que el material falla cuando alcanza un valor límite máximo de su esfuerzo cortante $\tau = c + \sigma \tan \phi$, dicho esfuerzo cortante depende del esfuerzo normal aplicado, así pues, entre ambos existe una relación lineal. La determinación de los esfuerzos cortantes del suelo es y ha sido uno de los puntos fundamentales de toda la mecánica de suelos. Sin embargo, en la actualidad es importante analizar la relación entre la resistencia al corte y la succión que experimenta el suelo con el interés de evaluar el comportamiento de un suelo no saturado oportunamente.

En los suelos no saturados, la presencia de los meniscos de agua induce a fuerzas de contacto adicionales entre las partículas sólidas que incrementan su resistencia. Sin embargo, la reducción de la resistencia que experimentan estos suelos se debe al decremento de los esfuerzos de succión en el suelo, ocasionados por la desaparición de los meniscos del agua de los poros al momento en el que se presenta la infiltración del agua de lluvia.

La succión total en un suelo no saturado la constituyen la succión mátrica (producida por los meniscos) y la succión osmótica (producida por las sales disueltas en el agua de poro), así, en un suelo no saturado, las variables independientes de los esfuerzos que influyen en su resistencia son el esfuerzo

neto ($\sigma_n - u_a$) y la succión ($u_a - u_w$); en donde σ_n representa el esfuerzo normal total, u_a la presión del aire y u_w la presión del agua (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Hoy en día se sabe que la curva característica encierra información valiosa para estimar los esfuerzos de corte, la conductividad hidráulica, los cambios de volumen, etc., en los suelos no saturados (Vanapalli *et al.*, 1996). Por lo antes mencionado, se debe conocer cómo se encuentra distribuida el agua dentro de los poros del suelo, esto ayudará a comprender mejor el comportamiento de estos materiales (Rojas, 2006).

En la literatura especializada existen distintas propuestas para predecir la resistencia de los suelos, por ejemplo: Coulomb (1776), Terzaghi (1936), Bishop (1959), Fredlund *et al.*, (1978) y Vanapalli *et al.*, (1996), estos modelos se describirán más adelante. Sin embargo, cada uno de ellos requiere contar con información experimental, para ello en la primera parte de esta investigación, se presentan los resultados de un programa experimental para conocer la variación de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo provocado por la variación de su grado de saturación. El programa experimental consistió en desarrollar una serie de ensayos triaxiales bajo succión controlada en trayectoria de secado y humedecimiento para un esfuerzo isotrópico de 150 kPa.

4.8.1 Modelos teóricos de resistencia al esfuerzo cortante existentes

Los primeros intentos por establecer una teoría de la resistencia al corte de los suelo saturados se le atribuyen a Coulomb (1776), quien consideró que ésta se debía a la fricción entre las partículas del suelo y a una liga entre ellas a la que llamó cohesión; así planteó el modelo de resistencia para suelos cohesivo-friccionantes.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{Ec. 4.18}$$

Donde

τ = Esfuerzo cortante del suelo

c = Cohesión del suelo

ϕ = Ángulo de fricción interna del material
 σ = Esfuerzo normal total.

Posteriormente Terzaghi (1936) modificó el modelo de resistencia de Coulomb mediante el concepto de los esfuerzos efectivos. Dichos esfuerzos están definidos como la diferencia entre el esfuerzo total y la presión del agua de poro, así el nuevo concepto de resistencia para suelos quedó de la siguiente forma:

$$\tau = c' + (\sigma - u_n) \tan \phi' \quad \text{Ec. 4.19}$$

Donde

τ = Esfuerzo cortante del suelo
 c' = Cohesión efectiva
 ϕ' = Ángulo efectivo de fricción
 u_n = Presión del agua de poro
 σ = Esfuerzo normal total.

Además el término $(\sigma - u_n)$ representa el esfuerzo efectivo aplicado al suelo. Esta es la ecuación de resistencia, que se aplica para el caso de suelos saturados, dado que la presión de poro en este caso se considera positiva.

Posteriormente Bishop (1959) planteó que la ecuación de Terzaghi también podía utilizarse para establecer la resistencia al corte en suelos no saturados, sólo que en este caso la ecuación de esfuerzos de corte estaría dada por:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \chi \tan \phi' \quad \text{Ec. 4.20}$$

Donde

τ = Esfuerzo cortante del suelo
 c' = Cohesión efectiva
 σ_n = Esfuerzo normal total
 u_a = Presión del aire de poro
 u_w = Presión del agua de poro
 ϕ' = Ángulo efectivo de fricción
 χ = Parámetro que depende del grado de saturación del suelo (de 0 a 1)

$(\sigma_n - u_a) = \text{Esfuerzo neto}$
 $(u_a - u_w) = \text{Succión mátrica del suelo}$

Otra ecuación para predecir la resistencia al corte de los suelos no saturados la desarrollaron Fredlund *et al.*, (1978) quienes propusieron la siguiente relación:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \text{Ec. 4.21}$$

Donde

τ = Esfuerzo cortante del suelo

c' = Cohesión efectiva

σ_n = Esfuerzo normal total

u_a = Presión del aire de poro

u_w = Presión del agua de poro

ϕ' = Ángulo efectivo de fricción

ϕ^b = Ángulo de fricción interna aparente, obtenido de la curva de esfuerzos cortantes contra succión

$(\sigma_n - u_a)$ = Esfuerzo neto

$(u_a - u_w)$ = Succión mátrica del suelo

En épocas más recientes han surgido otros modelos que se apoyan en la curva característica del suelo para determinar la magnitud de los esfuerzos de corte como es el caso de Vanapalli *et al.* (1996), su modelo es:

$$\tau = c' + (\sigma_n - U_w) \tan \phi' + (U_a - U_w) \left[\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \tan \phi' \quad \text{Ec. 4.22}$$

Donde

τ .- Esfuerzo cortante del suelo

c' .- Cohesión efectiva

σ_n .- Esfuerzo normal total

u_w .- Presión del agua de poro

u_a .- Presión del aire de poro

ϕ' .- Ángulo efectivo de fricción

θ_w .- Contenido volumétrico de agua
 θ_s .- Contenido volumétrico de agua saturado
 θ_r .- Contenido volumétrico de agua residual
 $(\sigma_n - u_a)$ = Esfuerzo neto
 $(u_a - u_w)$ = Succión mátrica del suelo

En este trabajo de investigación se presenta el comportamiento del esfuerzo cortante del suelo en estudio, para distintos valores del grado de saturación o de succión, obtenidos mediante ensayos triaxiales consolidados drenados, después se comparan con los resultados teóricos obtenidos mediante las ecuaciones de Bishop (1959) y Coulomb-Terzaghi.

5. RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

En este capítulo se concentran los datos numéricos de cada uno de los ensayos utilizados para desarrollar la investigación. Primeramente se muestran los resultados del análisis que se realizó a distintos suelos, el propósito es apreciar su comportamiento para poder elegir el que se apegará a los objetivos de este trabajo. Posteriormente se exponen los resultados de la caracterización del suelo, de los ensayos de consolidación con succión controlada, de los ensayos de compresión simple en trayectoria de secado y humedecimiento, de los ensayo triaxial CD en ambas trayectorias con control de succión por secado al horno y humedecimiento, ensayos triaxial CD en ambas trayectorias con control de succión mediante flujo de vapor, ensayos triaxiales CD en condiciones normales, determinación de la resistencia del suelo mediante el Modelo Sólido Poroso, curva característica del suelo en ambas trayectorias y finalmente, la porosimetría del suelo, todos ellos se obtuvieron mediante el programa de Excel.

En la tabla 5.0 se presentan la información recuperada con cada uno de los ensayos.

Tabla 5.0 Información recuperada con cada uno de los ensayos

No	Ensaye	Información obtenida
1	Granulometría	Seleccionar el suelo adecuado Identificar el tipo de suelo seleccionado Conocer la distribución de sólidos
2	Límites de consistencia	Identificar el tipo de suelo seleccionado
3	Proctor Estándar	Determinar el Peso Volumétrico Seco Máximo y la Humedad Óptima
4	Peso específico Relativo de los Sólidos (Ss)	Para determinar el volumen de los sólidos Identificar el tipo de suelo seleccionado
5	Calibración del Papel Filtro	Uso del Papel Filtro como sensor de la succión del suelo
6	Consolidación con succión controlada	Determinar la variación de los esfuerzos de preconsolidación a diferentes grados

		de saturación
--	--	---------------

Tabla 5.0 (Continuación) Información recuperada con cada uno de los ensayos

No	Ensayo	Información obtenida
7	Cilindro extractor de Membrana	Determinar la curva de retención del suelo en trayectoria de secado
8	Curva característica	Conocer la relación entre la succión del suelo y su grado de saturación
9	Análisis de Imagen	Determinar la distribución porosimétrica del suelo
10	Ensayo de Compresión Simple (qu)	Seleccionar el suelo y determinar el comportamiento mecánico del suelo en función del grado de saturación
11	Ensayo Triaxial CD normal	Determinar ϕ' y c
12	Ensayo Triaxial CD con succión controlada	Determinar el comportamiento mecánico del suelo en función del grado de saturación y con distintos esfuerzos de confinamiento

Fuente: Elaboración propia

5.1 Selección del suelo

En primer lugar se realizó la determinación del ensayo de compresión simple que sirvió para aceptar o rechazar el suelo. Por consiguiente se requiere practicar la determinación volumétrica y gravimétrica del suelo. Los resultados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Características de los especímenes de suelo

Propiedad	Valores
Peso específico de la masa (γ_m)	18.04 KN /m ³
Porosidad (n)	36.13 %
Contenido de agua (ω)	21.00 %
Grado de saturación (G_w)	88.33 %
Peso específico relativo de los sólidos (S_s)	2.38
Relación de vacíos (e)	0.57

Fuente: Elaboración propia

Los resultados permiten observar que el suelo seleccionado está cercano

a la saturación ($G_w = 88.33 \%$), esto indica que la estructura que se fabricada tenderá una tendencia a ser floculada, por lo que se espera que el comportamiento esfuerzo-deformación tienda a ser rígido. Además, se buscará reproducir los especímenes con un peso específico (18.04 KN /m^3) y con una humedad óptima de 21%.

La tabla 5.2 muestra los resultados de los ensayos de compresión simple en donde se aprecia el comportamiento del esfuerzo desviador alcanzado en función del contenido de agua de las probetas.

Tabla 5.2 Resultados de los ensayo de compresión simple vs contenido de agua

N o	Altura/diámetro de la probeta. (h/d)	Peso específico de la muestra. (γ_m). KN /m^3	Peso específico seco de la muestra. (γ_d). KN /m^3	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo Desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$). kPa
1	2.10	17.29	15.10	14.15	46.81
2	2.10	17.47	15.00	16.76	42.37
3	2.20	14.72	14.71	0.28	24.84
4	2.10	16.51	15.00	10.18	48.93
5	2.10	16.01	15.00	6.90	36.39
6	2.10	17.81	14.81	20.00	22.68

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el esfuerzo desviador crece en la medida que el contenido de agua se reduce hasta llegar a un valor máximo, a partir de aquí, en la medida que el contenido de agua continua reduciéndose, los esfuerzos desviadores cada vez serán menores. El comportamiento de la resistencia al esfuerzo desviador de este suelo está en mayor medida determinado por la componente mátrica y no por la osmótica, como se aprecia en la figura 5.1. Los resultados dan evidencia que este suelo es recomendable para desarrollar la presente investigación.

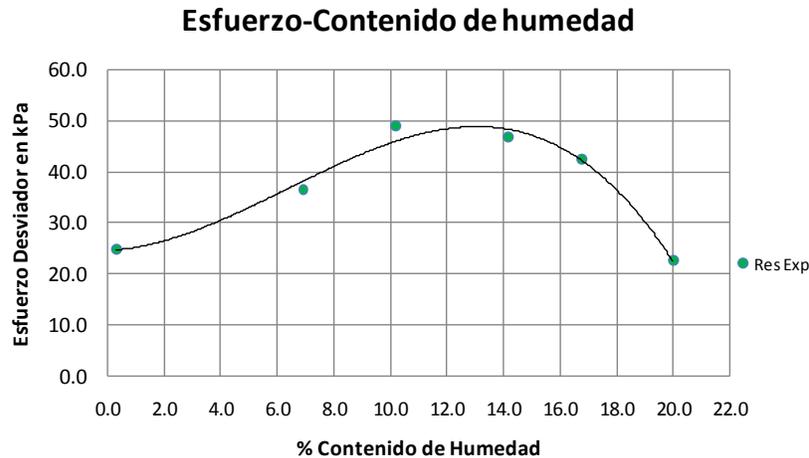


Figura 5.1 Comportamiento del esfuerzo desviador en función del contenido de agua

5.2 Determinación de las propiedades índices

La tabla 5.3 muestra las propiedades índices de los suelos utilizados, así como su clasificación de acuerdo con el criterio SUCS.

Tabla 5.3 Propiedades índices del suelo de Ciudad Fernández, Uriangato y la mezcla de éstos

Propiedad	Suelo de Ciudad Fernández S. L. P.	Suelo de Uriangato Gto	Mezcla de S.L.P. – Gto (30-70%)
Grava (G)	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Arena (S)	99.37 %	54.39 %	68.82 %
Limo (M)	0.63 %	42.72 %	29.41 %
Arcilla (C o O)	0.00 %	2.85 %	1.78 %
Límite Líquido (L.L.)	N. P.	N. P.	N. P.
Límite Plástico (L.P.)	N. P.	37.55 %	37.93 %
Índice de Plasticidad (I.P.)	N. P.	N. P.	N. P.
Clasificación S.U.C.S.	SP	SM	SM
Contracción Lineal (C.L.)	0.50 %	1.30 %	1.99 %
Contracción Volumétrica (C.V.)			0.95 %
Peso Volumétrico Seco Máximo (γ_m)	19.27 kN/m ³	14.86 kN/m ³	17.31 kN/m ³
Contenido de Agua Óptimo (ω %)	16.30 %	31.25 %	21.20 %
Densidad de los Sólidos (S_s)	2.62	2.49	2.38

Fuente: Elaboración propia

Con esta información se entiende que el suelo de Ciudad Fernández es una arena mal graduada (SP), el suelo de Uriangato es suelo areno limoso (SM) y la mezcla del suelo es una arena limosa (SM) en la que se tiene un 68.82 % de arena, 29.41 % de limos y un 1.78 % de arcillas inorgánicas. Así pues, se determinó que el peso específico seco máximo fue de 17.31 kN/m³ para un contenido de agua de 21.20 % y una Densidad de los Sólidos de 2.38. La información anterior confirma que este suelo presenta succión osmótica nula. En forma adicional la tabla 5.4 presenta la distribución granulométrica del suelo preparado a partir de la mezcla 30 – 70 % (S.L.P. – Gto).

Tabla 5.4 Distribución granulométrica de la mezcla de suelo

Abertura μm	Material que pasa %	Abertura μm	Material que pasa %
2000.00	99.95	26.20	18.30
850.00	80.50	23.50	14.99
425.00	65.42	17.20	12.02
250.00	51.31	13.10	8.92
150.00	41.31	9.50	6.27
75.00	31.19	6.80	4.89
51.90	23.58	4.40	3.57
43.90	20.94	3.00	1.92
31.80	18.96	2.40	1.78

Fuente: Elaboración propia

La representación gráfica de los valores de la tabla 5.4 se muestran en la figura 5.2 en la cual se presenta la distribución de los sólidos que se obtuvieron con la granulometría combinada (mallas e hidrómetro), aquí se puede ver que los diámetros existentes en el suelo están entre 2.4 y 2000 μm y además, la media de estos diámetros es de 221.31 μm y su desviación estándar es de 429.27 μm, por lo tanto se refiere que es posible construir la curva de distribución normal con este suelo.

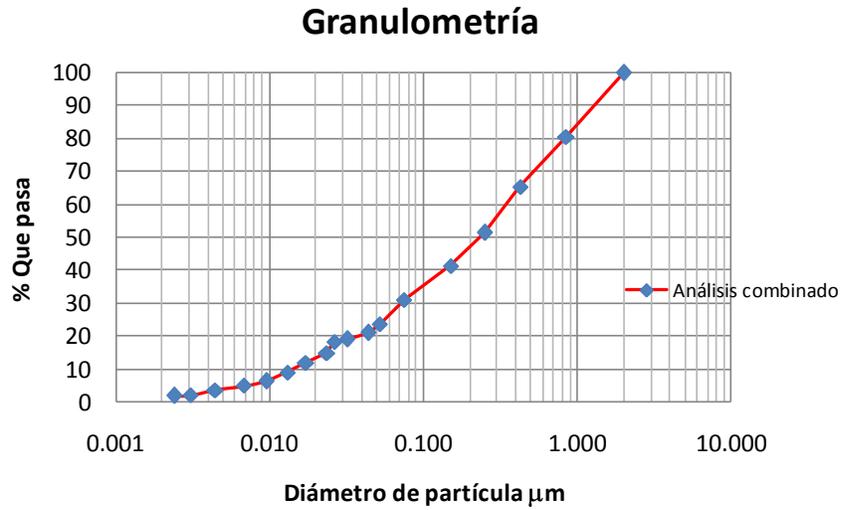


Figura 5.2 Distribución granulométrica de la mezcla de suelo

A partir de la tabla 5.4 se derivó la tabla 5.5 que presenta los diámetros de partícula retenidos y su representación grafica se muestra en la figura 5.3.

Tabla 5.5 Porcentaje retenido de partículas de cada diámetro

Diámetro μm	Retenido Parcial %	Diámetro μm	Retenido Parcial %
2000.00	0.05	26.16	0.66
850.00	19.46	23.53	3.30
425.00	15.08	17.78	2.97
250.00	14.11	13.07	3.10
150.00	10.00	9.48	2.64
75.00	10.13	6.81	1.39
51.91	7.61	4.42	1.32
43.86	2.64	3.03	1.65
31.78	1.98	2.41	0.13

Fuente: Elaboración propia

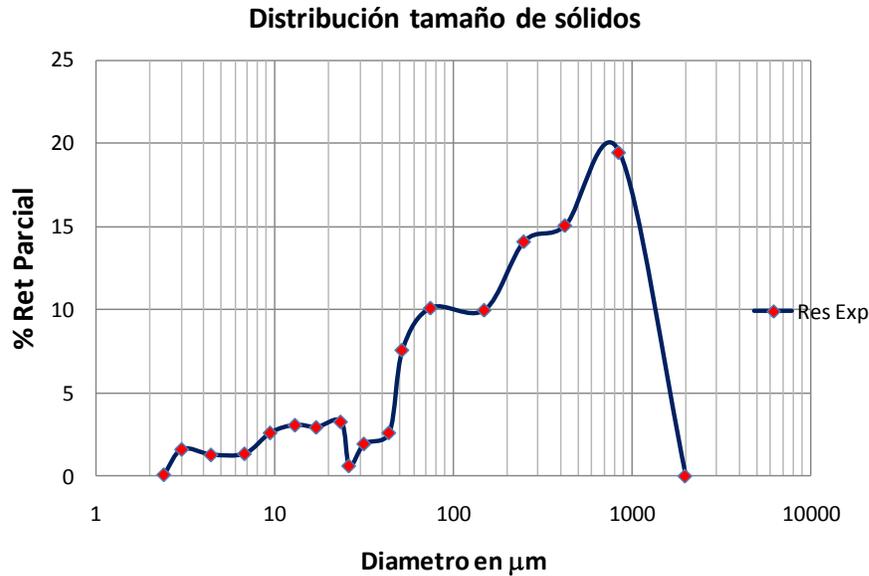


Figura 5.3 Distribución de tamaños de partícula de la mezcla

Con los resultados anteriores se observa la existencia de dos fracciones de suelo (figura 5.3) la de diámetros entre 2.41 – 13.10 μm y la que se presenta entre 13.10 – 2000 μm , éstas representan el 10.23 y 89.77 % de la muestra total, respectivamente.

5.3 Ensaye de consolidación unidimensional con succión controlada

En las tablas 5.6 y 5.7 se presentan las características de los especímenes de suelo utilizados en los ensayos de consolidación con diferentes grados de saturación (diferente succión) en trayectoria de secado y humedecimiento.

Tabla 5.6 Especímenes utilizados en trayectoria de secado

No	Contenido de Agua (ω) %	Relación de vacíos (e)	Peso específico seco máximo (γ_d) kN/m^3	Grado de saturación (G_w) %
1	8.56	0.5725	15.10	35.57
2	4.04	0.5749	15.10	16.73
3	13.90	0.5713	15.10	57.91
4	20.97	0.5813	15.10	85.87

Fuente: Elaboración propia

Aquí se aprecia que los especímenes ensayados en trayectoria de secado presentan el mismo peso específico seco (15.10 kN/m^3), pero con distintos grados de saturación que van desde 16.73 hasta 85.87 %.

Tabla 5.7 Especímenes utilizados en trayectoria de humedecimiento

No	Contenido de Agua (ω) %	Relación de vacíos (e)	Peso específico seco máximo (γ_d) kN/m^3	Grado de saturación (G_w) %
1	3.62	0.5733	15.13	15.04
2	8.19	0.5727	15.13	34.02
3	11.46	0.5733	15.13	47.56
4	21.93	0.5719	15.14	91.27
5	24.02	0.5803	15.06	98.51

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se muestra que los especímenes ensayados en trayectoria de secado presentan el mismo peso específico seco (15.12 kN/m^3), pero con distintos grados de saturación que van desde 15.04 a 98.51 %.

De los ensayos de consolidación practicados a las muestras presentadas en las tablas 5.6 y 5.7, se obtuvieron los esfuerzos de preconsolidación para las trayectorias de secado y humedecimiento en las tablas 5.8 y 5.9.

Tabla 5.8 Esfuerzos de preconsolidación obtenidos en trayectoria de secado

No	Grado de saturación (G_w) %	Esfuerzo de preconsolidación (P_c) KPa	Succión del suelo (ψ) kPa	Radio de poro (R) μm
1	35.57	36.00	1100.00	1.32E-01
2	16.73	40.00	40000.00	3.64E-03
3	57.91	41.00	103.00	1.41E+00
4	85.87	26.00	0.40	3.64E+02

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados de la tabla 5.8 se deduce que los especímenes ensayados en trayectoria de secado experimentaron distintos esfuerzos de preconsolidación, de acuerdo al grado de saturación con el que se ensayaron, y se observan que van desde 26 a 41 kPa, y para grados de saturación van de 85.87 a 16.73 %, respectivamente.

Tabla 5.9 Esfuerzos de preconsolidación obtenidos en trayectoria de humedecimiento

No	Grado de saturación (G_w) %	Esfuerzo de preconsolidación (P_c) KPa	Succión del suelo (ψ) kPa	Radio de poro (R) μm
1	15.04	50.00	45000	3.23E-03
2	34.02	50.00	560	2.60E-01
3	47.56	45.00	105	1.39E+00
4	91.27	30.00	0.03	4.85E+03
5	98.51	12.00	0.0001	1.46E+06

Fuente: Elaboración propia

De igual manera con los resultados de la tabla 5.9 se deduce que los especímenes ensayados en trayectoria de humedecimiento experimentaron distintos esfuerzos de preconsolidación, acorde al grado de saturación con el que se ensayó, y se observa que van desde 12 a 50 kPa y para grados de saturación que van de 98.51 a 15.04 %.

A partir de las tablas 5.8 y 5.9 se construyó la figura 5.4, en la cual se observa la trayectoria que experimentan los esfuerzos de preconsolidación al variar el grado de saturación del espécimen ensayado.

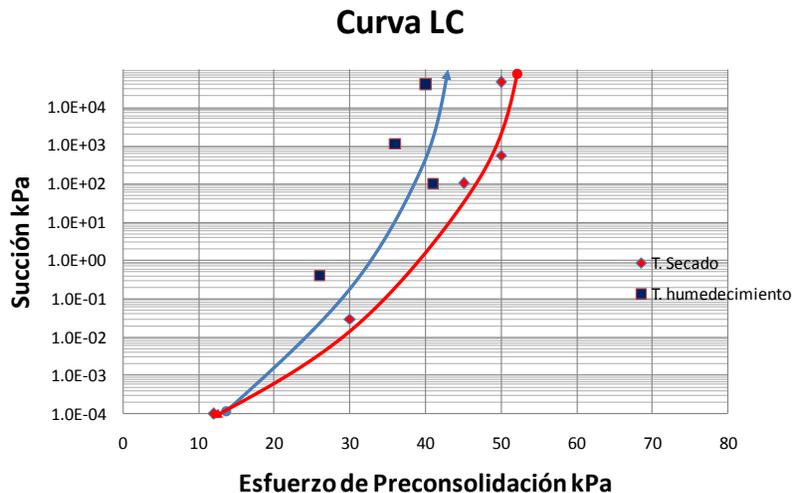


Figura 5.4 Gráfica de succión contra esfuerzo de preconsolidación

Con la figura 5.4 es posible visualizar que cuando el grado de saturación es elevado el esfuerzo de preconsolidación es cercano a 12 kPa, para ambas

trayectorias. Y para succiones elevadas se observa que el esfuerzo de preconsolidación es superior en trayectoria de secado, mientras que en humedecimiento es ligeramente inferior, a decir 52 y 43 kPa, respectivamente. Además, para succiones superiores a los 1×10^5 kPa, la tendencia de ambas trayectorias se comporta asintótica con respecto al eje de la succión.

5.4 Resistencia del suelo al esfuerzo cortante

En la determinación experimental de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se realizaron tres ensayos diferentes: el ensaye de compresión simple, el ensaye triaxial CD con succión controlada y el ensaye triaxial CD en condiciones normales; además se pronosticó la resistencia al esfuerzo cortante a partir del modelo de Bishop (1959).

5.4.1 Resistencia al esfuerzo cortante experimental

5.4.1.1 Ensayes de compresión no confinada (q_u)

En las tablas 5.10 y 5.11 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de compresión no confinada en trayectoria de humedecimiento y secado.

Tabla 5.10 Resultados de los ensayos de compresión no confinada en trayectoria de humedecimiento

N o	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Conte nido de agua (ω) %	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grad o de satura ción (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenid o volumétric o de agua (θ_w)
1	2.10	17.95	14.91	20.27	404.28	85.47	4.77	0.308
2	2.10	17.55	14.91	18.09	511.84	75.90	15.63	0.275
3	2.10	17.26	15.20	13.71	625.31	61.12	32.03	0.213
4	2.10	16.87	15.10	11.83	611.35	51.48	118.90	0.182
5	2.10	16.48	15.00	9.74	806.61	41.48	455.21	0.149
6	2.10	15.99	15.00	6.57	568.11	28.15	3392.62	0.101
7	2.10	15.59	15.00	4.00	649.47	17.22	22998.21	0.061
8	2.10	15.00	14.61	2.69	768.84	10.63	100083.5	0.040
9	2.10	15.10	15.00	0.44	630.93	1.90	390386.4 0	0.007

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.10 se aprecia que la magnitud del esfuerzo desviador crece en la medida que aumenta la succión. Sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo a partir de ese momento. Aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente, los valores del esfuerzo desviador fueron de 404.28 hasta 806.61 kPa para una magnitud de succión entre 4.77 y 455.21 kPa.

Tabla 5.11 Resultados de los ensayos de Compresión no Confinada en trayectoria de secado

N o	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.10	18.63	15.99	16.64	633.76	85.32	43.34	0.310
2	2.10	16.77	14.91	12.62	823.12	53.06	230.33	0.270
3	2.10	16.18	14.91	9.05	724.37	37.79	411.09	0.192
4	2.10	16.08	15.00	7.25	804.14	30.82	1493.25	0.137
5	2.10	15.99	15.20	4.76	707.64	21.27	10468.63	0.111
6	2.10	15.69	14.91	5.28	738.82	22.32	20891.48	0.074
7	2.10	15.30	14.71	4.13	788.34	16.62	40078.06	0.080

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.11 se puede comprobar que la magnitud del esfuerzo desviador crece, en la medida que aumenta la succión, sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se ve reducido significativamente, los valores del esfuerzo desviador registrados fueron de 633.76 hasta 823.12 kPa para una magnitud de succión entre 43.34 y 230.33 kPa.

A partir de la información mostrada en las tablas 5.10 y 5.11, se construyeron las figuras 5.5, 5.6 y 5.7.

Compresión no confinado

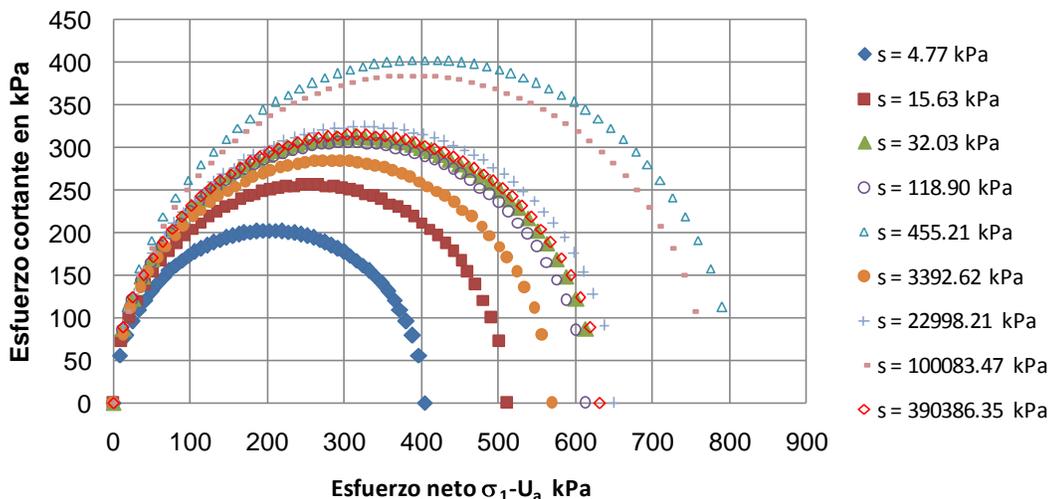


Figura 5.5 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye de compresión no confinada en trayectoria de humedecimiento

En la figura 5.5 se aprecia que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de un suelo sin succión osmótica, pues la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos, y por lo tanto el incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien, al tender a desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Compresión no confinada

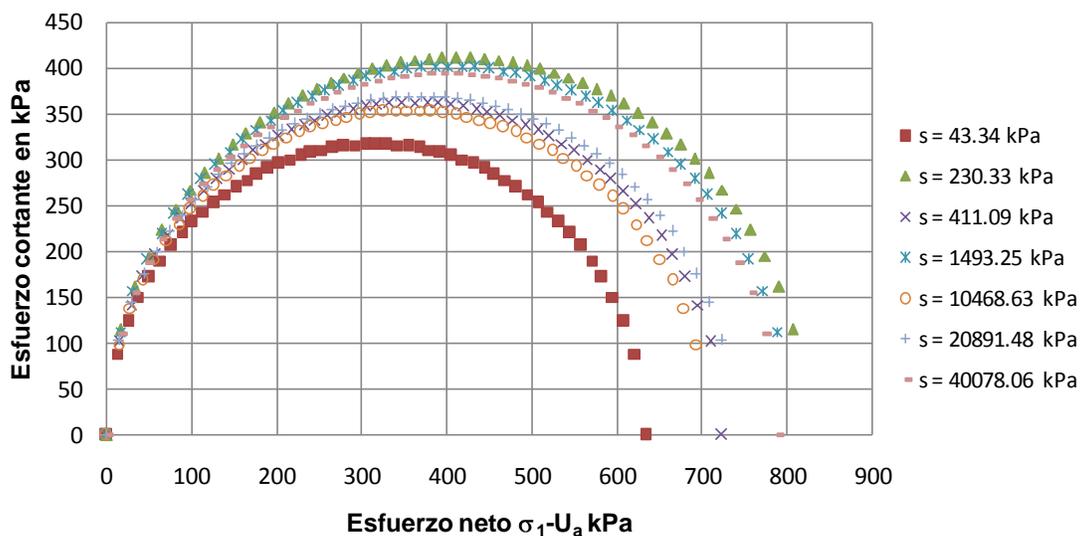


Figura 5.6 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye de compresión no confinada en trayectoria de secado

De forma semejante a la figura 5.5, en la figura 5.6 se muestra que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de un suelo sin succión osmótica, pues la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos, así como el incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien, al desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Esfuerzo cortante - Grado de saturación

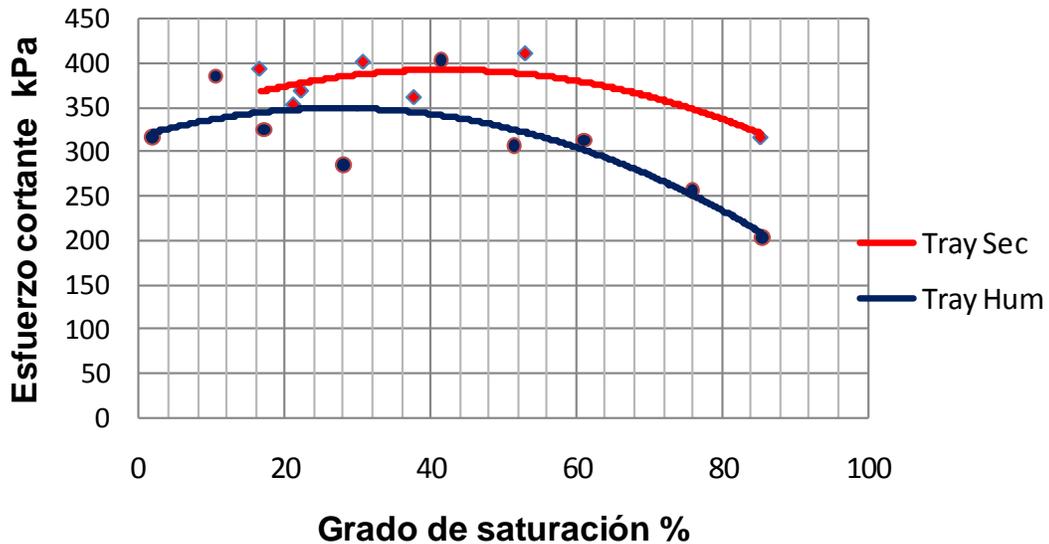


Figura 5.7 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenido del ensaye de compresión no confinada

Como puede verse en la figura 5.7 el comportamiento de la resistencia no es lineal para ambas trayectorias. También se puede apreciar que los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores.

5.4.1.2 Ensayes triaxiales CD con diferentes esfuerzos de confinamiento

5.4.1.2.1 Ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa

En las tablas 5.12 y 5.13 se presentan los resultados obtenidos en los ensayes triaxiales CD con una presión de confinamiento de 50 kPa en trayectoria de humedecimiento y de secado.

Tabla 5.12 Resultados de los ensayos triaxiales (CD) con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de humedecimiento

N o	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.10	15.00	14.81	1.49	50.00	596.47	6.16	419122.19	0.020
2	2.10	15.00	14.81	1.29	50.00	581.88	5.34	264278.24	0.020
3	2.10	15.50	14.91	3.97	50.00	501.81	16.67	47003.14	0.060
4	2.10	15.69	14.81	8.00	50.00	507.25	32.84	6827.98	0.120
5	2.10	16.38	14.61	13.25	50.00	415.00	52.89	1945.75	0.180
6	2.10	17.06	14.71	16.03	50.00	471.22	65.09	89.69	0.240
7	2.10	16.77	14.12	18.53	50.00	386.41	67.70	75.72	0.270
8	2.10	17.65	14.51	21.52	50.00	329.28	84.05	46.67	0.320

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.12 se aprecia que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión, sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente. Los valores del esfuerzo desviador fueron de 329.28 hasta 596.47 kPa para una magnitud de succión entre 46.67 y 419122.19 kPa.

