



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

UN MODELO ACOPLADO PARA SUELOS EXPANSIVOS

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Elizabeth Silva García

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

Dr. Eduardo Rojas González
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Dra. Teresa López Lara
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Noviembre 2019
México

RESUMEN

Los suelos expansivos son típicos de las regiones áridas y semiáridas en el mundo. Al haber un cambio en la humedad, se generan cambios volumétricos que se traducen en movimientos del suelo que afectan la estructura que se encuentra sobre ellos.

Los diferentes modelos que se han desarrollado para describir el comportamiento de los suelos expansivos hacen uso del concepto de variables independientes de esfuerzo, este trabajo tiene el objetivo de desarrollar un marco elastoplástico teórico para el comportamiento de suelos expansivos basado en esfuerzos efectivos, que permita obtener resultados teóricos y compararlos con los resultados experimentales. Para lo cual será necesario realizar pruebas en el laboratorio con el objetivo de obtener el comportamiento volumétrico de una arcilla expansiva.

Palabras clave: Suelos expansivos, suelos no saturados, modelo constitutivo, esfuerzos efectivos, succión.

ABSTRACT

The expansive soils are typical of the arid and semiarid regions in the world. When there is a change in humidity, this generates volumetric changes that result in soil movements ever that affect the structure.

The different models built that have been developed to describe the behavior of expansive soils make use of the concept of independent stress variables, this work has the objective to develop a theoretical elastoplastic framework for expansive soils based on effective stresses. The simulations of the model will be compared with some experimental results. Therefore, it is necessary to perform experimental tests in order to obtain

Key words: expansive soils, unsaturated soils, constitutive model, effective stress, suction.

Dirección General de Bibliotecas UNAM

DEDICATORIAS

Si tienes miedo no puedes avanzar
(Malala Yousafzai)

El éxito es la capacidad de ir de fracaso en fracaso sin perder el entusiasmo
(Winston Churchill)

A mi persona favorita, Oscar Cano Félix

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

En esta aventura llamada maestría en Geotecnia, la cual fue todo menos fácil. Digna de ser contada en historias por tener obstáculos que saltar, rocas y suelo que mover, puentes que cruzar y caídas de las cuales levantarse. Pero también con compañeros de aventura que llegaban con una sonrisa y profesores que guiaban el camino para no rendirse.

Por esta aventura que llega a su fin con la línea de meta llamada tesis, quiero agradecer a las personas que siempre estuvieron ahí para ofrecerme una palabra de aliento, un abrazo o una sonrisa que me dio el impulso de continuar.

A Dios, por escucharme y estar a mi lado siempre, por enseñarme cada día que todo lo que ocurre tiene un motivo y darme momentos tan felices en mi vida.

A mis padres y familia por apoyarme en todo momento, por sus dulces palabras y cariño incondicional.

A mis amigos y compañeros de la Universidad por todos sus consejos y momentos llenos de risas y alegría.

A mis amigos de internet, que siguieron mis aventuras por la maestría y que en los momentos difíciles siempre me escribían para motivarme y sacarme una sonrisa.

A mi asesor de tesis, el Dr. Eduardo Rojas González, quien fue la primera persona en darme clases de suelos, en la época en que estudiaba Ingeniería Civil, y que me hizo ver lo bonito que es el estudio de la Geotecnia. Gracias por el apoyo incondicional durante la Maestría, por no dejarme caer, por sus enseñanzas y por su valioso tiempo dedicado a este proyecto.

A mis profesores de Maestría, en especial al Dr. Omar Chávez Alegría y la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por sus enseñanzas de la Geotecnia en el mundo real y en especial por su calidad humana y su apoyo en los momentos más difíciles.

A los miembros de mi sínodo, el Dr. Jaime Horta Rangel y la Dra. Teresa López Lara, siempre dispuestos a ayudar y cuyas valiosas enseñanzas aportaron no solo a este trabajo sino a mi formación como estudiante de Maestría en Geotecnia.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo recibido para realizar mis estudios y terminar esta investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INTRODUCCIÓN	18
JUSTIFICACIÓN.....	18
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
1 SUELOS EXPANSIVOS	21
1.1 SUELOS SATURADOS Y NO SATURADOS.....	21
1.2 FÍSICOQUÍMICA DE LAS ARCILLAS	21
1.2.1 <i>Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	23
1.2.2 <i>Superficie Específica</i>	23
1.3 ORIGEN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	24
1.4 COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	24
1.4.1 <i>Factores que influyen el comportamiento de los suelos expansivos</i>	25
1.5 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS	27
1.5.1 <i>Identificación mineralógica</i>	28
1.5.2 <i>Métodos cualitativos</i>	28
1.5.3 <i>Método de la actividad de Skempton</i>	29
1.5.4 <i>Presión de expansión</i>	30
1.5.4.1 Método A.....	30
1.5.4.2 Método B.....	30
1.5.4.3 Método C.....	30
2 ANTECEDENTES	31
2.1 MICROESTRUCTURA Y MACROESTRUCTURA	31
2.1.1 <i>Comportamiento de la microestructura y macroestructura</i>	32
2.2 DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN SUELOS NO SATURADOS.....	33
2.2.1 <i>Endurecimiento por succión</i>	36
2.3 SUPERFICIE DE FLUENCIA.....	37
2.4 MODELOS CONSTITUTIVOS.....	38
2.4.1 <i>Modelo del Estado Crítico</i>	38
2.4.2 <i>Modelo Básico de Barcelona (BBM)</i>	39
2.4.3 <i>Marco elastoplástico Alonso 1992</i>	40
2.4.4 <i>Modelo Expansivo de Barcelona (BExM)</i>	42
2.4.5 <i>Marco general elastoplástico para suelos no saturados</i>	43
2.4.6 <i>Marco de esfuerzos efectivos</i>	46
3 HIPÓTESIS	50
4 OBJETIVOS	51
<i>Objetivo general</i>	51
<i>Objetivos particulares</i>	51

5	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	52
5.1	RELACIONES CONSTITUTIVAS.....	52
5.2	ESTADO DE ESFUERZOS.....	52
5.2.1	<i>Esfuerzos efectivos en suelos saturados.....</i>	53
5.2.2	<i>Esfuerzos efectivos en suelos no saturados.....</i>	54
5.2.2.1	Modelo sólido-poroso de Rojas.....	54
5.3	AGUA EN EL SUELO.....	55
5.4	SUCCIÓN.....	55
5.4.1	<i>Efectos de la capilaridad.....</i>	56
5.4.2	<i>Curva característica suelo-agua.....</i>	57
5.4.2.1	Modelo empírico de Van Genuchten.....	58
5.4.2.2	Modelo de Rojas.....	59
5.4.2.3	Modelo empírico de Sheng.....	59
6	METODOLOGÍA.....	60
6.1	OBTENCIÓN DE LA MUESTRA.....	60
6.1.1	<i>Localización del sitio de estudio.....</i>	60
6.1.2	<i>Obtención de la muestra inalterada.....</i>	61
6.1.3	<i>Obtención de la muestra alterada.....</i>	61
6.2	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	62
6.2.1	<i>Determinación de la humedad natural W%.....</i>	63
6.2.1.1	Muestras alteradas.....	63
6.2.1.2	Muestras inalteradas.....	63
6.2.1.3	Procedimiento.....	63
6.2.2	<i>Determinación del peso específico del suelo γ_m.....</i>	63
6.2.3	<i>Determinación del peso específico relativo de sólidos S_s.....</i>	64
6.2.4	<i>Análisis granulométrico por mallas.....</i>	64
6.2.5	<i>Análisis del tamaño de partículas.....</i>	65
6.2.6	<i>Determinación de los límites de consistencia.....</i>	67
6.2.7	<i>Determinación de la superficie específica.....</i>	68
6.3	ENSAYES PRELIMINARES.....	69
6.3.1	<i>Determinación de la succión del suelo.....</i>	69
6.3.1.1	Calibración del papel filtro.....	69
6.3.1.2	Medición de la Succión.....	72
6.3.2	<i>Determinación del esfuerzo de preconsolidación.....</i>	75
6.4	ENSAYES.....	77
6.4.1	<i>Pruebas oedométricas.....</i>	77
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
7.1	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	79
7.2	CURVA DE RETENCIÓN AGUA-SUELO DE UN SUELO EXPANSIVO EN EL ÁREA JURICA, QUERÉTARO.....	82
7.2.1	<i>Ajuste de Curva Característica suelo Jurica.....</i>	91
7.3	PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN OEDÓMETRO.....	93
7.4	PRUEBAS OEDOMÉTRICAS.....	96
7.4.1	<i>Curva de compresibilidad.....</i>	96
7.5	VARIACIÓN DE VOLUMEN CON PRUEBA DE LÍMITE DE CONTRACCIÓN POR INMERSIÓN EN MERCURIO (TRAYECTORIA DE SECADO) 100	
7.6	COMPARACIONES TEÓRICO – EXPERIMENTALES.....	106
8	OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.....	123
8.1	OBSERVACIONES.....	123

8.2	CONCLUSIONES.....	124
REFERENCIAS		125
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA		130
A.1.	CONTENIDO DE AGUA.....	130
A.2.	PESO ESPECÍFICO DE LA MASA DE SUELO	130
A.3.	PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS.....	130
A.4.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MALLAS	132
A.5.	ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS	133
A.6.	LÍMITES DE CONSISTENCIA	135
ANEXO B. CURVA CARACTERÍSTICA SUELO JURICA.....		138
B.1.	PRUEBA 1 DE SUCCIÓN.	138
B.2.	PRUEBA 2 DE SUCCIÓN.	139
B.3.	AJUSTE POR VAN GENUCHTEN.	140
B.4.	AJUSTE POR SHENG.....	141
ANEXO C. PRUEBAS OEDOMÉTRICAS		142
C.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS OEDOMÉTRICAS CON UN GRADO DE SATURACIÓN INICIAL PROMEDIO SW=65.6%	142
C.1.1	Muestra cargada a 200 kPa.....	142
C.1.2	Muestra cargada a 350 kPa.....	143
C.2.	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS OEDOMÉTRICAS CON UN GRADO DE SATURACIÓN INICIAL PROMEDIO SW=17.5%	144
C.2.1.	Muestra cargada a 200 kPa.....	144
C.2.2.	Muestra cargada a 300 kPa.....	145
C.2.3.	Muestra cargada a 400 kPa.....	146
C.2.4.	Muestra cargada a 500 kPa.....	147
C.2.5.	Muestra cargada a 1200 kPa.....	148
C.3.	RESULTADOS TEÓRICOS DE MUESTRA CARGADA A 350 KPA CON UN GRADO DE SATURACIÓN INICIAL PROMEDIO SW=46.5%	149
ANEXO D. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS - PRUEBA DEL PAPEL FILTRO		152
D.1	CALIBRACIÓN DEL PAPEL FILTRO.....	152
D.2	MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN.....	154
ANEXO E. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS – LABRADO DE MUESTRAS INALTERADAS DE ARCILLAS EN EL ANILLO DEL CONSOLIDÓMETRO		156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Capacidad de intercambio catiónico en las arcillas.....23

Tabla 1.2 Valores de superficie específica para minerales de arcilla.....24

Tabla 1.3 Datos para hacer estimaciones del cambio probable de volumen para suelos expansivos (Holtz y Gibbs, 1956).29

Tabla 1.4 Valores de actividad de arcillas (Budhu, 2011).29

Tabla 7.1. Caracterización del suelo, Jurica Querétaro.80

Tabla 7.2 Resultados de cambio de relación de vacíos en la muestra seca cargada a 1200 kPa.....95

Tabla 7.3. Resultados de pendiente κ y λ para un grado de saturación $G_w = 40\%$ 96

Tabla 7.4 Resultados de pendiente κ y λ para un grado de saturación $G_w = 13\%$ 98

Tabla 7.5 Parámetros para expresar los resultados obtenidos en un marco elastoplástico de esfuerzos efectivos..... 106

Tabla 7.6 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 200 kPa con $S_{wo} = 46\%$ 109

Tabla 7.7 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 350 kPa con $S_{wo} = 46\%$ 111

Tabla 7.8 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 200 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$ 113

Tabla 7.9 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 300 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$ 114

Tabla 7.10 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 400 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$ 116

Tabla 7.11 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 500 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$ 117

Tabla 7.12 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 1200 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$ 119

Dirección General de Bibliotecas UAO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fases presentes en un suelo no saturado.....21

Figura 1.2 a) Tetraedro de sílice, b) Lámina silícica.22

Figura 1.3 a) Octaedro de aluminio, b) Lámina alumínica.22

Figura 1.4 Factores que influyen en el potencial de expansión contracción de un suelo (Nelson y Miller, 1992).25

Figura 1.5 Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda y Castañeda, 1987).26

Figura 1.6 Grietas generadas después de las lluvias en una edificación construida sobre suelo expansivo en Querétaro, México.....27

Figura 1.7 Micrografía del suelo de Jurica, Querétaro, México con aumento de 6000x (Lopez-lara *et al.*, 2012).28

Figura 2.1 Macroporos, mesoporos y microporos.....31

Figura 2.2 Representación de la microestructura y macroestructura (Rojas y Chávez, 2013).....32

Figura 2.3 Distribución de volumen incremental de poro evaluado de resultados MIP (Nowamooz y Masrouri, 2008).....32

Figura 2.4 Curva de compresibilidad de suelos (Verdín Montes, 2018).....34

Figura 2.5 Relación $\ln e$ vs $\ln P$35

Figura 2.6 Comportamiento volumétrico de un suelo en los ejes logaritmo del esfuerzo medio efectivo (p') contra la relación de vacíos (e) (Rojas González, 2018).
.....37

Figura 2.7 Estado de esfuerzos elástico, de fluencia y elastoplástico (Budhu, 2011).	38
Figura 2.8 Marco elastoplástico del estado crítico (Roscoe <i>et al.</i> , 1958).	39
Figura 2.10. Marco elastoplástico del modelo Básico de Barcelona <i>BBM</i>	40
Figura 2.11 Obtención de presión de expansión con prueba de volumen constante.	41
Figura 2.12 Representación tridimensional de las superficies de fluencia para un suelo expansivo	41
Figura 2.13 Modelo <i>BExM</i> - Endurecimiento de la superficie de colapso LC en el plano p-s. (Alonso <i>et al.</i> , 1999).	42
Figura 2.14 Marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos no saturados (Rojas y Chávez, 2013).	43
Figura 2.15 Marco elastoplástico para suelos expansivos basado en esfuerzos efectivos (Rojas <i>et al.</i> , 2017).	46
Figura 2.16 Deformación volumétrica plástica de acuerdo con la relación de vacíos.	48
Figura 5.1 Esfuerzo efectivo en un suelo saturado.	53
Figura 5.2. Componentes del agua en el suelo.	55
Figura 5.3 Simulación de capilaridad en suelos.	57
Figura 5.4. Elementos que definen la curva característica suelo-agua (Fredlund y Xing, 1994).	58
Figura 6.1 Proceso metodológico.	60

Figura 6.2 Zona de obtención de la muestra. Jurica, Querétaro. Fuente: <i>Google maps</i> .	60
Figura 6.3 a) Excavación de un pozo a cielo abierto PCA. b) Labrado de la muestra inalterada.	61
Figura 6.4 a) Medición desde la superficie para obtención de muestras alteradas. b) Muestras alteradas a cada 50 cm desde la superficie.	62
Figura 6.5 Metodología para la caracterización de la muestra.	62
Figura 6.6 Aforo del matraz con suelo utilizando agua destilada durante la prueba de peso específico.	64
Figura 6.7 Análisis granulométrico por mallas.	65
Figura 6.8 Probeta con mezcla de suelo, defloculante y agua destilada durante la prueba de tamaño de partícula mediante densímetro.	67
Figura 6.9 Realización de prueba de límite líquido a) Método copa de Casagrande b) Método cono inglés.	68
Figura 6.10 a) Realización de la prueba de superficie específica con azul de metileno b) resultados de la prueba.	68
Figura 6.11 Curvas de calibración del papel filtro (Standard ASTM D5298-03, 2003).	69
Figura 6.12 Preparación de papeles filtro para la prueba de succión.	70
Figura 6.13 Elemento inerte para aislar el papel filtro de la solución.	70
Figura 6.14 Cámara para grabar el proceso de medición de masa de los papeles filtro.	72
Figura 6.15 Medición de la succión total ASTM D5298.	73

Figura 6.16 Metodología de medición de succión por etapas.....	74
Figura 6.17 Labrado de muestras inalteradas para prueba de succión.	74
Figura 6.18 Muestra después del proceso de secado.	75
Figura 6.19 Labrado de muestra inalterada en el anillo de consolidación.	76
Figura 6.20 Metodología pruebas oedométricas.....	77
Figura 6.21 Humedecimiento de muestra en el equipo de consolidación.	78
Figura 7.1 Perfil de humedades naturales, muestreo febrero 2018, Jurica, Querétaro.....	79
Figura 7.2 Carta de plasticidad, clasificación SUCS del suelo Jurica, Querétaro México.	81
Figura 7.3 Límites de consistencia graficados en los ejes volumen vs humedad. 81	
Figura 7.4 Curvas características suelo-agua de pruebas realizadas anteriormente, por 3 autores, en el mismo predio en la zona de Jurica, Querétaro México.	83
Figura 7.5 Resultados de la primera prueba de papel filtro - Curvas Características utilizando tres variables: antes de colocar en la muestra con contenedor, después del equilibrio con contenedor y después del equilibrio sin contenedor.	84
Figura 7.6 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [1] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días con contenedor”.	85
Figura 7.7 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [2] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.	86

Figura 7.8 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [2] y [3] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.....	86
Figura 7.9 Resultados de la segunda prueba de papel filtro - Curvas Características utilizando tres variables: antes de colocar en la muestra con contenedor, después del equilibrio con contenedor y después del equilibrio sin contenedor.	88
Figura 7.10 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [1], [2] y [3] con los resultados obtenidos en la segunda prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días con contenedor” , “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.....	89
Figura 7.11 Curva característica de la segunda prueba, suelo zona de Jurica.....	90
Figura 7.12 Ajuste de curva característica de humedecimiento por los métodos: Van Genuchten, Sheng y Rojas.	91
Figura 7.13 Ajuste de curva característica de secado por los métodos: Van Genuchten, Sheng y Rojas.....	92
Figura 7.14 Curva característica suelo Jurica para humedecimiento y secado ajustadas por el método de Rojas.....	92
Figura 7.15 Relación entre grado de saturación y valor χ_{corr} para trayectoria de secado obtenido del modelo de Rojas.	93
Figura 7.16 Expansión – colapso en muestras con $W=15.4\%$	94
Figura 7.17 Expansión – colapso en muestras con $W=4\%$	95
Figura 7.18 Relación de vacíos inicial (antes de cargar) vs presión de expansión para grupo de muestras con $w=15.4\%$ y $w=4\%$	96

Figura 7.19 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial $G_w=40\%$ saturada en 5 incrementos de agua.	97
Figura 7.20 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial $G_w=40\%$ utilizando esfuerzos efectivos.....	97
Figura 7.21 Curva de compresibilidad de la muestra 2 con un grado de saturación inicial $G_w=13\%$ saturada en 5 incrementos de agua.	99
Figura 7.22 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial $G_w=13\%$ utilizando esfuerzos efectivos.....	99
Figura 7.23 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (volumen vs humedad).....	100
Figura 7.24 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (volumen vs log tiempo).....	101
Figura 7.25 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (e vs log X_s).....	101
Figura 7.26 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs succión).	102
Figura 7.27 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs relación de vacíos).....	103
Figura 7.28 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (relación de vacíos vs log X_s).	103
Figura 7.29 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs log X_s).....	104
Figura 7.30 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Succión vs log X_s).	104

Figura 7.31 Curva de compresibilidad en términos de esfuerzos efectivos.	105
Figura 7.32 Representación de la superficie de colapso bajo carga (LCYS) después de la trayectoria de secado.	107
Figura 7.33 Trayectoria de secado y superficies de fluencia de colapso bajo carga (LCYS) para cada grupo de muestras mediante el uso de la curva de retención.	107
Figura 7.34 Trayectoria de secado y superficies de fluencia de colapso bajo carga (LCYS) para cada grupo de muestras mediante el uso de curva de compresibilidad.	108
Figura 7.35 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$	110
Figura 7.36 Deformación volumétrica de muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$	110
Figura 7.37 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 350 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$	112
Figura 7.38 Deformación volumétrica de muestra cargada a 350 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$	112
Figura 7.39 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=4\%$	113
Figura 7.40 Deformación volumétrica de muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=4\%$	114
Figura 7.41 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 300 kPa con humedad inicial $w=4\%$	115

Figura 7.42 Deformación volumétrica de muestra cargada a 300 kPa con humedad inicial $w=4\%$	115
Figura 7.43 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 400 kPa con humedad inicial $w=4\%$	116
Figura 7.44 Deformación volumétrica de muestra cargada a 400 kPa con humedad inicial $w=4\%$	117
Figura 7.45 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 500 kPa con humedad inicial $w=4\%$	118
Figura 7.46 Deformación volumétrica de muestra cargada a 500 kPa con humedad inicial $w=4\%$	118
Figura 7.47 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 1200 kPa con humedad inicial $w=4\%$	120
Figura 7.48 Deformación volumétrica de muestra cargada a 1200 kPa con humedad inicial $w=4\%$	120
Figura 7.49 Resultados experimentales de muestras remoldeadas e inalteradas en función de la relación de vacíos y el parámetro χ_s	121
Figura 7.50 Comparación del modelo de Esfuerzos Efectivos con los resultados experimentales de muestras remoldeadas e inalteradas, en función de la relación de vacíos y el parámetro χ_s	122

INTRODUCCIÓN

Conceptos de la Mecánica de Suelos clásica fueron desarrollados, en su mayoría, considerando el suelo saturado. Esto se debió probablemente a factores como: casi o total saturación de los suelos en los países donde esas teorías fueron concebidas (climas templados y fríos del hemisferio Norte), porque la saturación constituye la situación crítica para una diversidad de obras o debido a la simplificación de los modelos para explicar el comportamiento de esos sistemas bifásicos (Alfaro Soto, 2008).

Sin embargo, una gran parte de los suelos en donde se realizan obras ingenieriles presentan un nivel freático profundo, presentando por tanto 3 fases en el suelo: sólidos, aire y agua. Esta condición representa a los suelos no saturados y dentro de los suelos no saturados se encuentran los expansivos.

En los suelos expansivos el volumen se modifica debido a varios factores, como son: la influencia de la estructura del suelo, el humedecimiento y secado del material que generan una componente denominada succión, el tipo de mineral, el peso volumétrico, la plasticidad, las condiciones del entorno y las condiciones de esfuerzo.

Las curvas de humedecimiento y secado muestran histéresis, tal que el valor de succión es diferente cuando el suelo ha sido secado y cuando ha sido humedecido. Por lo tanto, es importante considerar la trayectoria de esfuerzo para predecir el comportamiento volumétrico del material. Varios modelos han sido desarrollados para explicar el comportamiento de los suelos expansivos, utilizando como variables independientes de esfuerzo la succión y el esfuerzo neto, pero poco se ha estudiado utilizando el concepto de esfuerzos efectivos.

JUSTIFICACIÓN

Los suelos expansivos suelen estar en un estado de condición no saturada y se encuentran ampliamente en regiones semiáridas y áridas del mundo (Vanapalli y Lu, 2012).

La mayor parte de los asentamientos humanos se encuentran sobre suelos no saturados y muchos de ellos son expansivos, sin embargo, los suelos expansivos no causan problemas a menos que las estructuras que se construyen sobre ellos sean pobremente diseñadas (Zepeda, 2004), es por ello la importancia de conocer el comportamiento de este tipo de suelos para poder diseñar adecuadamente la edificación que se desplantará encima.

Si se construye sobre suelos expansivos, se interrumpe la evaporación y empieza a cambiar el volumen del suelo, por lo que afecta considerablemente las cimentaciones, puede destruir losas, pisos

y hasta estructuras. Estos suelos reducen su volumen cuando se secan y esta contracción puede eliminar el soporte de edificios u otras estructuras y dar como resultado un hundimiento perjudicial. Las fisuras en el suelo también pueden desarrollarse, estas fisuras pueden facilitar la penetración profunda del agua cuando se producen condiciones de humedad o escorrentía. El ciclo de contracción y expansión coloca el estrés repetitivo en las estructuras y el daño empeora con el tiempo (King, 2016). Los daños causados por los suelos expansivos son debido al movimiento diferencial (no uniforme) que se genera en el subsuelo cuando hay entradas de agua o épocas de estiaje donde el suelo comienza a secarse, ya que la estratigrafía del suelo no es uniforme, ni tampoco el cambio de contenido de agua.

Algunos estados en México que han identificado el problema asociado con suelos expansivos son: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas, Campeche, Sonora y Sinaloa (Pérez, 2012). En la ciudad de Querétaro, se encuentran depósitos arcillosos que pueden tener más de 20 metros de espesor, sin que aparezca el nivel de aguas freáticas (Zepeda, 2004).

En los nuevos fraccionamientos construidos en estas ciudades, si no se diseña la cimentación con todo cuidado, tomando en cuenta este fenómeno, las casas pueden presentar daños considerables después de poco tiempo de construidas (Auvinet, 2010). Las pérdidas económicas que producen son muy grandes y muchas de ellas podrían evitarse reconociendo el problema a tiempo e incorporando medidas preventivas apropiadas en el diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras. La mayoría de los problemas de suelos expansivos están asociados a estructuras ligeras que provocan bajas presiones de contacto en el suelo (menores de $5-10 \text{ t/m}^2$), las cuales rara vez justifican investigaciones exhaustivas y soluciones efectivas. Lo mismo provocan daños a carreteras, bordos, canales que en casas habitación (P y Ballinas, 2010). Hablando en términos de casas habitación, los suelos expansivos afectan a las estructuras ligeras, esto debido a que cuanto menor sea la carga, mayor será la expansión, ya que no hay una sobrecarga que contrarreste la presión de expansión, generando por lo tanto mayores afectaciones a las estructuras ligeras, esto se ve repercutido en las cimentaciones, además, pueden aparecer; grietas en las esquinas de las ventanas, puertas, en los muros, en las banquetas, y en las avenidas. Sólo cambios de humedad del orden de 1 o 2% son suficientes para ocasionar expansiones poco convenientes. En estos casos las losas de piso se afectan en gran medida (Zepeda, 2004).

El problema que surge con las estructuras ligeras como casas habitación, es que estas se construyen de manera similar en todo tipo de terreno sin tomar en cuenta las condiciones del suelo, así que, si el suelo es expansivo, la cimentación “típica” no podrá satisfacer los requerimientos necesarios para evitar la expansión, llevando como consecuencia afectaciones a la vivienda y por tanto al dueño de esta. El problema social que se genera es que este tipo de casas habitación suelen ser construidas en grandes lotes y no hay una garantía suficiente que asegure al propietario que podrá tener una vivienda en buenas condiciones por un largo periodo de tiempo, ya que las garantías suelen ser de 1 año, y los constructores no se hacen responsables después de dicho tiempo. Y si la casa fue construida sobre suelos expansivos, las repercusiones se verán después de que haya pasado la época de humedecimiento del suelo, así que en ocasiones ya no entran en garantía, dejando al propietario con una deuda que va a pagar por 20 o 30 años y con una vivienda dañada y en malas condiciones.

Resulta evidente que los daños causados por un suelo expansivo afectan la estructura de una obra, eso se traduce en una afectación monetaria para el propietario, motivo por el cual, es necesario seguir con el estudio de este tipo de suelos y así conocer su comportamiento, lo cual permitirá diseñar mejores métodos constructivos que tomen en cuenta los efectos a largo plazo y así evitar daños estructurales. (Zepeda, 2004) menciona algo muy importante, tomar en cuenta todos los detalles para prevenir las fallas de la construcción por la actividad del suelo expansivo siempre será mejor que cualquier medida correctiva.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Desarrollar un modelo constitutivo adecuado para suelos expansivos es complicado y está influenciado por una gran variedad de parámetros. Actualmente existen algunos modelos que tratan de explicar el comportamiento de los suelos expanso-colapsables a partir de las variables independientes de esfuerzo (succión y esfuerzo neto). Sin embargo, resultan bastante complicados debido a que tratan a la macroestructura y la microestructura como entidades separadas, utilizando parámetros diferentes para cada nivel estructural. En cambio, si se analiza el comportamiento de los suelos expansivos, con un acoplamiento entre los niveles de estructura microestructural y macroestructural como entidades juntas y basado en esfuerzos efectivos, en lugar de esfuerzos netos y succión, se podrá obtener un modelo más sencillo que permita describir el comportamiento de los suelos expansivos.

1 SUELOS EXPANSIVOS

Los avances que se han realizado en el estudio de la mecánica de suelos han permitido conocer las diferentes características y comportamiento de cada uno de ellos, por lo cual se ha clasificado a los suelos según diferentes parámetros, como pueden ser; según su origen, su tamaño, sus propiedades, su comportamiento mecánico etc., cada una de estas clasificaciones proporciona información importante del suelo en cuestión.

1.1 Suelos saturados y no saturados

Se llama fase a una región que al interior del sistema es uniforme en sus propiedades físicas (Zepeda, 2004). Existen 4 fases que pueden presentarse en los suelos: la fase sólida, la fase líquida, la fase gaseosa, y la membrana contráctil (interfase aire-agua). La clasificación que divide el estudio de la mecánica de suelos en 2 tipos se debe al grado de saturación que presenta; los suelos saturados y los suelos no saturados. Los suelos saturados son aquellos que presentan únicamente la fase sólida y líquida, con un grado de saturación de 100%, mientras que los suelos no saturados presentan las 4 fases (Figura 1.1).