Tabla 5.13 Resultados de los ensayos triaxiales con $\sigma_3 = 50$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado

N o	Relación Altura/ Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.08	18.04	15.00	19.79	50.00	434.89	85.40	1.20	0.304
2	2.10	17.46	14.81	17.50	50.00	450.49	72.69	121.67	0.265
3	2.09	17.16	15.00	14.01	50.00	470.57	60.40	557.32	0.215
4	2.08	16.67	14.91	11.73	50.00	524.06	49.67	731.22	0.179
5	2.09	16.68	15.10	8.29	50.00	513.08	35.17	850.55	0.126
6	2.08	15.79	15.59	4.43	50.00	556.01	19.22	19222.40	0.068
7	2.09	15.59	14.81	3.78	50.00	504.02	16.20	30329.25	0.058
8	2.11	15.20	15.00	3.00	50.00	576.69	12.34	55520.07	0.045
9	2.08	15.40	14.91	2.14	50.00	563.88	9.24	140356.91	0.033

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.13 se observa que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión, sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente. Los valores del esfuerzo desviador fueron de 434.89 hasta 576.69 kPa para un magnitud de succión entre 1.20 y 55520.07 kPa.

A partir de la información mostrada en las tablas 5.12 y 5.13, se construyeron las figuras 5.8, 5.9 y 5.10.

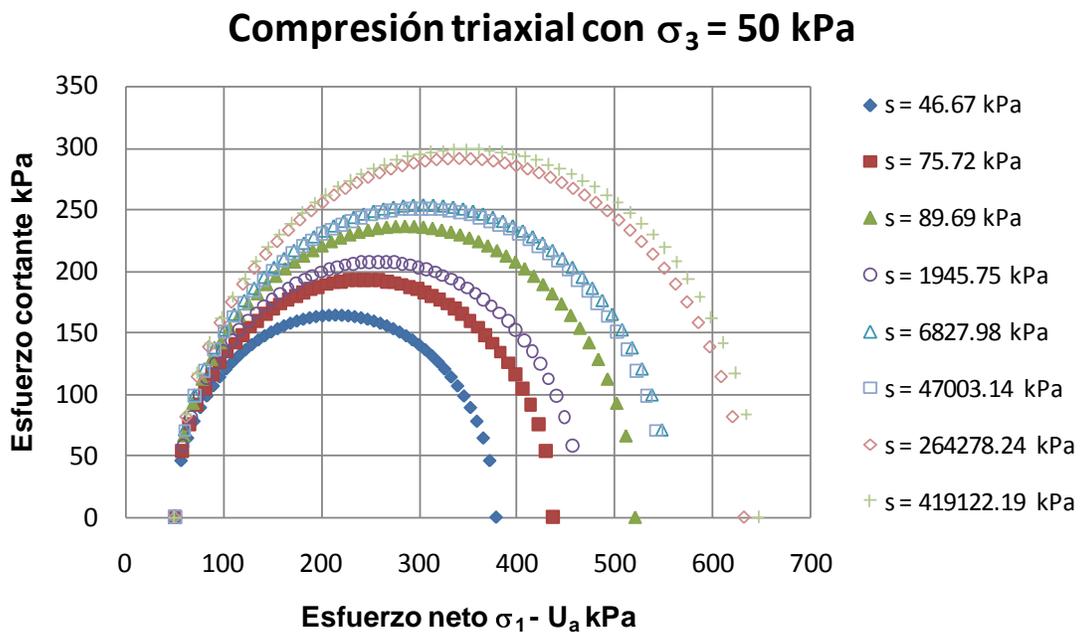


Figura 5.8 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de humedecimiento

En la figura 5.8 se percibe que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de un suelo sin succión osmótica, debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien al tender a desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

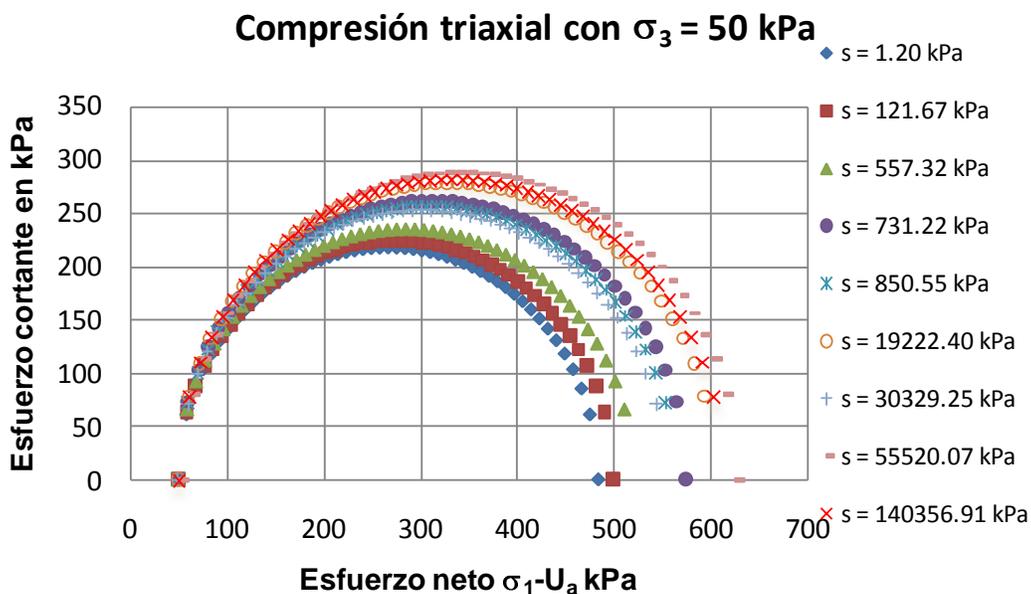


Figura 5.9 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensayo triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa en trayectoria de secado

Con la figura 5.9 se aprecia que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de uno sin succión osmótica. Debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien al tender a desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Esfuerzo cortante - Grado de saturación

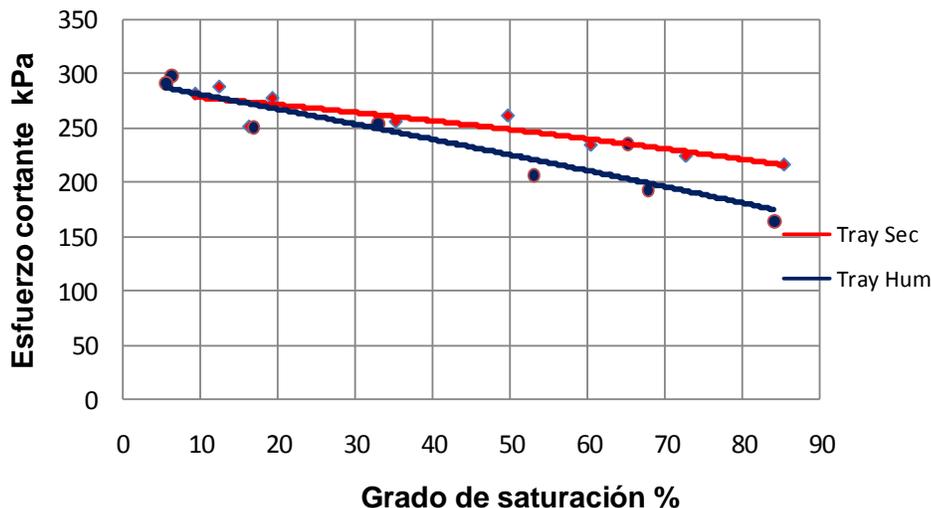


Figura 5.10 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenido del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 50$ kPa

Como puede verse en la figura 5.10 el comportamiento de la resistencia no es lineal para ambas trayectorias, sin embargo se aprecia que los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores.

5.4.1.2.2 Ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa

En las tablas 5.14 y 5.15 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales CD con una presión de confinamiento de 100 kPa en trayectoria de humedecimiento y de secado.

Tabla 5.14 Resultados de los ensayos triaxiales CD con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento

Número	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_s) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (u_f) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.10	17.85	14.81	20.37	100.00	529.53	84.84	9.66	0.310
2	2.10	17.46	14.91	17.23	100.00	544.18	72.38	31.62	0.260
3	2.09	16.97	14.81	14.41	100.00	631.09	59.78	55.27	0.220
4	2.08	16.57	14.81	12.04	100.00	716.65	49.93	83.06	0.180
5	2.09	16.18	14.81	8.94	100.00	760.37	37.17	638.38	0.140
6	2.07	15.89	15.00	5.28	100.00	785.79	22.81	16781.73	0.080

Tabla 5.14 (Continuación) Resultados de los ensayos triaxiales CD con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento

No	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (w) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
7	2.10	15.40	14.81	3.97	100.00	774.06	16.43	33774.85	0.060
8	2.11	15.20	14.71	3.04	100.00	723.08	12.38	91734.31	0.050
9	2.11	15.10	14.81	2.04	100.00	865.99	8.36	170528.17	0.030
10	2.08	15.00	14.91	0.66	100.00	765.57	2.79	366844.66	0.010

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.14 se puede mostrar que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión, sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente, los valores del esfuerzo alcanzados fueron de 529.53 hasta 865.99 kPa para una magnitud de succión entre 84.84 y 170528.17 kPa. Así pues, el esfuerzo desviador crece cuando se incrementa el esfuerzo de confinamiento, este comportamiento es característico de ambas trayectorias.

Tabla 5.15 Resultados de los ensayos triaxiales CD con $\sigma_3 = 100$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado

N o	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (w) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.12	17.65	14.81	18.61	100.00	1311.87	77.39	0.34	0.282
2	2.09	16.97	15.00	13.71	100.00	1665.94	58.28	3.97	0.209
3	2.11	16.38	14.71	11.30	100.00	1697.44	46.06	408.23	0.169
4	2.11	15.89	14.81	6.99	100.00	1665.94	29.11	4843.90	0.106
5	2.10	15.69	14.81	5.78	100.00	1766.87	23.95	24022.01	0.087
6	2.09	15.40	14.91	2.98	100.00	1902.88	12.55	121909.44	0.045
7	2.10	15.00	14.91	0.64	100.00	1731.61	2.71	341450.42	0.009

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla 5.15 se aprecia que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión, sin embargo, el esfuerzo

desviador no aumenta indefinidamente, sino llega a un valor máximo, A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente. Los valores del esfuerzo desviador alcanzados fueron de 1311.87 a 1902.88 kPa para una magnitud de succión entre 0.34 y 121909.44 kPa. Además el esfuerzo desviador crece cuando se incrementa el esfuerzo de confinamiento, este comportamiento es característico de ambas trayectorias.

A partir de la información mostrada en las tablas 5.14 y 5.15, se construyeron las figuras 5.11, 5.12 y 5.13.

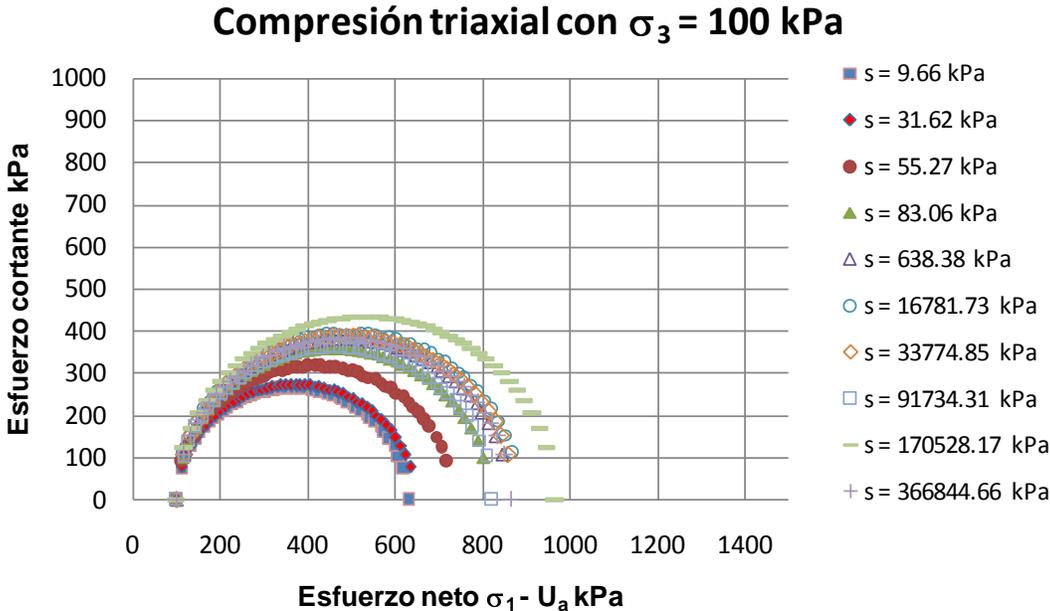


Figura 5.11 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensayo triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa en trayectoria de humedecimiento

Con la figura 5.11 se comprueba que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de uno sin succión osmótica, debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o

bien al desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

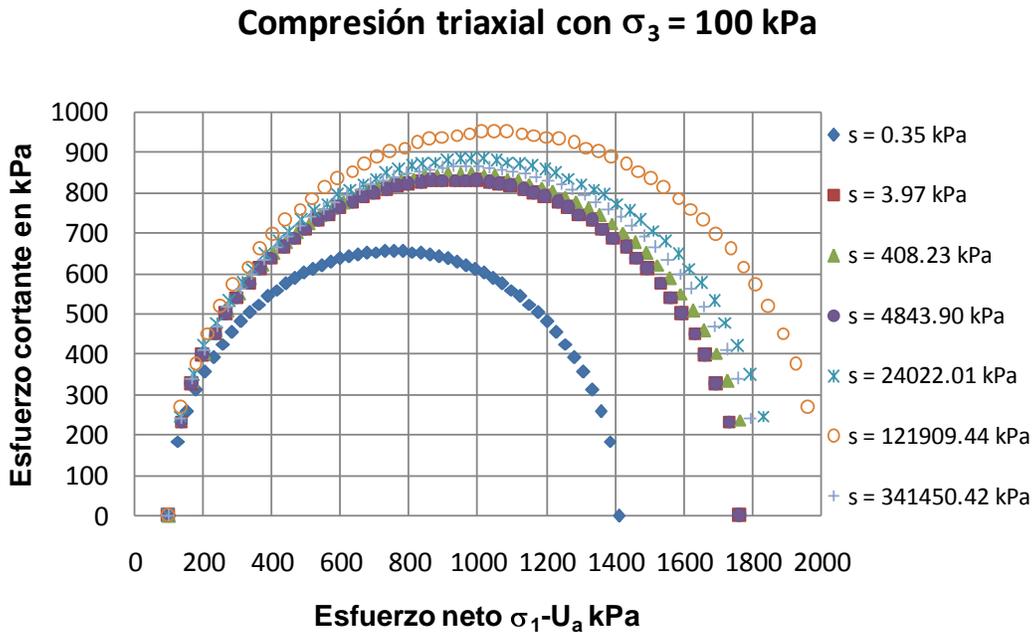


Figura 5.12 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa en trayectoria de secado

En la figura 5.12 se observa que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de uno sin succión osmótica, debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien, al desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Esfuerzo cortante -Grado de saturación

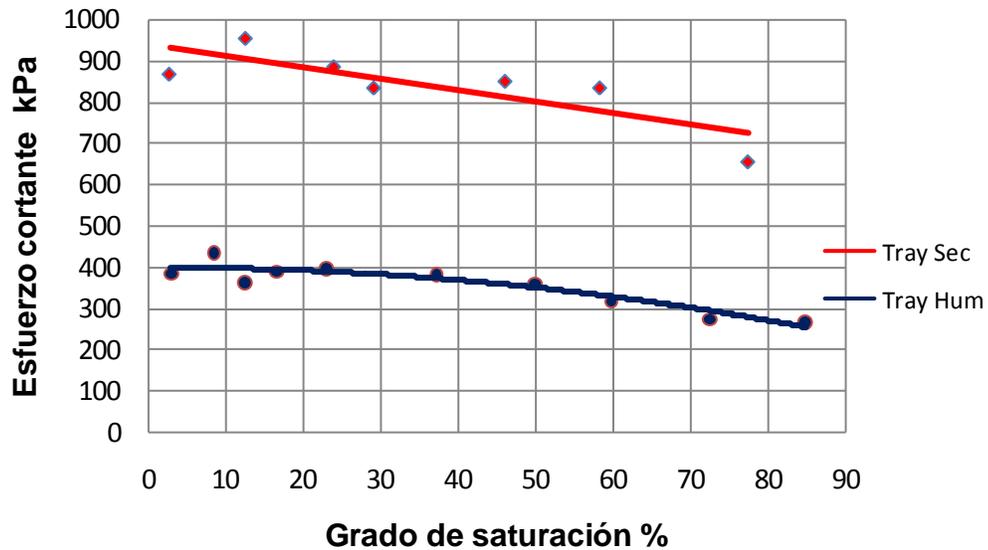


Figura 5.13 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 100$ kPa

Como puede verse en la figura 5.13 el comportamiento de la resistencia no es lineal para ambas trayectorias y además se aprecia que los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores.

5.4.1.2.3 Ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa

En las tablas 5.16 y 5.17 se presentan los resultados obtenidos en los ensayes triaxiales CD para una presión de confinamiento de 150 kPa en la trayectoria de humedecimiento y secado.

Tabla 5.16 Resultados del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa de confinamiento en trayectoria de humedecimiento

Nº	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.07	17.75	15.10	17.18	150.00	1344.07	48.31	1.84	0.265
2	2.08	17.16	15.10	13.51	150.00	1452.84	39.76	16.49	0.208
3	2.06	16.87	15.00	12.90	150.00	1401.36	36.60	37.01	0.197
4	2.10	15.99	14.81	8.16	150.00	1536.16	28.40	302.90	0.123
5	2.07	16.08	15.00	6.97	150.00	1534.14	19.34	3085.79	0.107
6	2.06	15.89	15.17	4.76	150.00	1555.09	13.97	12214.23	0.074
7	2.09	15.40	14.91	3.17	150.00	1534.90	8.59	48470.60	0.048
8	2.08	14.91	14.71	1.26	150.00	1518.30	1.52	296572.4	0.019

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.16 muestra que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión. Sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose, el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente. Los valores del esfuerzo desviador fueron de 1344.07 hasta 1555.09 kPa para un magnitud de succión entre 1.84 y 12214.23 kPa. Así pues, el esfuerzo desviador crece cuando se incrementa el esfuerzo de confinamiento, este comportamiento es característico de ambas trayectorias.

Tabla 5.17 Resultados del ensaye triaxial con $\sigma_3 = 150$ kPa de confinamiento en trayectoria de secado

Nº	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa	Contenido volumétrico de agua (θ_w)
1	2.10	15.50	14.91	3.69	150.00	2354.44	15.57	72471.44	0.060
2	2.10	15.59	14.81	5.62	150.00	2276.81	23.19	25808.57	0.080
3	2.10	15.50	14.91	3.33	150.00	2478.15	14.13	98809.57	0.050
4	2.10	15.59	14.61	6.62	150.00	2239.96	26.40	15147.12	0.100
5	2.10	16.08	14.71	8.83	150.00	2204.67	36.13	1383.90	0.130
6	2.10	16.57	14.91	11.37	150.00	2170.66	47.46	223.30	0.170
7	2.10	16.97	14.71	14.97	150.00	1854.20	61.14	79.12	0.230
8	2.10	17.16	14.51	17.83	150.00	1505.61	70.30	26.09	0.260
9	2.10	17.55	14.71	19.66	150.00	1416.26	79.75	17.01	0.290

Fuente: Elaboración propia

Con base a la información de la tabla 5.17 se infiere que la magnitud del esfuerzo desviador crece al aumentar la succión, sin embargo, el esfuerzo desviador no aumenta indefinidamente, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí, aunque la succión continúe incrementándose el esfuerzo desviador se verá reducido significativamente, los valores del esfuerzo desviador alcanzaron valores entre 1416.26 y 2478.15 kPa para una magnitud de succión de 17.01 y 98809.57 kPa. Además, el esfuerzo desviador crece cuando se incrementa el esfuerzo de confinamiento, este comportamiento es característico de ambas trayectorias.

A partir de la información mostrada en las tablas 5.16 y 5.17, se construyeron las figuras 5.14, 5.15 y 5.16.

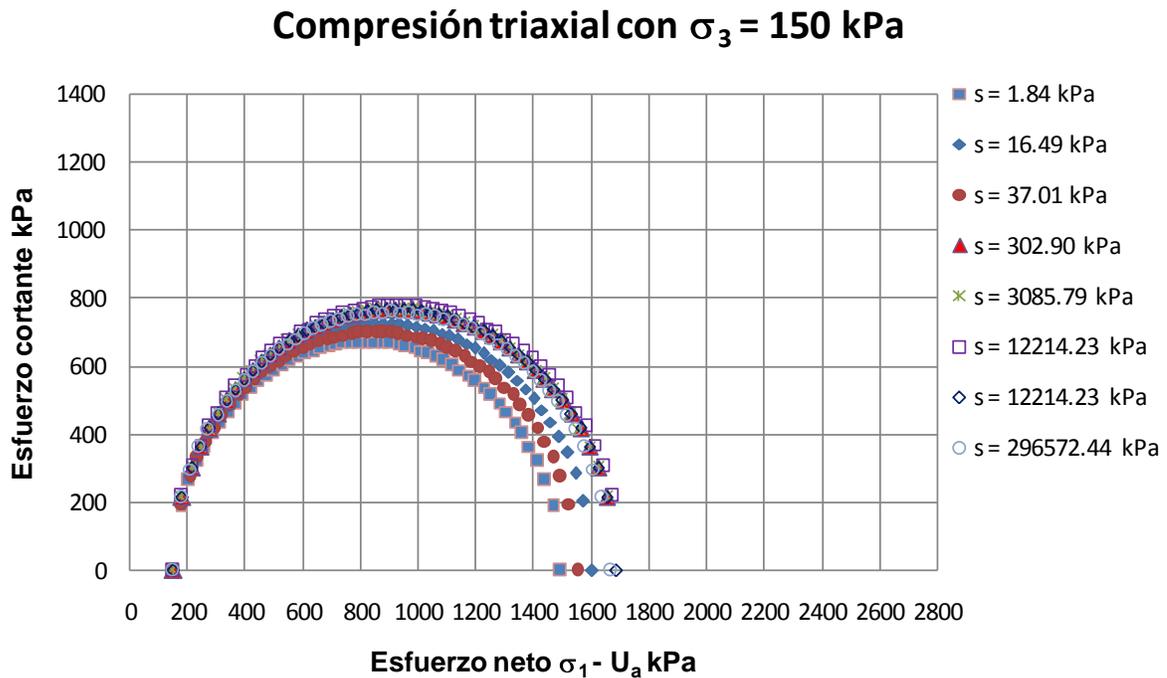


Figura 5.14 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensayo triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento con $\sigma_3 = 150$ kPa

En la figura 5.14 se muestra que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de uno sin succión osmótica, debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, es decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la

resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien, al tender a desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Compresión triaxial con $\sigma_3 = 150$ kPa

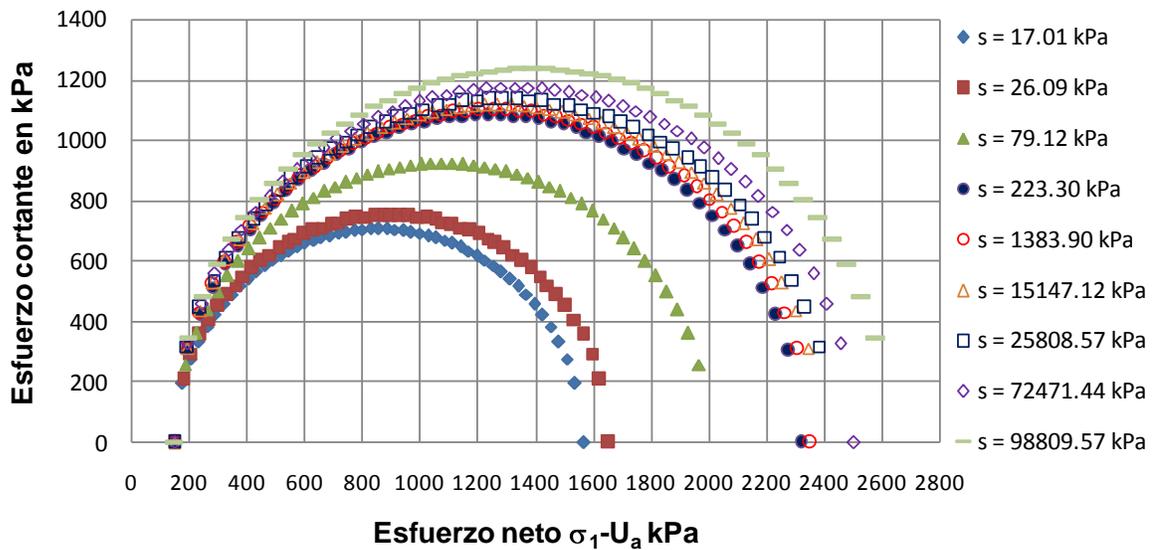


Figura 5.15 Círculos de esfuerzo obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado con $\sigma_3 = 150$ kPa

Con la figura 5.15 se aprecia que el comportamiento mecánico de este suelo corresponde al de uno sin succión osmótica, debido a que la resistencia al esfuerzo desviador aumenta al reducirse el grado de saturación, lo que quiere decir, cuando se inicia el desarrollo de los meniscos y por lo tanto, también al incremento de la resistencia. Sin embargo, al continuar reduciéndose el grado de saturación, o bien al desaparecer los meniscos, la resistencia del suelo también tiende a desaparecer, o lo que es lo mismo, la resistencia que experimenta este suelo se atribuye en mayor medida a la succión mátrica.

Esfuerzo cortante - Grado de saturación

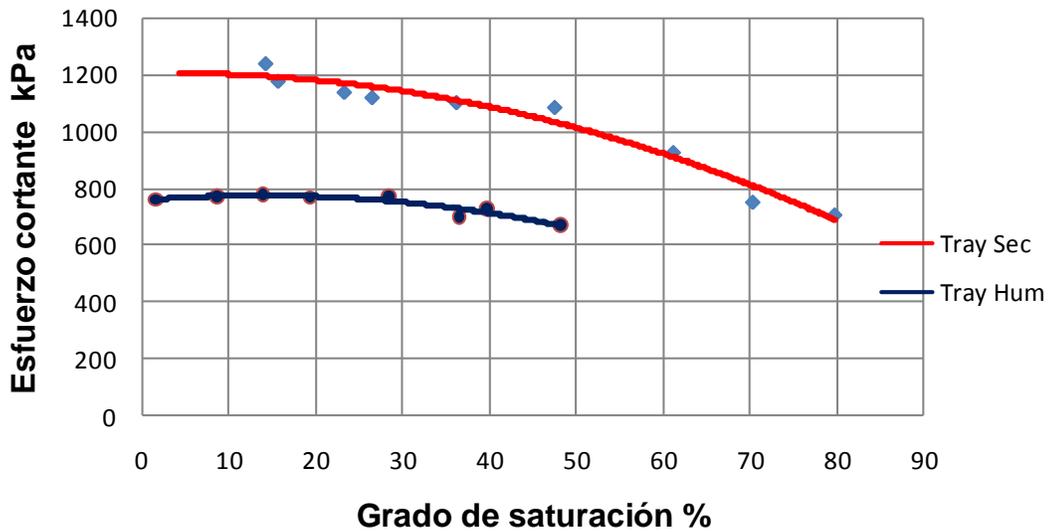


Figura 5.16 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa

Se puede observar que en la figura 5.16 el comportamiento de la resistencia no es lineal para ambas trayectorias. Así pues, se aprecia que los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores.

Además, se utilizaron los esfuerzos desviadores máximos obtenidos en cada trayectoria para determinar la línea de falla en trayectoria de humedecimiento y secado (figuras 5.17 y 5.18).

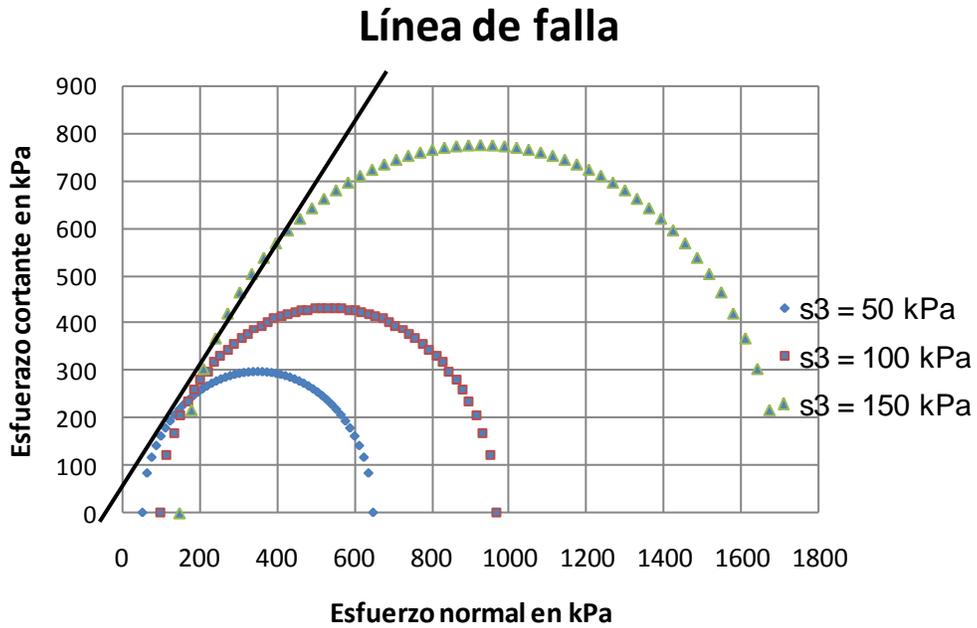


Figura 5.17 Comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en trayectoria de humedecimiento, con succión controlada (esfuerzos máximos)

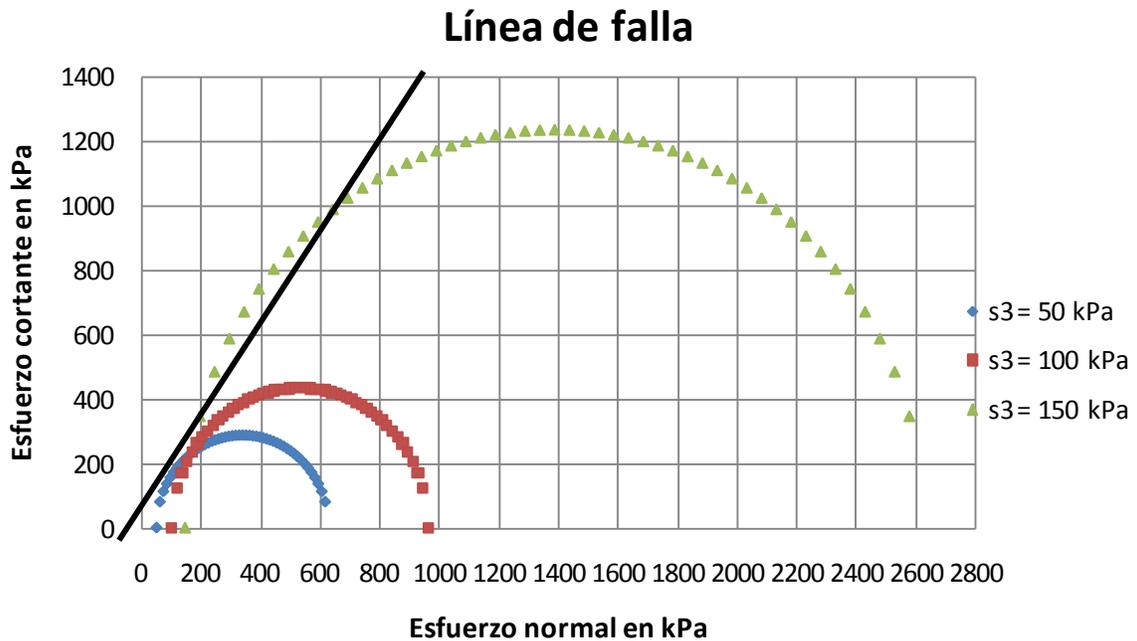


Figura 5.18 Comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en trayectoria de secado, con succión controlada (esfuerzos máximos)

Aquí se pudo apreciar que la cohesión y el ángulo de fricción para las trayectorias de humedecimiento y secado fueron $C = 55$ kPa y $\phi = 57^\circ$ y $C = 45$ kPa y $\phi = 59^\circ$, respectivamente.

5.4.1.3 Ensaye triaxial CD para determinar C' y ϕ'

Al iniciar el ensaye triaxial CD en condiciones normales, los especímenes se saturaron bajo una presión de confinamiento de 110 kPa y una contrapresión de 100 kPa con el drenaje abierto, hasta que el agua comenzó a drenar. Una vez que las muestras quedaron saturadas se cerró su drenaje, se mantuvo la presión de confinamiento y la contrapresión durante 24 hrs. Posteriormente se le incrementaron las presiones de confinamiento a cada espécimen por separado en 50, 100 y 150 kPa, se abrió la bureta para permitir su drenaje y después ser ensayados. Los resultados de los ensayos se presentan en la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Resultados del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa

No	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Contenido de agua final (ω_f) %
1	2.08	18.00	14.91	20.71	50.00	214.20	87.20	26.91
2	2.12	17.73	14.71	20.58	100.00	253.59	83.43	28.19
3	2.09	17.96	14.86	20.84	150.00	484.67	86.96	27.87

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.18 muestra que los especímenes al inicio del ensaye presentaron un peso específico de 17.90 kN/m³ para un grado de saturación 85.86 %; además el esfuerzo desviador se aumentó al incrementar los esfuerzos de confinamiento. Por otro lado, con la información que aparece en la tabla 5.18 se construyó la figura 5.19, en la cual presenta la línea de falla de este suelo.

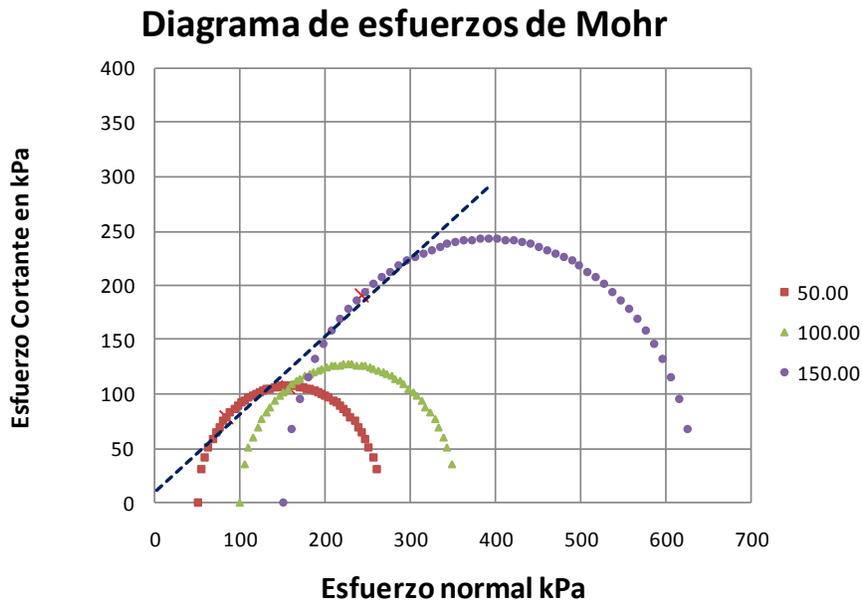


Figura 5.19 Línea de falla del ensaye triaxial CD, $\phi' = 36.37^\circ$ y $C' = 8.965$ kPa, con el suelo en estado saturado

Con esta información se determinó que el ángulo efectivo de fricción es $\phi' = 36.37^\circ$ y la cohesión $C' = 8.965$ kPa. Es importante señalar que el grado de saturación de los especímenes fabricados fue de 85.86 % y que el grado de saturación alcanzado por el suelo durante el proceso de saturación no consiguió el 100 %, sin embargo se mantuvo a los especímenes con presión de confinamiento constante hasta el momento en que drenaron. A partir de ahí, se incrementó su esfuerzo de confinamiento y se pudo apreciar que la presión de poro de la probeta no se incrementó en el mismo valor que lo hizo el esfuerzo de confinamiento, esto demuestra que existieron burbujas de gas presente en la probeta de suelo durante el ensaye. Además, con la información que se presenta en la tabla 5.18, se analizó el comportamiento del esfuerzo desviador contra el esfuerzo normal promedio, tal como se sugiere en la figura 5.20.

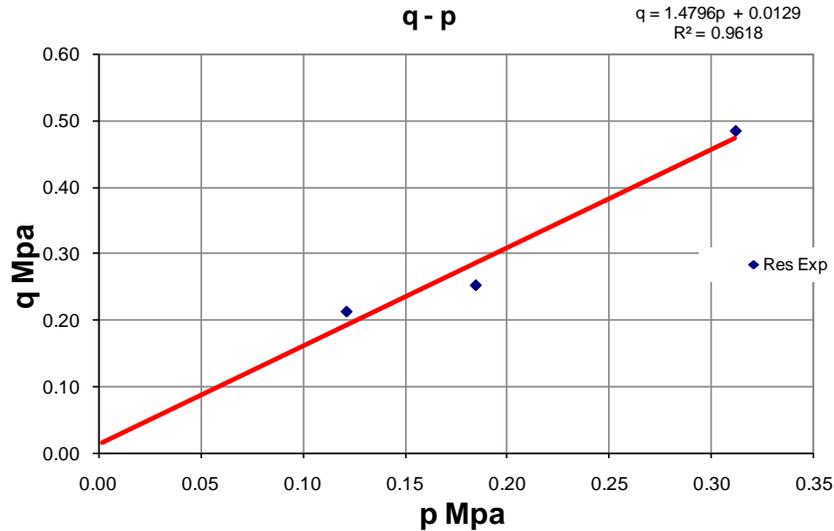


Figura 5.20 Esfuerzo desviador contra esfuerzo normal promedio, $M = 1.52$ para $\phi' = 36.37^\circ$ y $C' = 0.00865$ MPa

Con base a este análisis se determinó que el valor de la pendiente de la curva (M) en la gráfica q-p fue $M = 1.52$, se determinó que $\phi' = 36.37^\circ$ y $C' = 0.00865$ MPa, así pues, fue semejante al obtenido con la gráfica de Mohr-Coulomb correspondiente.

5.4.1.4 Ensaye triaxial CD para un $\sigma_3 = 150$ kPa con succión controlada mediante la bomba peristáltica

En las tablas 5.19 y 5.20 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales CD para una presión de confinamiento de 150 kPa en la trayectoria de humedecimiento y secado.

La finalidad es comparar el comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante obtenido a partir del ensaye triaxial CD en trayectoria de humedecimiento y secado para un esfuerzo de confinamiento de 150 kPa y con control de succión, se muestran los resultados obtenidos en las tablas 5.19 y 5.20. Se menciona que en este caso la succión del suelo se indujo mediante un sistema que proporciona

un flujo de vapor con succión osmótica conocida, así que, el vapor se circuló mediante una bomba peristáltica (ver el Anexo C).

Tabla 5.19 Resultados del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento

No	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa
1	2.05	17.94	14.96	19.93	150.00	1123.66	84.61	42.09
2	2.06	17.24	14.84	16.16	150.00	1406.25	67.18	440.36
3	2.06	17.18	14.88	15.49	150.00	1525.36	64.84	1409.60
4	2.04	16.76	14.85	12.89	150.00	1603.72	53.61	4295.56
5	2.06	15.68	14.84	5.64	150.00	1550.71	23.44	43639.87
6	2.09	14.98	14.86	0.87	150.00	1534.35	3.60	44070.64

Fuente: Elaboración propia

Con base en la información mostrada en la tabla 5.19 se confirma que el esfuerzo desviador crece en la medida que lo hace la succión, sin embargo, su incremento no es indefinido, sino que llega a un valor máximo. A partir de ahí aunque la succión continúe creciendo el valor del esfuerzo desviador se reduce. Aquí el valor máximo del esfuerzo desviador es de 1603.72 kPa y los mínimos a ambos lados son 1123.66 y 1534.35 kPa, en lado saturado y seco, respectivamente.

Tabla 5.20 Resultados del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado

No	Relación Altura/Diámetro (h/d)	Peso específico de la muestra (γ_m) kN/m ³	Peso específico de los sólidos (γ_d) kN/m ³	Contenido de agua (ω) %	Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kPa	Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) kPa	Grado de saturación (G_w) %	Succión (ψ) kPa
1	2.05	17.88	14.85	20.41	150.00	1360.51	84.97	13.23
2	2.04	17.47	14.88	17.41	150.00	1460.27	72.83	415.74
3	2.05	17.36	14.89	16.58	150.00	1533.77	69.52	959.88
4	2.07	16.47	14.83	11.09	150.00	1583.97	46.00	1184.63
5	2.07	16.13	14.96	7.81	150.00	1481.82	33.16	10683.08
6	2.09	15.51	14.83	4.59	150.00	1413.53	19.02	39158.15

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento del suelo es semejante en ambas trayectorias, pero los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores a los obtenidos en trayectoria de humedecimiento. El valor máximo del esfuerzo desviador es de 1583.97 kPa y los mínimos a ambos lados son 1360.51 y 1413.54 kPa, en lado saturado y seco, respectivamente. Aquí, también se aprecia que cuando la succión se induce mediante el sistema de succión controlada las trayectorias de la resistencia son más uniformes.

Con la información presentada en las tablas 5.19 y 5.20 se obtuvieron las figuras 5.21, 5.22 y 5.23.

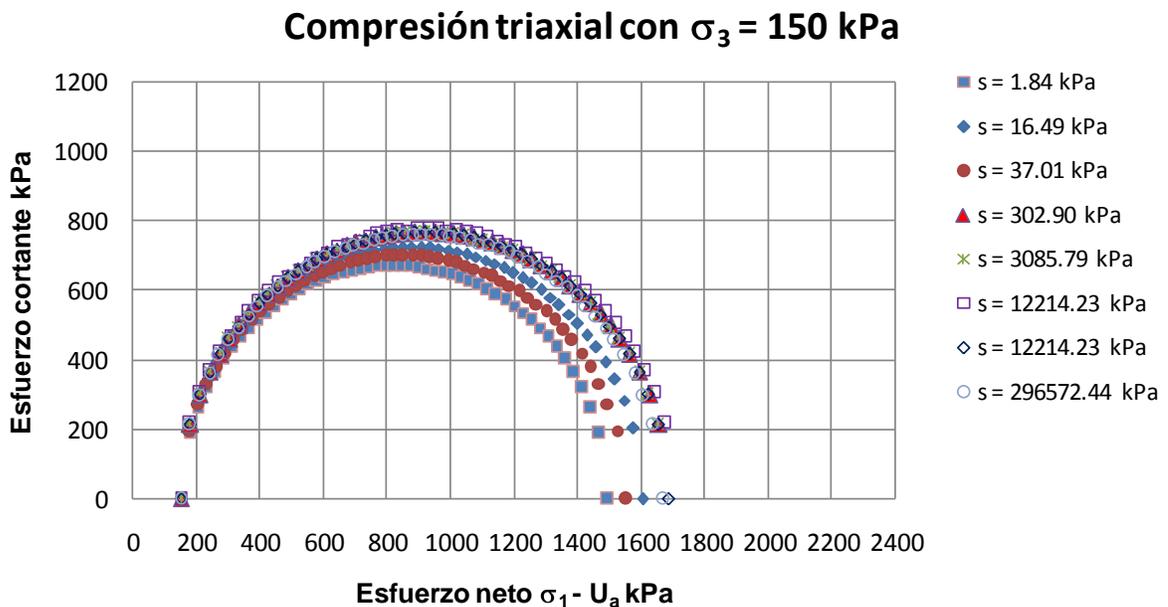


Figura 5.21 Círculo de esfuerzo obtenidos mediante el ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de humedecimiento, con succión controlada mediante la bomba peristáltica

En trayectoria de humedecimiento también se puede ver el ascenso y descenso de los esfuerzos desviadores, al variar la succión.

Compresión triaxial con $\sigma_3 = 150$ kPa

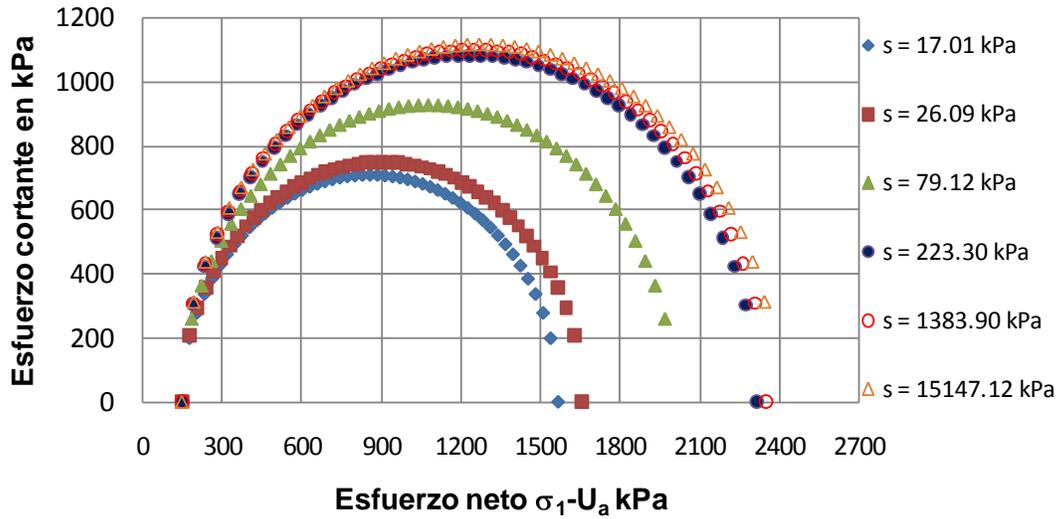


Figura 5.22 Círculo de esfuerzo obtenidos mediante el ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa en trayectoria de secado, con succión controlada mediante la bomba peristáltica

En trayectoria de secado también se aprecia el ascenso y descenso de los esfuerzos desviadores al modificarse la succión. Por otro lado, en la figura 5.23 se observa la trayectoria del esfuerzo desviador que siguió el suelo en ambas trayectorias.

Esfuerzo cortante-Grado de saturación

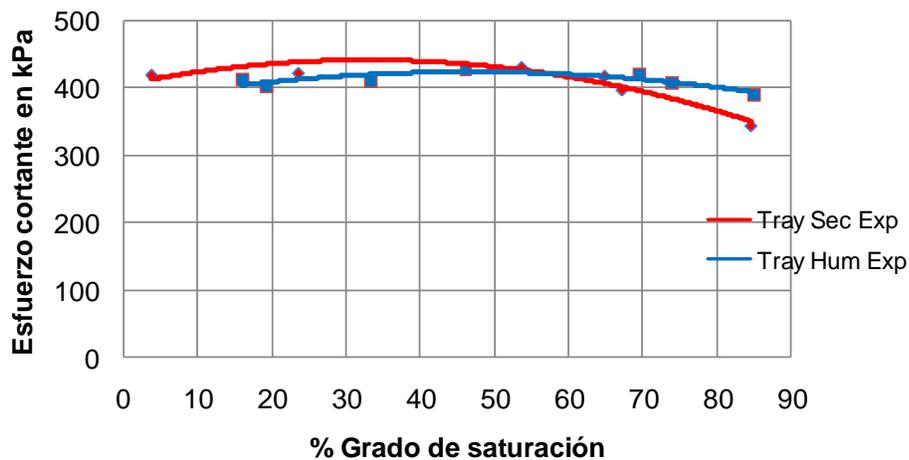


Figura 5.23 Comportamiento del esfuerzo cortante en función del grado de saturación obtenidos del ensaye triaxial CD con $\sigma_3 = 150$ kPa, con succión controlada mediante la bomba peristáltica

Además, como se ve en la figura 5.23 el comportamiento de la resistencia no es lineal para ambas trayectorias, lo que significa que esta variación obedece al efecto de la succión mátrica, también se aprecia que los esfuerzos desviadores obtenidos en trayectoria de secado son superiores, aunque sus valores máximos no coinciden con el mismo grado de saturación.

5.5 Curva característica

5.5.1 Resultados experimentales de la curva característica

Los resultados obtenidos en el ensaye de la curva característica en las trayectorias humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.21 y 5.22.

Tabla 5.21 Curva característica en trayectoria de Humedecimiento

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %
1	1.00	88.00	15	2000.00	31.00
2	2.00	87.00	16	4000.00	27.00
3	4.00	86.00	17	7000.00	24.50
4	7.00	84.00	18	10000.00	23.00
5	10.00	82.00	19	20000.00	19.00
6	13.00	80.00	20	40000.00	16.00
7	20.00	77.00	21	70000.00	12.50
8	30.00	70.00	22	100000.00	10.50
9	40.00	63.00	23	200000.00	7.50
10	60.00	57.00	24	300000.00	4.00
11	100.00	51.00	25	500000.00	3.00
12	300.00	41.00	26	600000.00	2.00
13	600.00	36.50	27	800000.00	1.00
14	1000.00	34.00	28	1000000.00	0.50

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.21 se puede ver la variación del grado de saturación del suelo y la succión que este suelo desarrolló, desde un estado saturado hasta seco.

Tabla 5.22 Curva característica en trayectoria de secado

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %
1	1.00	88.00	14	4000.00	30.50
2	2.00	87.00	15	6000.00	28.00
3	4.00	86.00	16	10000.00	26.00
4	7.00	84.00	17	20000.00	23.00
5	10.00	82.00	18	40000.00	19.00
6	20.00	78.00	19	70000.00	16.00
7	50.00	50.00	20	100000.00	12.00
8	100.00	61.50	21	200000.00	7.50
9	200.00	52.50	22	300000.00	4.00
10	400.00	400.00	23	500000.00	3.00
11	700.00	700.00	24	600000.00	2.00
12	1000.00	1000.00	25	800000.00	1.00
13	3000.00	3000.00	26	1000000.00	0.50

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.22 se aprecia la variación del grado de saturación del suelo y la succión que este suelo desarrolló, desde un estado seco hasta saturado.

La información presentada en las tablas 5.21 y 5.22, describen la curva característica de este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento, mostrada en la figura 5.24.

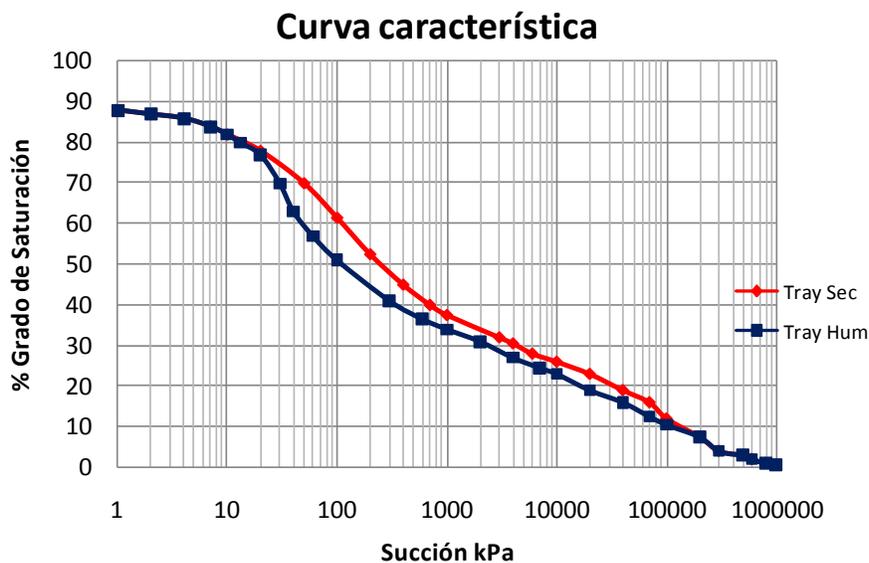


Figura 5.24 Curvas características del suelo en trayectoria de secado y humedecimiento

Con la figura 5.24 se puede conocer que la curva característica en trayectoria de secado queda ubicada arriba de la curva característica en trayectoria de humedecimiento, así mismo ambas curvas cubren el rango de succión desde 1 a 1×10^6 kPa para grados de saturación entre 0 y el 90 %.

5.6 Curvas de distribución porosimétrica

A partir del ensaye porosimétricos practicado al suelo, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.23.

Tabla 5.23 Porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen

Diámetro μm	Volumen Relativo
0.10	0.001
1.00	0.018
2.00	0.033
3.00	0.043
4.00	0.052
5.00	0.056
6.00	0.058
7.00	0.060
8.00	0.061
9.00	0.060
10.00	0.059
20.00	0.057
30.00	0.068
40.00	0.115
50.00	0.220
60.00	0.050

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.23 muestran que los diámetros identificados en el suelo estudiado están entre 0.10 μm hasta 60 μm , además el diámetro de poro medio es de 15.94 μm y su desviación estándar es de 18.83 μm .

A partir de la información presentada en la tabla 5.23 fue posible obtener los resultados que se presentan en la figura 5.25.

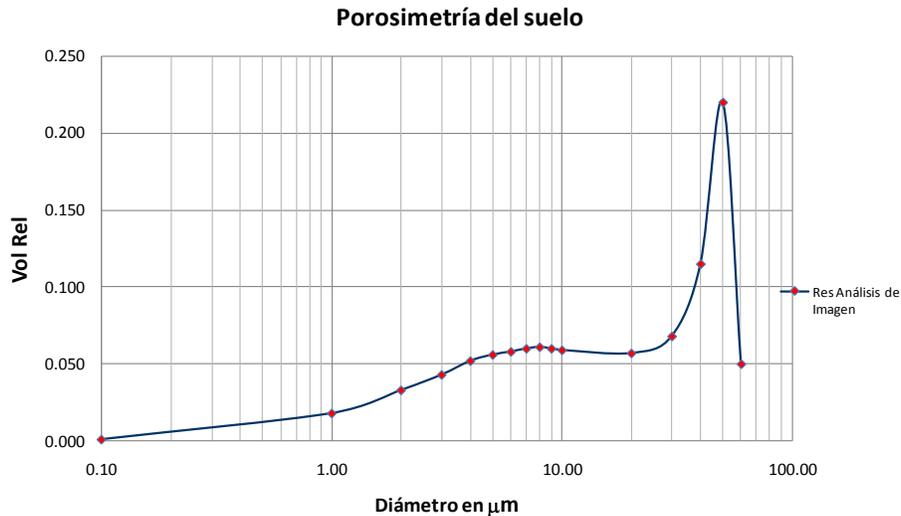


Figura 5.25 Porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen

La información porosimétrica obtenida por medio del análisis de imagen revela la bimodalidad de los tamaños de poro, los tamaños fueron de 0.10 a 20 μm y entre 20 a 60 μm .

5.7 Resultados del modelo sólido poroso

A continuación se muestra la información obtenida mediante el Modelo Sólido Poroso, del cual se presenta información teórica de la curva característica, Fracción saturada del suelo, Grado de saturación no saturado, Parámetro χ , Esfuerzo cohesivo, Esfuerzo Cortante y Porosimetría de los cuales se presentan los resultados a continuación.

5.7.1 Curva característica teórica

Los resultados obtenidos de la curva característica teórica en las trayectorias humedecimiento y secado se observan en las tablas 5.24 y 5.25.

Tabla 5.24 Curva característica teórica en trayectoria de humedecimiento

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %
1	967624.00	2.79	25	18.14	75.70	49	4.54	84.38
2	725718.00	2.88	26	16.13	76.87	50	4.40	84.47
3	483812.00	3.32	27	14.51	77.85	51	4.27	84.55
4	362859.00	4.06	28	13.19	78.67	52	4.15	84.62
5	290287.20	4.90	29	12.10	79.38	53	4.03	84.69
6	96762.40	8.58	30	11.16	79.98	54	3.92	84.76
7	58057.44	9.61	31	10.37	80.51	55	3.82	84.82
8	36285.90	10.64	32	9.68	80.97	56	3.72	84.88
9	29028.72	11.30	33	9.07	81.37	57	3.63	84.93
10	9676.24	16.78	34	8.54	81.73	58	3.54	84.98
11	5805.74	20.38	35	8.06	82.05	59	3.46	85.03
12	3628.59	23.79	36	7.64	82.34	60	3.38	85.07
13	2902.87	25.29	37	7.26	82.60	61	3.30	85.12
14	967.62	33.39	38	6.91	82.83	62	3.23	85.16
15	580.57	36.17	39	6.60	83.04	63	3.16	85.20
16	362.86	39.20	40	6.31	83.23	64	3.09	85.23
17	290.29	40.90	41	6.05	83.41	65	3.02	85.27
18	145.14	47.90	42	5.81	83.57	66	2.96	85.30
19	72.57	57.30	43	5.58	83.71	67	2.90	85.33
20	48.38	63.20	44	5.38	83.85	68	2.85	85.36
21	36.29	67.26	45	5.18	83.97	69	2.79	85.39
22	29.03	70.23	46	5.00	84.09	70	2.74	85.42
23	24.19	72.49	47	4.84	84.19	71	2.69	85.45
24	20.73	74.27	48	4.68	84.29	72	2.64	85.47

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.24 se puede distinguir la variación del grado de saturación del suelo y la succión que este suelo desarrolló, desde un estado saturado hasta seco.

Tabla 5.25 Curva característica teórica en trayectoria de Secado

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %	No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo (G_w) %
1	967624.00	2.79	25	18.14	82.13	49	4.54	84.98
2	725718.00	2.88	26	16.13	82.46	50	4.40	85.02
3	483812.00	3.32	27	14.51	82.75	51	4.27	85.05
4	362859.00	4.08	28	13.19	82.99	52	4.15	85.08
5	290287.20	5.04	29	12.10	83.21	53	4.03	85.11
6	96762.40	13.84	30	11.16	83.40	54	3.92	85.14
7	58057.44	15.51	31	10.37	83.57	55	3.82	85.17
8	36285.90	16.71	32	9.68	83.72	56	3.72	85.19
9	29028.72	17.41	33	9.07	83.86	57	3.63	85.22
10	9676.24	23.41	34	8.54	83.98	58	3.54	85.24
11	5805.74	27.47	35	8.06	84.09	59	3.46	85.26
12	3628.59	31.35	36	7.64	84.29	60	3.38	85.28
13	2902.87	33.07	37	7.62	84.29	61	3.30	85.30
14	967.62	43.31	38	6.91	84.37	62	3.23	85.32
15	580.57	48.70	39	6.60	84.45	63	3.16	85.34
16	362.86	57.36	40	6.31	84.52	64	3.09	85.36
17	290.29	64.18	41	6.05	84.59	65	3.02	85.37
18	145.14	75.51	42	5.81	84.65	66	2.96	85.39
19	72.57	77.83	43	5.58	84.71	67	2.90	85.40
20	48.38	79.13	44	5.38	84.76	68	2.85	85.42
21	36.29	80.03	45	5.18	84.81	69	2.79	85.43
22	29.03	80.73	46	5.00	84.86	70	2.74	85.45
23	24.19	81.29	47	4.84	84.90	71	2.69	85.46
24	20.73	81.75	48	4.68	84.94	72	2.64	85.47

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.25 se puede ver la variación del grado de saturación del suelo y la succión que este suelo desarrolló, desde un estado seco hasta saturado.

La información presentada en las tablas 5.24 y 5.25, describe la curva característica teórica de este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento (figura 5.26).

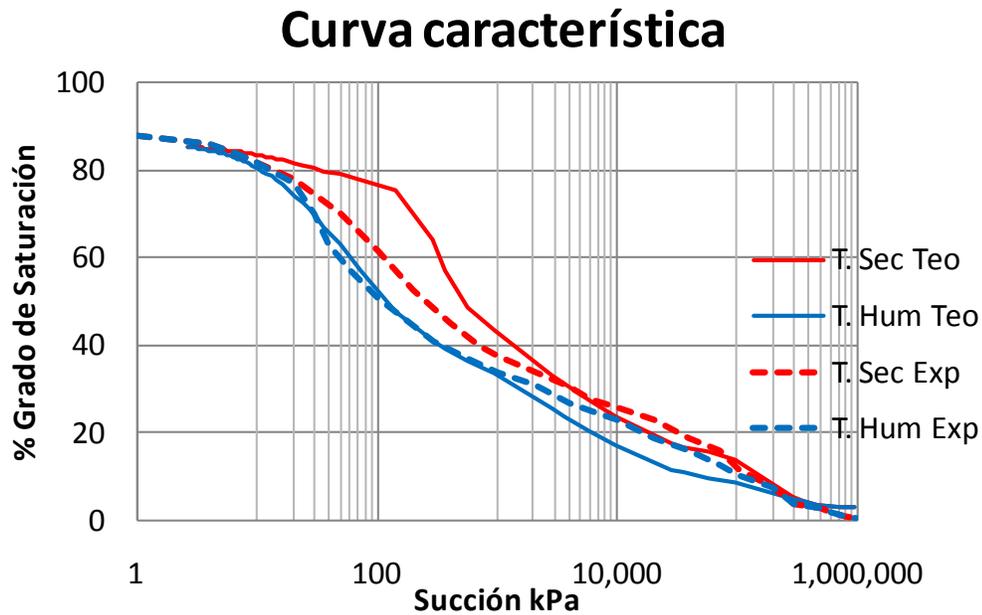


Figura 5.26 Curva característica teórica obtenida con M.P.

Con la figura 5.26 se puede advertir que la curva característica en trayectoria de secado queda ubicada arriba de la curva característica en trayectoria de humedecimiento, así mismo ambas curvas cubren el rango de succión desde 1 a 1×10^6 kPa para grados de saturación entre 0 y 90 %. Por otro lado, el comportamiento de la curva característica teórica obtenida mediante el Modelo Probabilista presenta mejor aproximación con los resultados experimentales en comparación, que con los resultados obtenidos con el modelo de Fredlund *et al.*, (1978). Es así como se confirma que mediante la distribución normal de sitios y enlaces es posible reproducir la estructura del suelo.

5.7.2 Fracción saturada

Los resultados obtenidos de la fracción saturada a partir del Modelo Sólido Poroso en las trayectorias humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.26 y 5.27.

Tabla 5.26 Fracción saturada en trayectoria de Humedecimiento

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)
1	0.00	0.0000	25	88.18	0.1734	49	98.68	0.7951
2	0.10	0.0001	26	89.60	0.2076	50	98.79	0.8090
3	0.64	0.0004	27	90.78	0.2429	51	98.88	0.7951
4	1.53	0.0009	28	91.78	0.2785	52	98.79	0.8090
5	2.55	0.0016	29	92.63	0.3139	53	99.06	0.8471
6	7.00	0.0043	30	93.36	0.3487	54	99.14	0.8586
7	8.25	0.0050	31	94.00	0.3827	55	99.21	0.8696
8	9.49	0.0058	32	94.56	0.4156	56	99.28	0.8802
9	10.29	0.0063	33	95.05	0.4473	57	99.35	0.8903
10	16.92	0.0103	34	95.48	0.4777	58	99.41	0.8999
11	21.27	0.0130	35	95.87	0.5068	59	99.47	0.9091
12	25.40	0.0155	36	96.21	0.5346	60	99.52	0.9180
13	27.21	0.0166	37	96.52	0.5612	61	99.57	0.9264
14	37.01	0.0226	38	96.81	0.5865	62	99.62	0.9345
15	40.38	0.0246	39	97.06	0.6105	63	99.67	0.9423
16	44.03	0.0268	40	97.29	0.6334	64	99.71	0.9498
17	46.10	0.0281	41	97.50	0.6552	65	99.76	0.9570
18	54.56	0.0334	42	97.70	0.6759	66	99.90	0.9639
19	65.93	0.0418	43	97.87	0.6956	67	99.83	0.9705
20	73.07	0.0518	44	98.04	0.7143	68	99.87	0.9769
21	77.98	0.0664	45	98.19	0.7321	69	99.91	0.9830
22	81.57	0.0866	46	98.33	0.7490	70	99.94	0.9889
23	84.30	0.1118	47	98.45	0.7651	71	99.97	0.9945
24	86.45	0.1411	48	98.57	0.7805	72	100.00	1.0000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.26 se puede ver la variación de la fracción saturada en función del grado de saturación desde seco a saturado.

Tabla 5.27 Fracción saturada en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Fracción Saturada (f ^s)
1	0.00	0.0000	25	95.96	0.9939	49	99.41	0.9993
2	0.10	0.0001	26	96.36	0.9947	50	99.45	0.9994
3	0.64	0.0004	27	96.70	0.9953	51	99.49	0.9994
4	1.56	0.0009	28	97.00	0.9958	52	99.53	0.9995
5	2.72	0.0016	29	97.26	0.9963	53	99.57	0.9995
6	13.36	0.0058	30	97.50	0.9966	54	99.60	0.0006
7	15.39	0.0068	31	97.70	0.9970	55	99.64	0.9996
8	16.83	0.0076	32	97.89	0.9972	56	99.67	0.9996
9	17.68	0.0081	33	98.05	0.9975	57	99.70	0.9997
10	24.95	0.0140	34	98.20	0.9977	58	99.72	0.9997

Tabla 5.27 (Continuación) Fracción saturada en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Fracción Saturada (f^s)	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Fracción Saturada (f^s)	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Fracción Saturada (f^s)
11	29.85	0.0220	35	98.34	0.9979	59	99.75	0.9997
12	34.54	0.0360	36	98.46	0.9981	60	99.78	0.9998
13	36.62	0.0452	37	98.57	0.9982	61	99.80	0.9998
14	49.01	0.1507	38	98.67	0.9984	62	99.82	0.9998
15	55.52	0.2347	39	98.77	0.9985	63	99.84	0.9998
16	66.00	0.4108	40	98.86	0.9986	64	99.86	0.9999
17	74.25	0.5982	41	98.94	0.9987	65	99.88	0.9999
18	87.95	0.9745	42	99.01	0.9988	66	99.90	0.9999
19	90.76	0.9815	43	99.08	0.9989	67	99.92	0.9999
20	92.33	0.9857	44	99.15	0.9990	68	99.94	0.9999
21	93.42	0.9885	45	99.21	0.9991	69	99.95	1.0000
22	94.27	0.9904	46	99.26	0.9991	70	99.97	1.0000
23	94.94	0.9919	47	99.32	0.9992	71	99.99	1.0000
24	95.50	0.9930	48	99.36	0.9993	72	100.00	1.0000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.27 se puede ver la variación de la fracción saturada en función del grado de saturación, desde saturado a seco.

La información presentada en las tablas 5.26 y 5.27 describe la fracción saturada de este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento.

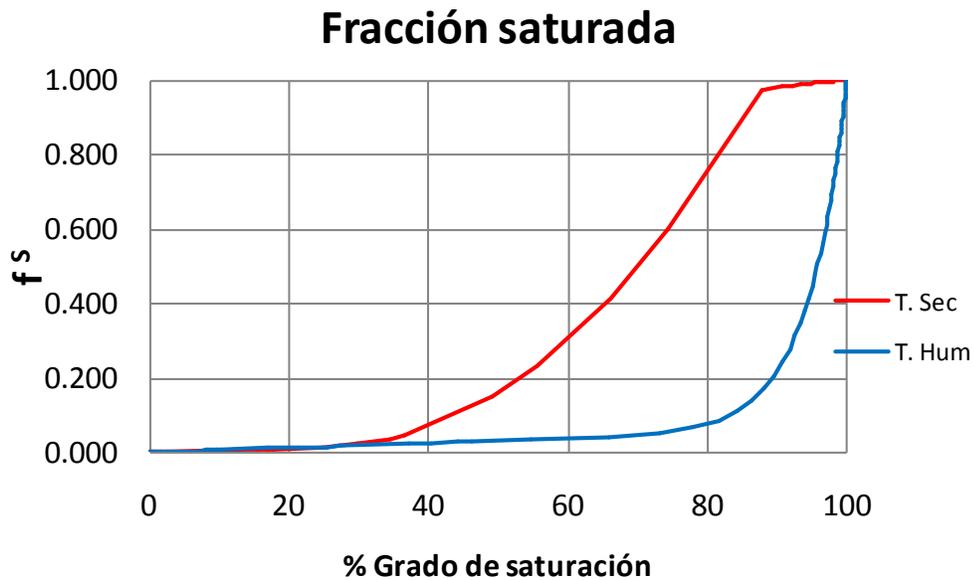


Figura 5.27 Curva de la Fracción saturada del suelo, obtenido con M.P.

En la figura 5.27 se ve que la curva de la Fracción Saturada en trayectoria de secado queda ubicada arriba de la curva de la Fracción Saturada en trayectoria de humedecimiento. Además, se aprecia que varía marcadamente del 30 al 100 % del grado de saturación, a decir desde 0.022 a 1.0.

5.7.3 Grado de saturación no saturado

Los resultados obtenidos del Grado de Saturación no Saturado a partir del Modelo Sólido Poroso en las trayectorias humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.28 y 5.29.

Tabla 5.28 Grado de saturación no saturado del suelo en trayectoria de humedecimiento

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)
1	0.00	0.00E+00	25	88.18	9.67E-06	49	98.68	1.28E-05
2	0.10	4.55E-08	26	89.60	1.00E-05	50	98.79	1.28E-05
3	0.64	2.77E-07	27	90.78	1.03E-05	51	98.88	1.28E-05
4	1.53	6.68E-07	28	91.78	1.06E-05	52	98.97	1.28E-05
5	2.55	1.11E-06	29	92.63	1.09E-05	53	99.06	1.29E-05
6	7.00	2.91E-06	30	93.36	1.11E-05	54	99.14	1.29E-05
7	8.25	3.19E-06	31	94.00	1.13E-05	55	99.21	1.29E-05
8	9.49	3.25E-06	32	94.56	1.14E-05	56	99.28	1.29E-05
9	10.29	3.26E-06	33	95.05	1.16E-05	57	99.35	1.30E-05
10	16.92	3.34E-06	34	95.48	1.17E-05	58	99.41	1.30E-05
11	21.27	3.37E-06	35	95.87	1.18E-05	59	99.47	1.30E-05
12	25.40	3.38E-06	36	96.21	1.20E-05	60	99.52	1.30E-05
13	27.21	3.38E-06	37	96.52	1.21E-05	61	99.57	1.30E-05
14	37.01	3.42E-06	38	96.81	1.21E-05	62	99.62	1.31E-05
15	40.38	3.56E-06	39	97.06	1.22E-05	63	99.67	1.31E-05
16	44.03	3.80E-06	40	97.29	1.23E-05	64	99.71	1.31E-05
17	46.10	3.95E-06	41	97.50	1.24E-05	65	99.76	1.31E-05
18	54.56	4.66E-06	42	97.70	1.24E-05	66	99.80	1.31E-05
19	65.93	5.85E-06	43	97.87	1.25E-05	67	99.83	1.31E-05
20	73.07	6.79E-06	44	98.04	1.25E-05	68	99.87	1.31E-05
21	77.98	7.57E-06	45	98.19	1.26E-05	69	99.91	1.31E-05
22	81.57	8.22E-06	46	98.33	1.26E-05	70	99.94	1.31E-05
23	84.30	8.78E-06	47	98.45	1.27E-05	71	99.97	1.32E-05
24	86.45	9.26E-06	48	98.57	1.27E-05	72	100.00	1.32E-05

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.28 se puede apreciar la variación del Grado de Saturación no Saturado en función del grado de saturación desde seco a saturado.