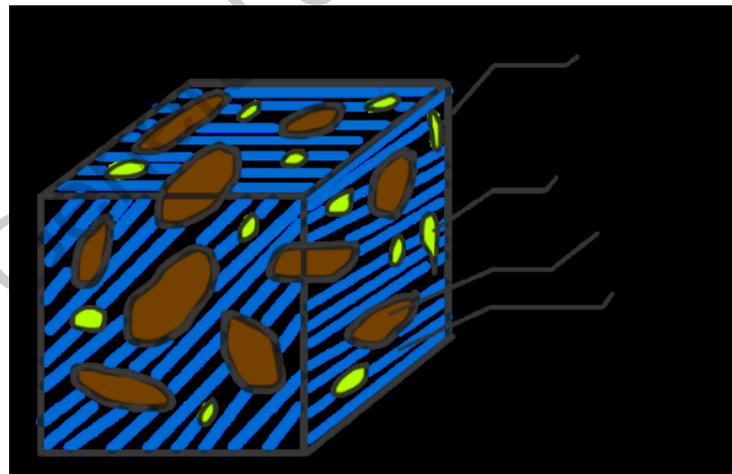


Figura 1.1 Fases presentes en un suelo no saturado.

1.2 Físicoquímica de las arcillas

Los elementos de mayor interés en el estudio de las arcillas son el oxígeno, el aluminio y el silicio. Los silicatos son un grupo de minerales con una unidad estructural llamada tetraedro de sílice

(Figura 1.2), conformado por un catión de silicio al centro (ion cargado positivamente) el cual está rodeado por 4 aniones de oxígeno (iones cargados negativamente) colocados en las esquinas del tetraedro (Budhu, 2011). El silicio que se encuentra al centro tiene 4 cargas eléctricas positivas, mientras que cada oxígeno tiene 2 cargas negativas, así que cada ion de oxígeno usa una de sus cargas negativas para atraer al átomo de silicio, quedando una carga total de -4 en el tetraedro, es decir que cada ion de oxígeno se queda con una carga de -1 , por lo tanto, para alcanzar una carga neutral, deben ser añadidos cationes como Na, K, Ca, etc., o los iones de oxígeno pueden utilizar su carga negativa para enlazarse a otros tetraedros, creando así una cadena de tetraedros y formando una lámina silícica (Figura 1.2).

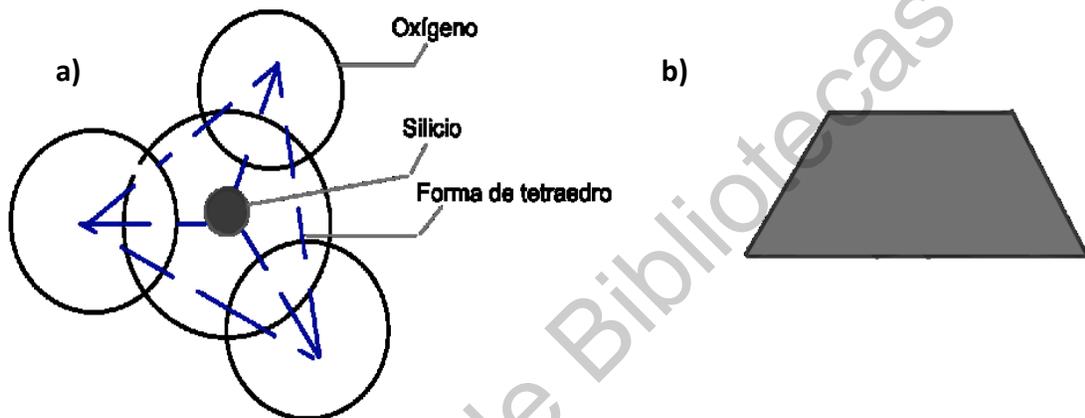


Figura 1.2 a) Tetraedro de silice, b) Lámina silícica.

El octaedro de aluminio (Figura 1.3) está conformado por un catión de aluminio al centro, y está rodeado por 6 aniones de oxígeno. La combinación de estos octaedros forma una lámina aluminica.

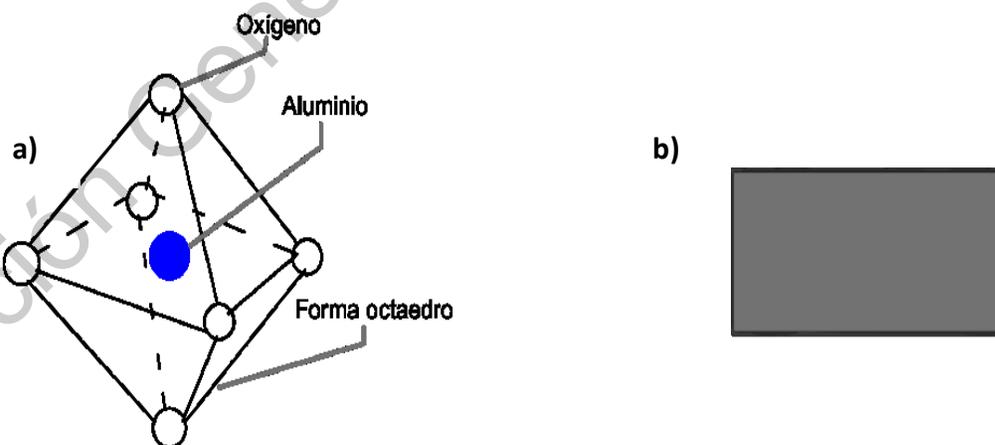


Figura 1.3 a) Octaedro de aluminio, b) Lámina aluminica.

Los minerales que forman a las arcillas se pueden clasificar en 3 grupos básicos: montmorillonita, illita y caolinita. La caolinita está formada por una lámina silícica y una lámina aluminica apiladas repetidamente, las capas son unidas con enlaces de hidrogeno, esta unión no permite

la penetración de moléculas de agua entre ellas, pues producen una capa electrónicamente neutra, lo que hace que estas arcillas sean bastante estables en presencia del agua (Villalaz, 2004).

La illita está formada por una lámina alumínica entre dos láminas silícicas, las capas son unidas por iones de potasio. La montmorillonita tiene una estructura similar a la illita, pero las capas están unidas por fuerzas de van der Waals (Budhu, 2011), las cuales son el tipo más débil de fuerza intermolecular que puede darse en la naturaleza, siendo muy fácil romper dicho enlace, por lo cual las moléculas de agua pueden penetrar con facilidad, además las montmorillonitas pertenecen al grupo de las esmectitas, en las cuales se tiene un ion de aluminio con una carga de +3 y este puede reemplazarse por un ion de magnesio con carga +2, esto genera un desequilibrio, dejando cargas negativas en las láminas de la arcilla, que para poder balancearse atraerán cationes (Budhu, 2011).

1.2.1 Capacidad de Intercambio Catiónico

La propiedad de intercambio de cationes que existe en las láminas para mantener el balance de cargas es conocida como capacidad de intercambio catiónico CEC, la cual es utilizada para diferenciar los distintos tipos de minerales presentes en las arcillas. La CEC se mide en miliequivalentes por cada 100 gramos (meq/100g), los valores de los 3 grupos básicos de arcillas se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Capacidad de intercambio catiónico en las arcillas.

Mineral	CEC (meq/100g)
Caolinita	3-15
Illita	15-40
Montmorillonita	80-100

Se observa que la montmorillonita tiene un valor muy grande de CEC comparado con la illita y caolinita, por lo cual, junto con la penetración de agua debido al tipo de enlace, se genera una expansión. Se define como suelos expansivos a las arcillas que experimentan grandes cambios de volumen a partir de ciclos de humectación y secado (Budhu, 2011), lo que hace que la montmorillonita sea una de las arcillas más activas en la naturaleza (Rojas *et al.*, 2017).

Si la arcilla está en un estado saturado, grandes deformaciones de expansión ocurren cuando el suelo es cargado, estos suelos han sido referidos en la literatura como arcillas activas y arcillas expansivas (Gens y Alonso, 1992).

1.2.2 Superficie Específica

Si se subdivide un cuerpo, la proporción de su área de superficie a su volumen aumenta. Por ejemplo, un cubo con lados de 1 cm tiene un área de superficie de 6 cm^2 . Si se subdivide este cubo en cubos más pequeños con lados de 1 mm, el volumen original no cambia, pero el área de superficie incrementa a 60 cm^2 . Así que el área de superficie por unidad de masa se define como superficie específica. En la Tabla 1.2 se indican los valores típicos de superficie específica que presentan los minerales de arcilla.

Tabla 1.2 Valores de superficie específica para minerales de arcilla

Mineral	Superficie específica (m^2/g)
Caolinita	10 – 20
Ilita	65 – 100
Montmorilonita	>800

1.3 Origen de los suelos expansivos

Otra forma de clasificar a los suelos no saturados está relacionada con el comportamiento del suelo en cuanto a sus cambios volumétricos. Si el volumen aumenta a causa del humedecimiento, el suelo tiene naturaleza expansiva; si el volumen del suelo decrece, entonces tiene naturaleza colapsable. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorilonita y un clima semiárido, donde la evapotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual (Zepeda, 2004). Las montmorilonitas están formadas por una lámina alumínica (Figura 1.3) entre dos sílicas (Figura 1.2) cuyos enlaces son débiles, pudiendo así presentarse la penetración de las moléculas de agua en su estructura reticular, debido sobre todo a la naturaleza dipolar de dichas moléculas. En estas condiciones los cristales de arcilla se hinchan (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1988).

1.4 Comportamiento de los suelos expansivos

Las propiedades ingenieriles de estos suelos son altamente sensibles a los cambios en el contenido de agua y la succión en la profundidad de la zona activa. Uno de los problemas clave asociados con los suelos expansivos son sus características de hinchamiento debido a un aumento en su contenido de agua natural (Vanapalli et al., 2012).

Las partículas de arcilla expansiva cuando toman agua del medio llegan a expandirse un porcentaje alto con respecto a su volumen inicial, en cambio cuando se secan se contraen demasiado, generando con esto un potencial de expansión enorme (Zepeda, 2004).

El comportamiento de las arcillas expansivas no saturadas está estrechamente asociado con los fenómenos mecánicos y fisicoquímicos que ocurren a nivel de partículas, los cuales son una consecuencia de las propiedades particulares de los minerales de arcillas activas contenidos en el suelo (Gens y Alonso, 1992).

1.4.1 Factores que influyen el comportamiento de los suelos expansivos

El mecanismo de expansión de una arcilla es complicado y además está influenciado por una gran variedad de parámetros (Zepeda, 2004). Los factores que influyen en el potencial de expansión-contracción de un suelo, se pueden considerar en tres grupos (Nelson y Miller, 1992):

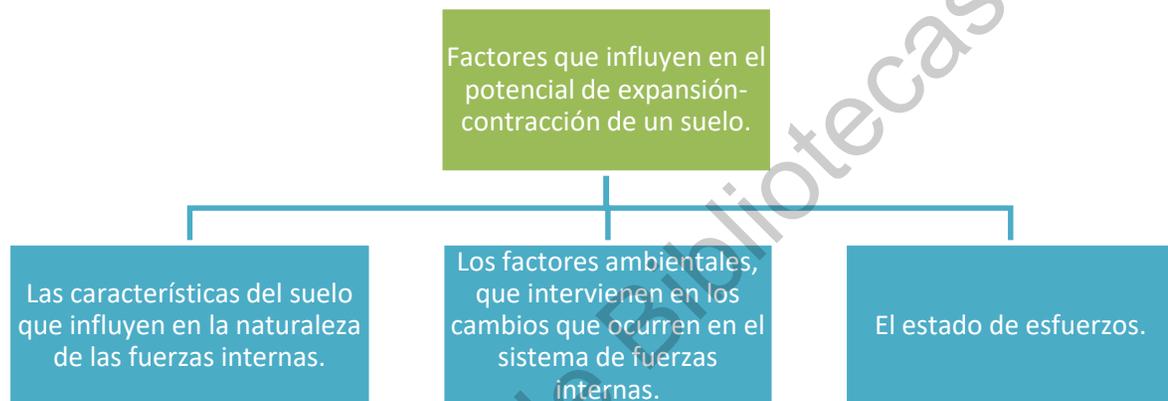


Figura 1.4 Factores que influyen en el potencial de expansión-contracción de un suelo (Nelson y Miller, 1992).

Las características del suelo que influyen en la naturaleza de las fuerzas internas (Figura 1.4) se pueden considerar como factores a microescala o a macroescala.

- Factores a microescala: están relacionados con las propiedades mineralógicas y químicas del suelo.
- Factores a macroescala: propiedades como son la plasticidad y la densidad. Incrementar la densidad del suelo a través de la compactación conduce a expansiones grandes y además eleva la presión de expansión.

Como se mencionó anteriormente un factor muy importante es el cambio de humedad, el cual genera expansión y contracción en las arcillas. El cambio de humedad también afecta las presiones negativas asociadas con el agua capilar del suelo, un efecto conocido como succión el cual se explica a detalle en la sección 5.4.

Como puede observarse el comportamiento de los suelos no saturados deformables es difícil de caracterizar con relaciones simples. Las propiedades hidráulicas no saturadas, es decir, la curva característica suelo-agua y la función de conductividad hidráulica, dependen tanto del cambio de volumen como del grado de saturación, mientras que el cambio de volumen a menudo no puede

relacionarse con una única variable de esfuerzo sino que debe describirse por funciones independientes de carga mecánica y succión (Simms *et al.*, 2005).

Los factores ambientales también tienen un impacto importante en el comportamiento de las arcillas, por ejemplo, los cambios climáticos, los cuales afectan la humedad del suelo. En zonas áridas en temporadas de calor, la humedad de la superficie será baja debido a la evaporación, en cambio en temporadas de lluvia la humedad aumentará. La profundidad del suelo en la cual se presenta esta variación de humedad se le conoce como zona activa, y es muy importante conocerla ya que esa zona es la que generará cambios volumétricos en las arcillas.

En la Figura 1.5 se observa las zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana.