Tabla 5.29 Grado de saturación no saturado del suelo en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Grado de Saturación no saturado (G _w ^u)
1	0.00	0.00E+00	25	95.96	1.14E-05	49	99.41	1.29E-05
2	0.10	1.36E-08	26	96.36	1.16E-05	50	99.45	1.29E-05
3	0.64	8.33E-08	27	96.70	1.17E-05	51	99.49	1.29E-05
4	1.56	2.04E-07	28	97.00	1.18E-05	52	99.53	1.30E-05
5	2.72	3.55E-07	29	97.26	1.20E-05	53	99.57	1.30E-05
6	13.36	1.66E-06	30	97.50	1.21E-05	54	99.60	1.30E-05
7	15.39	1.85E-06	31	97.70	1.21E-05	55	99.64	1.30E-05
8	16.83	1.94E-06	32	97.89	1.22E-05	56	99.67	1.30E-05
9	17.68	1.99E-06	33	98.05	1.23E-05	57	99.70	1.30E-05
10	24.95	2.39E-06	34	98.20	1.24E-05	58	99.72	1.30E-05
11	29.85	2.66E-06	35	98.34	1.24E-05	59	99.75	1.31E-05
12	34.54	2.93E-06	36	98.46	1.25E-05	60	99.78	1.31E-05
13	36.62	3.05E-06	37	98.57	1.25E-05	61	99.80	1.31E-05
14	49.01	3.83E-06	38	98.67	1.26E-05	62	99.82	1.31E-05
15	55.52	4.32E-06	39	98.77	1.26E-05	63	99.84	1.31E-05
16	66.00	5.15E-06	40	98.86	1.27E-05	64	99.86	1.31E-05
17	74.25	5.83E-06	41	98.94	1.27E-05	65	99.88	1.31E-05
18	87.95	7.84E-06	42	99.01	1.27E-05	66	99.90	1.31E-05
19	90.76	9.08E-06	43	99.08	1.28E-05	67	99.92	1.31E-05
20	92.33	9.77E-06	44	99.15	1.28E-05	68	99.94	1.31E-05
21	93.42	1.03E-05	45	99.21	1.28E-05	69	99.95	1.31E-05
22	94.27	1.06E-05	46	99.26	1.28E-05	70	99.97	1.31E-05
23	94.94	1.09E-05	47	99.32	1.29E-05	71	99.99	1.32E-05
24	95.50	1.12E-05	48	99.36	1.29E-05	72	100.00	1.32E-05

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.29 se puede verificar la variación del Grado de Saturación no Saturado en función del grado de saturación desde saturado a seco.

La información presentada en las tablas 5.28 y 5.29 describe el Grado de Saturación no Saturado de este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento (figura 5.28).

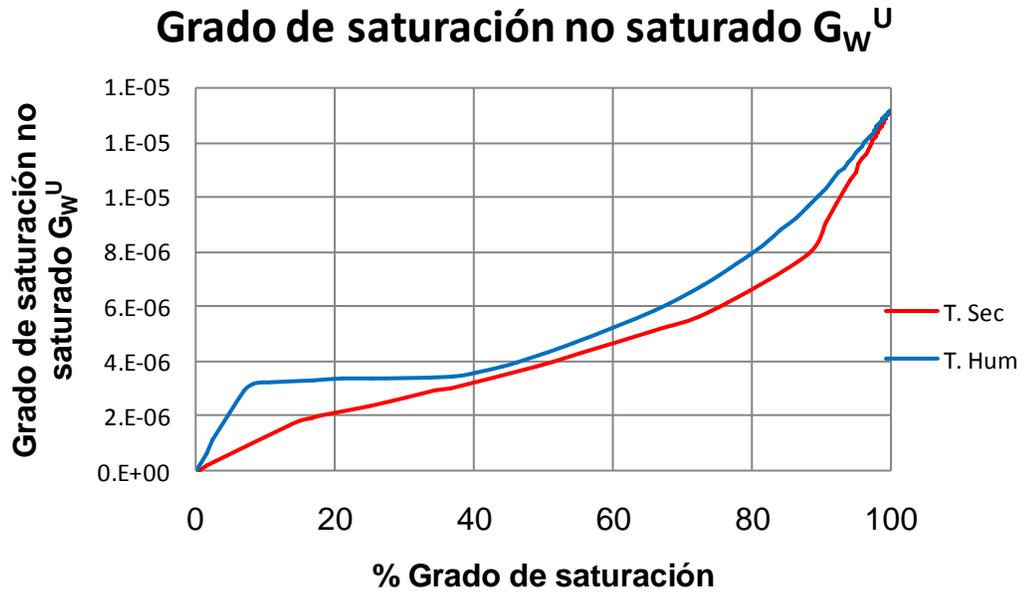


Figura 5.28 Curva del Grado de Saturación no Saturado obtenida con el M.P.

La figura 5.28 muestra que la curva del Grado de Saturación no Saturado en trayectoria de secado queda ubicada por abajo de la curva en trayectoria de humedecimiento, así mismo ambas curvas presentan variaciones significativas entre el 0 y 40 % del Grado de Saturación, a diferencia en el tramo comprendido entre el 60 y 100 % del Grado de Saturación sus diferencias son de menor magnitud que en el tramo anterior. Además, entre el 50 y 100 % del Grado de Saturación se presentan los valores máximos alcanzados en ambas trayectorias.

5.7.4 Parámetro χ

Los resultados obtenidos de la variación del parámetro de Bishop a partir del Modelo Sólido Poroso en la trayectoria de humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.30 y 5.31.

Tabla 5.30 Parámetro de Bishop en trayectoria de humedecimiento

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)
1	0.00	0.0000	25	88.18	0.1734	49	98.68	0.7951
2	0.10	0.0001	26	89.60	0.2076	50	98.79	0.8090
3	0.64	0.0004	27	90.78	0.2429	51	98.88	0.8223
4	1.53	0.0009	28	91.78	0.2785	52	98.97	0.8350
5	2.55	0.0016	29	92.63	0.3139	53	99.06	0.8471
6	7.00	0.0043	30	93.36	0.3488	54	99.14	0.8586
7	8.25	0.0050	31	94.00	0.3827	55	99.21	0.8696
8	9.49	0.0058	32	94.56	0.4156	56	99.28	0.8802
9	10.29	0.0063	33	95.05	0.4473	57	99.35	0.8903
10	16.92	0.0103	34	95.48	0.4777	58	99.41	0.8999
11	21.27	0.0130	35	95.87	0.5068	59	99.47	0.9091
12	25.40	0.0155	36	96.21	0.5346	60	99.52	0.9180
13	27.21	0.0166	37	96.52	0.5612	61	99.57	0.9264
14	37.01	0.0226	38	96.81	0.5865	62	99.62	0.9345
15	40.38	0.0246	39	97.06	0.6105	63	99.67	0.9423
16	44.03	0.0268	40	97.29	0.6334	64	99.71	0.9498
17	46.10	0.0281	41	97.50	0.6552	65	99.76	0.9570
18	54.56	0.0334	42	97.70	0.6759	66	99.80	0.9639
19	65.93	0.0418	43	97.87	0.6956	67	99.83	0.9705
20	73.07	0.0518	44	98.04	0.7143	68	99.87	0.9769
21	77.98	0.0665	45	98.19	0.7321	69	99.91	0.9830
22	81.57	0.0866	46	98.33	0.7490	70	99.94	0.9889
23	84.30	0.1118	47	98.45	0.7651	71	99.97	0.9945
24	86.45	0.1411	48	98.57	0.7805	72	100.00	1.0000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.30 se puede apreciar la variación del Parámetro de Bishop en función del grado de saturación, desde seco a saturado.

Tabla 5.31 Parámetro de Bishop en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Parámetro de Bishop (χ)
1	0.00	0.0000	25	95.96	0.9939	49	99.41	0.9993
2	0.10	0.0001	26	96.36	0.9947	50	99.45	0.9994
3	0.64	0.0004	27	96.70	0.9953	51	99.49	0.9994
4	1.56	0.0009	28	97.00	0.9958	52	99.53	0.9995
5	2.72	0.0016	29	97.26	0.9963	53	99.57	0.9995
6	13.36	0.0058	30	97.50	0.9966	54	99.60	0.9996
7	15.39	0.0068	31	97.70	0.9970	55	99.64	0.9996
8	16.83	0.0076	32	97.89	0.9972	56	99.67	0.9996
9	17.68	0.0081	33	98.05	0.9975	57	99.70	0.9997
10	24.95	0.0140	34	98.20	0.9970	58	99.72	0.9997
11	29.85	0.0220	35	98.34	0.9979	59	99.75	0.9997
12	34.54	0.0360	36	98.46	0.9981	60	99.78	0.9998
13	36.62	0.0452	37	98.57	0.9982	61	99.80	0.9998

Tabla 5.31. (Continuación) Parámetro de Bishop en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Parámetro de Bishop (χ)	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Parámetro de Bishop (χ)
14	49.01	0.1507	38	98.67	0.9984	62	99.82	0.9998
15	55.52	0.2347	39	98.77	0.9985	63	99.84	0.9998
16	66.00	0.4108	40	98.86	0.9986	64	99.86	0.9999
17	74.25	0.5982	41	98.94	0.9987	65	99.88	0.9999
18	87.95	0.9745	42	99.01	0.9988	66	99.90	0.9999
19	90.76	0.9815	43	99.08	0.9989	67	99.92	0.9999
20	92.33	0.9857	44	99.15	0.9990	68	99.94	0.9999
21	93.42	0.9885	45	99.21	0.9991	69	99.95	1.0000
22	94.27	0.9904	46	99.26	0.9991	70	99.97	1.0000
23	94.94	0.9919	47	99.32	0.9992	71	99.99	1.0000
24	95.50	0.9930	48	99.36	0.9993	72	100.00	1.0000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.31 se ve la variación del Parámetro de Bishop en función del grado de saturación, desde saturado a seco.

La información presentada en las tablas 5.30 y 5.31 describe el parámetro χ de Bishop en trayectoria de secado y humedecimiento, mostrada en la figura 5.29.

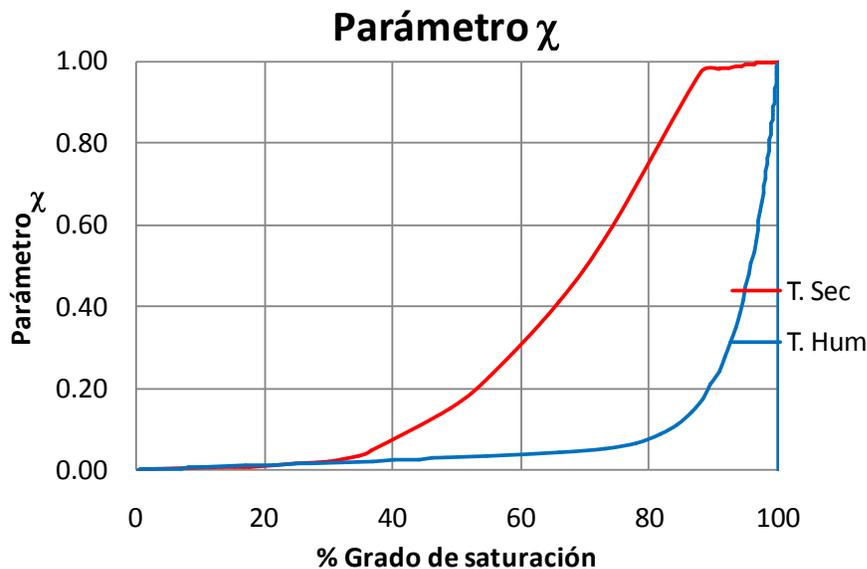


Figura 5.29 Parámetro χ de Bishop en trayectoria de secado y humedecimiento

En la figura 5.29 se observa que la curva del parámetro χ de Bishop en trayectoria de secado queda ubicada por arriba de la curva en trayectoria de

humedecimiento, así mismo ambas curvas presentan variaciones más significativas entre el 30 y 100 % del Grado de Saturación, a diferencia en el tramo comprendido entre el 0 y 30 % de Grado de Saturación sus diferencias son nulas. Además, entre el 50 y 100 % del Grado de Saturación se presentan los valores máximos alcanzados en ambas trayectorias, no obstante los máximos valores corresponden a la trayectoria de secado. Finalmente, entre el 0 y el 30 % del grado de saturación los valores del parámetro χ de Bishop son iguales.

5.7.5 Esfuerzo cohesivo

Los resultados obtenidos del esfuerzo cohesivo en función del grado de saturación a partir del Modelo Sólido Poroso en trayectoria de humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.32 y 5.33.

Tabla 5.32 Esfuerzo cohesivo en trayectoria de humedecimiento

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{\sigma_a - u_w}{\chi} \right]$ kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{\sigma_a - u_w}{\chi} \right]$ kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{\sigma_a - u_w}{\chi} \right]$ kPa
1	0.00	0.00	25	88.18	3.15	49	98.68	3.62
2	0.10	46.36	26	89.60	3.35	50	98.79	3.56
3	0.64	187.86	27	90.78	3.53	51	98.88	3.51
4	1.53	339.28	28	91.78	3.67	52	98.97	3.46
5	2.55	451.39	29	92.63	3.80	53	99.06	3.42
6	7.00	413.12	30	93.36	3.89	54	99.14	3.37
7	8.25	292.25	31	94.00	3.97	55	99.21	3.32
8	9.49	210.11	32	94.56	4.02	56	99.28	3.28
9	10.29	182.26	33	95.05	4.06	57	99.35	3.23
10	16.92	99.84	34	95.48	4.08	58	99.41	3.19
11	21.27	75.31	35	95.87	4.09	59	99.47	3.14
12	25.40	56.18	36	96.21	4.08	60	99.52	3.10
13	27.21	48.16	37	96.52	4.07	61	99.57	3.06
14	37.01	21.83	38	96.81	4.05	62	99.62	3.01
15	40.38	14.29	39	97.06	4.03	63	99.67	2.97
16	44.03	9.74	40	97.29	4.00	64	99.71	2.93
17	46.10	8.16	41	97.50	3.96	65	99.76	2.89
18	54.56	4.84	42	97.70	3.92	66	99.80	2.86
19	65.93	3.04	43	97.87	3.88	67	99.83	2.82
20	73.07	2.51	44	98.04	3.84	68	99.87	2.78
21	77.98	2.41	45	98.19	3.79	69	99.91	2.74
22	81.57	2.51	46	98.33	3.75	70	99.94	2.71
23	84.30	2.70	47	98.45	3.70	71	99.97	2.67
24	86.45	2.93	48	98.57	3.65	72	100.00	1.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.32 se aprecia la variación del esfuerzo cohesivo del suelo en función del grado de saturación, desde seco a saturado. Aquí puede apreciarse que el mayor esfuerzo cohesivo es de 451.39 kPa y se presenta con un grado de saturación de 2.55 %.

Tabla 5.33 Esfuerzo cohesivo en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{k_a - u_w}{\gamma} \right]$ kPa	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{k_a - u_w}{\gamma} \right]$ kPa	No	Grado de saturación del suelo (G _w) %	Esfuerzo Cohesivo $\left[\frac{k_a - u_w}{\gamma} \right]$ kPa
1	0.00	0.00	25	95.96	18.03	49	99.41	4.53
2	0.10	46.34	26	96.36	16.04	50	99.45	4.40
3	0.64	188.00	27	96.70	14.45	51	99.49	4.27
4	1.56	343.47	28	97.00	13.14	52	99.53	4.14
5	2.72	472.05	29	97.26	12.05	53	99.57	4.03
6	13.36	565.11	30	97.50	11.13	54	99.60	3.92
7	15.39	394.46	31	97.70	10.34	55	99.64	3.82
8	16.83	275.42	32	97.89	9.65	56	99.67	3.72
9	17.68	235.31	33	98.05	9.05	57	99.70	3.63
10	24.95	135.93	34	98.20	8.52	58	99.72	3.54
11	29.85	127.87	35	98.34	8.05	59	99.75	3.45
12	34.54	130.77	36	98.46	7.62	60	99.78	3.37
13	36.62	131.12	37	98.57	7.24	61	99.80	3.30
14	49.01	145.83	38	98.67	6.90	62	99.82	3.22
15	55.52	136.24	39	98.77	6.59	63	99.84	3.15
16	66.00	149.07	40	98.86	6.30	64	99.86	3.09
17	74.25	173.64	41	98.94	6.04	65	99.88	3.02
18	87.95	141.45	42	99.01	5.80	66	99.90	2.96
19	90.76	71.23	43	99.08	5.58	67	99.92	2.90
20	92.33	47.69	44	99.15	5.37	68	99.94	2.85
21	93.42	35.87	45	99.21	5.18	69	99.95	2.79
22	94.27	28.75	46	99.26	5.00	70	99.97	2.74
23	94.94	23.99	47	99.32	4.83	71	99.99	2.69
24	95.50	20.59	48	99.36	4.68	72	100.00	2.64

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la tabla 5.33 la variación del esfuerzo cohesivo en función del grado de saturación, desde seco a saturado. Aquí el mayor esfuerzo cohesivo es 565.11 kPa y se presentan con un grados de saturación de 13.36 %.

La información presentada en las tablas 5.32 y 5.33 describe los esfuerzos cohesivos que se pueden presentar en este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento, los cuales son mostrados en la figura 5.30.

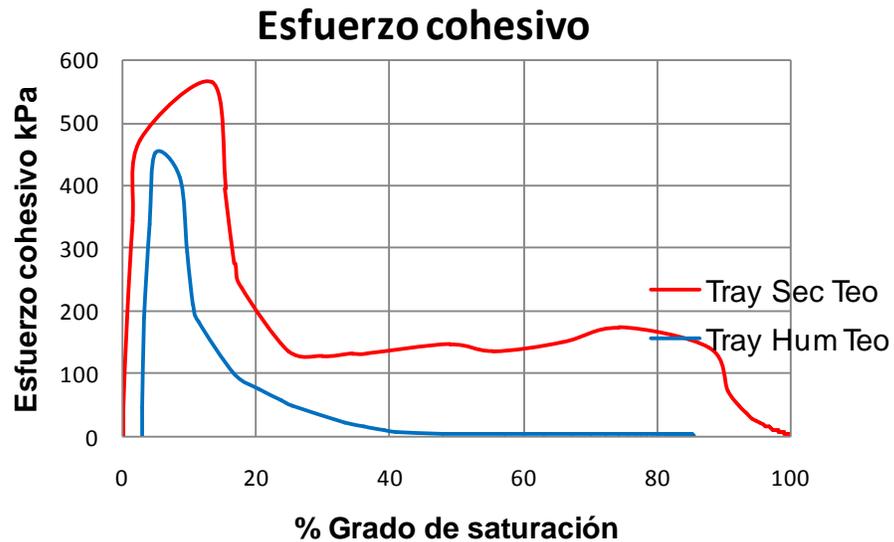


Figura 5.30 Esfuerzos cohesivos en trayectoria de secado y humedecimiento

La figura 5.30 exhibe que las curvas del esfuerzo cohesivo presentan sus máximos valores entre el 0 y 20 % de grado de saturación para ambas trayectorias. Los esfuerzos cohesivos en trayectoria de secado son mayores a los obtenidos en trayectoria de humedecimiento. En el caso de la trayectoria de secado se aprecia una zona entre el 25 y el 90 % del grado de saturación en el que sus esfuerzos cohesivos oscilan entre los 150 kPa. Pareciera que en este tramo la resistencia del suelo en trayectoria de secado también presenta bimodalidad.

5.7.6 Esfuerzo cortante teórico

Los resultados del esfuerzo cortante teóricos obtenidos mediante el Modelo Sólido Poroso para distintos grados de saturación en la trayectoria de humedecimiento y secado se presentan en las tablas 5.34 y 5.35.

Tabla 5.34 Esfuerzo cortante en trayectoria de humedecimiento

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo o Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa
1	0.00	120.00	25	88.18	119.13	49	98.68	119.46
2	0.10	150.13	26	89.60	119.28	50	98.79	119.43
3	0.64	251.62	27	90.78	119.41	51	98.88	119.40
4	1.53	360.23	28	91.78	119.51	52	98.97	119.36
5	2.55	440.64	29	92.63	119.60	53	99.06	119.33
6	7.00	413.19	30	93.36	119.67	54	99.14	119.29
7	8.25	326.49	31	94.00	119.72	55	99.21	119.26
8	9.49	267.58	32	94.56	119.76	56	99.28	119.23
9	10.29	247.61	33	95.05	119.79	57	99.35	119.19
10	16.92	188.49	34	95.48	119.80	58	99.41	119.16
11	21.27	170.89	35	95.87	119.81	59	99.47	119.13
12	25.40	157.18	36	96.21	119.81	60	99.52	119.10
13	27.21	151.42	37	96.52	119.80	61	99.57	119.07
14	37.01	132.54	38	96.81	119.78	62	99.62	119.04
15	40.38	127.13	39	97.06	119.77	63	99.67	119.01
16	44.03	123.87	40	97.29	119.74	64	99.71	118.98
17	46.10	122.73	41	97.50	119.72	65	99.76	118.95
18	54.56	120.35	42	97.70	119.69	66	99.80	118.93
19	65.93	119.06	43	97.87	119.66	67	99.83	118.90
20	73.07	118.68	44	98.04	119.63	68	99.87	118.87
21	77.98	118.61	45	98.19	119.60	69	99.91	118.85
22	81.57	118.68	46	98.33	119.57	70	99.94	118.82
23	84.30	118.82	47	98.45	119.53	71	99.97	118.79
24	86.45	118.98	48	98.57	110.50	72	100.00	118.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.34 se visualiza la variación del esfuerzo cortante del suelo en función del grado de saturación, desde seco a saturado. Aquí puede estimarse que el mayor esfuerzo cortante es de 440.64 kPa y se presenta con un grado de saturación de 2.55 %.

Tabla 5.35 Esfuerzo cortante en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo o Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa
1	0.00	116.88	25	95.96	129.81	49	99.41	120.13
2	0.10	150.11	26	96.36	128.38	50	99.45	120.03
3	0.64	251.72	27	96.70	127.24	51	99.49	119.94
4	1.56	363.23	28	97.00	126.30	52	99.53	119.85
5	2.72	455.45	29	97.26	125.52	53	99.57	119.77
6	13.36	522.21	30	97.50	124.86	54	99.60	119.69
7	15.39	399.81	31	97.70	124.29	55	99.64	119.62
8	16.83	314.43	32	97.89	123.80	56	99.67	119.55
9	17.68	285.66	33	98.05	123.37	57	99.70	119.48
10	24.95	214.37	34	98.20	122.99	58	99.72	119.42
11	29.85	208.60	35	98.34	122.65	59	99.75	119.36
12	34.54	210.67	36	98.46	122.35	60	99.78	119.30

Tabla 5.35 (Continuación) Esfuerzo cortante en trayectoria de secado

No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa	No	Grado de saturación del suelo (G_w) %	Esfuerzo Cortante (τ) kPa
13	36.62	210.92	37	98.57	122.07	61	99.80	119.24
14	49.01	221.47	38	98.67	121.83	62	99.82	119.19
15	55.52	214.60	39	98.77	121.60	63	99.84	119.14
16	66.00	223.80	40	98.86	121.40	64	99.86	119.09
17	74.25	241.42	41	98.94	121.21	65	99.88	119.05
18	87.95	218.33	42	99.01	121.04	66	99.90	119.00
19	90.76	167.97	43	99.08	120.88	67	99.92	118.96
20	92.33	151.08	44	99.15	120.73	68	99.94	118.92
21	93.42	142.60	45	99.21	120.59	69	99.95	118.88
22	94.27	137.50	46	99.26	120.46	70	99.97	118.84
23	94.94	134.09	47	99.32	120.34	71	99.99	118.81
24	95.50	131.65	48	99.36	120.23	72	100.00	118.77

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.35, se aprecia la variación del esfuerzo cortante en función del grado de saturación, desde seco a saturado. Aquí se encontró que el mayor esfuerzo cortante es 522.21 kPa y se presenta con un grado de saturación de 13.36 %.

La información mostrada en las tablas 5.34 y 5.35 describe los esfuerzos cortantes que se pueden presentar en este suelo en trayectoria de secado y humedecimiento, estos son expuestos en la figura 5.31.

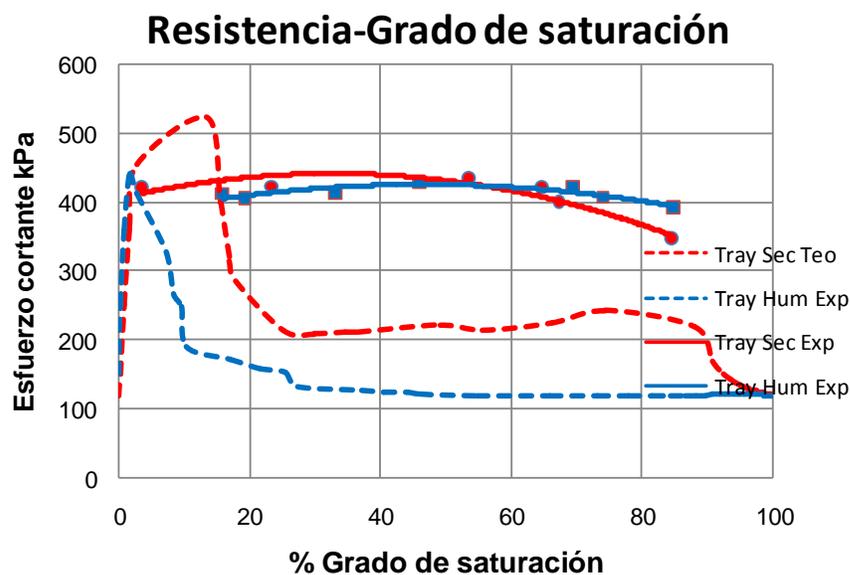


Figura 5.31 Esfuerzo Cortante en trayectoria de secado y humedecimiento

En la figura 5.31 se aprecia que los valores máximos del esfuerzo cortante teórico se presentan entre el 0 y 20 % del grado de saturación, para ambas trayectorias, pero, en la trayectoria de secado entre el 70 y el 90 % del grado de saturación se presenta una segunda zona con esfuerzos cortantes superiores (curva bimodal). Los esfuerzos cortantes en trayectoria de secado son mayores a los obtenidos en trayectoria de humedecimiento. En ambos sentidos la magnitud de los esfuerzos cortantes teóricos son del orden del 40 % de los obtenidos en forma experimental.

5.7.7 Porosimetría teórica

Los resultados de la porosimetría obtenida mediante el Modelo Sólido Poroso para distintos grados de saturación en la trayectoria de humedecimiento y secado se presenta en la tabla 5.36.

Tabla 5.36 Porosimetría obtenida mediante el Modelo Sólido Poroso

No	Diámetro de poro (D) μm	Frecuencia relativa	No	Diámetro de poro (D) μm	Frecuencia relativa
1	0.0003	0.01897	15	0.5	0.00243
2	0.0004	0.05025	16	0.8	0.00187
3	0.0006	0.12657	17	1	0.00167
4	0.0008	0.17732	18	2	0.00112
5	0.001	0.19199	19	4	0.00061
6	0.003	0.05772	20	6	0.00038
7	0.005	0.07424	21	8	0.00026
8	0.008	0.08180	22	10	0.00019
9	0.01	0.08188	23	12	0.00014
10	0.03	0.05396	24	14	0.00011
11	0.05	0.03517	25	16	0.00009
12	0.08	0.02101	26	18	0.00007
13	0.1	0.01589	27	20	0.00006
14	0.3	0.00381			

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la porosimetría de la tabla 5.36 es posible apreciar que se presentan diámetros de poro desde 0.0003 a 20 μm , y que los poros que se encuentran en mayor número son los 0.001 μm . También se pudo determinar que el tamaño medio de los enlaces es de 4.18 μm y su desviación estándar es de 6.42 μm , además el tamaño medio de los sitios es de 18.98 μm y su desviación estándar es de 19.81 μm , respectivamente. Así mismo, la distribución porosimétrica se presenta en la figura 5.32.

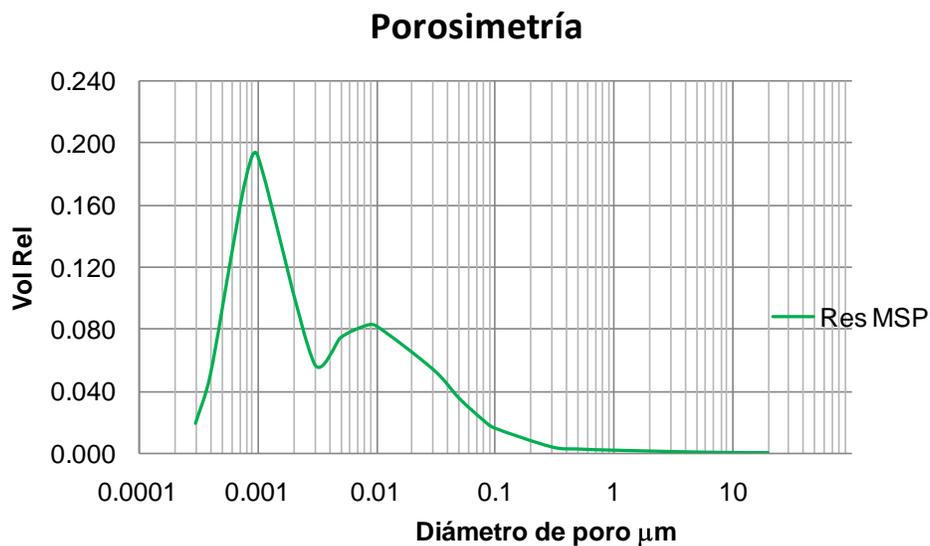


Figura 5.32. Distribución de tamaño de poro obtenida mediante el MSP

Con la figura 5.32 es posible apreciar que el suelo en estudio presenta dos tamaños de poros muy bien definidos, los de diámetros entre 0.0003 a 0.003 μm y los de 0.003 a 20 μm . Los primeros vacíos (enlaces) se encuentran en mayor abundancia que los segundos (sitios). Así, se señala que este suelo presenta en forma marcada una estructura bimodal.

5.8 Análisis de los resultados

En este apartado se presenta el análisis de los resultados obtenidos vía experimental y teórica de las hipótesis planteadas.

Con relación a la hipótesis:

El tamaño de los poros y sólidos del suelo presentan una distribución logarítmica normal, lo que permitirá reproducir la muy compleja estructuración del esqueleto de poros encontrado en el suelo, considerando que no se presenta la succión osmótica en el suelo.

Para dar respuesta a este planteamiento se pueden aportar dos elementos que son claves en el modelo de distribución normal; la media y la desviación estándar (Walpone *et al.*, 2007). En este suelo en particular el tamaño medio de suelo es de 221.31 μm y su desviación estándar es 429.27 μm , con por lo tanto es posible construir la curva de distribución normal del suelo estudiado. Además, el tamaño medio de los enlaces es 4.18 μm y su desviación estándar es 6.42 μm . Así mismo, el tamaño medio de los sitios es de 18.98 μm y su desviación estándar es 19.81 μm , respectivamente.

Por otro lado, en el ensaye triaxial CD con succión controlada se apreció que el comportamiento del esfuerzo desviador no es lineal sino que presenta un valor máximo y después decrece hacia ambos lados, este mismo comportamiento se reproduce en ambas trayectorias, así, el valor máximo determinado en trayectoria de humedecimiento fue de 1603.72 kPa y 1123.66 y 1534.35 kPa como los mínimos en el lado saturado y seco, respectivamente.

En la trayectoria de secado, el comportamiento del esfuerzo desviador fue el siguiente; el máximo fue de 1583.97 kPa y los mínimos 1360.51 y 1413.54 kPa hacia el lado saturado y seco. Lo que demuestra que

la resistencia se incrementa con la succión mátrica y se reduce cuando ésta desaparece.

Con relación a la hipótesis:

Se considera que las partículas sólidas no absorben humedad y que el modelo no contiene burbujas de gas aisladas, ni que se puedan formar en la parte saturada o durante el proceso de humedecimiento o secado.

En atención al supuesto anterior, se señala que el grado de saturación inicial de los especímenes fabricados fue de 85.86 % y que no se consiguió saturar a las probetas de suelo al 100 %, razón por la que sí se presentaron burbujas de gas aisladas durante el ensaye triaxial. Lo anterior sólo evidencia parcialmente lo anteriormente mencionado.

En lo que respecta la tercera hipótesis:

Los sitios como los sólidos son esferas (círculos), los enlaces son cilindros (rectángulos), y el llenado de los sitios con agua es gobernado por la ecuación de la Laplace.

Los resultados obtenidos experimentalmente del ensaye de la curva característica en trayectoria de secado y humedecimiento cubren el rango de succiones típicas para un suelo que va desde 1 a 1×10^6 kPa, de igual forma lo hacen los resultados teóricos de la curva característica. Lo anterior obedece a que el planteamiento del Modelo Probabilista y posteriormente del Modelo Sólido Poroso, determinar los resultados teóricos y considera que tanto los sitios como los sólidos presentan forma circular, para poder determinar su volumen; mientras que para determinar el volumen de los enlaces, se consideró que estos presentan forma rectangular, esto aunado al

hecho de que se determinó la succión para cada uno de los diámetros analizados con el modelo de Laplace.

Así, al obtener los resultados de la curva de retención teórica y su cercanía con la curva de retención experimental del suelo que se ha utilizado para esta investigación, se validan las consideraciones hechas en el supuesto anterior.

Y finalmente la consideración de que:

Esto permite desarrollar un modelo sólido poroso a partir del cual es posible reproducir las curvas de retención del material y obtener su porosimetría teórica.

La información con la que se alimentó el modelo fue mediante la media y desviación estándar de enlaces, sitios y sólidos. Esto permitió reproducir la estructura del suelo en análisis: ($\mu_B = 4.18 \mu\text{m}$ $\sigma_B = 6.42 \mu\text{m}$; $\mu_S = 18.98 \mu\text{m}$ $\sigma_S = 19.81 \mu\text{m}$; $\mu_P = 221.31 \mu\text{m}$ y $\sigma_P = 429.27 \mu\text{m}$).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se presentarán las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de la investigación.

6.1 Conclusiones

Los objetivos y las hipótesis planteadas en esta investigación se cumplieron debido a que se aportó elementos para expresar que el tipo de suelo es apropiado para reproducir su comportamiento mediante el Modelo Sólido Poroso.

Además, ésta investigación proporciona un Modelo Sólido Poroso que puede ser utilizado para analizar el comportamiento de arenas, limos y mezclas de ellos. Este modelo contempla únicamente la succión mátrica y no contempla el efecto de la succión osmótica, por esta razón otro tipo de suelos no puede ser analizado, dado que en ellos sí está presente el efecto osmótico.

El modelo proporciona elementos útiles para desarrollar en forma más sistemática y precisa el análisis de los suelos no saturados, en lo que se refiere a la determinación de la curva de retención, fracción saturada, grado de saturación no saturado, parámetro χ de Bishop, esfuerzos cohesivos y resistencia en ambas trayectorias, además de la porosimetría.