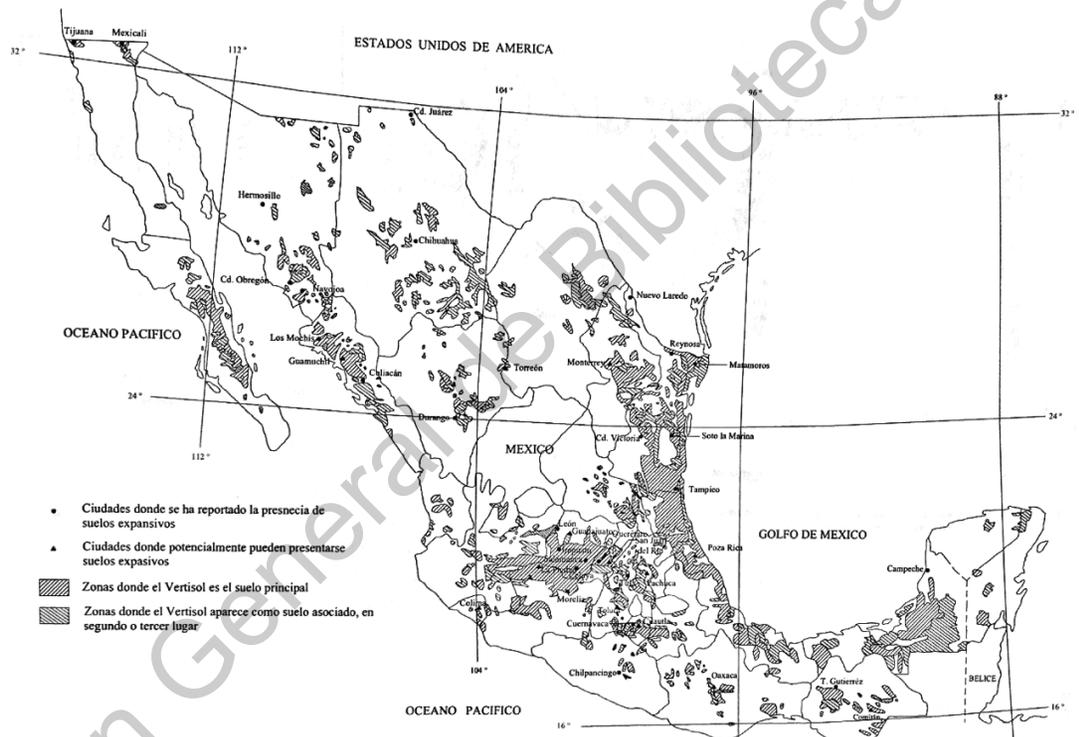


Figura 1.5 Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda y Castañeda, 1987).

Dentro de los factores que afectan el estado de esfuerzos se encuentra la historia geológica de esfuerzos a los que el suelo ha sido sometido previamente. Por ejemplo, un suelo que fue sometido a un alto grado de compactación, al ser humedecido, presentará mayores expansiones que un suelo con menor grado de compactación.

Otro factor es la sobrecarga a la cual será sometido el suelo, si la carga es pequeña no habrá una fuerza que contrarreste el efecto de la expansión, por lo tanto, el suelo expandirá libremente, en cambio si la carga es grande la expansión será menor.

Finalmente podemos mencionar algunos factores humanos que pueden ayudar a prevenir la expansión de un suelo. Un sistema de drenaje adecuado que desvíe el paso del agua lejos de la estructura ayuda a evitar cambios de humedad en el suelo que está debajo de la cimentación. Atender inmediatamente fugas de agua en la superficie es importante. Construir banquetas y patios de concreto, así como calles de asfalto o concreto ayuda a prevenir que el suelo alrededor de las orillas de la cimentación se humedezca o se seque. Es importante que las calles y banquetas tengan una pendiente que dé hacia afuera de los edificios o casas, ya que, si la pendiente es hacia adentro, el agua de lluvia puede acumularse e infiltrarse hacia el suelo. También ocurrirá este mismo efecto si la calle presenta grietas o depresiones en la superficie.

La vegetación juega un papel importante cuando hay suelos expansivos, no deben plantarse árboles cerca del perímetro del edificio o casa ya que las raíces de los árboles buscan agua en época de sequía, haciendo que haya cambios de humedad en el suelo y generando con esto movimientos. Debe evitarse tener flores plantadas o césped cerca de las edificaciones que se encuentran sobre suelo expansivo, ya que al regarlas se está añadiendo agua que se infiltrará al suelo expansivo, generando cambios de humedad.

1.5 Identificación de suelos expansivos

La presencia de grietas en la superficie (Figura 1.1) puede ser una indicación de que se trata de un suelo expansivo. Sin embargo, para poder identificar que efectivamente el suelo sobre el cual está cimentada una estructura es expansivo existen diferentes métodos.



Figura 1.6 Grietas generadas después de las lluvias en una edificación construida sobre suelo expansivo en Querétaro, México.

1.5.1 Identificación mineralógica

Como se mencionó en la sección 1.2, las cargas eléctricas negativas y la capacidad de intercambio catiónico en los minerales de arcilla, influyen en el potencial de expansión. Para poder identificar los minerales de la arcilla existen varias técnicas, algunas de ellas son: Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial, Microscopio Electrónico de Barrido y Análisis Químico y Potencial de Hidrógeno pH.

En el estudio realizado por (Lopez-lara *et al.*, 2012) se realizó una micrografía por medio del microscopio electrónico de barrido a un suelo expansivo de la zona de Jurica en Querétaro, México. Mediante la micrografía se puede apreciar el ordenamiento de las partículas de arcilla las cuales se presentan en forma de láminas sobrepuestas unas de otras formando aglomeraciones (Figura 1.7).



Figura 1.7 Micrografía del suelo de Jurica, Querétaro, México con aumento de 6000x (Lopez-lara *et al.*, 2012).

Entre mayor sea el contenido de montmorilonita en la arcilla, más expansivo será el suelo. El mineral de arcilla predominante del suelo es reflejado en la plasticidad. Por lo tanto, es de esperarse que haya una correlación entre la plasticidad de un suelo y su potencial expansivo.

1.5.2 Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos son aquellos que clasifican la expansión del suelo en términos tales como bajo, medio o alto. Algunos de estos métodos son; Límites de Atterberg, los cuales proporcionan información acerca de la plasticidad del suelo y que permiten conocer el valor de Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP). Otros métodos son el Límite de Contracción, Contracción Lineal, Expansión libre y Contenido de Coloides.

(Holtz y Gibbs, 1956) realizaron una clasificación cualitativa del grado de expansión tomando en cuenta datos de pruebas índice (Tabla 1.3). Se observa que los suelos con un índice de plasticidad

mayor a 15 es considerado medianamente expansivo, y se considera altamente expansivo cuando es mayor a 35.

Tabla 1.3 Datos para hacer estimaciones del cambio probable de volumen para suelos expansivos (Holtz y Gibbs, 1956).

Datos de pruebas índice			Expansión probable % total del cambio de volumen	Grado de expansión
Contenido Coloidal % menor de 0.001 mm	Índice de Plasticidad	Límite de Contracción		
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-20	Medio
<15	<18	>15	<10	Bajo

1.5.3 Método de la actividad de Skempton

(Skempton, 1953) mostró que, para suelos con una mineralogía particular, el índice de plasticidad está linealmente relacionado a la cantidad de la fracción de arcilla. Él acuñó el término llamado actividad (A) para describir la importancia de las fracciones de arcillas en el índice de plasticidad. La ecuación para A es:

$$A = \frac{IP}{\text{Fracción de arcilla (\%)}} \quad (1.1)$$

La fracción de arcillas es la cantidad de partículas menores a 2 μm. La actividad es uno de los factores usados para identificar suelos expansivos. En la Tabla 1.4 se muestran valores de actividad típicos.

Tabla 1.4 Valores de actividad de arcillas (Budhu, 2011).

Descripción	Actividad, A
Inactiva	<0.75
Normal	0.75-1.25
Activa	1.25-2
Muy activa	>6
Minerales	
Caolinita	0.3-0.5
Illita	0.5-1.3
Na-montmorilonita	4-7
Ca-montmorilonita	0.5-2.0

1.5.4 Presión de expansión

La presión de expansión puede obtenerse mediante la metodología especificada en la norma (Standard ASTM D 4546-03) la cual propone tres alternativas: Método A, B y C. Se define como presión de expansión a la presión necesaria para evitar que un espécimen de suelo expanda (Método C) o la presión que es requerida para regresar al espécimen a su estado original (altura, relación de vacíos) que tenía antes de haber sido saturado (Método A o B).

Los tres métodos requieren que el espécimen de suelo esté restringido lateralmente y sea cargado axialmente en un consolidómetro con acceso al agua libre.

1.5.4.1 Método A

La muestra es sometida a una presión de al menos 1kPa, la cual es aplicada por el peso de la piedra porosa en la parte superior y por la placa de carga. El espécimen es inundado y se permite que expanda libremente de forma vertical hasta completar la expansión primaria. Después el espécimen se carga hasta llegar a la altura/relación de vacíos inicial.

1.5.4.2 Método B

El método consiste en colocar una presión al espécimen, frecuentemente se utiliza la presión vertical de sobrecarga in situ, antes de permitir que el agua penetre en el consolidómetro. Después se permite el acceso al agua libre, lo cual puede hacerse por capilaridad. Esto puede resultar en:

- Expansión
- Expansión y luego contracción
- Contracción, o
- Contracción y luego expansión

Después del humedecimiento se hacen los incrementos de carga, tal y como se realiza en una prueba normal de consolidación.

1.5.4.3 Método C

El espécimen se inunda permitiendo acceso al agua libre y se realizan ajustes en la presión vertical para mantener la altura de la muestra constante. La presión que permite que el material mantenga su altura inicial (volumen constante) es la presión de expansión. Posterior a ello se realiza una prueba normal de consolidación.

2 ANTECEDENTES

2.1 Microestructura y macroestructura

Se sabe que muchos materiales finos naturales y secos de suelos compactados muestran una estructura bimodal formada por una microestructura y una macroestructura. La microestructura, que se genera durante el proceso de compactación, está representada por el arreglo de pequeñas partículas formando agregados con poros de tamaño pequeño, estos poros son llamados intra-agregados. El arreglo relativo de agregados constituye la macroestructura, la cual muestra poros grandes. Estos poros son llamados interagregados o macroporos (Rojas *et al.*, 2017).

Los macroporos (poros grandes) y los mesoporos (poros de tamaño mediano), constituyen las cavidades del material. Los macroporos tienen la característica de ser más grandes que las partículas del sólido que forma el poro; por lo tanto, su equilibrio es precario bajo carga isotrópica o cortante. La mayoría de los macroporos reducen su tamaño y se transforman en poros más pequeños y son responsables de la mayor parte de la respuesta volumétrica del suelo. En contraste, los mesoporos tienen la característica de ser más pequeños que los sólidos que los rodean; por lo tanto, son muy estables y en general mantienen su tamaño bajo carga isotrópica. Los macroporos y mesoporos se interconectan por poros de otro tipo llamados microporos (Rojas y Chávez, 2013).

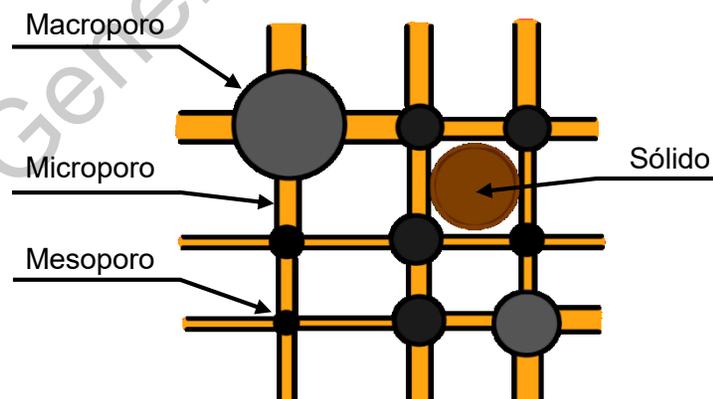


Figura 2.1 Macroporos, mesoporos y microporos.

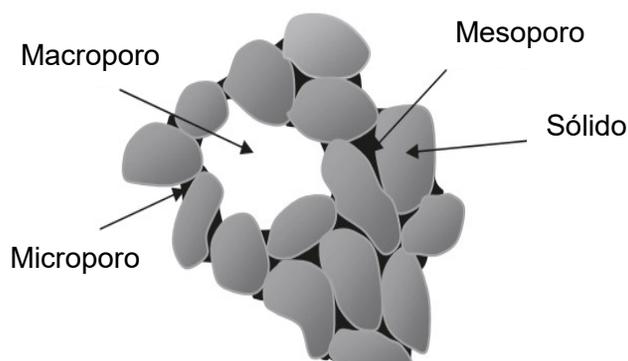


Figura 2.2 Representación de la microestructura y macroestructura (Rojas y Chávez, 2013).

(Nowamooz y Masrouri, 2008) realizaron una prueba de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés) para evaluar la distribución de tamaño de poro de una mezcla de bentonita/limo compactada. En la Figura 2.3 se observa la distribución del volumen incremental de poro, el diámetro de poro y el límite entre la micro y macroestructura.

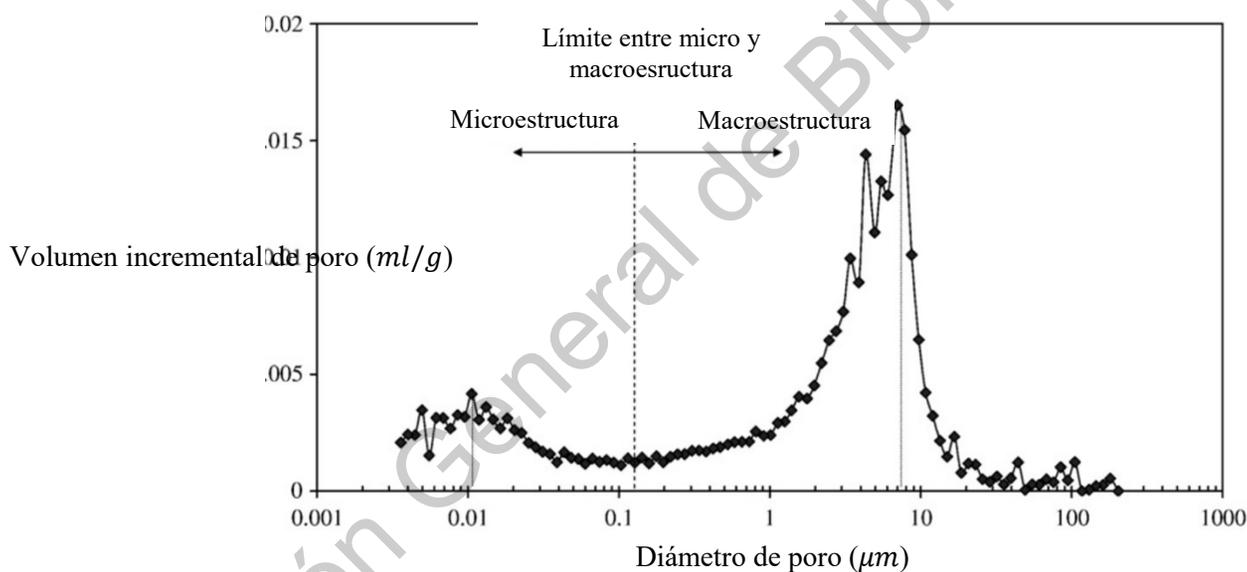


Figura 2.3 Distribución de volumen incremental de poro evaluado de resultados MIP (Nowamooz y Masrouri, 2008).