Con relación a la curva característica, el modelo permite simular las en ambas trayectorias en forma indistinta. Además, el modelo proporciona curvas características más aproximadas a las que se obtiene mediante el modelo de Fredlund *et al.*, (1978). En este mismo sentido el modelo permite trabajar en dos

direcciones, a decir, se puede partir de la curva característica y obtener la curva de distribución porosimétrica, o partir de la curva distribución porosimétrica y obtener la curva característica.

Referente a la fracción saturada, el modelo proporciona su valor numérico para diferentes grados de saturación desde seco a saturado y viceversa, el cual si es útil en la determinación del parámetro χ de Bishop.

Hasta hace algunos años este parámetro no había sido determinado en forma analítica, este modelo sí permite obtenerlo. De igual forma el modelo también permite encontrar el valor numérico del grado de saturación no saturado en ambas trayectorias, también necesario en la determinación del parámetro χ de Bishop.

Anteriormente numerosos investigadores han propuesto expresiones empíricas para determinar el parámetro χ de Bishop, sin embargo, estos valores sólo fueron útiles para algunos suelos en específico y, por otro lado, no cubrían la totalidad de la variación del grado de saturación. Con este modelo es posible salvar las limitantes anteriores, analizarlo en ambas trayectorias y más aún, trabajarlo en un mayor número de suelos, ya que no existe procedimiento de laboratorio para determinarlo.

En lo relativo a los esfuerzos cohesivos y resistencia al esfuerzo cortante, este modelo permite simular su comportamiento en unos minutos, optimizando tiempo, ahorrando recursos, materiales y lo más importante, evitando la pérdida de vidas.

En lo que compete a la porosimetría el modelo hace posible inferir la distribución del tamaño de poros, identificar la bimodalidad o multimodalidad de éste y también determinar cuáles vacíos predomina.

Aunado a lo anterior, es posible acoplar el Modelo Sólido Poroso con cualquier modelo constitutivo para suelos no saturados y poder solucionar los diferentes tipos de problemas que involucra la resistencia, los cambios de volumen y de flujo, como es el caso de la estabilidad de taludes, capacidad de carga del terreno, empujes, análisis de muros de retención, infiltración de agua en el suelo y rellenos.

Por otro lado, el uso de este modelo va a permitir entender mejor el comportamiento de los suelos durante la práctica docente, debido a que la información que requiere el modelo puede ser determinada con facilidad en el laboratorio de mecánica de suelos y en la práctica. Así pues, el alumno puede seleccionar algún problema de su interés para analizar su comportamiento ya que el Modelo Sólido Poroso permite predecir el comportamiento de la curva de retención resistencia y porosimetría en unos minutos.

6.2 Recomendaciones y limitaciones

Durante la simulación se recomienda utilizar preferentemente la porosimetría obtenida mediante intrusión de mercurio, tal procedimiento permite mejorar la interpretación de los resultados. La porosimetría obtenida de esta manera presenta un espectro de exploración de los diámetros de poro presentes en el suelo, además es más amplia.

En la presente investigación se utilizó el análisis de imagen que proporcionó un buen soporte para el desarrollo de este trabajo, porque no se contaba con el equipo de intrusión de mercurio, sin embargo, se recomienda utilizar este último método, debido a que permite explorar un espectro de diámetros de poro más amplio que el aquí utilizado.

En el planteamiento del modelo para futuros trabajos se recomienda utilizar una distribución estadística distinta a la normal, con la finalidad de obtener mayor precisión en los resultados.

En el análisis de imagen se recomienda allegarse un programa de lectura más versátil y con mayor alcance; de tal forma que se pueda obtener el área de los poros más exacta. Además, estos poros pueden estar relacionados con los demás, de modo que se pueda apreciar la existencia de los poros cerrados y la de poros que se encuentran comunicados en la estructura del suelo.

Finalmente, se recomienda implementar en el Modelo Sólido Poroso el efecto de la succión osmótica, para que con esta implementación, el modelo pueda ser utilizado para predecir el comportamiento de cualquier tipo de suelo y por lo tanto, su aplicación práctica crezca, aún más.

Referencias utilizadas

Alonso E., E .Gens A. and High D. W. 1987. Special problem Soils. General Rep. Proc., 9th European Conf. Soil Mechanics and Foundations Engineering, Dublin: 1087-1146.

Annual book of ASTM STANDARDS. 2004. International Standard World Wide. Section four Construction Volume 04.08 Soil y Rock. (I): D420-D-5611.

Arya, L. M. and Paris J. F. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, Soil Science Society of American Journal, Vol. 45, pp 1023-1030.

ASTM D 2166-00 Standard Test Method for Unconfined compressive Strength of Cohesive Soil.

ASTM D 2216-98. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM D 2325-68. (Reapproved 2000). Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium-Textured Soils by Porous-Plate Apparatus.

ASTM D 2435-03 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.

ASTM D 2487-00 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

ASTM D 2850-03^a Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

ASTM D 4220-95. (Reapproved 2000). Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples.

ASTM D 4318-00. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D 5298-03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.

ASTM D 698-00a^{e1}. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m³)).

Aubertina M., Mbonimpaa M., Bussièreb B., and Chapuisa R. P. 1998. A physically-based model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties.

Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications Inc., New York.

Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress. Tecknisk Ukeblad 106(39), p. 859-863.

Bishop, A. W. y Blight, G. E. 1963. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. Géotechnique 13, No 3: 177-197.

- Blight, G. E. 1961.** Strength and Consolidation Characteristics of Compacted Soils, Ph. D. Disertation, Univ. of London, London England: 217.
- Blight, G. E. 1965.** A study of effective stress for volume change. Proc. Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in the soils Beneath Covered Areas. Butterworths, Sydney, Australia: 259-269.
- Bowles, E. Joshep 1980.** Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Editorial Mc Graw Hill Latinoamericana, S. A.
- Brooks, R. H. and Corey A. T. 1964** Hydraulic properties of porous medium. Hidrology paper No. 3, Civ. Engrg. Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, Colol.: 27.
- Bumb, A. C. 1987.** Unsteady-state flow of methane and water in coalbeds. Ph. D. thesis, Department of Chemical Engineering, University of Wyoming, Laramie.
- Burland, J. B. 1965.** Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soil. In Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils Beneath Covered Areas. Australia: Butterworths: 270-278.
- Comisión Nacional del Agua. 1996.** Manuel de laboratorio de Mecánica de Suelos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Corey, A. T. 1954.** The interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producer's Montly, vol 19 No 1.
- Coulomb, C. A. 1776.** Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. Memoires de l'Academie Royale pres Divers Savants, Vol. 7.
- Croney D. and J. D. Coleman. 1948.** Soil Thermodynamics Applied to the Movement of Moisture in Road Foundations, in Proc. 7th Int. Cong. Appl. Mech, vol 3.:163-177.
- Croney, D., Coleman J. D. and W. A. Lewis 1950.** Calculation of the Moisture Distribution Beneath Structures, Cov. Eng. L. vol 45: 524.
- Croney, D., Coleman J. D., Black W. P. M. 1958.** Studies of the movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. Highway Research Board, Special Report 40, Washington D.C.: 226-252.
- Cunningham, M. R., Ridley A. M., Dinnen K. and Burland J. B. 2003.** The mechanical behavior of a reconstituted unsaturated silty clay. Geotechnique 53(2): 183-194.
- Daniel, D. E. 1983.** Permeability test for unsaturated soils. Geotech. Testing J. (ASTM) vol 6 No 2: 81-86.
- Delage, P., Cui Y. J. 2000.** L'eau dans les sols non saturés. Editions Techniques de l'ingenieur, Paris, vol C2, article C 301, Traité Construction.
- Delage, P., Cui Y. J., Yahia Al M., De Laure E. 1998.** On the saturated hydraulic conductivity of dense compacted bentonite. Proc. 2 and Int. Conf. on Unsaturated Soils vol. 1. International Academic Publishers, Beijing: 344-349.
- Donald, I. B. 1961** The Mechanical Properties of Saturated and Partly Saturated Soils with Special Reference to Negative Pore Water Pressure, Ph. D. Dissertaton, Univ. of London, London England.
- Dregne, H. E. 1976.** Soils in Arid Regions. New Yok: American Elsevier: 5.

- Edlefsen, N. E. and Anderson A. B. C. 1943.** Thermodynamics of Soil Moisture, vol. 15: 31-298.
- Escario, V. and Juca J. F. T. 1989.** Strength and deformation of partly saturated soils. Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1: 43-46.
- Fredlund M. D., Fredlund D. G. and Wilson G. W. 1997.** Prediction of the Soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. Proceeding of the 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated soils.
- Fredlund, D. G., Morgenstern N. R. and Widger R. A. 1977.** The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal. 15, N°3: 313-321.
- Fredlund, D. G., Morgenstern N. R. and Widger R. A. 1978.** The shear strength of unsaturated soil. Canadian Geotechnical Journal 15: 313-321.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. 1993.** Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1993.: 1-6.
- Fredlund, D. G., Xing, A. E. 1994** "Equations for the soil-water characteristic curve." Can. Geotech. J., 31: 521-532.
- Fuentes, C. and Brambila F. 2007.** About the relationship between soil particle and pore sizes distributions, En prensa.
- Gan, J. K. M., Fredlund D. G. and Rahardjo H. 1988.** Determination of the shear strength of unsaturated soils. Can. Geotech. J., 25: 500-510.
- Gardner, V. R. 1968.** Some Steady State Solution of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water-Table. Soil Sc., Vol 85, No 4.
- Haines, W. B. 1930.** Studies in the physical proprieties of soil : V. The hysteresis effect in capillary proprieties and the modes of moisture distribution associated therewith. J. Agricultural Sci., 20: 97-116.
- Hamilton, J. J. 1960.** Earth pressure cells: design, calibration and performance. División of Building Research, National Research Council Canada.
- Hamilton, J. M., Daniel D. E., and Olson R. E. 1981.** Measurement of Hydraulic Conductivity of Partially Saturated Soils. In Permeability and Groundwater Contaminant Transport, A.S.T.M. Special Tech. Publ. 746, T. F. Zimmie and C. O.Riggs, Eds., A.S.T.M.: 182-196.
- Houlsby, G. T. 1997.** The work input to an unsaturated granular material. Geotechnique 47, No 1: 193-196.
- James, M., Tinjum, Craig, H., Benson Lisa R., and Blotz 1997** "Soil-water characteristic curves for compacted clays." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, November.
- Jenning, J. E. B. and Burland, J. B. 1962.** Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. Géotechnique 12, No 2: 125-144.
- Jian, Zhou, Jian-lin Yu. 2005.** Influences affecting the soil water characteristic curve. Journal of Zhejiang University Science. 2005 6A (8): 797-804.

Johari, A., Habibagahi G. and Ghahramani A. 2006. Prediction of Soil–Water Characteristic Curve Using Genetic Programming. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 5, May 1.

John, D. N. and Debora J. M. 1991. Expansive soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. John Wiley and Sons Inc.

Kanno, T. Wakamatsu H. 1993. Moisture adsorption and volume change of partially saturated bentonite buffer materials. *Material research society symposia proceedings*, vol 294: 425–430.

Kawai, K., Kato S., and Karube D. 2000 “The model of water retention curve considering effects of void ratio.” *Unsaturated Soils for Asia*, Rahardjo, Toll & Leong (eds), Balkema, Rotterdam: 329-334.

Khalili, N. and Khabbaz M. H. 1998. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, 48(5): 681-687.

Khalili, N., Geiser F. and Blight G. E. 2004. Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidences. *International Journal of Geomechanics*. ASCE/June:115.

Klute, A. 1972. The Determination of the Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci.* Vol 113: 264-276.

Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory method pp 635-662. In A. Klute (ed) *Methods of soil analysis*. Part 1, 2nd ed. Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison, WI.

Lambe and Wihntman 2006. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa-México.

Leong, E. C., He L. And Rahardjo H. 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotech. Tech Test. J.* 25: 321-332.

Li X. S. 2003. Effective stress in unsaturated soil: a microstructural analysis. *Geotechnique* 53, No 2: 273-277.

Maria, T. Serafini. 2006. Como redactor un tema “Didáctica de la escritura”. Editorial Paidós.

Marshall, T. J., Holmes J. W. and Rose, C. W. 1996. *Soil Physics*, Third Edition, Cambridge University Press.

Matyas, E. L. y Radhakrishna H. S. 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique*, 18, No 4: 432-448.

McKee C. R. and Bumb A. C. 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of the water and gas. In *SPE Formation Evaluation*, December: 599-608.

Mckee, C. R. and Bumb A. C. 1984. The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environment emergencies. *Proceeding, Hazardous Materials Controls Research Institute National Conference*, Houston TX. March: 50-58.

Md, Abdul Alim, Makoto Nishigaki, Larry Pax Chegbeleh, John Apambilla Akudago and Mitsuru Komatsu 2009. Determination of soil water characteristic curve of unsaturated sandy soils using membrane filter with stainless wire mesh. *Journal of the Environmental Science and Technology*, Okayama University. Vol 14 No 1; 13-16. March.

Meigs, P. 1953. World Distribution of Arid and Semi-Arid Homoclimates, in UNESCO, *Reviews of Res. on Arid Zone Hydrology*, *Arid Zone Res.*: 203-210.

Morgenstern, N. R. 1979. Properties of compacted clays. In Contribution to Panel Discussion, Session IV, Proceedings of the 6th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lima Peru, Vol. 3,: 349-354.

Murray, Eduard J. 2002. An equation of state for unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal. 39: 125-140.

Öberg, A. L. and Sällfors G. 1995. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol 1, Paris, E. E. Alonso and P. Delague, eds, Balkema, Rotterdam, The Netherlands: 151-158.

Öberg, A. L. and Sällfors G. 1997. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. Geotechnical Testing Journal. v. 20, No. 1.

Phyllis Creame and Mary R. Lea. 2005. Escribir en la Universidad. Editorial Geodisa, 3era Edición.

Prapaharan, S., Altschaeffl A. G. and Dempsey B. J. 1985. Moisture curve of compacted clay: Mercury Intrusion Method. J. Geotech. Engng. ASCE 111 (9): 1139-1143.

Rankine, W. J. M. 1857. On the stability of loose earth. Philosophical Transaction of the Royal Society, London, Part 1: 147, 9-27.

Richards B. G. 1974. Behavior of Unsaturated Soils. In Soil Mechanics-New Horizons, I. K. Lee Ed. New York: American Elsevier. 112-157.

Richards, B. G. 1965. Measurement of the free energy of the soil moisture by the pycrometric technique using termistors. In moisture Equilibria and the Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, a. Symp. In print. Australia: Butterworths, pp 39-46.

Rojas, E. 2006. Equivalent stress for unsaturated soils. Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils held in Carefree, Arizona on April: 2-5.

Romero, E., Gens A. and Loret A. 1999. Water permeability, water retention, and microstructure of unsaturated compacted boom clay. Eng. Geol. (Amsterdam) 54(1-2): 177-127.

Romero, E., Gens, A. and Lloret, A. 2001. "Laboratory testing of unsaturated soils under simultaneous suction and temperature control". Proc. 15th ICSMGE, Istanbul, vol 1: 619-622.

Saiyouri, N., Hicher P. Y. and Tessier D. 2000. Microstructural approach and transfer water modelling in highly compacted unsaturated swelling clays. Mech Cohes Frict Mater 5: 41-60.

Sandra, I. Houston, Natalia P. García y William N. Houston. 2008. Shear strength and shear-induced volume change behavior of Unsaturated Soils from a triaxial test program. Journal of Geomechanical and Geoenvironmental Engineering. ASCE November: 1619-1632.

Simms, P. H. and Yanful E. K. 2000. Estimation of the soil-water characteristic curve of a clayey till using measured pore-size distribution. In Proceeding of the 5th International Conference on Geotechnology and Sustainable Development, Minas Geiras, Brasil: 17-23 Aug.

Simms, P. H. and Yanful E. K. 2001. "Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests", Canadian Journal Geomechanics, 38: 741-754.

Simms, P. H. and Yanful E. K. 2002. "Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions", Gèotechnique 52: 269-278.

- Simms, P. H. and Yanful E. K. 2003.** Pore network Modeling for unsaturated soils. Proc. 56th Canadian Geotechnical Conf. Winnipeg, Canada.
- Simms, P. H. and Yanful E. K. 2005.** A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils. Canadian Geotechnical Journal; 42: 499-514.
- Smith, G. N. and Smith Ian G. N. 1998.** Elements of soil Mechanics. Seven Edition. Blackwell Science.
- Stokes, R. H. and Robinson, R. A. 1948.** Standard solutions for humidity control at 25°C. Journal of phys. chem. 36.
- Tang, A. M. and Cui Y. J. 2005.** Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. Can Geotech J 42: 287–296.
- Tang, G. X., Graham J, Wan AWL 1998.** On yielding behavior of an unsaturated sand-bentonite mixture. In Proceedings of the 2nd international conference on unsaturated soils, vol 1. Beijing: 149-154.
- Terzaghi, K. 1925.** Erdbaumechanik (in German) Vienna: Franz Deutique: 399.
- Terzaghi, K. 1936.** The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear, In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10, Proceedings, Cambridge, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1: p. 54-56.
- Tessier, D. 1984.** Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Ph.D. thesis, Université de Paris VII, Paris, France.
- Van Genuchten, M. Th. 1980.** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soils Sci. Am. J. 44: 892-898.
- Vanapalli, S. K. and Fredlund D. G. 1999.** Empirical procedure to predict the shear strength of unsaturated soils. Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 0531.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl D. E., and Clifton A.W. 1996.** Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 33: 379-392.
- Vanapalli, S. K., Fredlund D. G. and Pufahl D. E. 1999.** The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till. Géotechnique 49, No.2: 143-159.
- Villar, M. V. 2000.** Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.
- Vulliet L., Laloui L., Koliji A. and Cuisinier O. 2006.** Unsaturated structures soil with multiporosity. Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik un Wasserbau.
- Walpole E., Ronald Myers H., Raymond Myers, L. Sharon and Ye keying. 2007.** Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Editorial Pearson Education. 8^a Edición.
- Wheeler S. J., Naatanen A., Karstunen M. and Lojander M. 2003.** An anisotropic elasto-plastic model for natural soft clays. Canadian Geotechnical Journal, 40: 403-418.

Williams, J., Prebble R. E., Williams W.T., and Hignnett C. T. 1983. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. Australian Journal of Soil Research, 21: 15-32.

Young, J. F. 1967. Humidity control in the laboratory using sali solutions - a review. J. of apply chemistry: 17.

Zhou Jian, Yu Jian-lin. 2004. Influences affecting the soil-water characteristic curve. Journal of Zhejiang University SCIENCE. Univ SCI 2005 6A(8): 797-804.

ANEXO A

Actualmente existen varios procedimientos para obtener la curva característica, en este trabajo se presenta uno de ellos. El procedimiento se apoya en la distribución de los vacíos del suelo -sitios y enlaces- para su planteamiento, además utiliza el modelo de Laplace para pronosticar la succión desarrollada en el suelo. A continuación se presenta el procedimiento que se siguió para obtener la curva característica del suelo estudiado mediante el Modelo Probabilista (MP), apoyándose en la técnica de análisis de imagen.

A.1. Procedimiento utilizado para obtener la curva característica a partir de la porosimetría de un suelo cualquiera

A.1.1. Análisis de imagen y porosimetría

La porosimetría es la distribución de poros obtenida a partir del análisis de imagen, para este propósito se utilizó un tamizado morfológico, según lo refiere Luengo Hendricks (2004). Esta técnica es muy semejante al tamizado de polvos por usar un sistema de mallas estándares de laboratorio.

Cuando se utilizan mallas de laboratorio, los sólidos se pasan a través de las mallas, iniciando por las de diámetros mayores hasta las de diámetros pequeños. Es así que las partículas grandes se quedan en las primeras mallas y las partículas pequeñas pasan a las mallas siguientes. Mediante la medición de las partículas retenidas en cada malla es posible obtener la distribución de las partículas. De forma análoga, en el caso de los poros se analizarán en forma decreciente iniciando por los macro-poros continuando por los meso-poros, y

finalizando con los micro-poros, de tal modo que será posible cuantificar la presencia de cada uno de ellos con respecto de la sumatoria total de los poros. Con la información anterior se obtiene el porcentaje correspondiente de cada uno de los vacíos presentes en el medio poroso.

Mediante la técnica de análisis de imagen es posible desarrollar un análisis de la estructura de los poros en distintas zonas de la muestra. Una alternativa para analizar la estructura de los materiales porosos es mediante el análisis morfológico de micrografías propuesto por Matheron (1975). Esta técnica de procesamiento de imagen puede ser de utilidad en el análisis de tamaño de poro. De ahí que el proceso de identificación de los poros existentes en las probetas de suelo utilizado en la investigación, se desarrolló de la siguiente forma:

A.1.2. Elaboración de la probeta de suelo

En primer lugar se fabricaron probetas con el suelo en estudio en las cuales se buscó reproducir un γ_m de 18.01 kN/m^3 para una humedad $\omega = 21 \%$. Para este propósito la muestra se fabricó dentro del porta muestra tal y como se aprecia en la Figura A.1.



Figura A.1. Muestra de suelo SM instalada dentro de un porta muestras

Una vez elaboradas las probetas y colocadas en el porta muestra, fueron instaladas en el porta objetos del microscopio electrónico de barrido. El microscopio electrónico de barrido trabajó a bajo vacío con la intención de no alterar las condiciones de humedad de las muestras. Para obtener las micrografías fue utilizado un microscopio electrónico de barrido (figura A.2).



Figura A.2. Microscopio electrónico de barrido utilizado

Mediante el microscopio electrónico de barrido es posible practicar diferentes análisis a las muestras en cuestión, sin embargo, en este caso sólo se obtuvieron micrografías. Durante el análisis de estas muestras de suelo el microscopio electrónico de barrido obtuvo micrografías a 100, 500, 1000, 3000 y 6000 aumentos respectivamente, una de ellas se aprecia en la figura A.3.

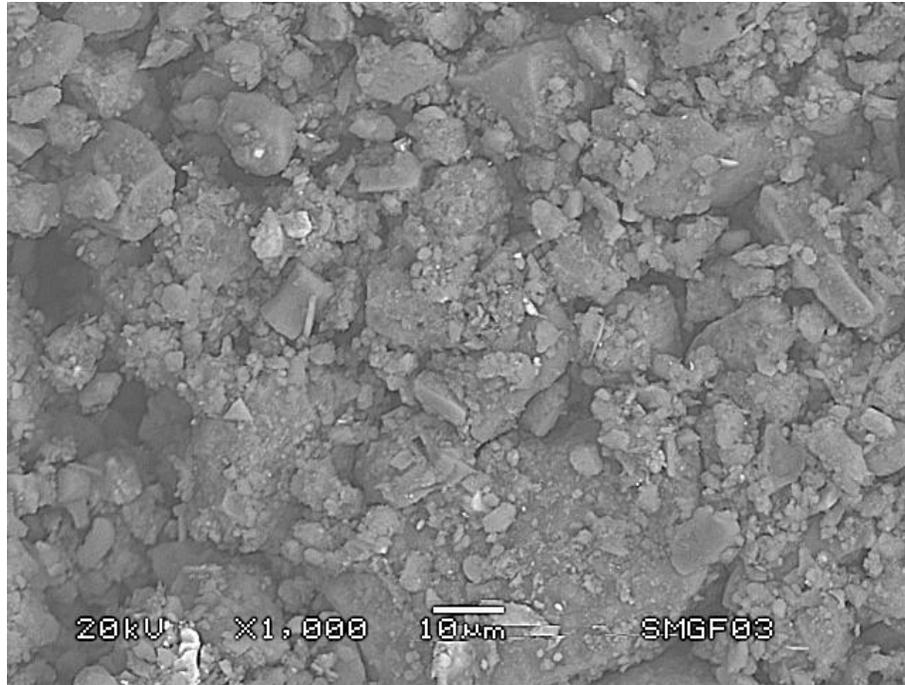


Figura A.3. Micrografía del suelo SM

A.1.3. Procedimiento utilizado para el análisis de imagen

Con las micrografías correspondientes se procedió a analizar las imágenes por medio del siguiente procedimiento:

1. Se seleccionan las micrografías obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido.
2. A cada una de las micrografías se le da un tratamiento de nitidez, la finalidad es apreciar la forma de las partículas sólidas y la de los poros presentes en el suelo (figura A.4).



Figura A.4. Programa para mejorar la calidad de imagen

3. Mediante un programa de conteo de imagen como el que se muestra en las figuras A.5 y A.6, es posible cuantificar la superficie total de la micrografía en análisis, así como la de cualquier área seleccionada sobre ella, para esto es necesario proporcionar la escala de la imagen. De esta manera cada uno de los poros seleccionados es cuantificado sin importar su forma, su tamaño o sus unidades. El programa mantiene el área total de la micrografía, también la de cada uno de los poros seleccionados así como la sumatoria de las áreas seleccionadas. Con el área total y el área de los poros (A_v) es posible conocer por diferencia el área de los sólidos (A_s). Por lo tanto, usando la expresión de la relación de vacíos ($e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{A_v}{A_s}$) es posible determinar su valor teórico el cual se compara con la relación de vacíos determinada experimentalmente. Esta revisión permite conocer el momento en que el análisis de la imagen ha terminado. Finalmente el programa proporciona un archivo con el listado del área de los poros y su diámetro equivalente.

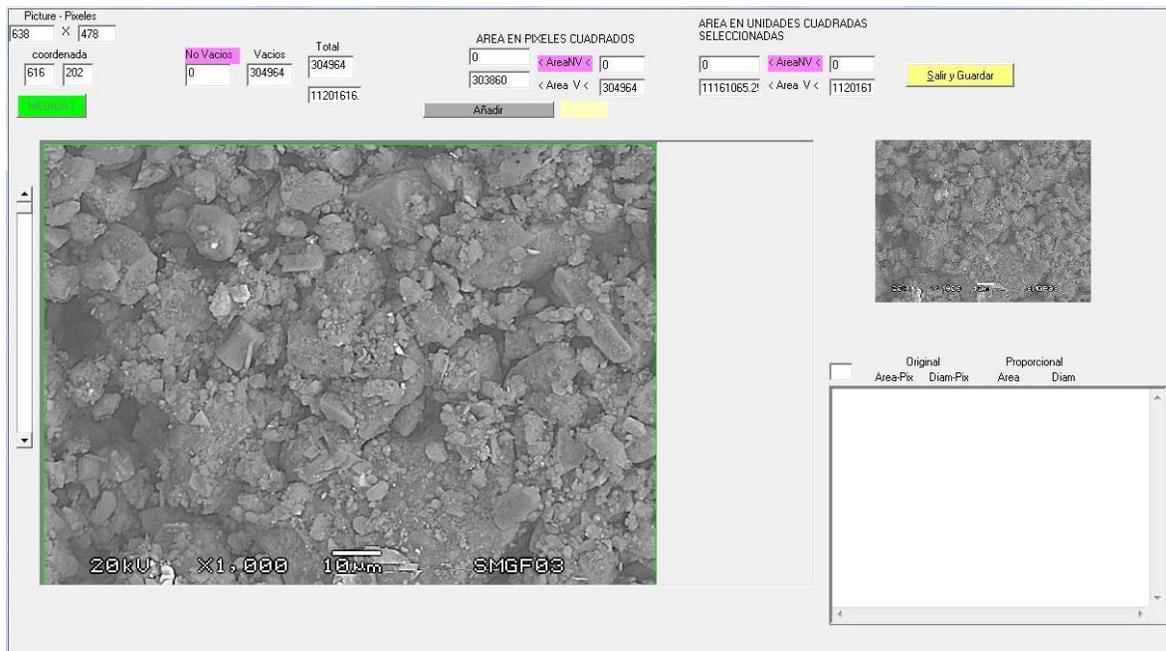


Figura A.5 Programa para el conteo de la imagen.

4. Una vez que se cuenta con el listado de diámetros de cada uno de los poros se efectúa un análisis estadístico, la información de los diámetros de poro es posible obtenerla también por medio de varias micrografías integradas. Para el análisis estadístico de los poros fue necesario identificar el diámetro máximo y mínimo, la finalidad fue de establecer los anchos de clase y el correspondiente punto medio de cada clase, para permitir efectuar un análisis de la distribución de éstos. Los datos obtenidos mediante el análisis de imagen son presentados en la tabla A.1 y en la figura A.7.

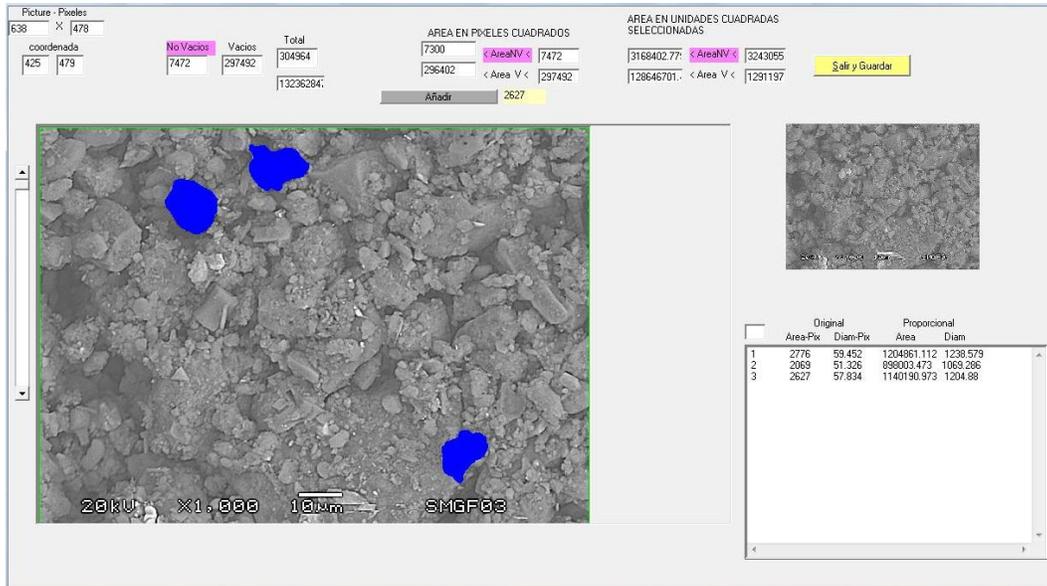


Figura A.6 Análisis del conteo de una micrografía

Tabla A.1 Porosimetría obtenida mediante análisis de imagen

No	Frontera de clase μm	Punto medio de clase μm	Volumen de poro μm^3	Frecuencia de poros	Volumen de poro total μm^3	Frecuencia relativa
0		0.540				0.000
1	0.540-3.436	1.988	4.11	3830	15756.02	0.027
2	3.436-6.332	4.884	61.00	657	40074.15	0.068
3	6.331-9.227	7.779	246.47	82	20210.81	0.034
4	9.227-12.124	10.676	637.12	57	36316.10	0.062
5	12.124-15.020	13.572	1308.97	47	61521.66	0.105
6	15.020-17.916	16.468	2338.41	4	9353.65	0.016
7	17.916-20.812	19.364	3801.75	10	38017.53	0.065
8	20.812-23.708	22.260	5775.29	3	17325.88	0.030
9	23.708-26.604	25.156	8335.34	5	41676.71	0.071
10	26.604-29.500	28.052	11558.20	5	57790.99	0.098
11	29.500-32.395	30.947	15518.66	2	31037.32	0.053
12	32.395-35.291	33.843	20295.75	2	40591.51	0.069
13	35.291-38.187	36.739	25964.54	0	0.00	0.000
14	38.187-41.083	39.635	32601.32	0	0.00	0.000
15	41.083-43.979	42.531	40282.41	2	80564.81	0.137
16	43.979-46.875	45.427	49084.10	0	0.00	0.000
17	46.875-49.771	48.323	59082.69	0	0.00	0.000
18	49.771-52.667	51.219	70354.50	0	0.00	0.000
19	52.667-55.563	54.115	82975.83	0	0.00	0.000
20	55.563-58.459	57.011	97022.98	1	97022.98	0.165
					587260.11	

Fuente: Elaboración propia

Porosimetría

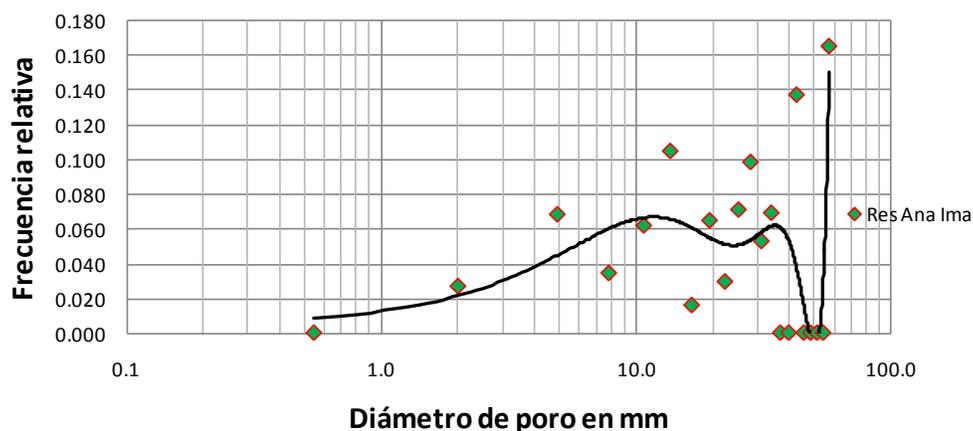


Figura A.7 Porosimetría resultante de análisis de imagen

Al hacer una depuración de las clases, en las cuales no se encontró poros durante el análisis de imagen se obtienen los resultados (presentados en la tabla A.2 y la figura A.8). No obstante haciendo un análisis numérico de los resultados depurados se obtuvo la porosimetría presentada en la figura A.9.