2.1.1 Comportamiento de la microestructura y macroestructura

Varios autores han realizado investigaciones acerca del comportamiento de la micro y macroestructura en los suelos expansivos. En el trabajo realizado por (Gens y Alonso, 1992) se presenta un marco extendido que está basado en la distinción dentro del material de un nivel microestructural, donde la expansión básica de los minerales activos toma lugar y un nivel

macroestructural, el cual es responsable de importantes reordenamientos estructurales. También mencionan que el comportamiento de las arcillas expansivas no saturadas está estrechamente asociado con el fenómeno mecánico y fisicoquímico ocurriendo a nivel de partícula. Uno de los factores más importantes son las presiones negativas asociadas con el agua capilar en el suelo (succión), el cual juega un papel importante en los poros interconectados de la macroestructura de la arcilla, donde el agua tiene una movilidad relativamente grande.

(Alonso *et al.*, 1999) observa que la deformación plástica de la macroestructura depende no solamente de la deformación microestructural sino también del nivel de esfuerzo y del estado de compactación (relación de vacíos) de la macroestructura. Así mismo mencionan que se debe incluir una interrelación entre las deformaciones de la microestructura y la macroestructura. Esta interrelación debe tomar en cuenta que cuando el agua está disponible y la microestructura se hincha, este incremento de volumen no se transmite íntegramente a la macroestructura dado que una parte de esta expansión ocurre en los macroporos. Por lo tanto, el volumen de los macroporos es un factor importante para el modelado de la expansión. Este volumen está ligado directamente con la densidad del material.

(Simms y Yanful, 2001) observaron que, cuando la succión o el esfuerzo neto se incrementan, el volumen relativo de los macroporos se reduce, mientras el de los intraporos parece incrementarse.

(Rojas, 2016) considera que la microestructura se hincha y contrae con los ciclos de humedecimiento y secado y este comportamiento se transmite a la macroestructura de alguna forma. Cuando un suelo expansivo no está saturado, el agua posee una presión negativa debido a la presencia de interfaces de agua-aire (meniscos de agua). Esto quiere decir que la intrusión o drenaje de agua entre las laminillas de una partícula está regulada por el valor de la succión. En tal caso, la modelación del comportamiento volumétrico de la microestructura durante ciclos de humedecimiento-secado se puede hacer utilizando el mismo índice de compresión utilizado para la simulación del comportamiento volumétrico de la macroestructura, cuando se utiliza el principio de esfuerzos efectivos.

2.2 Deformación volumétrica en suelos no saturados

Varias relaciones constitutivas están disponibles en la literatura, usando la mecánica de suelos no saturados, para interpretar el comportamiento de cambio de volumen mediante el uso de variables del estado de esfuerzo, como son el esfuerzo normal neto ($\sigma - u_a$) y la succión mátrica ($u_a - u_w$) (Vanapalli y Lu, 2012).

(Verdín Montes, 2018) menciona que los suelos preconsolidados desarrollan deformaciones elásticas únicamente mientras que los suelos normalmente consolidados han alcanzado un esfuerzo crítico llamado esfuerzo de preconsolidación ($p_{0\ net}$) más allá de las deformaciones elásticas, las cuales es necesario sumar las deformaciones plásticas. Si se observa la Figura 2.4, el suelo se comprime inicialmente dentro de una zona elástica (línea \overline{ab}), que representa la historia de carga del suelo y que tiene una pendiente que se denomina κ (índice de descarga-recarga). Cuando el suelo se carga más allá del punto b (esfuerzo de preconsolidación, $p_{0\ net}$) comienza la zona plástica (línea \overline{bc}) donde hay un

cambio de pendiente, el cual se denomina λ (índice de compresión). Posteriormente, al descargar el suelo se genera la línea \overline{cd} , cuya pendiente es nuevamente κ . Por lo tanto, se observa que κ corresponde a la pendiente del estado preconsolidado y λ al estado normalmente consolidado.

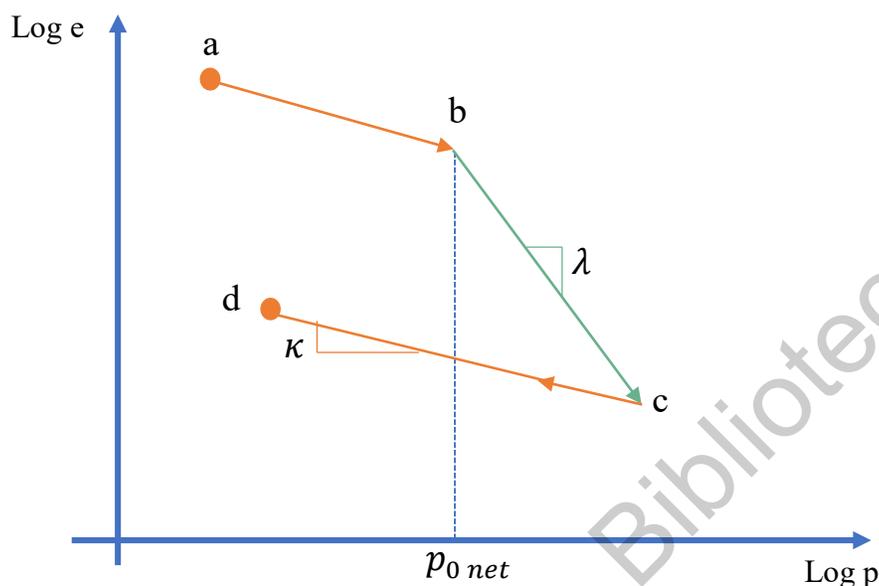


Figura 2.4 Curva de compresibilidad de suelos (Verdín Montes, 2018).

El cambio de volumen ε_v puede definirse con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.1)$$

Donde ε_v representa la deformación volumétrica del suelo, v_0 el volumen inicial de la muestra, Δv la variación del volumen, Δe la variación de la relación de vacíos y e_0 la relación de vacíos inicial.

Cambiando el eje de esfuerzos netos p de la Figura 2.4 a esfuerzos efectivos p' y utilizando la pendiente λ se obtiene la siguiente ecuación (Rojas y Chávez, 2013)

$$\frac{de}{e} = \lambda_e \frac{dp'}{p'} \quad (2.2)$$

Donde e es la relación de vacíos actual y de es el incremento de esa relación de vacíos, dp' es el incremento del esfuerzo medio efectivo mientras que λ_e es el índice de compresión cuando el esfuerzo medio efectivo y la relación de vacíos se grafican en un plano logarítmico. Para el comportamiento elástico se sustituye el índice de descarga-recarga κ_e por λ_e .

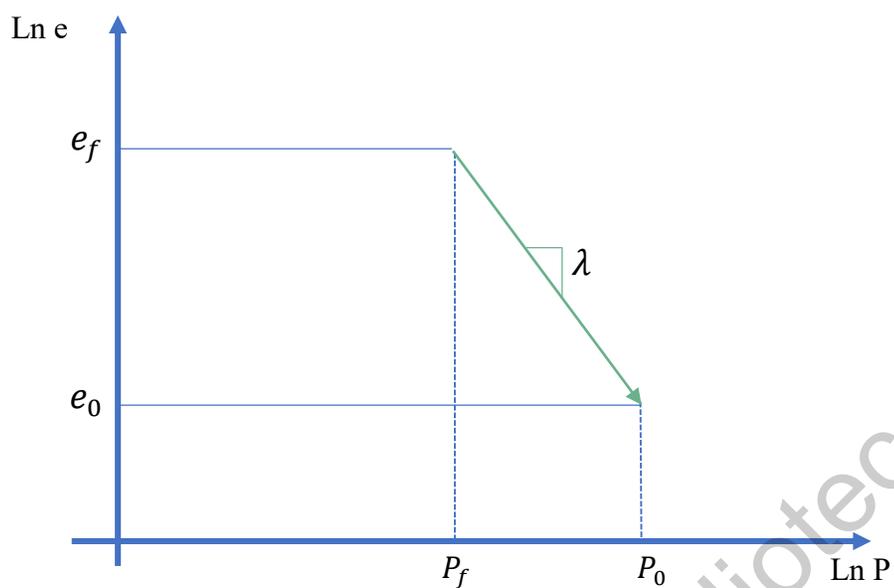


Figura 2.5 Relación $\ln e$ vs $\ln P$.

Utilizando la Figura 2.5 se obtiene la siguiente relación:

$$\ln \frac{e_f}{e_0} = \lambda_e \ln \left(\frac{p_f}{p_0} \right) \quad (2.3)$$

Usando la propiedad del logaritmo natural se tiene lo siguiente:

$$\ln \frac{e_f}{e_0} = \ln \left(\frac{p_f}{p_0} \right)^{\lambda_e} \quad (2.4)$$

Aplicando la base e en ambos lados de la ecuación (2.4):

$$e^{\ln \frac{e_f}{e_0}} = e^{\ln \left(\frac{p_f}{p_0} \right)^{\lambda_e}} \quad (2.5)$$

$$e_f = e_0 \left(\frac{p_f}{p_0} \right)^{\lambda_e} \quad (2.6)$$

2.2.1 Endurecimiento por succión

(Rojas González, 2018) menciona que cuando los incrementos de carga van precedidos de algún incremento de succión por encima de la succión máxima histórica, ocurre el fenómeno de endurecimiento por succión. Este fenómeno es el que tiene mayor influencia en el comportamiento de los suelos no saturados y ocurre porque las componentes del esfuerzo efectivo: esfuerzo neto y esfuerzo de succión, actúan de manera independiente.

Cuando un suelo se seca, su esfuerzo de preconsolidación aparente se incrementa en una cantidad igual al incremento del esfuerzo de succión. El esfuerzo de preconsolidación aparente (p'_0) es aquel que muestra el suelo a cierta succión y se denomina aparente porque al reducirse la succión, este esfuerzo también se reduce. El esfuerzo de preconsolidación saturado (p_{n0}) es el que muestra el suelo después de sufrir un ciclo de secado-humedecimiento hasta llegar nuevamente a la saturación.

La ecuación que define el incremento de deformación plástica es la siguiente:

$$d\varepsilon^p_v = (\lambda - \kappa) \frac{e_0}{1 + e_0} \left(\frac{dp'}{p'_0} \right) \quad (2.7)$$

Suponga que una muestra saturada normalmente consolidada soporta un esfuerzo medio neto p_{n0} indicado por el punto 0 en la Figura 2.6. Si la muestra se seca, el esfuerzo medio efectivo se incrementa en la cantidad $\chi_0 S_0$, en donde S_0 representa la succión máxima alcanzada durante el secado y χ_0 representa el valor del parámetro de Bishop (el cual es explicado a detalle en la sección 5.2.2) para esta succión. Durante el secado, el esfuerzo medio efectivo se desplaza del punto 0 al punto A siguiendo la línea de compresión isotrópica (LCI).

Si después del secado, la muestra se carga por incremento del esfuerzo medio neto, ocurre un comportamiento elástico inicial (trayectoria AB) hasta que se alcanza el esfuerzo aparente de preconsolidación (p'_0). Este esfuerzo aparente de preconsolidación (punto B) está representado por la suma del esfuerzo medio efectivo al final del secado (p'_{0*} , punto A) más el esfuerzo de succión ($\chi_0 S_0$).

$$p'_0 = p'_{0*} + \chi_0 S_0 \quad (2.8)$$

Donde:

p'_0 es el esfuerzo aparente de preconsolidación

p'_{0*} es el esfuerzo medio efectivo al final del secado

χ es el parámetro de Bishop para esfuerzo efectivo.

S_0 es la succión máxima que ha sufrido el suelo.

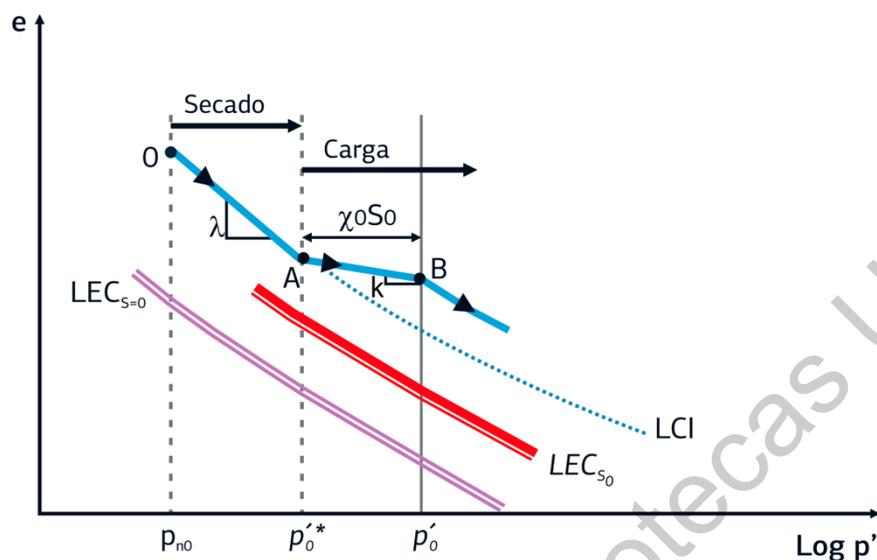


Figura 2.6 Comportamiento volumétrico de un suelo en los ejes logaritmo del esfuerzo medio efectivo (p') contra la relación de vacíos (e) (Rojas González, 2018).

Si el esfuerzo medio neto se sigue incrementando, ocurren deformaciones elastoplásticas (línea punteada después del punto B en la Figura 2.6). Esto quiere decir que el incremento del esfuerzo aparente de preconsolidación después del secado (punto B) con respecto al esfuerzo inicial de preconsolidación saturado (p_{n0}), es dos veces el esfuerzo de succión $\chi_0 S_0$.

2.3 Superficie de fluencia

Se define como superficie de fluencia al conjunto de puntos en todas las posibles direcciones que delimitan la región elástica de la región elastoplástica. Para comprender este concepto (Budhu, 2011) lo explica mediante un cilindro al cual se le está aplicando incrementos de esfuerzos verticales y radiales. Como no se están aplicando esfuerzos cortantes, el esfuerzo vertical y radial serán los esfuerzos principales. Si se considera que σ_3 es cero y se incrementa σ_1 , el material va a fluir en algún valor de σ_1 , al cual llamaremos $(\sigma_1)_y$, y se observa como el punto A en la Figura 2.7. Si, por el contrario, σ_1 es cero y se incrementa σ_3 , el material va a fluir en $(\sigma_3)_y$ y es representado como el punto B. Se puede someter al cilindro a varias combinaciones de σ_1 y σ_3 y graficar los puntos de fluencia. Si se unen los puntos de fluencia resulta la curva, AB, la cual es llamada superficie o curva de fluencia. Un material que está sujeto a una combinación de esfuerzos que están por debajo de la curva de fluencia responderán elásticamente (deformación recuperable). Si la carga continua más allá del esfuerzo de fluencia, el material responderá elastoplásticamente (deformación permanente).