Tabla A.2 Porosimetría encontrada mediante análisis de imagen

No	Diámetro de poro encontrado μm	Volumen Relativo
1	0.540	0.0000
2	1.988	0.0268
3	4.884	0.0682
4	7.780	0.0344
5	10.676	0.0618
6	13.572	0.1048
7	16.468	0.0159
8	19.364	0.0647
9	22.260	0.0295
10	25.156	0.0710
11	28.052	0.0984
12	30.947	0.0529
13	33.843	0.0691
14	42.531	0.1372
15	57.011	0.1652

Fuente: Elaboración propia

Porosimetría

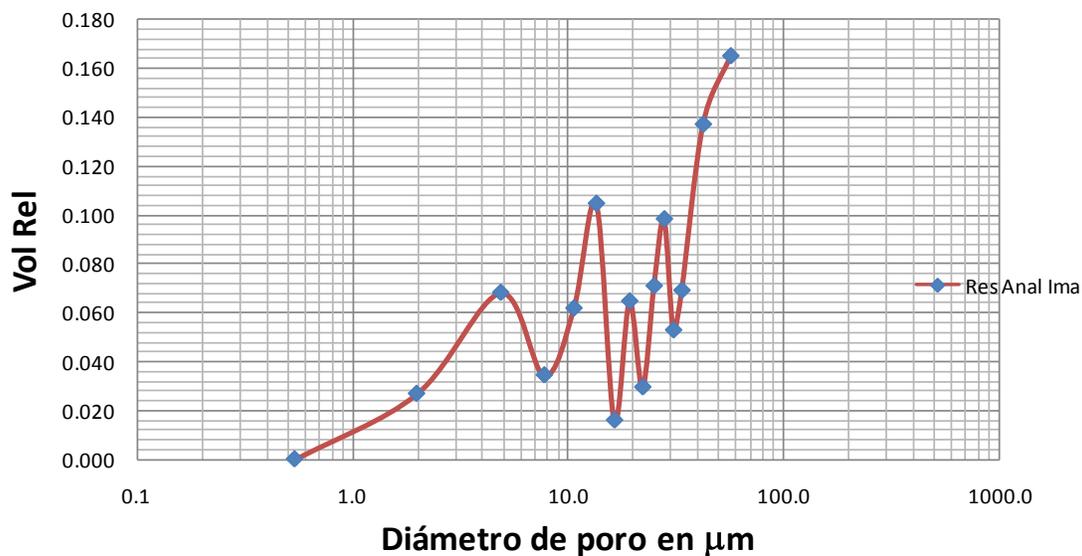


Figura A.8 Porosimetría depurada

Porosimetría

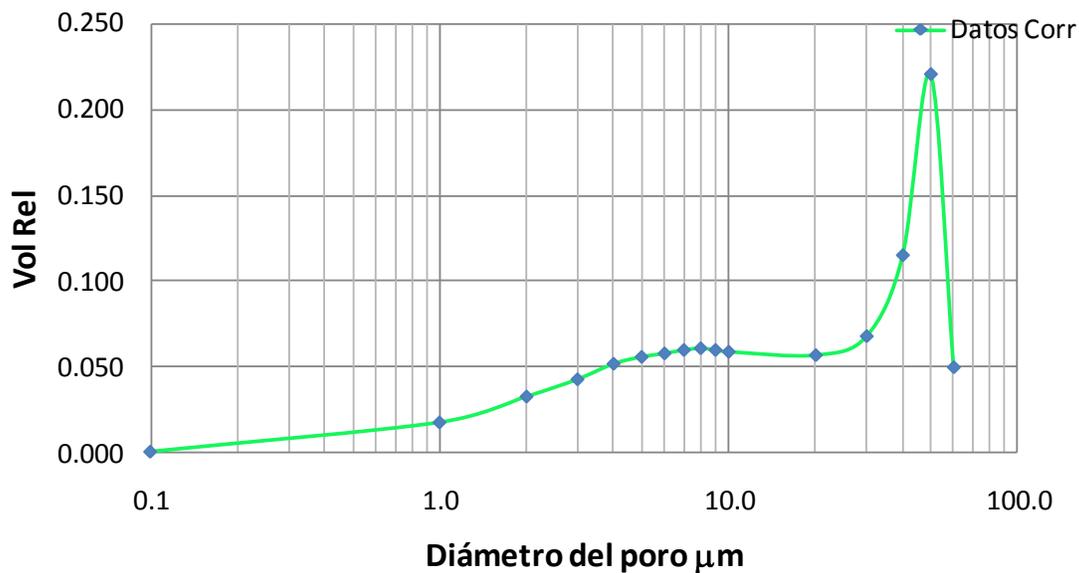


Figura A.9 Porosimetría del suelo

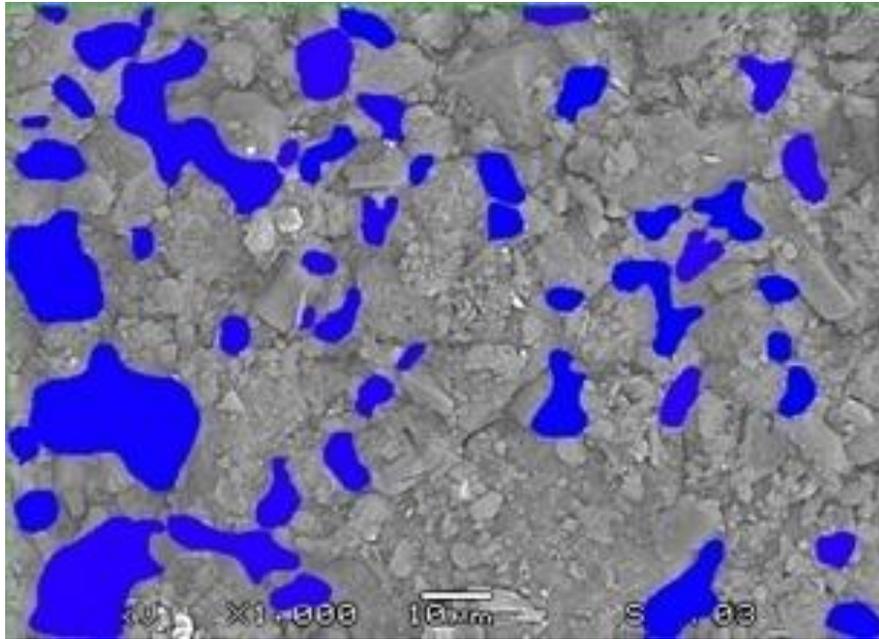


Figura A.10 Aspecto de la micrografía durante el conteo de los poros, en color azul

Las micrografías analizadas para poder obtener esta distribución porosimétrica fueron de 500X, 1000X, 3000X y 6000X, (los resultados presentados en la tabla A.2), sin embargo, los datos de las micrografías anteriores se integraron en uno solo. Se menciona que la micrografía de mayor tamaño fue la de 500X, a partir de esta micrografía se encontró un Factor de Escala para las otras micrografías; obteniendo así el resultado del número de veces que la otra micrografía podía caber en la primera.

5. Finalmente, mediante el programa de conteo de imágenes es posible cuantificar el área de cada uno de los poros encontrados. Partiendo de que el área es encontrada y considerando que se trata de una circunferencia, se determinará el correspondiente diámetro de poro equivalente con la expresión siguiente (A.1).

$$D_{equivalente} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{Ec. A.1}$$

Donde

A = Área encontrada en cada poro

$D_{\text{equivalente}}$ = Diámetro de poro equivalente encontrado a partir del área de poro determinada mediante el programa de conteo de imagen.

ANEXO B

En este anexo se detalla el procedimiento para obtener la curva característica por secado, obtenida mediante el cilindro extractor de membrana.

B.1 Manejo del cilindro extractor de membrana

B.1.1 Principios de operación

El Cilindro Extractor es capaz de extraer la humedad existente en los espacios microscópicos de las muestras de suelo, por medio de la membrana de celulosa húmeda que se coloca en el fondo de la cámara de extracción.

Cuando la presión del aire existente dentro del extractor de membrana de presión se incrementa por arriba de la presión atmosférica, obliga al exceso de agua a pasar a través de los micro-poros de la membrana de celulosa y además, a salir fuera del extractor. El aire a alta presión no fluirá a través de los poros de la membrana de celulosa impermeable, ya que éstos están llenos con agua. La tensión superficial de la interface aire agua existente en los poros soporta la presión en una forma semejante a un diafragma de caucho flexible. Cuando la presión del aire dentro del extractor se incrementa, el radio de curvatura de la interface disminuye (ver la figura B.1).

La película de agua no se rompe cuando se alcanzan las presiones máximas, la finalidad es permitir que el aire atraviese la membrana de celulosa existente dentro del extractor por pequeño diámetro de poro (24 Ångstrom). Existe una correlación exacta entre la presión del aire dentro del extractor y el radio de curvatura del menisco que se forma en los orificios de la membrana de celulosa en las interfaces de aire y del agua.

Cuando las muestras de suelo saturadas previamente, se colocan dentro del extractor de presión, y además si la presión del aire dentro del extractor se incrementa arriba de la presión atmosférica, se provocará que el agua gravitacional que está en torno a cada una de las partículas de suelo fluya y salga a través de los poros de la membrana de celulosa. Cuando se aplica una presión de aire dentro del extractor, el agua existente dentro de los corazones de suelo fluirán hasta que la presión del agua gravitacional que envuelve cada una de las partículas de suelo sea la misma que la desarrollada en los poros de la membrana de celulosa, corresponde a la curvatura asociada con la presión de la figura B.1.

Por ejemplo, si la presión del aire dentro del extractor se mantiene a $9.855E-2$ Mpa y el flujo de agua que sale del extractor se interrumpe, entonces se dirá que la muestra de suelo que se encuentra dentro del extractor presenta una succión de $9.855E-2$ Mpa. Entonces, el agua existente dentro de una muestra que se obtuvo en campo puede decirse que presenta también un valor de succión de cuando menos $9.855E-2$ Mpa para estas condiciones. Si la presión del aire dentro del extractor se mantiene a 1.4783 Mpa el equilibrio en la succión del suelo podrá ser de 1.4783 Mpa.

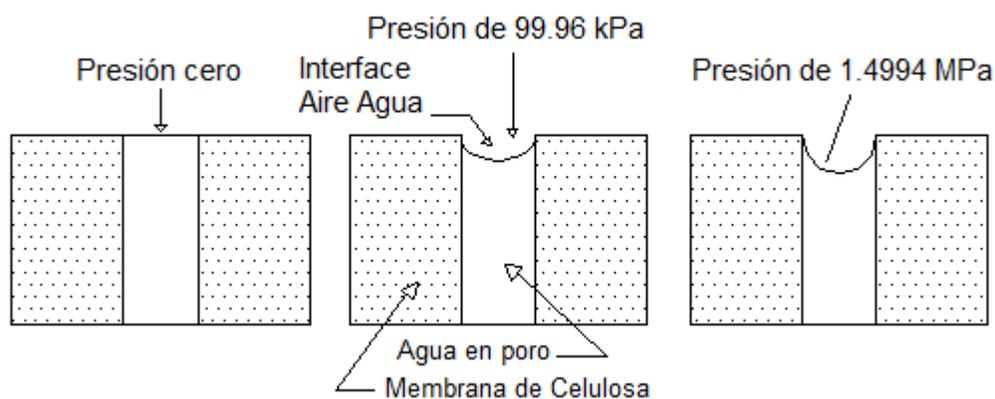


Figura B.1 Detalle de la membrana microporosa

El cilindro extractor requiere una presión que esté regulada en todo su rango de operación hasta alcanzar valores de 10.3481 Mpa. El uso del aire comprimido es muy limitado, sin embargo su uso puede ser de utilidad en estudios de la curva característica. La solución existente dentro de una muestra de suelo también puede ser extraída para análisis químicos, para ello se requiere utilizar agua pura y nitrógeno en tanque para evitar en lo posible alteraciones que se presenten por el oxígeno comprimido o CO₂ en el aire.

Si el extractor es utilizado en forma extensiva para estudios de la curva característica, el aire comprimido de un compresor es la fuente de suministro más satisfactoria. Así mismo, el nitrógeno o aire comprimido en tanque a 13.7975 Mpa, puede ser adecuado cuando el extractor es operado en condiciones límites o donde la solución que se extrae sirva para análisis químico, como se indicó con anterioridad.

La magnitud de la presión (aplicada al extractor) con la que el drenado de las muestras alcanza el equilibrio, debe ser lo más exacta posible. Por esta razón es muy importante contar con un sistema de control de presión apropiado para medir las distintas presiones. (Véase el diagrama del sistema para regular la presión en el laboratorio tal y como se muestra en la figura B.2). Para el Cilindro Extractor es común utilizar presión de aire regulada suministrada por un compresor.

B.1.2 Operación del regulador diferencial de mercurio

El Regulador Diferencial de Mercurio proporciona diferentes presiones al forzar el diafragma de hule para comprimir el suelo, éste a su vez en íntimo contacto con la membrana de celulosa (vea la figura B.3).

La presión del gas del lado derecho del tubo en U presiona la parte superior del mercurio hacia el lado opuesto, hasta que pase la curva, como se muestra en la figura B.3. Así, la presión en la “salida 1” es siempre menor que en

la “salida 2” debido al peso de la columna de Mercurio; el peso del mercurio sobrepuesto es el correspondiente a $2.759E-2$ Mpa.

Entre la conexión de la salida 2, que se encuentra detrás del diafragma de compresión, y la salida 1, que va a la cámara del extractor se puede presentar una presión diferencial de $2.759E-2$ Mpa detrás del diafragma de compresión adicional a la presión de extracción.

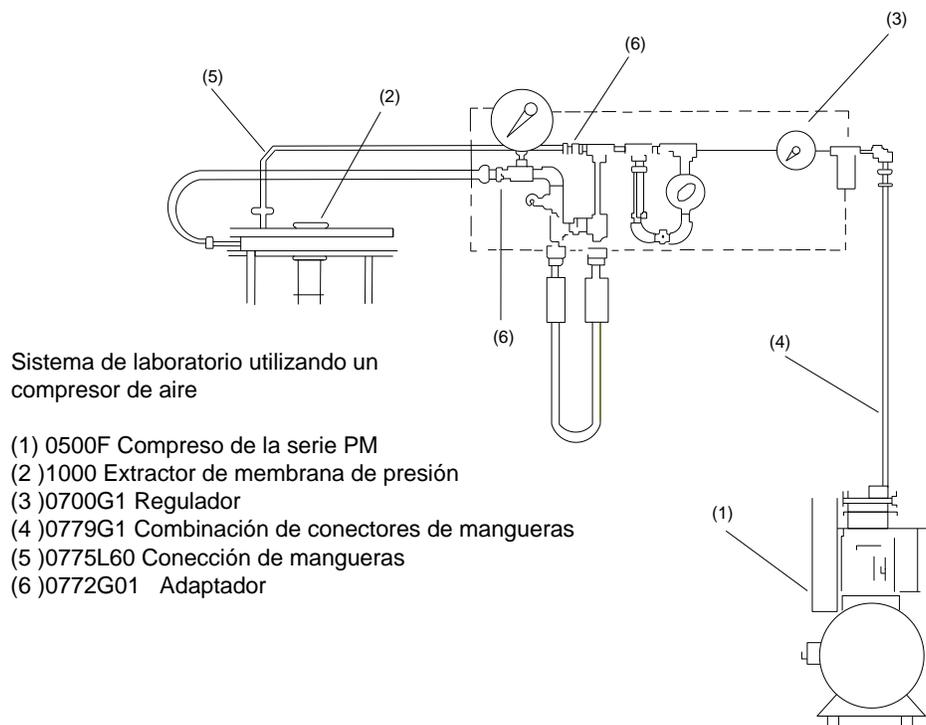


Figura B.2 Diagrama del sistema para regular la presión del extractor

El diafragma de compresión es utilizado principalmente en corazones de suelos arcillosos para mantenerlos contraídos y en contacto con la membrana de celulosa por períodos prolongados, mientras que se remueve la humedad de la muestra. Este diafragma se utiliza únicamente durante varias horas después de que se inició el ensaye.

B.1.3 Preparación de las muestras de suelo

Antes de introducir los corazones de suelo en el extractor, se deben de realizar los estudios correspondientes, es decir, “preparar” la muestra pasándolas a través de un tamiz con orificios de 2 mm, para remover las partículas superiores a 2 mm y utilizar de esta manera todos los agregados menores. Es común utilizar 25 gr de muestra para cada uno de los suelos que se pretenda ensayar.

Los corazones de suelo inalterado también pueden ser utilizados en el ensaye, sin embargo, los corazones de suelo remoldeados deberán ser retenidos con un anillo durante el proceso de extracción y además, las caras del corazón de suelo deberán ser cuidadosamente preparadas para proporcionar una superficie plana y en el caso de la cara inferior de éstos se debe procurar que estén en contacto con la membrana de celulosa sobre la cual serán colocados.

Por otro lado, al trabajar con corazones de muestras inalteradas, el muestreador de corazones de suelo proporciona resultados más efectivos, debido a que los corazones de suelo son retenidos en cilindros de latón de 2 ¼” de diámetro y pueden presentar varias alturas.

Se ha desarrollado un sin número de procedimientos para la preparación de muestras de suelo con la finalidad de realizar trabajos en el campo. En primer lugar, se tratará las muestras que son representativas del suelo en las condiciones de campo, de modo que tomando como base las curvas características obtenidas se podrán aplicar a condiciones de campo similares.

Los detalles para preparar muestras se proporcionan en los estándares de la Sociedad Americana de Ensaye de Materiales (ASTM), Designada D421 y “Práctica de Preparación en Seco de las Muestras de Suelo para Análisis del Tamaño de las Partículas y Determinación de las Constantes del Suelo”.

B.1.4 Operación del cilindro extractor de membrana

En la realización de estudios de la curva características, el extractor de membrana de presión se utiliza principalmente en el rango de 9.855×10^{-2} Mpa a 1.4783 Mpa. Conforme al pequeño tamaño de los poros de la membrana de celulosa, la velocidad con la que el agua fluye a través de la membrana es muy baja, para presiones diferenciales entre 0 y 0.1035 Mpa. Lo anterior provoca que el equilibrio se produzca después de mucho tiempo. De esta manera para estudios de la curva de retención en el rango de 0 a 9.855×10^{-2} Mpa también se podrá utilizar el extractor de placa de 0.4927 Mpa y, además la celda plana de presión.

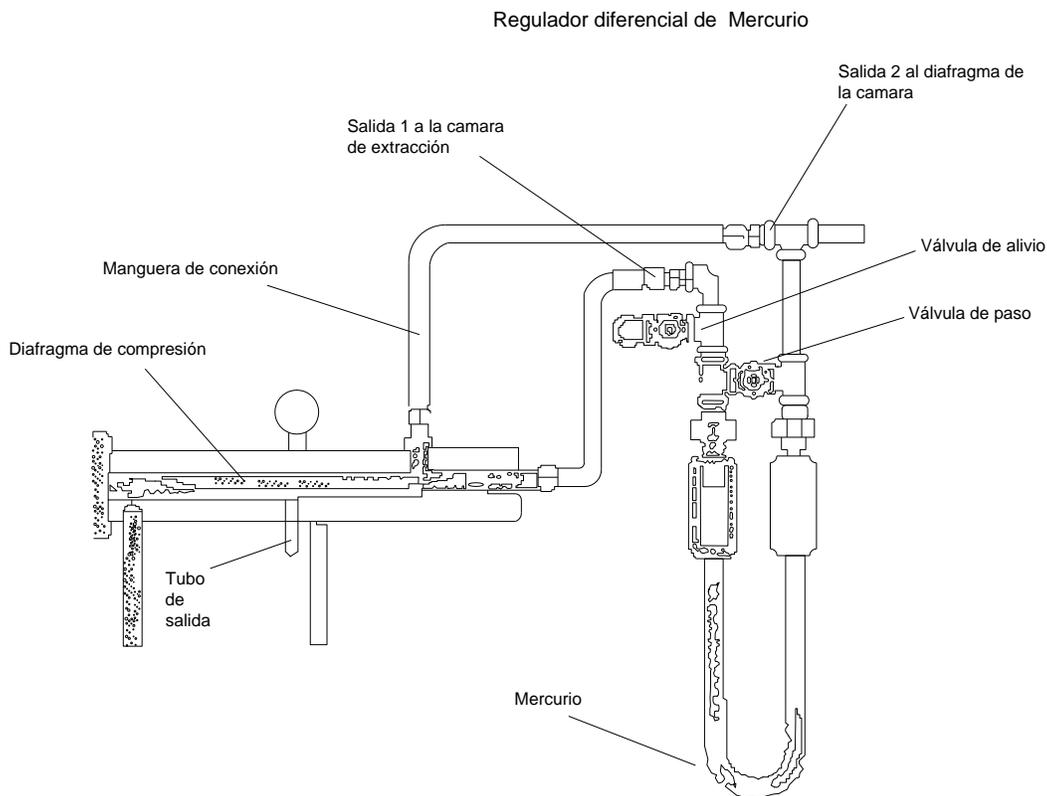


Figura B.3 Diagrama del regulador diferencial de mercurio

Durante el ensaye de la curva característica, es deseable obtener muestras de poca altura, buscando que se requiera el menor tiempo posible para que se alcance el equilibrio. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio varía con el cuadrado de la altura de la muestra. Por ejemplo, una muestra de suelo de

2 cm de altura, tomará un tiempo cuatro veces mayor para alcanzar el equilibrio que una muestra de 1 cm de altura. Siempre que sea posible, la altura de las muestras de suelo debe ser limitada a 1 cm. El Anillo Retenedor de muestras de suelo sugerido, es el que sujeta 25 gr de muestra de 1 cm de altura por 5 ½ cm de diámetro, por lo tanto, es ideal para retener muestras preparadas.

Para lograr que sea extraída el agua de muestras de suelo u otros materiales porosos, es indispensable que las muestras de suelos estén en íntimo contacto con la membrana de celulosa dentro del extractor. También es esencial saturar la muestra con agua antes de que se monte sobre la membrana de celulosa, con el fin de conectar la película de agua del suelo con la de la membrana de celulosa. Este procedimiento asegura la máxima velocidad del flujo del agua de la muestra, durante el proceso de extracción.

Es deseable que el extractor de membrana de presión sea operado de acuerdo con la designación D3152 del Método de la Sociedad Americana de Ensayes (ASTM), titulado: “Método de Ensaye Estándar para la Relación Humedad Capilaridad en Suelos de Textura Fina, mediante el Extractor de Presión”.

B.1.5 Sugerencias

Para realizar el estudio de la curva característica a una muestra de suelo preparada, se debe colocar adecuadamente el montaje de la membrana de celulosa, por lo tanto, se necesitan seguir las siguientes recomendaciones:

B.1.5.1 Remover los tornillos sujetadores, del plato superior y el cilindro extractor

Se centra el disco de celulosa, previamente sumergido en agua por lo menos de 10 a 15 minutos. Después se coloca cuidadosamente sobre la pantalla del plato de drenado, se debe hacer el manejo de la membrana de celulosa con mucho cuidado (la que en condiciones secas permanece rígida), así pues, se debe

evitar hacer dobleces o plegados que pueden causar pequeñas roturas y sean las que posteriormente permitan la salida del aire durante el desarrollo de la corrida. Con la finalidad de evitar dificultades de esa naturaleza, conviene almacenar las membranas de celulosa en un sitio fresco y dentro de un contenedor que conserve la humedad.

Ahora se coloca un arosello sobre la membrana de celulosa y sobre éste se pone el cilindro, procurando que el arosello penetre en la ranura del cilindro, posteriormente, se coloca sobre la ranura superior del cilindro un segundo arosello y encima de arosello la tapa del extractor de membrana, se gira la tapa superior hasta que sus orificios coincidan con los orificios de la tapa inferior.

Es importante mantener las partículas de suelo alejadas del sitio donde hace contacto el arosello con la membrana de celulosa. Las partículas de arena podrán ser empujadas por la membrana de celulosa bajo el arosello debido a que están sujetado por el cilindro extractor y éste por los tornillos, y como resultado causará fugas de aire a través de la membrana de celulosa. Para evitar esto, se coloca un anillo delgado de estopilla o un material similar dentro del cilindro extractor.

Cuando se empieza a preparar muestras para determinar la curva de conductividad, se debe colocar los anillos retenedores de las muestras de suelo sobre la membrana de celulosa dentro del extractor (figura B.4). En el extractor se podrán acomodar hasta 14 muestras cuando éstas son retenidas en los anillos. Cada anillo podrá contener una muestra de suelo de hasta 25 gr.

Se debe trasladar las muestras, previamente preparadas de 25 gr, y los anillos retenedores a las cajas contenedoras de muestras en donde se almacenarán. Se recomienda colocar todas las muestras de suelo dentro de su respectivo anillo.

Una vez terminada la corrida se recomienda extraer todas las muestras de suelo, no dejar ninguna muestra dentro del contenedor porque esto provocará que

se alteren. Durante la colocación, nivelar la muestra en el anillo y cubrirla con un cuadro de papel encerado.

Al iniciar la corrida se recomienda agregar cuidadosamente agua a la superficie entre la membrana de celulosa y el anillo que contiene las muestras, provocando así, un excedente de agua en todo el anillo contenedor.

B.1.5.2 Cerrado del Extractor

Se remueve el exceso de agua de la membrana de celulosa con una pipeta o jeringa de plástico. Después se coloca el segundo anillo en la ranura de la parte superior del cilindro extractor y sobre este el plato superior, también se alinea para que sus orificios coincidan con los del plato inferior. A continuación se insertan los tornillos sujetadores. Si se aplica un ajuste excesivo a los tornillos, se reduce la vida de los aros del cilindro extractor. Por lo que se recomienda utilizar un calibrador de torsión.

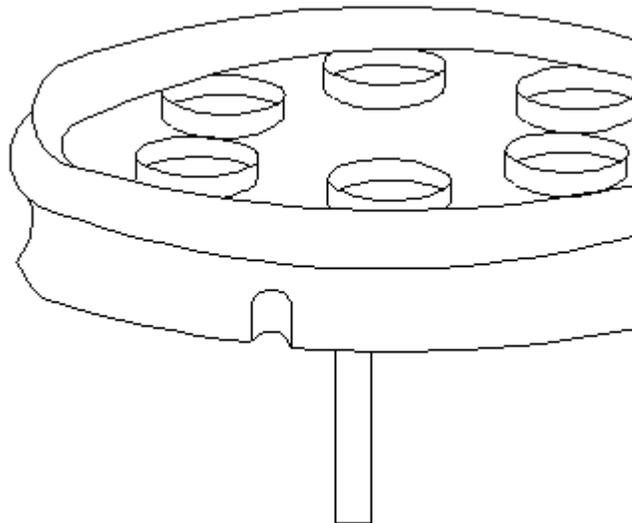


Figura C.4 Anillos retenedores de muestras de suelo

B.1.5.3 Conexión de la bureta para monitorear la salida del agua

Se debe conectar un pequeño tubo en la salida de la pantalla del plato de drenado, donde se encuentra una pequeña funda ajustada para introducir un tubo de pequeño diámetro que se extiende en forma lateral hasta alcanzar una bureta sujeta por una abrazadera a una de las piernas del extractor. El gas puede difundirse en el agua y pasar continuamente a través de la membrana en forma de pequeñas burbujas junto con el agua excedente.

Se deben tomar lecturas periódicamente en la bureta hasta que el flujo se acerque al equilibrio. Si la presión en la cámara del extractor se mantiene constante, y no se observan cambios en la lectura de la bureta por un período de varias horas o hasta días, se considerará que se ha alcanzado el equilibrio.

B.1.5.4 Modificaciones en la presión

Antes de hacer modificaciones en la presión, se debe asegurar que todas las mangueras estén muy bien conectadas con el regulador de presión.

También es necesario asegurar que la válvula del regulador diferencial de mercurio esté completamente abierta. Esto prevendrá posibles daños al diafragma de compresión y/o alteraciones de la muestra dentro del extractor. A la vez, se debe evitar que el mercurio pase a otras partes del sistema regulador en el momento que se presente una entrada de aire rápido a través del tubo en U. Además, la válvula de descarga debe mantenerse cerrada.

En seguida se debe abrir el regulador de presión lentamente y ajustarlo a la presión de extracción deseada. En aquellos casos en los que se determina el contenido de humedad del punto de marchitamiento y se presenta a una presión de 1.5177 Mpa, el agua de la muestra fluirá inmediatamente del extractor a la bureta y de la misma forma, el nivel de la bureta se debe registrar hasta que alcance el equilibrio.

Después de unas horas, la velocidad con la que sale el agua de las muestras de suelo disminuye de manera significativa y las muestras de suelo adquieren suficiente rigidez de forma que el diafragma que comprime a las muestras puede aplicar apreciable presión o compactación; por lo que para aplicar compresión al diafragma se debe cerrar la válvula de paso. Entonces, se abre un poco la válvula de escape, y se puede escuchar que las burbujas pasan a través del mercurio que se encuentra en el tubo en U. Una vez que esto se consigue se cierra la válvula de escape. La presión atrás del diafragma de compresión es ahora de $2.759E-2$ Mpa y es mayor que la presión de extracción. Esto se origina por la disminución de la presión en la cámara. Ahora es necesario provocar que la presión dentro de la cámara de extracción se eleve a su valor original. Esto se logra ajustando el regulador a la presión deseada.

La presión del diafragma mantiene las muestras firmemente en contacto con la membrana de celulosa y facilita la extracción en suelos de textura fina. El diafragma de compresión no es necesario para medios y suelos de textura cuarzosa.

Durante el proceso de extracción, pequeñas cantidades de aire se difunden en el agua y pasan a través de la membrana de celulosa. Como resultado de las altas presiones que están dentro del extractor, el aire se separa de la solución cuando el agua sale del extractor a la presión atmosférica. La velocidad de difusión del aire es de 2 ml/min aproximadamente, y la presión dentro del extractor es de 1.5177 Mpa. Si se utilizan bajas presiones, la velocidad de difusión es menor.

B.1.5.5 Remoción de las muestras

Las muestras pueden ser removidas cuando las lecturas en la bureta indican que se ha alcanzado el equilibrio. En la mayoría de los suelos el equilibrio hidráulico se alcanzará en la membrana de celulosa entre 18 y 20 horas.

Al terminar el ensaye se recomienda abrir la válvula de paso del primer regulador diferencial de mercurio. A partir de ahí, se cierra lentamente el regulador de presión y después se abre la válvula de salida hasta que toda la presión salga del extractor. A continuación se remueven los tornillos sujetadores y el plato superior. Se deben transferir las muestras a cajas de humedad después de liberar la presión y tan pronto como sea posible, con el fin de evitar cambios en el contenido de agua. Al terminar la corrida desechan los discos de membrana de celulosa.

B.1.5.6 Determinación del contenido de agua

Después de transferir las muestras a las cajas de humedad, se pesará cuidadosamente la caja y las muestras contenidas. En seguida, se colocará la caja con las muestras en un horno y se secarán a 105 °C hasta que su peso ya no disminuya, para determinar el contenido de agua. Este puede ser expresado como un porcentaje del peso seco del suelo. Si se conoce la densidad volumétrica del suelo, entonces también se puede conocer el contenido de humedad volumétrica del suelo.

B.1.5.7 Desarrollo de las curvas de retención del suelo

Se podrán desarrollar las curvas características con el extractor de membrana de presión en un rango de $9.855E-2$ a 9.855 Mpa para cualquier tipo de suelo. Los puntos de la curva se pueden determinar obteniendo en forma simultánea el contenido de agua. Se recomienda correr varias muestras del mismo suelo a diferente presión de extracción como puede ser $9.855E-2$ Mpa, 0.2957 Mpa, 0.4927 Mpa, etc. Cuando se alcanza el equilibrio para cada presión de extracción aplicada, se deben retirar las muestras para determinarles el contenido de agua. Entonces se colocarán los pares ordenados (presión y contenido de agua) en una gráfica para producir la curva característica para el suelo que se esté estudiando.

B.2 Resultados obtenidos

En el desarrollo de esta investigación se trabajó con un suelo de tipo SM, según el criterio de clasificación S.U.C.S. color café claro, el cual se disgrega al disminuir su contenido de agua.

El formato utilizado en la realización del ensaye de la curva característica por secado fue el cual se muestra en las tablas B.1 y B.2. Con la información contenida aquí, se determina el grado de saturación para la correspondiente presión aplicada.

Tabla B.1 Formato de lectura del ensaye del Cilindro extractor de membrana

Lectura No	Fecha de la toma de lectura	Hora	Presión aplicada Kpa	Lectura del a Bureta

Tabla B.2 Formato de lecturas de los especímenes ensayados

	Contenedores					
Presión	1	2	3	4	5	6
Peso Inicial						
Izquierda						
Centro						
Derecha						
Peso Final						
Izquierda						
Centro						
Derecha						

Ahora se muestra un ejemplo de los resultados que se obtienen en el ensaye, con ellos se construirá la curva característica en trayectoria de Secado (tabla B.3).

Tabla B.3 Valores de Presión vs Grado de Saturación

Lectura No	Presión kPa	Grado de saturación %
1	1.03	99.65
2	43.09	80.17
3	86.17	68.64
4	129.26	62.27
5	172.35	58.37
6	258.52	56.26
7	344.69	54.69
8	517.04	52.46
9	689.38	49.57
10	1378.76	44.25
11	2068.15	39.72
12	2757.53	37.14
13	3446.91	35.13
14	4136.29	32.69

Se presenta también la Curva Característica en trayectoria de secado, obtenida mediante el cilindro extractor la cual aparece en la figura B.5.

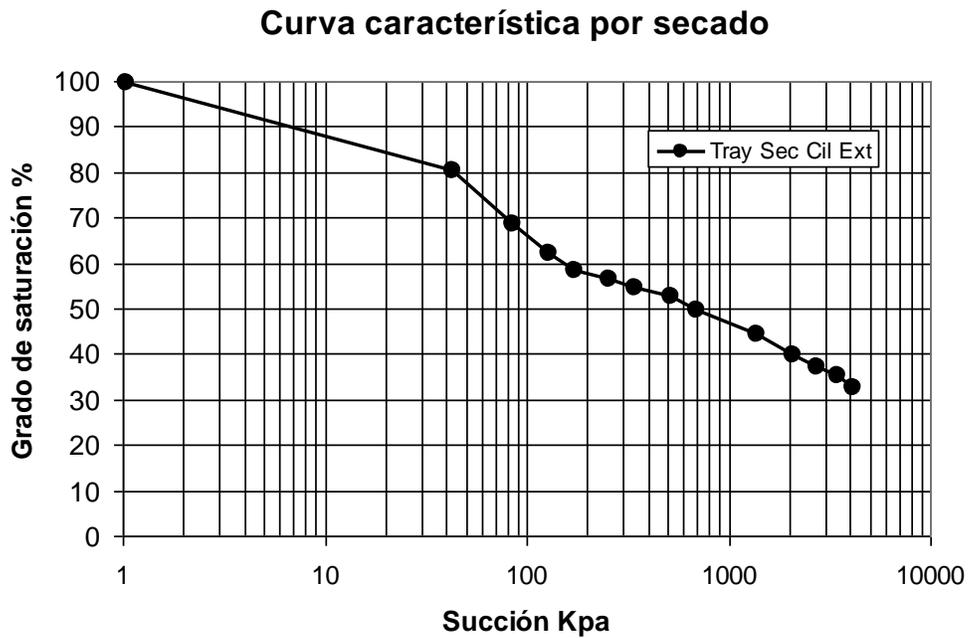


Figura B.5 Curva Característica en trayectoria de secado obtenida

ANEXO C

A continuación se presenta el procedimiento utilizado para suministrar el control de la succión a utilizar en un equipo triaxial convencional, este mismo procedimiento también puede ser aplicado al equipo de consolidación o al equipo de corte directo.

C.1 Procedimiento utilizado para controlar la succión de las probetas de suelo durante el ensaye triaxial con succión controlada

C.1.1 Fabricación y preparación de los especímenes

Con el propósito de conocer el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo estructurado por agregados, se elaboraron especímenes de suelo fabricados mediante compactación estática y buscando reproducir un peso específico del suelo $\gamma_m = 18.01 \text{ kN/m}^3$ para un contenido de agua $\omega = 21\%$, tal y como se aprecia en la figura C.1. El lote de especímenes de suelo elaborados se separó en dos partes, a la primera parte se le proporcionó un secado parcial mediante el horno eléctrico a $110 \text{ }^\circ\text{C}$, buscando reducir el grado de saturación de las probetas de suelo hasta que ésta alcanzara un valor cercano inferior al valor del grado de saturación previamente escogido.

A la segunda parte de los especímenes, fabricados en primer lugar, se les sometió a un trabajo de secado total al horno eléctrico a $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, a cada uno de los especímenes de este lote se les adicionó agua (superficialmente) con un aspersor, hasta llevarlos a un valor de su grado de saturación cercano inferior al previamente escogido para este propósito (figura C.2).

C.1.2 Equilibrio de la succión de los especímenes

Una vez que los especímenes de suelo se encontraron con un grado de saturación cercanos inferior al grado de saturación seleccionado previamente, se les indujo el equilibrio de la succión, mediante flujo de vapor de agua con un concentración salina conocida (succión conocida), proporcionado por un sistema que cuenta con una bomba peristáltica (observe la figura C.3). Es así que, el equilibrio de la succión de cada espécimen fue alcanzada, a cada uno de estos especímenes se les sometió a un proceso de preconsolidación mediante una presión de confinamiento de 150 kPa, durante 24 horas (véase la figura C.5). Transcurrido este tiempo, cada espécimen recibió la acción del esfuerzo desviador hasta su falla, a una velocidad de 0.001 mm/min, manteniendo la magnitud de su succión constante.