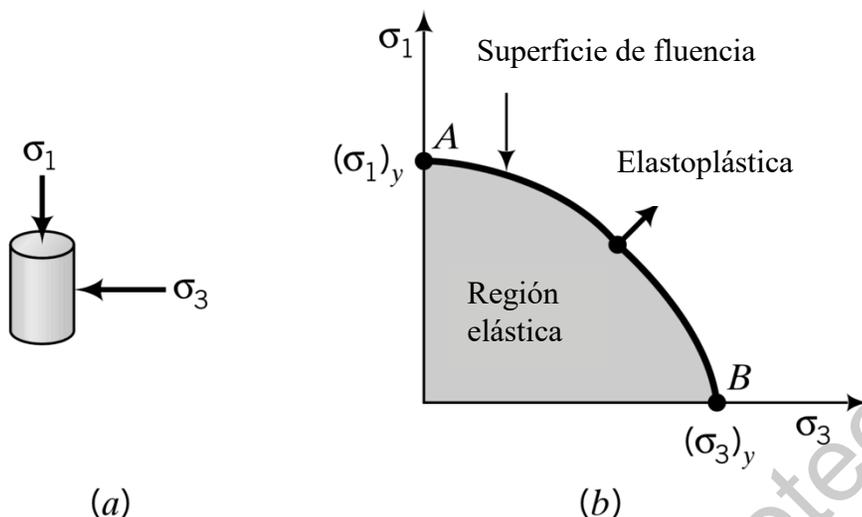


Figura 2.7 Estado de esfuerzos elástico, de fluencia y elastoplástico (Budhu, 2011).

A lo largo de la superficie de fluencia se genera un estado llamado carga neutral, es decir que a lo largo de la superficie de fluencia las deformaciones son cero. Como se mencionó anteriormente, una vez que el material toca la superficie de fluencia, éste muestra deformación plástica. Sin embargo, mientras que el suelo no toque la superficie de falla, la deformación plástica no crece indefinidamente y, por lo tanto, el material debe mostrar endurecimiento plástico (es decir que la superficie de fluencia se desplaza o crece). Por otro lado, para que la deformación plástica ocurra nuevamente antes de otro aumento de carga, es necesario que el estado de esfuerzos actualizado se ubique nuevamente en la periferia de la superficie de fluencia, a esta condición se le conoce como condición de consistencia y establece cómo y cuándo debe crecer la superficie de fluencia.

El endurecimiento de la superficie puede ser de diferentes tipos; isotrópico, el cual se da cuando la superficie de fluencia incrementa en tamaño mientras mantiene su forma; anisotrópico, donde además de incrementar el tamaño cambia de forma; y cinemático, en el cual la superficie de fluencia se mueve siguiendo el estado de esfuerzos actual (Zepeda, 2004).

2.4 Modelos constitutivos

2.4.1 Modelo del Estado Crítico

Los primeros modelos de estado crítico se desarrollaron en la Universidad de Cambridge por (Roscoe *et al.*, 1958). En la Figura 2.8 se presenta el marco elastoplástico del estado crítico, donde se observa la superficie de fluencia que delimita la zona elástica de la zona elastoplástica, la superficie de falla y la trayectoria del esfuerzo. La línea punteada indica el estado de esfuerzos equivalente, en donde no se presentan cambios volumétricos.

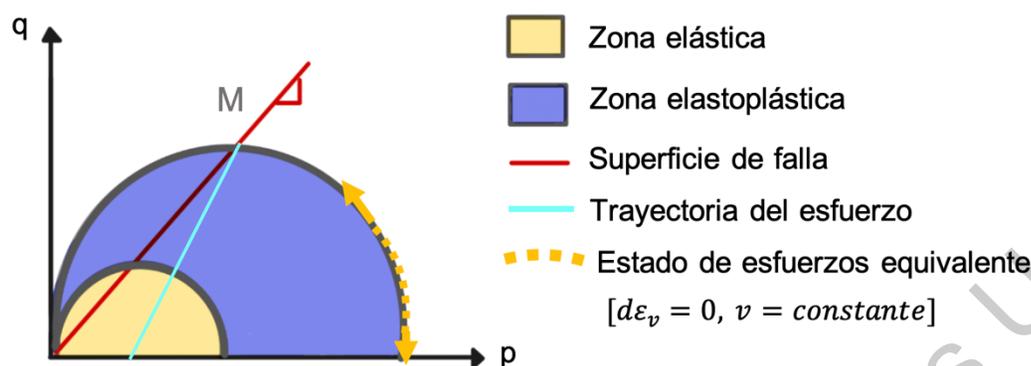


Figura 2.8 Marco elastoplástico del estado crítico (Roscoe *et al.*, 1958).

El Modelo del Estado Crítico propone una superficie de fluencia de forma elíptica en el plano de esfuerzo medio efectivo (p) contra esfuerzo desviador (q), con sus vértices izquierdo y derecho colocados en el origen y en el esfuerzo de preconsolidación respectivamente. Esta superficie se endurece isotrópicamente, es decir, aumenta de tamaño sin cambiar de forma, cuando el estado de esfuerzos impuesto la rebasa, produciendo deformaciones plásticas y desplazando el esfuerzo de preconsolidación hacia la derecha o izquierda.

(Barrera, 2004) menciona que los modelos del estado crítico permitieron reproducir los rasgos más característicos del comportamiento de los suelos desde el punto de vista cualitativo, y también como base para obtener modelos más completos, capaces de predecir el comportamiento de los suelos.

2.4.2 Modelo Básico de Barcelona (*BBM*)

Partiendo del modelo del Estado Crítico, un grupo de investigadores de la universidad Politécnica de Barcelona (Alonso *et al.*, 1990) desarrollaron un modelo general para suelos no saturados que son ligeramente o moderadamente expansivos, como son arenas, limos, arenas arcillosas y arcillas de baja plasticidad. Este modelo es llamado *Barcelona Basic Model (BBM)*.

La concordancia entre los resultados observados y los calculados en este modelo se considera satisfactoria. Confirma las posibilidades de reproducir las características más importantes del comportamiento del suelo parcialmente saturado utilizando un marco general simple.

El modelo *BBM* está formulado utilizando las llamadas variables independientes de esfuerzo: succión y esfuerzo neto. Está basado en la teoría de la plasticidad rigidizable; tiene superficies de fluencia, las cuales se observan como superficie de incremento de succión (SIYS) y superficie de colapso bajo carga (LCYS) las cuales delimitan la zona elástica (Figura 2.9); se basa en una ley de fluencia (deformaciones plásticas), y ley de rigidización (deformaciones elásticas).

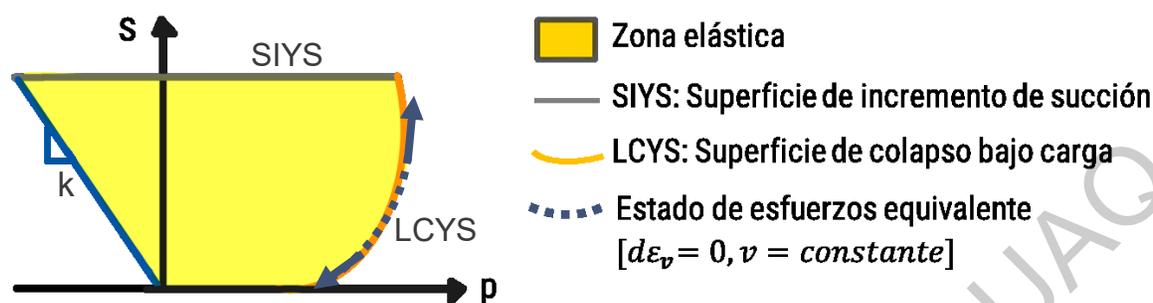


Figura 2.9. Marco elastoplástico del modelo Básico de Barcelona *BBM*.

(Alonso *et al.*, 1990) mencionan que los resultados de muestras analizadas en el odómetro a diferentes condiciones de humedad pueden ser interpretadas como un incremento en el esfuerzo de preconsolidación aparente a medida que la succión aumenta. Lo cual implica un movimiento a la derecha de la superficie LCYS.

Cualquier suelo parcialmente saturado incluido en los tipos mencionados, para los cuales aplica el modelo *BBM*, puede expandirse o colapsarse al humedecerse si el esfuerzo de confinamiento es suficientemente bajo (expansión) o alto (colapso). Experimentos de succión controlada han revelado, sin embargo, que también puede ocurrir una reversión en el comportamiento volumétrico durante el proceso de humedecimiento. De hecho, se ha informado que las microestructuras potencialmente colapsables sometidas a una reducción de succión desde un valor inicial relativamente alto experimentan primero una expansión y luego una deformación de compresión.

En el caso de los suelos no saturados, se ha podido observar experimentalmente que su respuesta elástica, así como su resistencia se incrementan con la succión. De acuerdo con la teoría elastoplástica, esto significa que la superficie de fluencia aumenta de tamaño con la succión.

2.4.3 Marco elastoplástico Alonso 1992

Debido a que el modelo presentado por (Alonso *et al.*, 1990) no es capaz de reproducir las grandes deformaciones que se presentan en los suelos expansivos (Gens y Alonso, 1992) desarrollaron un marco elastoplástico para describir el comportamiento mecánico de arcillas expansivas no saturadas. El marco ampliado se basa en la distinción dentro del material de un nivel microestructural en el que se produce el hinchamiento básico de los minerales activos y un nivel macroestructural responsable de los principales reordenamientos estructurales.

En la Figura 2.10 se observa un espacio bidimensional ($S - \sigma_v$), donde S es la succión y σ_v el esfuerzo vertical. Si partimos de un punto con condiciones iniciales (σ_0, S_0) y se comienza a saturar la muestra, la succión del suelo va a disminuir y empezarán los cambios volumétricos. Si aplicamos una carga vertical de tal forma que esa deformación sea cero y el volumen se mantenga constante, entonces seguimos la curva del estado de esfuerzos equivalentes (curva azul de la Figura 2.10). Cuando la muestra está completamente saturada, y la succión es cero, el valor final de la curva de estado de

esfuerzos equivalente es la presión de expansión (pe), concepto que fue definido a detalle en la sección 1.5.4.

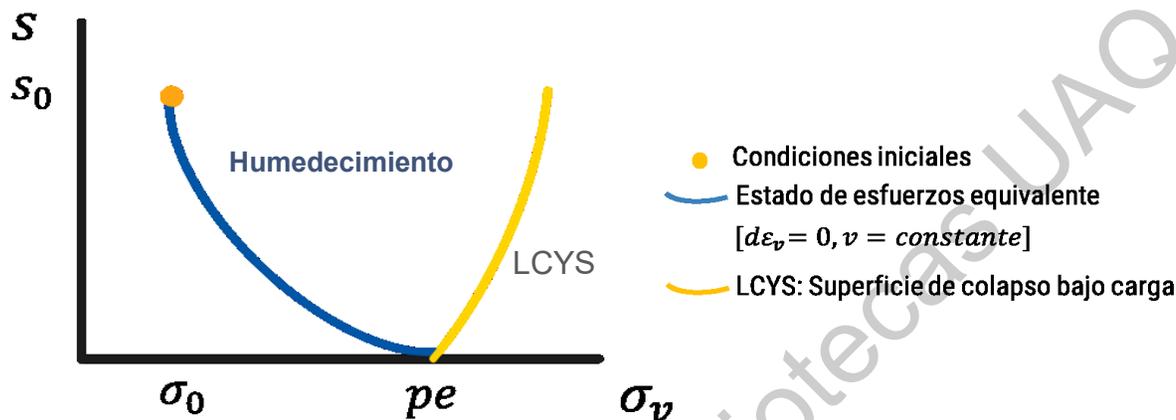


Figura 2.10 Obtención de presión de expansión con prueba de volumen constante.

Tomando en cuenta lo anterior y recordando que a lo largo de una superficie de fluencia las deformaciones son cero (sección 2.3), los autores propusieron la curva de estado de esfuerzos equivalentes como una superficie de fluencia, la cual está representada como la línea E en la Figura 2.11. Se observa la representación tridimensional ($q - p - S$) donde q corresponde al esfuerzo desviador, p al esfuerzo neto y S a la succión.

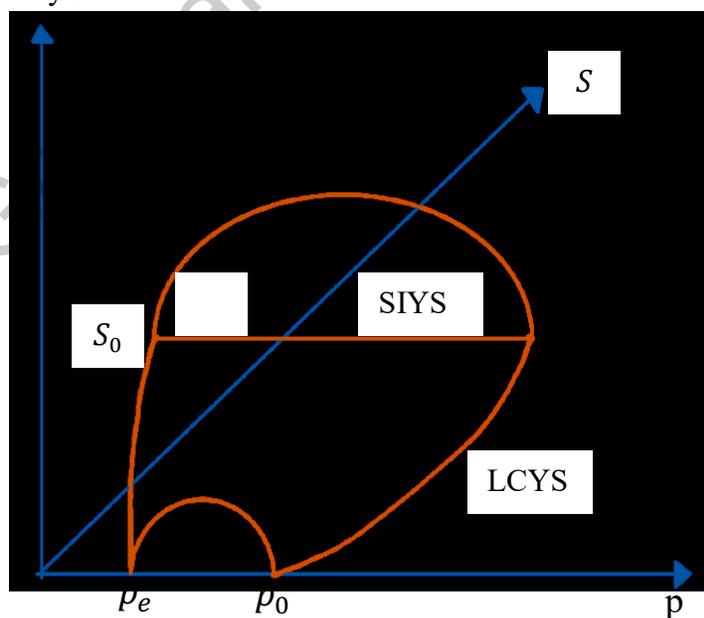


Figura 2.11 Representación tridimensional de las superficies de fluencia para un suelo expansivo

Si ocurre una reducción del esfuerzo neto o de la succión tal que provoque que la trayectoria de esfuerzos alcance la superficie E, entonces se producen las deformaciones plásticas de expansión, al contrario, es si la trayectoria alcanza la superficie de colapso bajo carga (LCYS) en donde se producen deformaciones plásticas de colapso. A esta curva (E) que delimita la frontera izquierda de la superficie de fluencia se le ha denominado superficie de expansión.

2.4.4 Modelo Expansivo de Barcelona (*BExM*)

Siete años después (Alonso *et al.*, 1999) presentan un modelo llamado *Barcelona Expansive Model (BExM)* que simula el comportamiento de arcillas expansivas. Este modelo considera dos niveles de estructura: la micro y la macroestructura que interactúan entre sí. El comportamiento de la macroestructura del modelo *BExM* sigue el modelo desarrollado para suelos no saturados de (Alonso *et al.*, 1990), mientras que el comportamiento de la microestructura del modelo *BExM* fue adaptado del trabajo presentado por (Gens y Alonso, 1992) para incluir la posibilidad de que los microporos estén parcialmente saturados. Se considera que el comportamiento microestructural es elástico y volumétrico y el acoplamiento entre la microestructura y la macroestructura resulta en la posible construcción de deformaciones elastoplásticas cuando la deformación microestructural ocurre.

El modelo (*BExM*) se presenta en la Figura 2.12, a lo largo de la línea neutral (NL) no hay deformación microestructural, esta línea se mueve con el estado actual de esfuerzos y a cada instante separa la zona de expansión microestructural de la zona de contracción microestructural en el plano $p - s$.

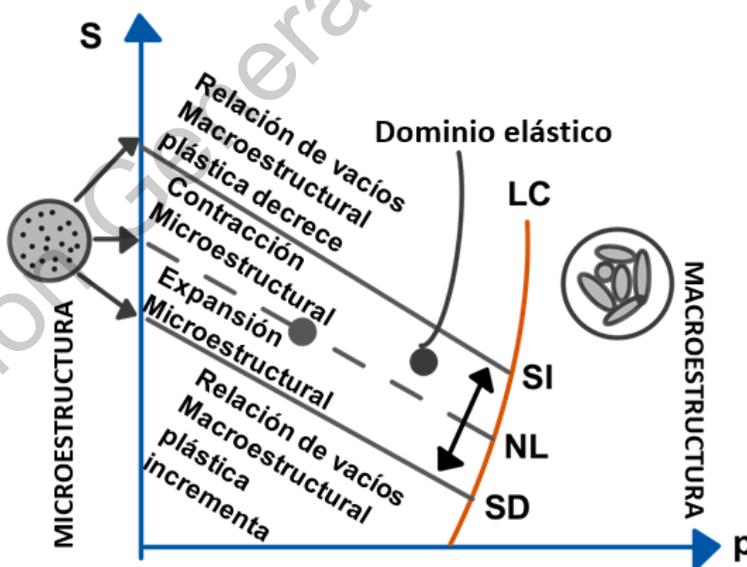


Figura 2.12 Modelo *BExM* - Endurecimiento de la superficie de colapso LC en el plano $p-s$. (Alonso *et al.*, 1999).

secado hasta alcanzar la succión s_0 . Durante este proceso, la muestra sigue la trayectoria de esfuerzo AB indicada en la Figura 2.13 en el plano de esfuerzos efectivos contra succión. Esta trayectoria muestra una pendiente inicial de 45° , ya que el valor de χ es igual a 1 para muestras saturadas. El incremento en esfuerzo efectivo aplicado a la muestra al final de la trayectoria de secado AB es representado por la cantidad $\chi_0 s_0$. La superficie de fluencia SIYS representa la succión máxima alcanzada durante el secado y es representada por una línea horizontal en s_0 . Por lo tanto, si una muestra inicialmente saturada es secada, alcanzando la succión s_0 , la muestra presenta un incremento de deformación volumétrica $\Delta\varepsilon_v^p$. Tomando la ecuación (2.7) se tiene lo siguiente:

Incremento de deformación volumétrica plástica por secado (AB):

$$\Delta\varepsilon_v^p = -\frac{e_0}{1+e_0}(\lambda_e - \kappa_e) \left(\frac{\Delta p'}{p'_0} \right) = -\frac{e_0}{1+e_0}(\lambda_e - \kappa_e) \left(\frac{\Delta(\chi s)}{P_0} \right) \quad (2.9)$$

Esto significa que el incremento en el esfuerzo de preconsolidación aparente en el secado es dado por el mismo incremento en esfuerzo efectivo aplicado a la muestra $\Delta(\chi s)$ independientemente del esfuerzo medio neto. En este caso, el esfuerzo de preconsolidación aparente de la muestra incrementa $\chi_0 s_0$ (Figura 2.13).

Por lo tanto, cuando una muestra es inicialmente saturada y después secada hasta alcanzar la succión s_0 , la superficie de fluencia LCYS (línea punteada CD en la Figura 2.13) se endurece por desplazamiento hacia la derecha en una cantidad representada por el esfuerzo de succión $\chi_0 s_0$.

Si después de secado el suelo es saturado, regresa elásticamente al esfuerzo neto inicial bajo condiciones de saturación, esto significa que la superficie de colapso bajo carga se localiza paralela a la trayectoria de secado a una distancia horizontal de $\chi_0 s_0$.

Si después se seca hasta alcanzar la succión máxima s_0 y se aplica una carga al suelo hasta alcanzar el esfuerzo aparente de preconsolidación (punto C de la Figura 2.13) y después se humedece el suelo, la trayectoria de humedecimiento (línea CD) no cruza la superficie de fluencia de colapso bajo carga (LCYS), es decir, permanece en la parte elástica y el suelo no mostrará colapso. Por el contrario, si el suelo se carga con un incremento de esfuerzo neto ($\Delta\bar{p}$) que excede el esfuerzo de preconsolidación aparente (trayectoria BE), el suelo colapsará con el humedecimiento. Esto ocurre porque el cruce de la superficie LCYS produce deformaciones volumétricas plásticas, el suelo se endurece y la superficie LCYS alcanza la posición indicada por la línea EG.

Inclinación de la superficie de colapso bajo carga:

La superficie de colapso bajo carga (LCYS) se inclina hacia el lado derecho comparado con la LCYS después del secado. Si el suelo es saturado en esta etapa, este colapso cuando la trayectoria de humedecimiento cruza la superficie LCYS en el punto F.

La inclinación de la superficie LCYS ocurre debido a que la parte superior de la curva sigue el incremento del esfuerzo medio efectivo ($\Delta\bar{p}$) aplicado durante la carga (punto E) mientras que la parte inferior endurece en el esfuerzo de preconsolidación ($\Delta\bar{p}_0$) en condiciones saturadas (punto G). El incremento en el esfuerzo de preconsolidación en condiciones saturadas puede ser obtenido calculando la deformación volumétrica plástica generada durante la etapa de carga del punto C al punto E.

Incremento de deformación volumétrica plástica por carga (CE):

$$\Delta\varepsilon^p_v = \frac{e_c}{1 + e_c} (\lambda_e - \kappa_e) \left(\frac{\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0}{p'_{oi} + \chi_0 s_0 + \Delta p} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

e_c = relación de vacíos en el punto C.

p'_{oi} = esfuerzo medio efectivo aplicado a la muestra en condiciones saturadas.

$$\begin{aligned} \Delta\bar{p}_0 &= \Delta\varepsilon^p_v \left(\frac{1 + e_D}{e_D} \right) \frac{p'_{oi} + \chi_0 s_0 + \Delta p_0}{\lambda_e - \kappa_e} \\ &= \left(\frac{1 + e_D}{1 + e_c} \right) \left(\frac{e_c}{e_D} \right) \left(\frac{p'_{oi} + \chi_0 s_0 + \Delta p_0}{p'_{oi} + \chi_0 s_0 + \Delta p} \right) (\Delta p - \chi_0 s_0) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde:

e_D = relación de vacíos en el punto D.

Despejando la ecuación anterior queda:

$$\Delta\bar{p}_0 = \left(\frac{(\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0) (-p'_{oi} - \chi_0 s_0)}{\Delta\bar{p} \left(1 - \frac{e_G}{e_E} \right) - \chi_0 s_0 \left(1 + \frac{e_G}{e_E} \right) - \frac{e_G p'_{oi}}{e_E}} \right) \quad (2.12)$$

Si el suelo es descargado del punto C al punto D siguiendo la superficie LCYS después del secado (línea punteada CD), entonces la relación de vacíos en el punto C y D es el mismo, por la ecuación anterior se simplifica a:

$$\Delta\bar{p}_0 = \left(\frac{(\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0) (p'_{oi} + \chi_0 s_0)}{p'_{oi} + 2\chi_0 s_0} \right) \quad (2.13)$$

Esta ecuación resulta en $\Delta\bar{p}_0 < (\Delta\bar{p}_0 - \chi_0 s_0)$. Por lo tanto, la superficie LCYS se inclina con carga elastoplástica, y permite que la trayectoria de humedecimiento cruce la LCYS en el punto F y haya colapso.

2.4.6 Marco de esfuerzos efectivos

La Figura 2.14 muestra el marco elastoplástico basado en esfuerzos efectivos presentado por (Rojas *et al.*, 2017), donde se observa que hay una única superficie de fluencia de colapso bajo carga (LCYS). A la izquierda de la superficie se presenta una zona elástica para el incremento de carga (zona azul), mientras que la zona elástica para los ciclos de humedecimiento-secado se encuentra entre las superficies de fluencia de incremento de succión (SIYS) y de decremento de succión (SDYS) representada como la zona elástica de la microestructura (zona gris).

En la parte superior de s_0 se presenta contracción del suelo, debido a un incremento en la succión mayor a la succión máxima histórica, mientras que debajo de la superficie SDYS ocurre expansión debido al decremento de succión y por lo tanto de humedecimiento.

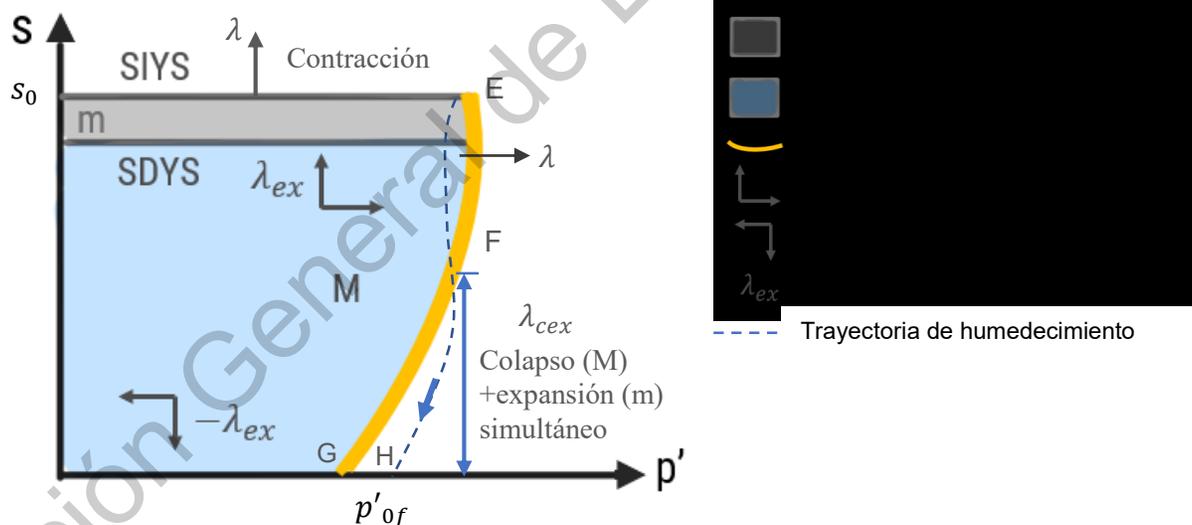


Figura 2.14 Marco elastoplástico para suelos expansivos basado en esfuerzos efectivos (Rojas *et al.*, 2017).

En este marco elastoplástico (Rojas *et al.*, 2017) se define el parámetro de índice de expansión λ_{ex} , el cual permite evaluar la influencia de la expansión de la microestructura en la macroestructura.

$$\lambda_{ex} = (\lambda_e - k_e)Dr + k_e \quad (2.14)$$

Donde λ_e es el índice de compresión (comportamiento elastoplástico) obtenido de una gráfica logarítmica, donde la relación de vacíos es graficada contra el esfuerzo medio efectivo (Figura 2.4). Este parámetro es remplazado por el índice de descarga-recarga k_e para el caso de comportamiento elástico.

Adicionalmente, cuando un suelo expansivo tiene un cierto valor de succión, está suficientemente cargado, y entonces es saturado, ocurre colapso macroestructural, mientras que expansión microestructural ocurre al mismo tiempo. En tal caso, la modelación del suelo necesita tomar en cuenta ambos fenómenos simultáneamente. Esto se realiza considerando un índice de colapso-expansión (λ_{cex}), que resulta de la diferencia entre el índice de compresión, el índice de expansión, y el índice elástico añadido en la siguiente forma:

$$\lambda_{cex} = \lambda_e - \lambda_{ex} + k_e = (\lambda_e - k_e)(1 - Dr) + k_e \quad (2.15)$$

Usando el valor de densidad relativa y los dos parámetros que incluye el marco elastoplástico λ_{ex} y λ_{cex} , se puede incluir el comportamiento volumétrico de la microestructura y macroestructura. Esto es porque la densidad relativa, la cual usa el valor máximo, mínimo y natural de la relación de vacíos (e_{max} , e_{min} y e respectivamente) permite conocer cuánta expansión será comunicada a las fronteras. Es decir que la expansión de la microestructura se comunica a la macroestructura dependiendo de la densidad del material.

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.16)$$

El valor e_{max} puede ser obtenido al final de una prueba de expansión libre cuando el suelo es completamente saturado. Y el valor de e_{min} es el que alcanza el suelo durante compactación en el contenido óptimo de agua.

En la Figura 2.15 se observa que cuando la relación de vacíos es máxima e_{max} , no hay deformación plástica de expansión. Este caso corresponde cuando el material está en una condición suelta, y hay presencia de macroporos, donde el suelo tiene la libertad de expandir sin comunicar esta expansión a las fronteras. Esta deformación es elástica, sin embargo, conforme el suelo se va compactando y la relación de vacíos se acerca al mínimo e_{min} , el suelo forma mesoporos. Cuando hay expansión en los mesoporos, estos no tienen suficiente espacio para que la deformación sea elástica, por lo tanto comunican la expansión a las fronteras generando deformación plástica de expansión. Por lo tanto, el valor de densidad relativa Dr indica el comportamiento de la deformación de la microestructura y macroestructura.

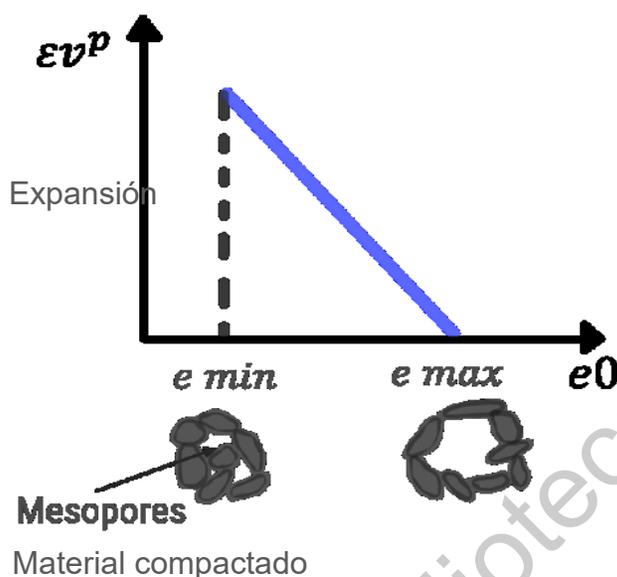


Figura 2.15 Deformación volumétrica plástica de acuerdo con la relación de vacíos.

La primera etapa de la prueba es simular mediante el cálculo del incremento del esfuerzo medio neto que es requerido para mantener el volumen constante de una muestra que se humedece de un estado inicial de esfuerzos. Para este propósito, dos pasos son seguidos. Primero, se considera que el suelo expande debido a un pequeño decremento de succión, y segundo, el incremento del esfuerzo neto requerido para recomprimir el suelo a su volumen original es calculado. Durante el primer paso, se considera que el esfuerzo neto permanece constante mientras la succión cambia y el suelo expande. La deformación volumétrica de la muestra producida por humedecimiento se calcula utilizando la siguiente ecuación.