Para determinar el tiempo de equilibrio de cada una de las probetas se registró su peso al iniciar, así como la hora, posteriormente se determinó el peso de la probeta y el tiempo transcurrido, diariamente hasta que se alcanzó el equilibrio, es decir, hasta que su peso se mantuvo constante. Es importante señalar que el flujo de vapor se mantuvo a una velocidad de 24 ciclos/minuto, y además, el sistema que proporcionó el vapor con succión controlada permaneció dentro de una cámara con temperatura controlada a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$, así mismo, se determinó el tiempo necesario para que la probeta alcanzara el equilibrio, el cual fue de 5 días, tal y como se muestra en la figura C.4.

Es importante señalar que los grados de saturación seleccionados para ensayar a las probetas de suelo en ambas trayectorias se obtuvieron buscando que cubrieran el comportamiento del suelo desde seco hasta saturado, y así, poder apreciar el comportamiento mecánico de este suelo.



Figura C.1 Dispositivos utilizados en la fabricación de los especímenes de suelo



Figura C.2 Adición de agua a los especímenes de suelo mediante el aspersor



Figura C.3 Sistema para circular el vapor con succión controlada

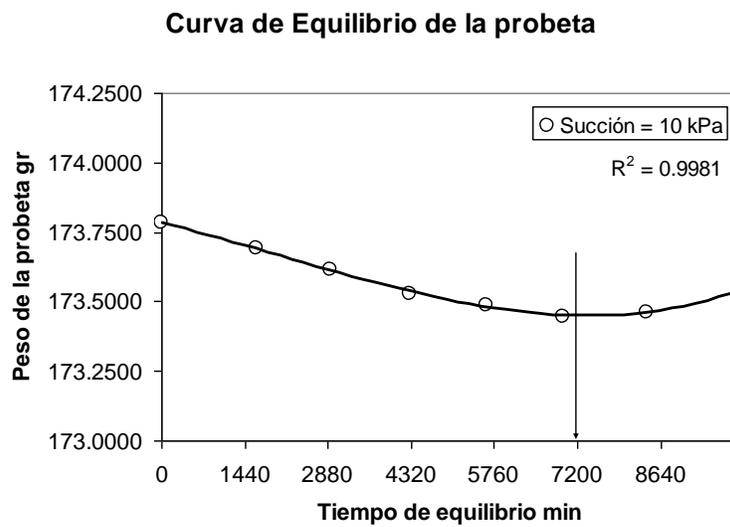


Figura C.4 Tiempo en el que el espécimen alcanzó el equilibrio de la succión

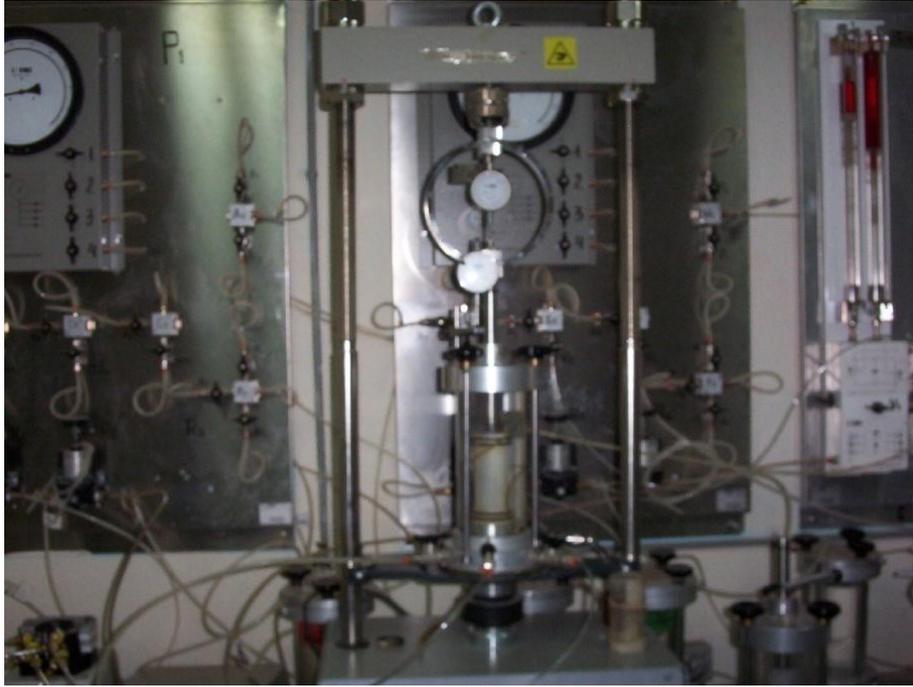


Figura C.5 Trabajo de preconsolidación de los especímenes

ANEXO D

D.1 Uso de la Bomba Peristáltica

Bomba Peristáltica Dynamax



Figura D.1 Bomba Peristáltica Model RP-1

D.1.1 Guía del usuario

D.1.1.1 Descripción general

La bomba peristáltica Dinamax RP-1 está específicamente diseñada para transferencia de fluidos. El impulsor de rotación tiene 10 roles de acero inoxidable. Como el impulsor rota, cinco de los roles presionan al tubo contra el brazo de compresión, produciendo flujo por la acción peristáltica. Los cinco roles que están constantemente en contacto con la manguera, aseguran una pulsación baja, flujo laminar, y alta presión. El modelo RP-1 es ideal para cromatografía líquida crítica, generación de gradientes, y para aplicaciones en análisis de flujo.

El RP-1 incorpora un impulsor de diseño único: el tornillo de ajuste no presiona directamente al brazo de compresión. En su lugar, al girar el tornillo de ajuste en el RP-1, este mueve un impulsor que aplica fuerza gradual al brazo compresor. Dando como resultado un control de flujo más preciso.

El RP-1 cuenta con un motor de torque de pasos, controlado por un microprocesador con un circuito único de retroalimentación para dar una buena estabilidad en la velocidad, aún a velocidades muy bajas. La estabilidad de la velocidad se mantiene entre los 0 y 40 °C y con presiones en contra superiores a los 5 bares. La velocidad de la bomba se maneja en rpm en un display de cristal líquido (LCD), en el panel frontal de la bomba. La velocidad de bombeo y la dirección de rotación son controladas por una tecla de membrana próxima al display.

Se encuentran disponibles varias cabezas para la bomba: un modelo con un sólo canal, así como versiones de 2, 3, 4, y 8 canales. Se asigna presión individual a cada tubo de la cabeza de la bomba, permitiendo usar diferentes diámetros de tubo en cada canal. Las asignaciones de compresión independientes para cada canal aseguran una velocidad de flujo óptima y una larga vida de la manguera.

Los collares fijados a las mangueras, permiten una fácil instalación de éstas a la presión adecuada, los cuales aseguran que el diámetro del tubo sea optimizado y no se altere día con día. La precisa y cuidadosa asignación de la velocidad del motor se debe ajustar a la presión de la manguera, el diámetro del tubo contribuye a asegurar las velocidades de flujo reproducible.

D.2 Desempaque

El contenedor de embarque deberá contener lo siguiente:

Tabla D.1 Accesorios del Bomba peristáltica

Descripción	Cantidad
Cuerpo de la bomba	1
Cabeza de la bomba	1 (como ordeno)
Accesorios del paquete contenedor	
Cordón de corriente	1
Fusibles	4
Tornillo de montura	2
Mangueras	
0.38 mm Diam Int	1
1.52 mm Diam Int	1

3.16 mm Diam Int		1
Manguera de drenaje		2
Manual de instrucciones		1

D.3 Controles e indicadores

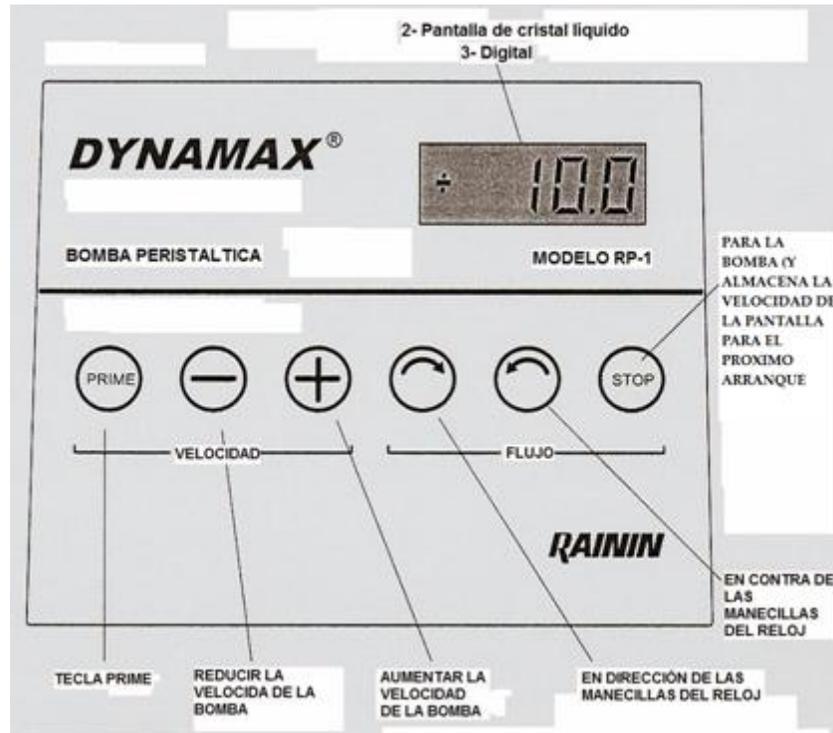


Figura D.2 Controles e indicadores frontal RP-1

LCD: La pantalla de cristal líquido muestra con 3 dígitos y 2 símbolos la velocidad del motor en rpm. Cuando la bomba está trabajando despliega los signos “+ o -“, para indicar la rotación de la cabeza de la bomba, a favor de las manecillas del reloj (+) o en contra de las manecillas del reloj (-).

Tecla PRIME (PRINCIPAL): Anula las velocidades altas. Para la manguera principal. Presiona esta tecla cuando la bomba está trabajando a su máxima capacidad de 48 rpm. (El presionar la tecla no tiene efecto cuando la bomba no está trabajando). La bomba se mantiene en alta velocidad de flujo hasta que la tecla PRIME es presionada nuevamente, o hasta que cualquiera de las dos teclas

de arranque sea presionadas, la bomba regresa a la velocidad que se le asignó anteriormente.

Tecla MINUS (-): Reduce la velocidad del motor al presionar y mantener la tecla oprimida mientras la bomba está trabajando, así es que reduce la velocidad de la bomba durante el tiempo en el que la tecla esté presionada. Presionando y manteniendo oprimida la tecla, mientras la bomba no está trabajando, asignará la velocidad a la que la bomba operará cuando arranque de nuevo.

Tecla PLUS (+): Aumenta la velocidad del motor; su uso es similar al de la tecla MINUS (-).

Tecla STAR (arranque) en dirección de las manecillas del reloj: Presionando esta tecla cuando la bomba esta parada, ocasionará que el cilindro rote en dirección de las manecillas del reloj a la velocidad desplegada en el LCD (Pantalla de cristal líquido). Presionando ésta mientras la cabeza de la bomba está en la máxima velocidad (después de que la tecla PRIME ha sido presionada) provoca que la bomba regrese a su velocidad anterior. Presionando esta tecla mientras que la bomba está trabajando en dirección contraria a las manecillas del reloj, ocasiona que el cilindro pare e inicie su rotación inmediatamente en dirección de las manecillas del reloj a la misma velocidad.

Tecla STAR (arranque) en contra de las manecillas del reloj: es usada en forma similar a la tecla de arranque en dirección de las manecillas del reloj.

Tecla STOP (parar): Detiene la bomba y almacena en su memoria el valor de la velocidad que estuvo desplegada en la pantalla de vidrio líquido LCD. Este valor aparece en la pantalla cuando la bomba es arrancada con la tecla de arranque.

D.4 Panel Posterior

Modulo de línea de corriente: La corriente es suministrada a la bomba RP-1 vía línea de corriente, conteniendo:

1. Switch de corriente On/Off.- Es un switch de arco de dos posiciones que suministra corriente alterna AC, está encendido en On y apagado en Off.
2. Cable receptor de corriente.- Aterrizar el tercer polo. Utilizar el cordón de corriente suministrado en el kit de los accesorios.
3. Fusible/Selector del voltaje de línea.- Es un selector de dos posiciones 110V/220V que contiene dos fusibles.

Terminal de contacto externo desnudos.- Terminal desnuda para control remoto de circuito cerrado. Control de entradas, velocidad, parar/arrancar, y dirección de rotación. Hay también una salida de +5 V CD en la terminal de aterrizaje, usada como un voltaje auxiliar.

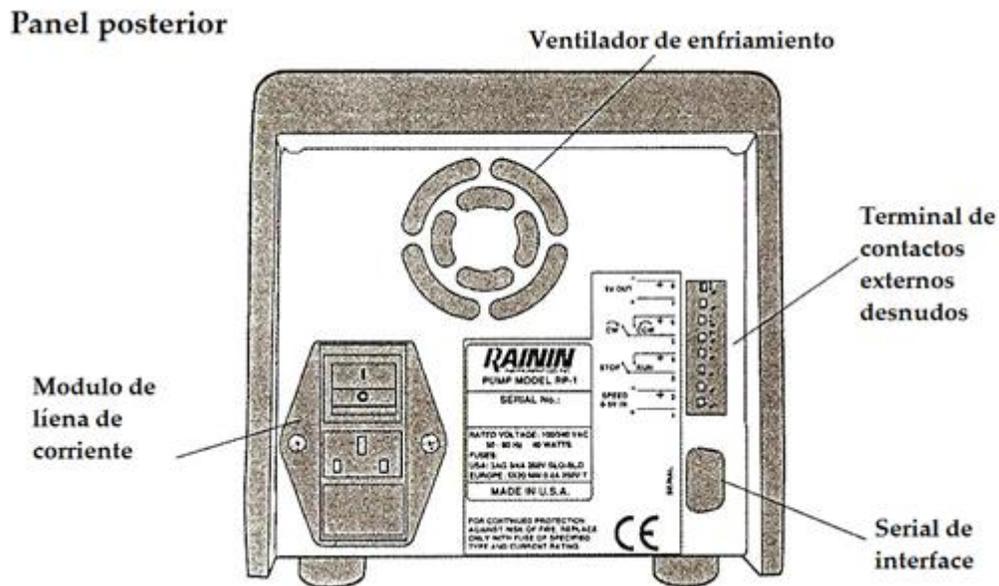


Figura D.3 Panel posterior

Nota.- La bomba RP-1 es empacada desde la fábrica lista para operar a la línea de voltaje del país de destino. Referirse al manual del usuario para información de los fusibles, antes de operar la bomba.

Serial.- Soquet de interface serial para computadora a control remoto. Favor de referirse a la sección 5 para mayor información en relación a la interface serial a control remoto.

D.5 Mangueras

Selección de mangueras.- El modelo RP-1 utiliza mangueras especiales con collares de enlace. Para ello, se debe seleccionar la manguera más adecuada para la aplicación de:

Cloruro de poliyvinil (PVC) – para soluciones más acuosas.

Silicón.- Para soluciones acuosas polares.

Vitón.- Para gases, aceites, ácidos fuertes, con temperaturas a 200°C.

Diferentes diámetros de manguera se pueden instalar en canales adyacentes para proporcionar una variedad de velocidades de flujo para una velocidad de bombeo dada.

D.6 Instalación de mangueras

1.- Con referencia a la figura D.4, abrir los brazos de compresión mediante el mecanismo biselado hacia los roles (Disparador), esto permite quitarle al brazo el candado para que pueda ser sacado, mediante un giro permite sacar fácilmente al brazo de compresión de los roles.

2.- Seleccione la longitud del tubo del diámetro deseado e inserte uno de sus collares fijos dentro de las ranuras en los collares de soporte.

3.- Instalar las mangueras alrededor de los roles y dentro de las ranuras del brazo de compresión (la ranura evita que el tubo serpentee durante la operación). Despliegue el tubo suavemente e insértelo dentro de la ranura de otro collar de fijación en el collar de sujeción opuesto. Ver la figura D.5.

4.- Cierre el brazo de compresión sobre el tubo y cierre el brazo candado. (Esta acción también “activa” el botón disparador).

5.- Repita los pasos del 1 al 4 para cada canal y afloje todo el tornillo de ajuste por ahora.

Debido a las irregularidades de la manguera, el tubo se puede subir o bajar en los roles. Si esto ocurre tuerza a 180° el collar en el extremo de la manguera afectada en dirección opuesta al movimiento del tubo. Vea la figura D.6.

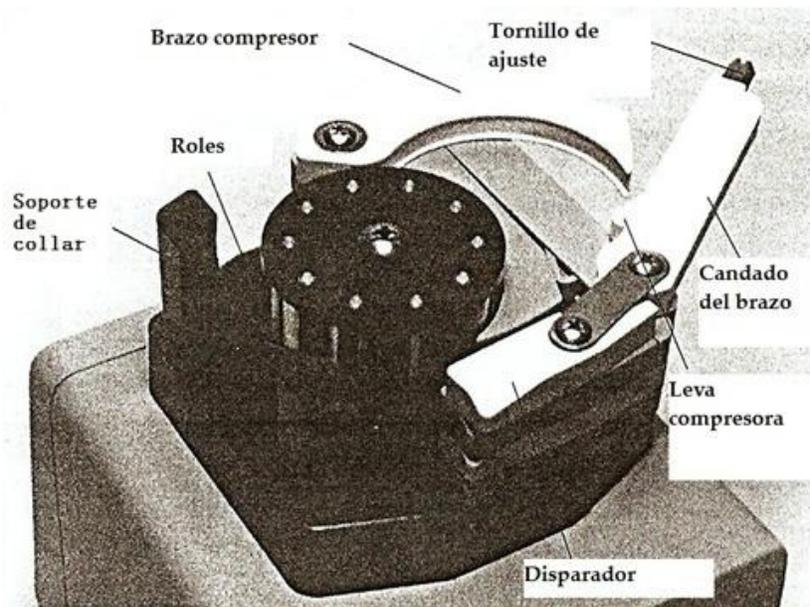


Figura D.4. Cabeza de la bomba

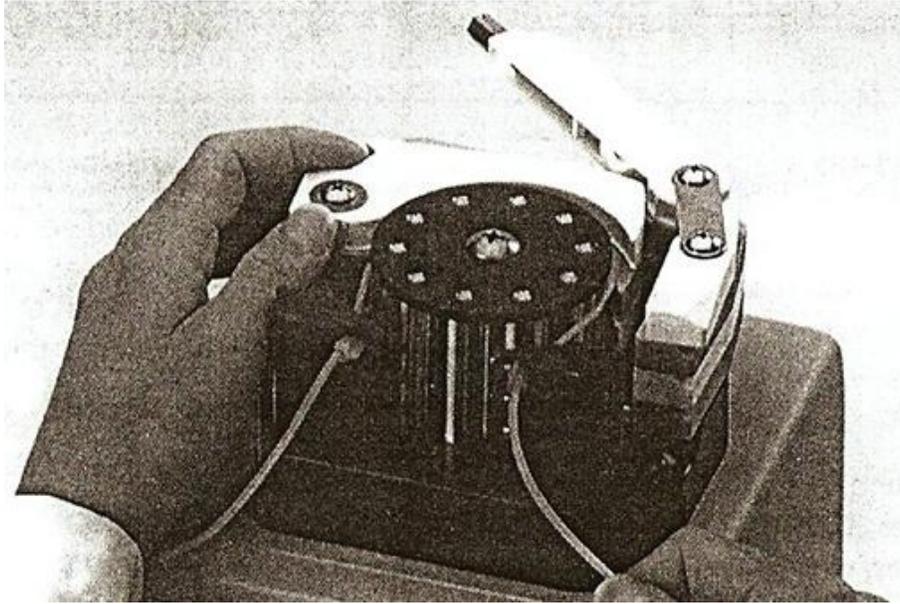


Figura D.5 Instalación de la manguera

Precaución.- Si utiliza el modelo RP-1 a presiones (>25 PSI) asegúrese que la presión de operación no exceda la presión máxima de la manguera.

Tubos de drenaje: Agregar un tubo de drenaje del kit de accesorios en el talón de atrás de la cabeza de la bomba aplanándolo firmemente sobre el talón. Esto ayudará a prevenir que algún líquido se derrame (debido a que la manguera se rompa) bajo los roles y dentro de la parte electrónica de la bomba.

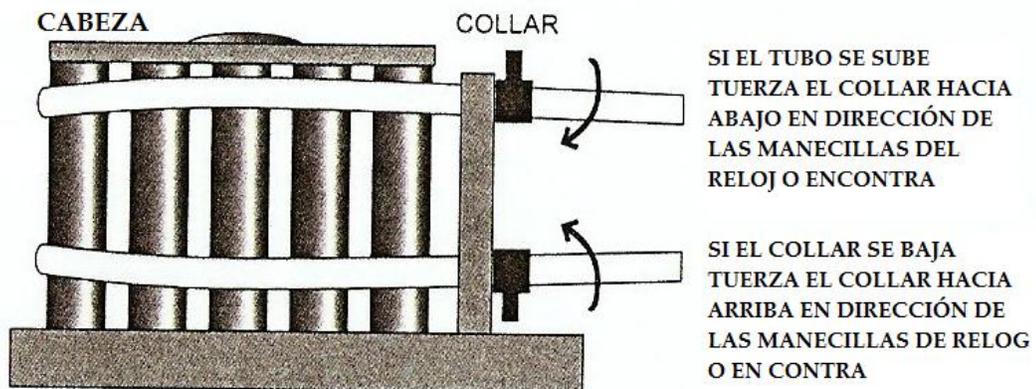


Figura D.6 Cabeza de la bomba

D.7 Asignación y Operación

1.- Conecte el RP-1 a una fuente de corriente AC aterrizada.

2.- Encienda la bomba en ON usando el switch de poder en el panel posterior. El display de cristal líquido mostrará la velocidad asignada en la ocasión anterior que fue utilizada la bomba (la velocidad es asignada a elección de 10 rpm). La bomba no arrancará hasta que presione a la vez las teclas de arranque (Star).

3.- Seleccione el tipo de manguera a utilizar y determine la velocidad máxima de flujo deseada. Refiérase a la tabla D.2 para seleccionar el diámetro de manguera específico y a la vez asigne la velocidad que produce un flujo máximo.

Tabla D.2 Velocidad de flujo máximo de la bomba

Catálogo No.	Descripción	Flujo Máximo
39-628	PVC 3.16 mm Diam Inter.	26.0 ml/min
39-627	PVC 2.80 mm Diam Inter.	23.0 ml/min
39-626	PVC 2.29 mm Diam Inter.	15.0 ml/min
39-625	PVC 1.52 mm Diam Inter.	9.50 ml/min
39-624	PVC 0.76 mm Diam Inter.	2.50 ml/min
39-623	PVC 0.63 mm Diam Inter.	1.70 ml/min
39-622	PVC 0.50 mm Diam Inter.	1.33 ml/min
39-621	PVC 0.38 mm Diam Inter.	0.76 ml/min
39-620	PVC 0.25 mm Diam Inter.	0.51 ml/min

4.- Asigne la velocidad de la bomba utilizando la tecla de control de más o menos. (Presionando la tecla una vez cambien los dígitos en el display, presionando y sosteniendo la tecla oprimida, cambiará la velocidad en forma creciente hasta alcanzar una mayor velocidad). No arranque la bomba aún.

5.- Instalar la manguera de flujo para cada canal que desee usar, como se describe en la sección previa. Unir los conectores acoplándolos y agregue la manguera (ver la sección D.9 – accesorios) para completar el recorrido del fluido desde el recipiente de almacenamiento hasta el receptor.

Nota. – Mantener las manos y objetos extraños alejados de los roles mientras la máquina está en operación.

D.8 Operación

1.- Arrancar la bomba en la dirección deseada presionando a la vez la tecla de arranque y la tecla de dirección (en dirección de las manecillas del reloj o en contra de las manecillas del reloj).

2.- Ajustar la presión de la leva para cada canal apretado suavemente el tornillo de ajuste hasta que inicie el flujo, entonces apretar el tornillo $\frac{1}{4}$ de vuelta. (Ajustar únicamente lo mínimo necesario para que bombeando se asegure una larga vida de la manguera).

3.- Cuando se use una manguera nueva o seca. Presionar la tecla PRIME (principal) para preparar la manguera. Después de que la manguera esté preparada, presionar la tecla preparar (PRIME) nuevamente o la tecla arrancar para regresar a la velocidad de flujo asignada previamente.

4.- Permitir que el flujo se estabilice por 15 minutos, entonces revisar la velocidad de flujo y la presión de la leva. Ajustarla si es necesario.

D.9 Auto arranque

La bomba RP-1 tiene una característica de auto arranque que opera como sigue: si la bomba está en marcha y el flujo de corriente eléctrica es cortado, la bomba arrancará automáticamente a la misma velocidad cuando el suministro de corriente regrese. Cuando esto ocurra, la pantalla parpadeará On y Off (indicando auto arranque) hasta que las teclas de Arranque y Parar sean presionadas.

Si la bomba no se encuentra en marcha cuando el suministro de corriente se interrumpe, su operación es normal. La bomba no arrancará automáticamente cuando la corriente regrese, entonces permanecerá en reposo hasta que la tecla de arranque sea presionada.

Nota.- El modelo RP-1 podrá estar trabajando por lo menos 10 segundos antes de que la corriente sea interrumpida por las características de trabajo del auto arranque.

El auto arranque es fijado en “ON” cuando la bomba está liberada. Usted puede cambiar de auto arranque a “OFF” como sigue:

1.- Con el control de poder en Off, mantenga presionada la tecla STOP mientras se cambia el control de poder a On. Cuando la pantalla encienda, libere la tecla STOP. La pantalla deberá de leer A30, donde A indica auto arranque permitido, y 30 indica la unidad de identificación para operación remota.

2.- Si usted desea cambiar la condición de auto arranque, presione la tecla PRIME. La A cambia a deshabilitar (-) para mostrar el auto arranque deshabilitado. Presione la tecla PRIME nuevamente y habilitará el auto arranque y a la vez cambia el deshabilitado (-) por el A. Fije el auto arranque como se desee.

3.- Presione la tecla STOP nuevamente para almacenar la condición de auto arranque y regresar a la pantalla normal (rpm).

D.10 Requerimientos de operación

El modelo RP-1 está diseñado para operar en laboratorio o condiciones similares a una temperatura entre 4 y 40 °C. La bomba deberá ser colocada en una superficie plana limpia y deberá ser operada en un área con ventilación adecuada, libre de humo. Todos los orificios de la bomba deberán permanecer sin obstrucción durante la operación.

Si el equipo es utilizado en una manera no especificada por las recomendaciones de cuidado proporcionadas por el fabricante, el equipo se puede dañar.

Asegurar que el ventilador no se obstruya durante la operación.

D.11 Sugerencias de operación

1.- Para cuando se manejen velocidades de flujo bajas, usar los diámetros pequeños, no use los diámetros grandes a velocidades bajas.

2.- Para maximizar el periodo de vida de la manguera, utilice una velocidad de baja a media, con mangueras de diámetro apropiado para las velocidades de flujo deseadas.

3.- Instalar el tubo de drenado proporcionado en el kit de accesorios, en el tacón del la parte posterior de la cabeza de la bomba.

4.- Cambiar la manguera de flujo tan pronto como presente alguna señal de rotura, desgaste o al apreciar cristalización. Reemplazar las mangueras desgastadas antes de que fuguen, esto ayudará a evitar escurrimientos dentro del compartimiento electrónico de la bomba y con ello costos de reparación.

5.- Coloque el RP-1 tan alto como se encuentre el recipiente recolector para evitar flujo gravitacional dentro de la bomba en caso de que la manguera se rompa.

6.- Cuando la bomba no se encuentre en uso, presione el mecanismo de sujeción para liberar el brazo de compresión. Suelte del tubo desganchando uno de collares del tubo. Esto evitará el desarrollo de costras en la manguera provocadas por la leva contra los roles. Las costras no deben presentarse en la manguera debido a que provocan excesivas pulsaciones y velocidades de flujo irregular.

7.- Limpiar oportunamente los derrames, especialmente cerca de la cabeza de la bomba, enfrente de la membrana del panel y de la pantalla.

8.- Cambiar el botón de encendido a Off cuando se limpie el modelo RP-1. Utilizar un trapo humedecido con agua únicamente para limpiar la bomba; no utilice detergentes ásperos o algún solvente para limpiar.

Nota.- Cuando limpie las mangueras de la cabeza del RP-1 asegurarse de que la bomba esté apagada.

ANEXO E

E.1 Preparación de las muestras para obtener las micrografías

Para obtener las micrografías del suelo fue necesario desarrollar el siguiente procedimiento:

E.1.1 Preparación del suelo

Con la muestra de suelo proveniente de Ciudad Fernández S.L.P. y el suelo proveniente de Uriangato Gto., se obtuvo una mezcla de suelo en proporción de 30-70 % la cual se sometió a un proceso de secado total hasta que el suelo alcanzó peso constante.

A partir de aquí, al suelo se le adicionó agua hasta que alcanzó un contenido de humedad $\omega = 21 \%$.

E.2 Colocación del suelo dentro del porta muestras

Con el suelo preparado con un contenido de humedad del 21 % se fabricaron especímenes buscando reproducirlos con un γ_m de 18.01 kN/m³ para un contenido de humedad, $\omega = 21 \%$, la muestra se instaló dentro de un porta muestra tal y como se aprecia en la figura E.1.



Figura E.1. Especímenes de suelo SM instalados dentro de un porta muestras

E.3 Instalación de los porta muestras dentro del porta objetos

El porta muestras, ya con las muestras, fue instalado dentro del porta objetos. Este dispositivo se coloca dentro del microscopio electrónico de barrido. El microscopio electrónico de barrido trabajó a bajo vacío para no alterar las condiciones de humedad de las muestras. Para obtener las micrografías fue utilizado un microscopio electrónico de barrido (figura E.2).



Figura E.2. Microscopio electrónico de barrido utilizado

Las micrografías obtenidas durante este proceso fueron a 100X, 500X, 1000X, 3000X y 6000X aumentos respectivamente, una de ellas se aprecia en la figura E.3.

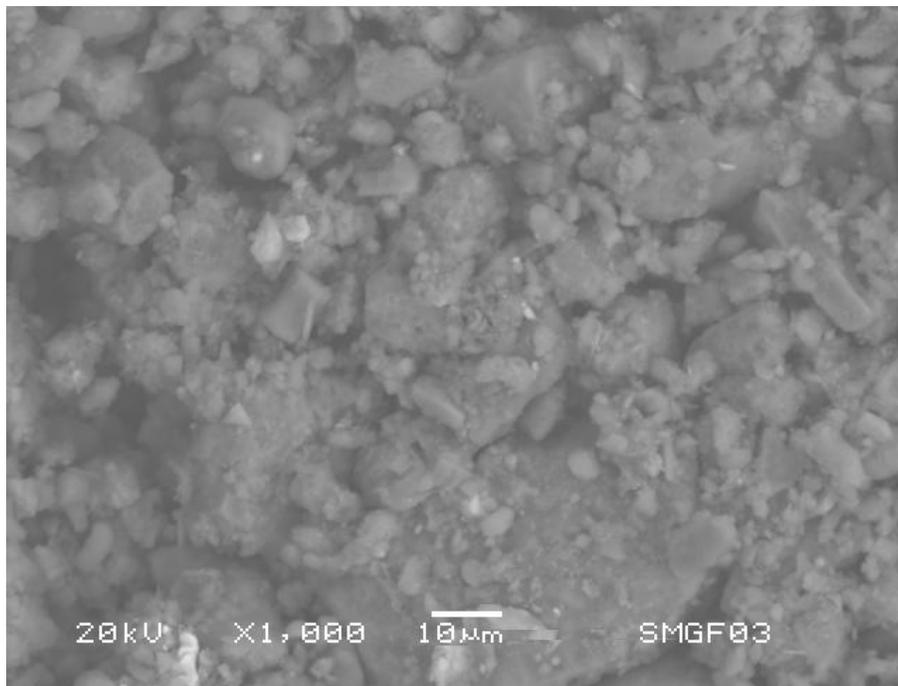


Figura E.3. Micrografía del suelo SM

E.4 Procedimiento utilizado para determinar la porosimetría del suelo a partir de las micrografías

El procedimiento utilizado para determinar la porosimetría del suelo a partir de las micrografías se presenta a continuación:

1. Se obtiene la micrografía mediante el microscopio electrónico de barrido.

2. Cada una de las micrografías recibe un tratamiento de nitidez con la finalidad de apreciar mejor la forma de las partículas sólidas y los poros presentes en el suelo.
3. Mediante un programa de conteo de imagen es posible cuantificar la superficie de la micrografía, así como la de cualquier área seleccionada sobre ella, para esto es necesario proporcionar la escala de la imagen. De esta manera, cada uno de los poros seleccionados es cuantificado sin importar su forma, tamaño o unidades correspondientes. El programa mantiene el área total de la micrografía, así como la de cada uno de los poros seleccionados y la sumatoria de las áreas seleccionadas. Con el área total y el área de los poros es posible conocer el área de los sólidos. De esta manera usando la expresión de la relación de vacíos ($e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{A_v}{A_s}$) es posible comparar su valor obtenido con el determinado experimentalmente. Esta revisión permite conocer el momento en el cual el análisis de la imagen ha terminado. Finalmente, el programa proporciona un archivo con el listado del área de los poros y su diámetro equivalente.

ANEXO F

En este anexo se presenta el procedimiento para obtener la curva característica a partir de la distribución porosimétrica experimental.

F.1 Determinación de la curva característica mediante el modelo probabilista apoyándose en la porosimetría por intrusión de mercurio

A continuación se presenta el procedimiento que se sigue para obtener la curva característica en ambas trayectorias mediante el Modelo Probabilista (MP), véase la figura F.1.



Figura F.1 Secuencia para obtener la curva característica mediante el MP

Primer paso.- Para alimentar este modelo se recomienda utilizar la porosimetría obtenida mediante el ensaye de intrusión de mercurio (ver la tabla F.1 y la figura F.2). En este caso se utilizó la porosimetría de Vulliet *et al.*, (2006).

Tabla F.1 Distribución porosimetría del suelo

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo	No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.010	26.00	15	1.120	26.00
2	0.018	29.00	16	1.560	28.00
3	0.026	14.00	17	2.000	28.50
4	0.034	14.00	18	3.000	37.50
5	0.048	15.00	19	4.000	47.00
6	0.062	17.00	20	5.200	47.00
7	0.092	20.50	21	7.600	50.00
8	0.130	26.00	22	10.000	63.00
9	0.170	27.00	23	14.000	50.50
10	0.260	30.00	24	18.600	48.00
11	0.320	32.00	25	20.600	43.00
12	0.420	30.50	26	44.000	37.00
13	0.600	28.00	27	80.000	8.00
14	0.80	27.00	28	100.000	0.10

Fuente: Tomada de Vulliet *et al.* (2006).

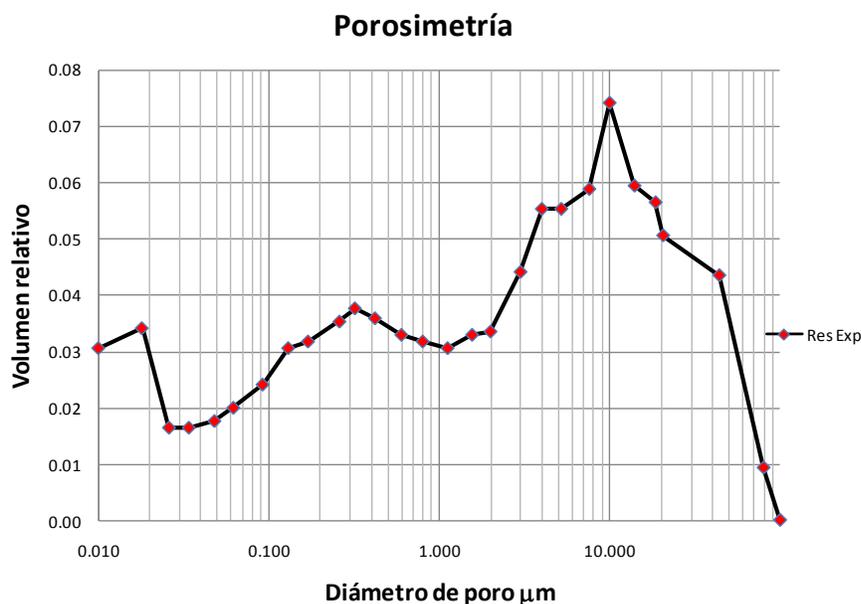


Figura F.2 Distribución de tamaño de poro obtenida mediante intrusión de

mercurio (tomada de Vulliet *et al.* 2006)

Segundo paso.- Se separan los tamaños de poro que corresponden a los enlaces y a los sitios, respectivamente. Estas distribuciones de enlaces y sitios aparecen en las tablas F.2 y F.3.

Tabla F.2 Porosimetría de los enlaces utilizada en el análisis

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.0003	0.50
2	0.0005	2.00
3	0.0010	4.00
4	0.0015	8.00
5	0.0030	16.00
6	0.0050	20.00
7	0.0100	26.00
8	0.0180	29.00
9	0.0260	14.00
10	0.0500	9.00
11	0.1000	4.00
12	0.2000	2.00
13	0.5000	0.50

Fuente: Tomada de Vulliet *et al.*, (2006)

Tabla F.3 Porosimetría de los sitio utilizada en el análisis

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo	No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.003	0.50	15	0.600	28.00
2	0.005	3.00	16	0.800	27.00
3	0.010	6.00	17	1.120	26.00
4	0.017	9.00	18	1.560	22.00
5	0.025	11.00	19	2.000	20.00
6	0.040	14.00	20	3.000	16.00
7	0.048	15.00	21	4.000	12.00
8	0.062	17.00	22	5.200	8.00
9	0.092	20.50	23	7.600	4.50
10	0.130	26.00	24	10.000	2.00
11	0.170	27.00	25	14.000	0.40
12	0.260	30.00			
13	0.320	32.00			
14	0.420	30.50			

Fuente: Tomada de Vulliet *et al.* (2006)

Tercer paso.- A partir de la distribución de los enlaces y sitios extraídos de la distribución porosimétrica se obtuvo que $\mu_B = 0.070 \mu\text{m}$ y $\sigma_B = 9.80 \mu\text{m}$. En lo que respecta a la distribución de los sitios, se determinó que $\mu_S = 2.059 \mu\text{m}$ y $\sigma_S = 3.587 \mu\text{m}$.

Cuarto paso.- Determinación de la distribución normal de enlaces y sitios (figura F.3). Cabe mencionar que a partir del diámetro medio y desviación estándar, se construyó la curva de distribución normal, tanto para los sitios como para los enlaces, debido a que describe aproximadamente la distribución real de los sitios y los enlaces presentes en un suelo. La expresión matemática de la distribución normal es la Ecuación F.1 que aparece a continuación.

$$f(D, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D' - \mu')^2}{2\sigma'^2}} \quad -\infty < D < \infty \quad \text{Ec. F.1}$$

Donde

$$\pi = 3.141592\dots$$

$$e = 2.71828\dots$$

Nota.- En esta expresión de la distribución normal se utilizó el $\mu' = (\log \mu)$ y $\sigma' = (\log \sigma)$, así mismo $D' = \log D$.

Donde

μ = Media aritmética

σ = Desviación estándar

D = Diámetro medio de poro.

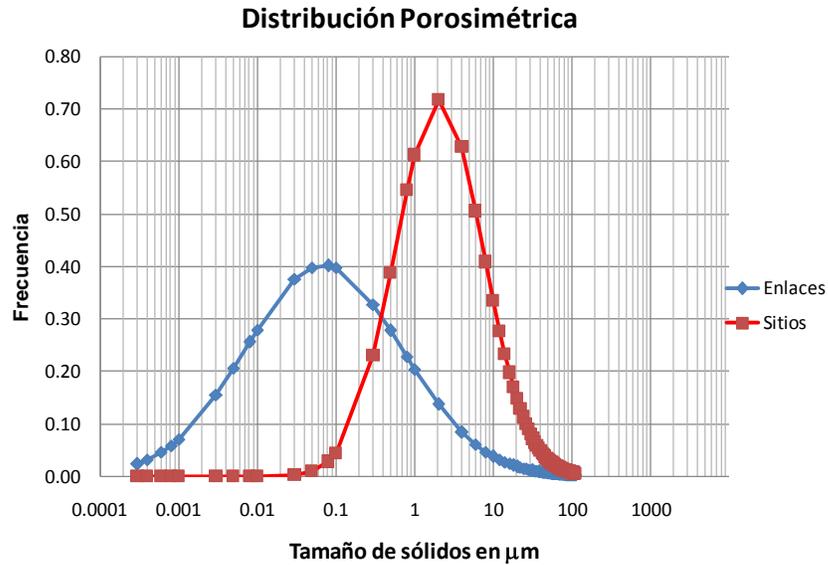


Figura F.3 Distribución de frecuencia de sitios y enlaces deducidos

Quinto paso.- Determinación de los factores de probabilidad a partir de las distribuciones de enlaces y sitios presentadas en la figura F.3. Se determinó el área bajo cada una de las curvas y con ellas se pronosticaron los valores de L_{BD} , L_{SD} , L_{BI} , y L_{SI} respectivamente. Para encontrar el área bajo las curvas de distribución de frecuencia de enlaces y sitios se utilizó la expresión matemática $\text{Área} = \text{Base} \times \text{Altura Media}$, presentada en la figura F.4.

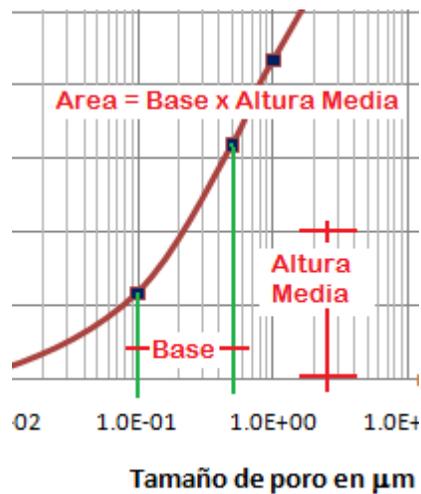


Figura F.4 Procedimiento para determinar el área bajo la curva

Para conocer el área bajo las curvas de distribución de enlaces y sitios, se requiere elegir un valor de R_C (radio crítico) haciendo un barrido de este radio, de izquierda a derecha o de derecha a izquierda (véase la figura F.3). Aquí las áreas ya están definidas bajo las curvas antes y después del R_C , tanto para sitios como para enlaces. Estas permitirán determinar las probabilidades L_{BD} , L_{SD} y L_{BI} , L_{SI} . Estas son expresiones del modelo probabilista con las que se obtienen los valores de G_{WD} (en trayectoria de secado) y G_{WI} (en trayectoria de humedecimiento) con los cuales se construirán las correspondientes curvas características en trayectoria de secado y humedecimiento.

Sexto paso.- Se presentan los valores de la succión y grado de saturación obtenidos en trayectoria de secado y humedecimiento (tabla F.4). En la figura F.5 se presentan las curvas características teóricas mediante el modelo probabilista.

Tabla F.4 Resultados obtenidos del análisis con el modelo probabilista

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %		No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %		No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %	
1	967624.00	0.00	0.00	25	18.14	89.83	62.43	49	4.54	97.60	94.21
2	725718.00	0.00	0.00	26	16.13	90.55	66.04	50	4.40	97.75	94.62
3	483812.00	0.00	0.00	27	14.51	91.19	69.17	51	4.27	97.89	95.01
4	362859.00	0.00	0.00	28	13.19	91.76	71.92	52	4.15	98.03	95.37
5	290287.20	0.00	0.00	29	12.10	92.28	74.83	53	4.03	98.16	95.37
6	96762.40	0.00	0.00	30	11.16	92.75	76.47	54	3.92	98.29	95.72
7	58057.44	0.01	0.01	31	10.37	93.18	78.37	55	3.82	98.41	96.05
8	36285.90	0.02	0.02	32	9.68	93.57	80.07	56	3.72	98.53	96.37
9	29028.72	0.03	0.03	33	9.07	93.94	81.59	57	3.63	98.64	96.66
10	9676.24	0.14	0.14	34	8.54	94.28	82.97	58	3.54	98.76	97.22
11	5805.74	0.27	0.26	35	8.06	94.60	84.22	59	3.46	98.89	97.48
12	3628.59	0.47	0.46	36	7.64	94.90	85.36	60	3.38	98.97	97.72
13	2902.87	0.60	0.60	37	7.62	95.18	86.40	61	3.30	99.07	97.96
14	967.62	1.97	1.90	38	6.91	95.44	87.35	62	3.23	99.16	98.19
15	580.57	3.39	3.14	39	6.60	95.69	88.23	63	3.16	99.26	98.40
16	362.86	5.62	5.01	40	6.31	95.93	89.04	64	3.09	99.35	98.61
17	290.29	7.16	6.26	41	6.05	96.15	89.78	65	3.02	99.44	98.81
18	145.14	15.17	12.44	42	5.81	96.36	90.48	66	2.96	99.53	99.00
19	72.57	32.70	23.79	43	5.58	96.57	91.12	67	2.90	99.61	99.18
20	48.38	83.72	33.25	44	5.38	96.76	91.72	68	2.85	99.69	99.36
21	36.29	85.49	41.12	45	5.18	96.94	92.29	69	2.79	99.77	99.53
22	29.03	86.89	47.76	46	5.00	97.12	92.81	70	2.74	99.85	99.69
23	24.19	88.03	53.41	47	4.84	97.29	93.31	71	2.69	99.93	99.85
24	20.73	89.00	58.26	48	4.68	97.45	93.77	72	2.64	100.00	100.00

Fuente: Elaboración propia

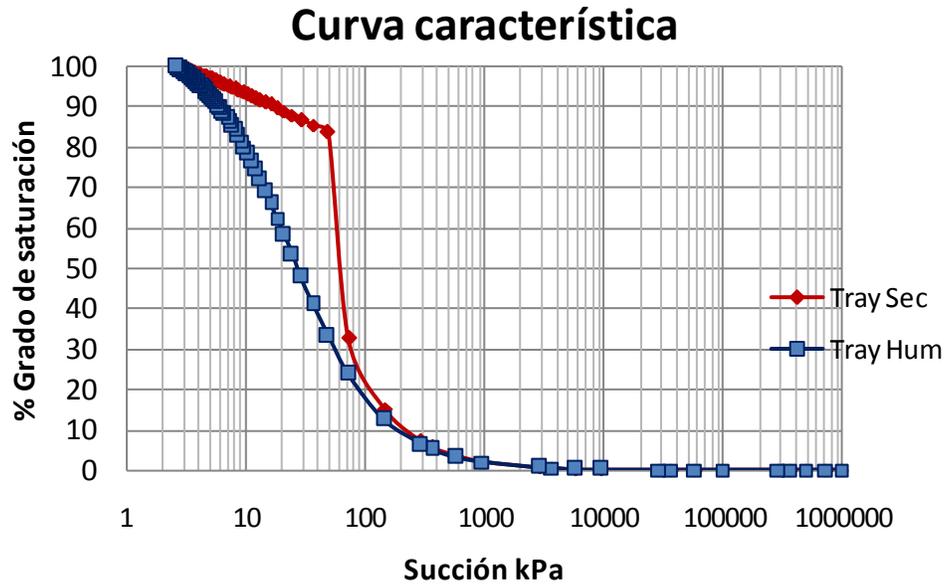


Figura F.5 Curva característica obtenida mediante el modelo probabilista

Séptimo paso.- Las curvas de retención obtenidas de esta manera requieren, en muchos de los casos, ser corregidas. Para realizar la corrección de ambas curvas características se necesita conocer el grado de saturación mínimo, $G_{w \min}$, y el grado de saturación máximo, $G_{w \max}$, de ambas curvas características experimentales. Para obtener el G_{WD} o G_{WI} corregido se utiliza la ecuación 4.8.

Octavo paso.- Con los valores de $G_{WD \text{ corr}}$, $G_{WI \text{ corr}}$ y su correspondiente succión se obtiene las curvas características corregidas.

F.2 Determinación de la curva característica mediante el modelo probabilista apoyándose en la porosimetría obtenida por análisis de imagen

Primer paso.- La porosimetría obtenida mediante análisis de imagen se presenta en la tabla F.5 y la figura F.6.

Tabla F.5 Porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.10	0.001
2	1.00	0.018
3	2.00	0.033
4	3.00	0.043
5	5.00	0.056
6	6.00	0.058
7	7.00	0.060
8	8.00	0.061
9	9.00	0.061
10	10.00	0.059
11	20.00	0.057
12	30.00	0.068
13	40.00	0.115
14	50.00	0.220
15	60.00	0.050

Fuente: Elaboración propia

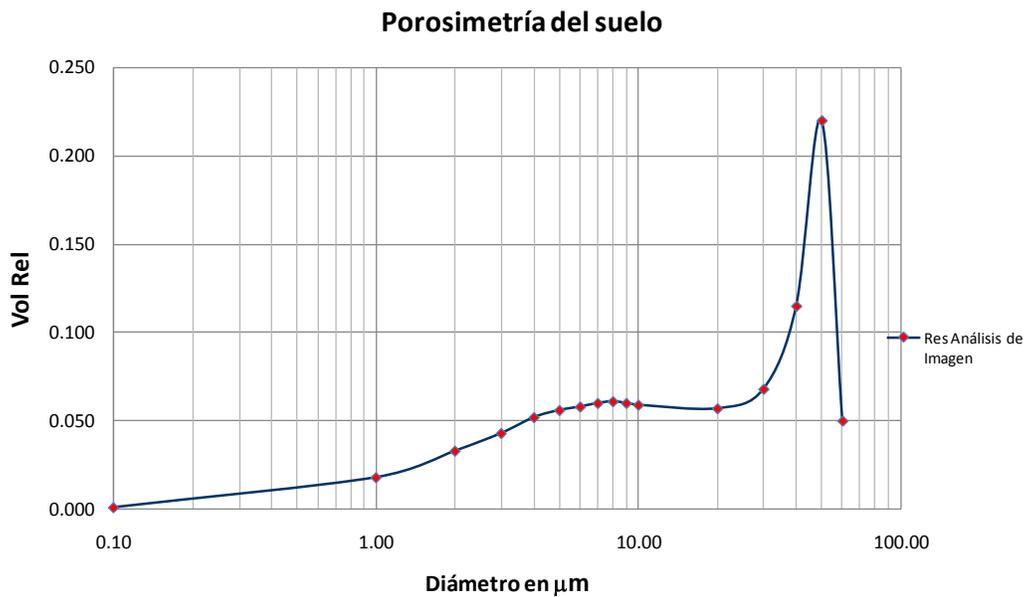


Figura F.6 Distribución del diámetro de sitios experimentales utilizados en el análisis

Segundo paso.- Separar los tamaños de poro que corresponden a los enlaces y a los sitios, respectivamente. Estas distribuciones de enlaces y sitios aparecen en la tabla F.6 y 4.7.

Tabla F.6. Distribución de enlaces deducidos de la porosimetría por análisis de imagen

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.080	0.0010
2	0.090	0.0015
3	0.095	0.0020
4	0.120	0.0030
5	0.150	0.0035
6	0.200	0.0060
7	0.250	0.0070
8	0.300	0.0072
9	0.350	0.0090
10	0.400	0.0110
11	0.450	0.0120
12	0.550	0.0140
13	0.650	0.0140
14	0.750	0.0140
15	0.850	0.0120
16	1.000	0.0120
17	1.500	0.0090
18	2.000	0.0080
19	3.000	0.0050
20	5.000	0.0015
21	9.000	0.0010

Fuente: Elaboración propia

Tabla F.7. Distribución de sitios deducidos de la porosimetría por análisis de imagen

No	Diámetro de poro (D) μm	Volumen Relativo
1	0.60	0.0010
2	0.70	0.0060
3	0.80	0.0100
4	1.00	0.0180
5	2.00	0.0330
6	3.00	0.0430
7	4.00	0.0520
8	5.00	0.0560
9	6.00	0.0580
10	7.00	0.0600
11	8.00	0.0610
12	9.00	0.0600
13	10.00	0.0590
14	13.00	0.0520
15	17.00	0.0440
16	20.00	0.0370
17	25.00	0.0270
18	28.00	0.0210
19	33.00	0.0140
20	37.00	0.0090
21	43.00	0.0010

Fuente: Elaboración propia

Tercer paso.- A partir de la distribución de los enlaces y sitios extraídas de la distribución porosimétrica se obtuvo que $\mu_B = 1.28 \mu m$ y $\sigma_B = 2.13 \mu m$. Y en lo que respecta a la distribución de los sitios se determinó que $\mu_S = 13.00 \mu m$ y $\sigma_S = 13.06 \mu m$.

Nota.- El cuarto paso y el quinto se omite debido a que en el ejemplo anterior se describe este procedimiento.

Sexto paso.- Se presentan en la tabla F.8 los valores de la succión y grado de saturación obtenidos en trayectoria de secado y humedecimiento respectivamente, obtenidos con el Modelo Probabilista. En la figura F.7 se muestra la curva característica teórica en ambas trayectorias, obtenidas mediante el modelo probabilista.

Tabla F.8 Resultados obtenidos del análisis con el modelo probabilista

No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %		No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %		No	Energía del suelo (ψ) kPa	Gado de saturación del suelo ($G_{WD} - G_{WI}$) %	
1	967624.00	2.79	2.79	25	18.14	85.43	22.39	49	4.54	85.47	61.51
2	725718.00	2.79	2.79	26	16.13	85.45	24.01	50	4.40	85.47	62.82
3	483812.00	2.79	2.79	27	14.51	85.45	25.64	51	4.27	85.47	64.11
4	362859.00	2.79	2.79	28	13.19	85.46	27.27	52	4.15	85.47	64.11
5	290287.20	2.79	2.79	29	12.10	85.46	28.92	53	4.03	85.47	65.38
6	96762.40	2.79	2.79	30	11.16	85.46	30.57	54	3.92	85.47	66.63
7	58057.44	2.79	2.79	31	10.37	85.46	32.24	55	3.82	85.47	67.85
8	36285.90	2.79	2.79	32	9.68	85.47	33.89	56	3.72	85.47	69.04
9	29028.72	2.79	2.79	33	9.07	85.47	35.55	57	3.63	85.47	70.22
10	9676.24	2.79	2.79	34	8.54	85.47	37.22	58	3.54	85.47	71.38
11	5805.74	2.79	2.79	35	8.06	85.47	38.87	59	3.46	85.47	72.51
12	3628.59	2.79	2.79	36	7.64	85.47	40.52	60	3.38	85.47	73.62
13	2902.87	2.80	2.80	37	7.62	85.47	42.15	61	3.30	85.47	74.71
14	967.62	2.95	2.95	38	6.91	85.47	43.78	62	3.23	85.47	75.78
15	580.57	3.46	3.46	39	6.60	85.47	45.38	63	3.16	85.47	76.84
16	362.86	5.01	4.85	40	6.31	85.47	46.97	64	3.09	85.47	77.87
17	290.29	6.43	5.90	41	6.05	85.47	48.53	65	3.02	85.47	78.88
18	145.14	15.69	9.27	42	5.81	85.47	50.07	66	2.96	85.47	79.88
19	72.57	81.56	12.37	43	5.58	85.47	51.59	67	2.90	85.47	80.85
20	48.38	84.94	14.29	44	5.38	85.47	53.08	68	2.85	85.47	81.81
21	36.29	85.25	15.96	45	5.18	85.47	54.55	69	2.79	85.47	82.75
22	29.03	85.35	17.57	46	5.00	85.47	55.99	70	2.74	85.47	83.67
23	24.19	85.39	19.17	47	4.84	85.47	57.41	71	2.69	85.47	84.58
24	20.73	85.42	20.78	48	4.68	85.47	58.80	72	2.64	85.47	85.47

Fuente: Elaboración propia

Curva característica

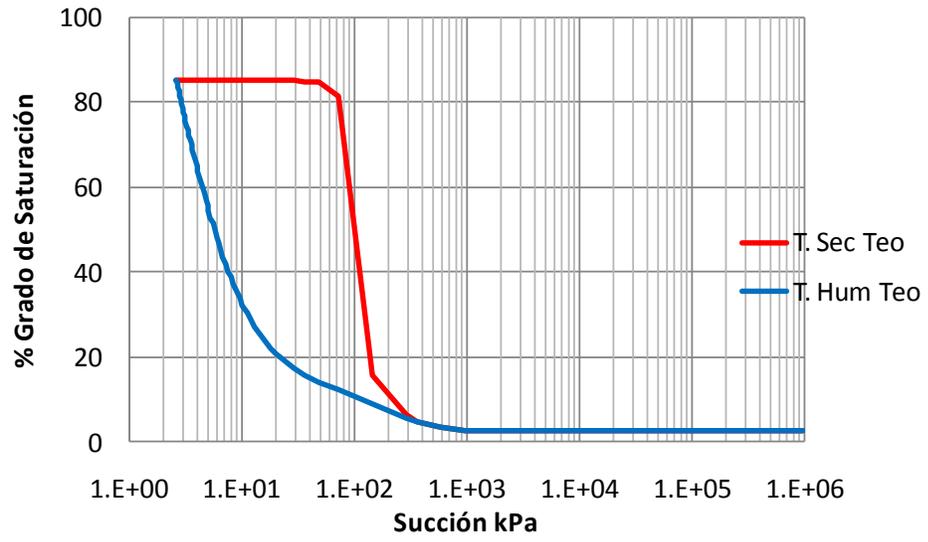


Figura F.7 Curva característica obtenida mediante el MP

ANEXO G

G.1 Método inverso para determinar la porosimetría

Además de poder utilizar el Modelo Sólido Poroso para determinar la curva característica también es posible utilizarlo para deducir la porosimetría del suelo a partir de la curva de retención de éste, tal y como se presenta en la figura G.1. A continuación se presenta el procedimiento a seguir para obtener la distribución porosimétrica de un suelo:

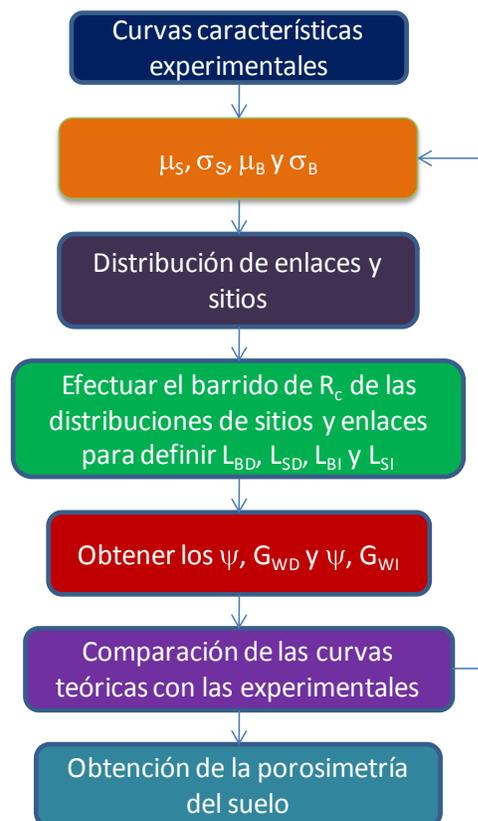


Figura G.1 Secuencia para obtener la porosimetría del suelo

Una vez que se encontró la distribución porosimétrica de los sitios y de los enlaces que permiten alimentar al modelo probabilista (M. P.), se inicia con una simulación que permite obtener las curvas de retención teóricas. Cuando las curvas obtenidas son semejantes a las curvas de retención experimental, se ha llegado a la solución y se puede determinar la porosimetría del suelo en análisis.

G.2 Ejemplo del Método inverso

En la tabla G.1 y G.2 se presenta los datos experimentales de las curvas características en trayectoria de secado y humedecimiento, las que se presentan en la figura G.1.

Tabla G.1. Datos experimentales de la curva característica en trayectoria de secado

No	Succión n (ψ) kPa	Grado de saturación (G_w) %	No	Succión n (ψ) kPa	Grado de saturación (G_w) %
1	1	88.00	14	4000	30.50
2	2	87.00	15	6000	28.00
3	4	86.00	16	10000	26.00
4	7	84.00	17	20000	23.00
5	10	82.00	18	40000	19.00
6	20	78.00	19	70000	16.00
7	50	70.00	20	100000	12.00
8	100	61.50	21	200000	7.50
9	200	52.50	22	300000	4.00
10	400	45.00	23	500000	3.00
11	700	40.00	24	600000	2.00
12	1000	37.50	25	800000	1.00
13	3000	32.00	26	1000000	0.50

Fuente: Elaboración propia

Tabla G.2 Datos experimentales de la curva característica en trayectoria de humedecimiento

No	Succión (ψ) kPa	Grado de saturación (G_w) %	No	Succión (ψ) kPa	Grado de saturación (G_w) %
1	1.00	88.00	15	2000.00	31.00
2	2.00	87.00	16	4000.00	27.00
3	4.00	86.00	17	7000.00	24.50
4	7.00	86.00	18	10000.00	23.00
5	10.00	82.00	19	20000.00	19.00
6	13.00	80.00	20	40000.00	16.00
7	20.00	77.00	21	70000.00	12.50
8	30.00	70.00	22	100000.00	10.50
9	40.00	63.00	23	200000.00	7.50
10	60.00	57.00	24	300000.00	4.00
11	100.00	51.00	25	500000.00	3.00
12	300.00	41.00	26	600000.00	2.00
13	600.00	36.50	27	800000.00	1.00
14	1000.00	34.00	28	1000000.00	0.50

Fuente: Elaboración propia

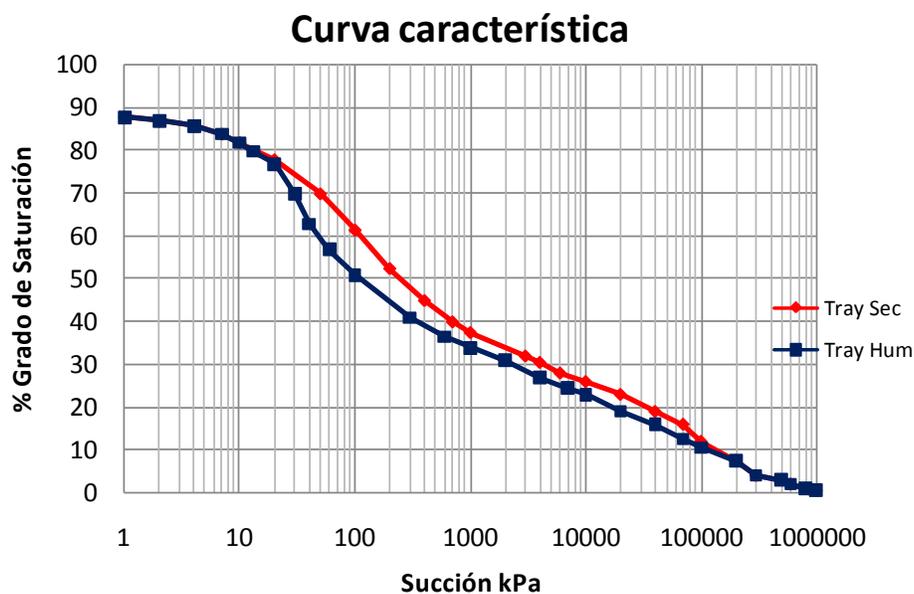


Figura G.1 Curva característica del suelo en ambas trayectorias

En la tabla G.3 se observa la media y la desviación estándar, de los enlaces y de los sitios que permitieron alimentar el modelo probabilista (MSP), también fue posible determinar las correspondientes curvas características en ambas trayectorias (figura G.2). Es importante resaltar que, se necesita una distribución de sitios y enlaces, que permita obtener una curva característica teórica semejante a la curva característica experimental, es decir, a la distribución de sitios y enlaces que el suelo presenta. Es por ello que a partir de la curva característica experimental se puede obtener la porosimetría del suelo. Cabe mencionar que el proceso de variación de la media y desviación estándar de enlaces y sitios, se realiza hasta que la curva característica obtenida en forma teórica, resulta ser semejante a la experimental, como se muestra en la figura G.1, y las curvas características obtenidas, se aprecian en la figura G.2. Finalmente, en la figura G.3 se presentan las curvas características teóricas para ambas trayectorias más cercanas a la experimental, obtenidas mediante el modelo probabilista. Además, al ajustar las curvas características teóricas con las experimentales, se dedujo que la distribución porosimétrica integrada del suelo es la que aparece en la figura G.4.

Tabla G.3 Media y desviación estándar utilizadas en la modelación

No	Diámetro medio de enlaces (μ_B) μm	Desviación estándar de enlaces (σ_B) μm	Diámetro medio de sitios (μ_S) μm	Desviación estándar de sitios (σ_S) μm
1	0.073	0.142	7.943	8.399
2	0.528	1.571	9.854	12.175
3	22.498	4.974	2.966	4.974
4	0.006	0.524	3.573	5.693

Fuente: Elaboración propia

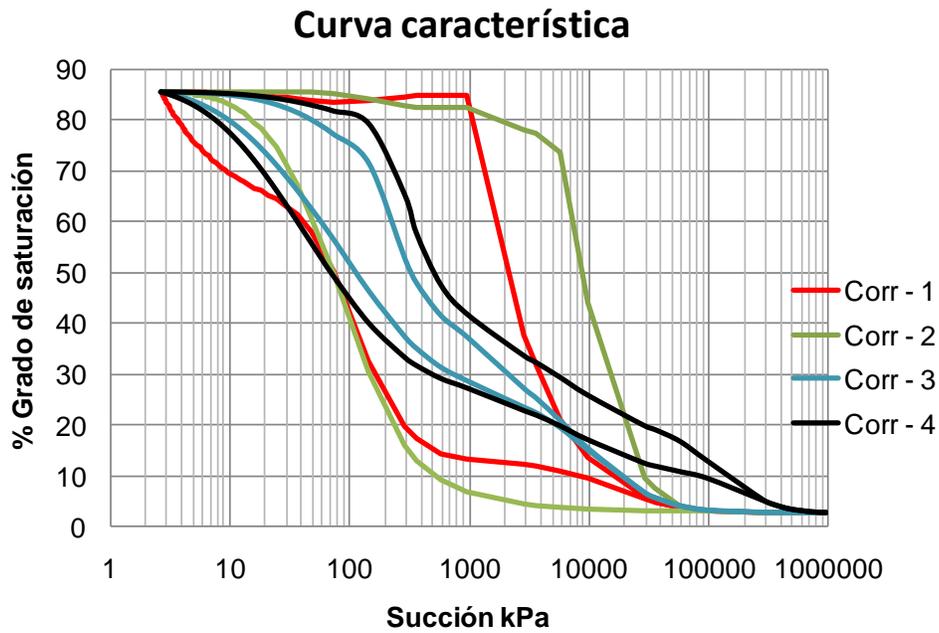


Figura G.2. Curvas de retención obtenidas con el MP

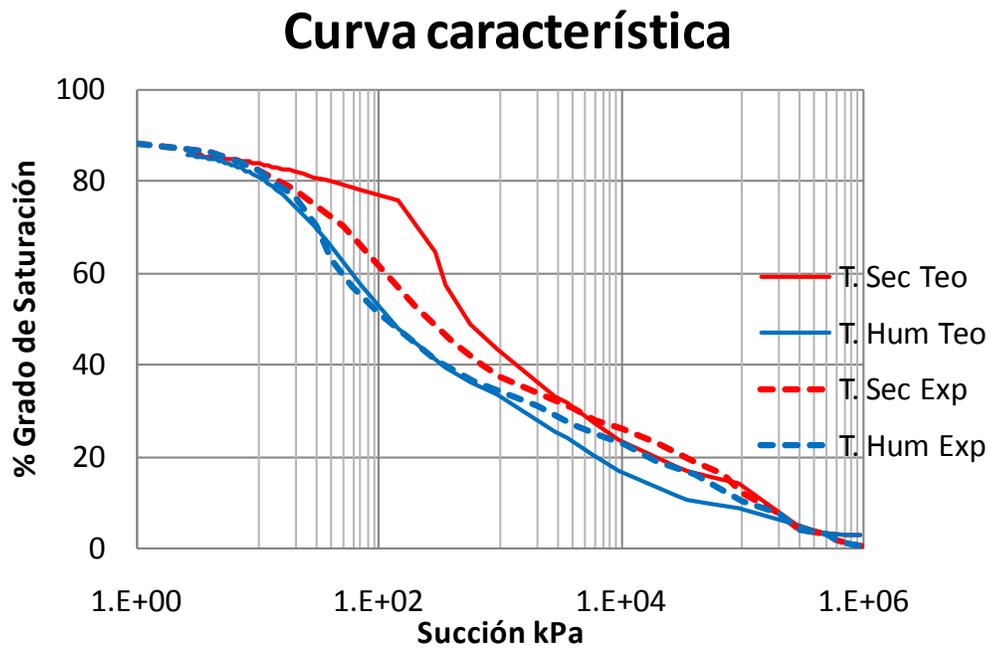


Figura G.3. Curvas de retención experimental y teórica obtenida con el MSP

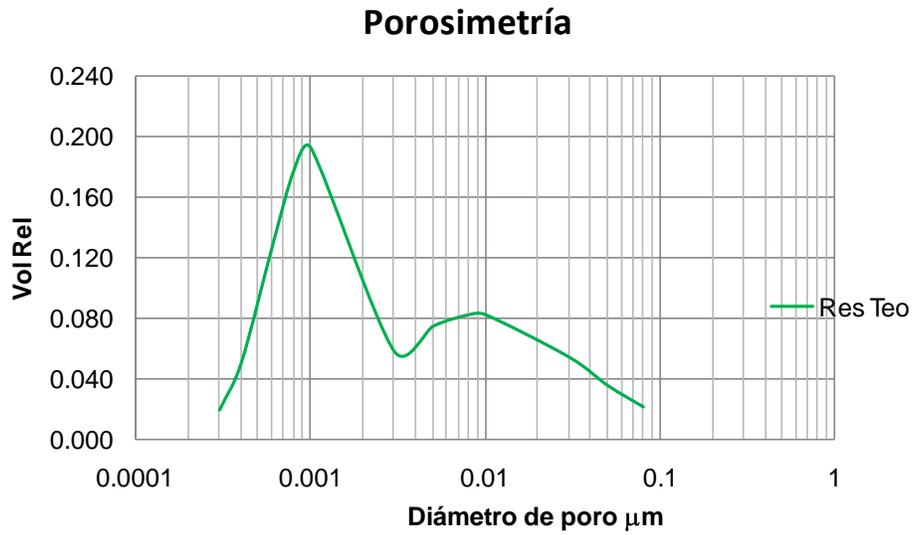


Figura G.4. Curva de distribución porosimétrica del suelo obtenida con el MSP