Deformación volumétrica producida por humedecimiento:

$$\Delta\varepsilon_v = \frac{e_0 \left\{ \left[\frac{p'_0 + \Delta(\chi_s)}{p'_0} \right]^{\lambda_{ex}} - 1 \right\}}{1 + e_0} \quad (2.17)$$

Donde $\Delta(\chi_s)$ es la variación en el esfuerzo efectivo producido por el humedecimiento

En el segundo paso se considera que la succión permanece constante mientras que el esfuerzo medio neto incrementa para recomprimir el suelo. El incremento del esfuerzo medio neto requerido para recomprimir la muestra a su volumen original es la siguiente.

Incremento del esfuerzo medio neto para recomprimir la muestra a su volumen original:

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{P'(1 + e_0)}{e_0 (\lambda_{cex})} \Delta \varepsilon_v \quad (2.18)$$

El índice de compresión λ_{cex} es usado en la ecuación anterior porque se considera que el suelo primero expande y después hay recompresión.

Durante la **segunda etapa**, la trayectoria de esfuerzo alcanza y sigue la superficie LCYS. la superficie LCYS representa la trayectoria de deformaciones volumétricas nulas y, por lo tanto, para cambios de esfuerzos efectivos nulos [$dp' = d\bar{p} + d(\chi s) = 0$]. La variación en el esfuerzo neto iguala la variación en el esfuerzo de succión.

$$d\bar{p} = \chi s \quad (2.19)$$

Durante las pruebas de carga-descarga, el suelo se comporta de acuerdo con el marco general elastoplástico para suelos no saturados explicado en la sección anterior. Para cada deformación volumétrica plástica generada durante ciclos de humedecimiento-secado, la superficie LCYS endurece o se ablanda dependiendo del signo de la deformación volumétrica.

Este endurecimiento o ablandamiento puede calcularse con la siguiente ecuación.

$$\Delta p' = p' \left(\frac{\Delta e^p}{e} \right)^{\left(\frac{1}{\lambda_e - k_e} \right)} \quad (2.20)$$

En este trabajo se desarrollará este marco elastoplástico basado en esfuerzos efectivos, cuyo acoplamiento hidromecánico se realizará mediante la metodología desarrollada por el modelo sólido poroso de (Rojas, 2008), el cual se explica en la sección 5.2.2.1

3 HIPÓTESIS

La hipótesis del presente trabajo es la siguiente:

Utilizando el concepto de esfuerzos efectivos, dentro de un marco elastoplástico, se puede desarrollar un modelo para suelos expansivos que simule adecuadamente el comportamiento volumétrico del suelo.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4 OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar el marco elastoplástico teórico para el modelo de suelos expansivos basado en esfuerzos efectivos.

Objetivos particulares

- Realizar pruebas experimentales en laboratorio a una muestra de suelo expansivo para determinar cuál es su comportamiento bajo diferentes cargas y succiones.
- Desarrollar un modelo utilizando esfuerzos efectivos y un marco elastoplástico, tomando como base los modelos investigados en el estado del arte.

5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1 Relaciones constitutivas

(Fung, 1965) describe “el estado de un sistema”, como la información necesaria en una caracterización completa del sistema para el intento deseado. (Lu y Likos, 2004) describen las variables materiales como propiedades intrínsecas que dependen del tipo de material, usualmente varían de un material a otro o de un estado a otro, por ejemplo, el módulo elástico, la permeabilidad y la compresibilidad. También pueden ser funciones de las variables de estado como son la presión, la temperatura y el esfuerzo.

Las variables de estado las definen como aquellas que son independientes de las propiedades del suelo. Son usadas para describir fenómenos que ocurren en la naturaleza y en la ingeniería práctica y requeridas para describir completamente el estado del sistema para el fenómeno en cuestión.

Para sistemas multifase, como los suelos no saturados, se usan variables materiales en conjunto con variables de estado para describir el estado del sistema (Fung, 1965).

(Lu y Likos, 2004) describen las leyes o ecuaciones constitutivas como aquellas que describen las interrelaciones entre las variables de estado y las variables materiales. Una ecuación constitutiva para un sistema dado permite la predicción de una variable de estado a partir de otras, por ejemplo, para un suelo elástico, el esfuerzo unidimensional se puede predecir a partir de la deformación unidimensional si el módulo elástico es conocido.

Una interrelación de esfuerzo vs deformación es una relación constitutiva que describe el comportamiento de un material. Las relaciones constitutivas son expresiones unívocas que relacionan los parámetros de estado (Fung, 1969).

5.2 Estado de esfuerzos

El estado de esfuerzos en los suelos no saturados es diferente del estado de esfuerzos en un suelo saturado. A diferencia de los suelos saturados, los cuales tienen un sistema bifásico conformado por agua y suelo, los suelos no saturados presentan un sistema de 4 fases (Figura 1.1) en donde hay presencia de aire (presión de aire de poro). Las cantidades relativas y presiones correspondientes de agua de poro y aire de poro en un suelo no saturado tiene un impacto directo en el estado de esfuerzos actuando en el contacto partícula-partícula y, consecuentemente, en el comportamiento físico macroscópico de la masa de suelo, por ejemplo, resistencia al esfuerzo cortante y cambio de volumen (Lu y Likos, 2004).

5.2.1 Esfuerzos efectivos en suelos saturados

Es importante diferenciar tres tipos de esfuerzos en los suelos saturados, la carga que se aplica al suelo (esfuerzo total), las presiones que se transmiten directamente a los sólidos del suelo (esfuerzos efectivos) y las que actúan en el fluido que llena los poros (presión de agua de poro).

Si se considera un elemento de un suelo saturado sujeto a un esfuerzo normal, σ , aplicado en la frontera horizontal del suelo como se muestra en la Figura 5.1. El esfuerzo σ se denomina esfuerzo total y por equilibrio (tercera ley de Newton) los esfuerzos en el suelo deben ser iguales y opuestos a σ . La resistencia o reacción a σ es dada por la combinación de los esfuerzos de los sólidos, llamados esfuerzos efectivos (σ'), y del agua en los poros, llamada presión de agua de poro (u). Se denota a los esfuerzos efectivos con el símbolo ($'$) seguido del símbolo de esfuerzo normal σ (Budhu, 2011).

La ecuación de equilibrio es:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (5.1)$$

Por lo tanto, el esfuerzo efectivo es:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5.2)$$

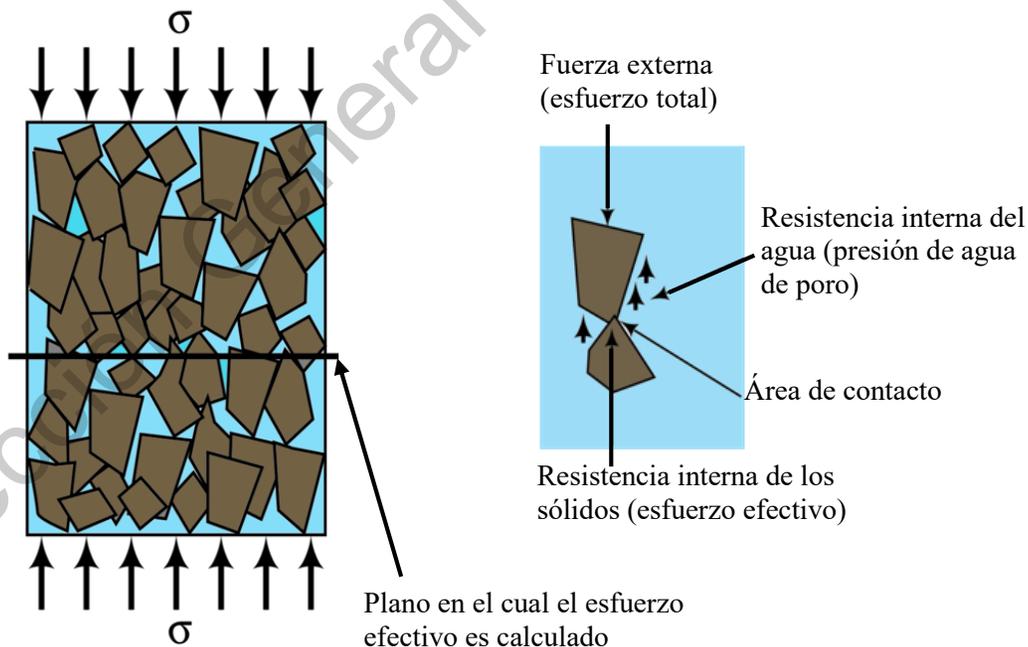


Figura 5.1 Esfuerzo efectivo en un suelo saturado.

La ecuación (5.2) es llamada el principio de esfuerzos efectivos y fue reconocida por primera vez por Terzaghi en la mitad de los años 20 durante su investigación de la consolidación de suelos. El principio de esfuerzos efectivos es el principio más importante en la mecánica de suelos. Las deformaciones de los suelos son una función de los esfuerzos efectivos no de los esfuerzos totales (Budhu, 2011).

5.2.2 Esfuerzos efectivos en suelos no saturados

El concepto de esfuerzos efectivos para suelos no saturados fue usado para proponer un esfuerzo unificado (σ') tanto para cambios de succiones como esfuerzos aplicados (Nowamooz, 2014).

(Bishop, 1959) sugirió la siguiente expresión de esfuerzos efectivos para suelos no saturados:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (5.3)$$

En donde σ' es el esfuerzo efectivo, σ es el esfuerzo total, u_w es la presión de poro debido al agua, u_a es la presión de poro debido al aire y χ es el parámetro de esfuerzo efectivo, siendo $\chi = 0$ para suelo completamente seco y $\chi = 1$ para suelo completamente saturado.

El primer término de la ecuación (5.3) ($\sigma - u_a$) representa la componente del esfuerzo normal neto. Por otro lado, el producto $\chi(u_a - u_w)$, representa el esfuerzo interpartícula debido a la succión, aquí referido como esfuerzo de succión.

El parámetro de esfuerzo efectivo χ , es una variable material que varía con el grado de saturación. Entender el esfuerzo de succión y su dependencia con el grado de saturación en los suelos no saturados ha sido históricamente una tarea desafiante desde la perspectiva teórica y experimental. En los primeros ensayos experimentales que se realizaron, la principal preocupación fue determinar χ indirectamente como una función del contenido de agua o el grado de saturación (Lu y Likos, 2004).

Basados en una evidencia experimental, (Öberg y Sälfors, 1995) proponen que para materiales granulares y grados de saturación por arriba del 50%, el parámetro χ puede adoptar el valor del grado de saturación (G_s), esto quiere decir que el parámetro χ puede ser considerado igual al grado de saturación ($\chi = G_s$) (Zazueta Rodríguez, 2015).

5.2.2.1 Modelo sólido-poroso de Rojas

El esfuerzo medio efectivo está definido por la ecuación de Bishop

$$p' = \bar{p} + \chi s \quad (5.4)$$

En donde \bar{p} es el esfuerzo medio neto y χ es el parámetro de Bishop, este parámetro puede ser escrito como una función de la fracción saturada y el grado de saturación de la fracción no saturada

del suelo. Sin embargo, la determinación de estos dos últimos parámetros no puede ser hecha de procedimientos experimentales. Por lo tanto, el autor (Rojas, 2008) propone un modelo sólido-poroso que simula la estructura del suelo para determinar estos parámetros.

$$\chi = f^s + S_w^u f^u \quad (5.5)$$

Donde f^s y f^u representan las fracciones saturadas y no saturadas del suelo, respectivamente, mientras que S_w^u es el grado de saturación de la fracción no saturada. La fracción saturada representa el volumen de todos los sólidos rodeados exclusivamente de poros saturados, sumado al volumen de dichos poros y dividido entre el volumen total del suelo. Mientras que la fracción no saturada está representada por el volumen de sólidos rodeados de una combinación de poros saturados y secos, adicionada al volumen de estos poros y dividido por el volumen total del suelo (Rojas, 2016).

5.3 Agua en el suelo

El agua que circula en el suelo tiene 3 componentes: higroscópica, capilar y gravitacional. La componente higroscópica es fuertemente adherida a los coloides del suelo por fuerzas electroquímicas, las raíces de las plantas no tienen la fuerza suficiente para tomar estas partículas de agua. La componente capilar es el agua que se encuentra en los microporos, es atraída al suelo por fuerzas derivadas de la tensión superficial. Y finalmente la componente gravitacional es el agua que se encuentra en los macroporos y es atraída al suelo por la fuerza de gravedad (Figura 5.2).

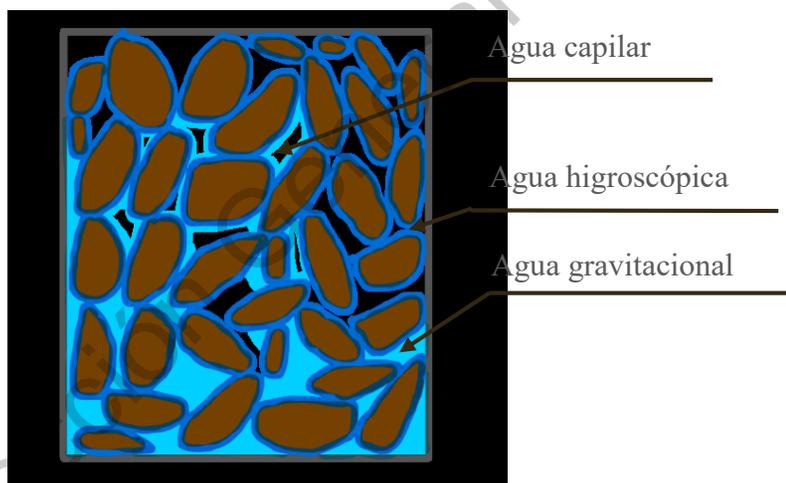


Figura 5.2. Componentes del agua en el suelo.

5.4 Succión

Como se mencionó en la sección 1.1, la diferencia entre un suelo saturado y uno no saturado es la presencia de la fase de aire (Figura 1.1). Esta fase de aire causa un fenómeno llamado succión. Por

lo tanto, puede decirse que la succión es una medida de la afinidad del suelo para retener agua y puede proporcionar información de los parámetros del suelo que están influenciados por el agua de este, por ejemplo: cambio de volumen, deformación y características de resistencia del suelo.

La succión es una variable que tiene influencia en el comportamiento mecánico de los suelos expansivos, genera fuerzas de contacto adicionales entre las partículas del suelo que se conocen como cohesión. Estas fuerzas se pueden conocer a través de la determinación de la curva de retención suelo-agua.

La succión total es la suma de la succión osmótica y la succión mátrica. La succión osmótica depende de factores como la presencia de sales disueltas en el agua del suelo, mientras que la succión mátrica es definida como la diferencia entre la presión de aire y la presión de agua que existe en los poros (García-elías *et al.*, 2017).

$$\Psi_m = U_a - U_w \quad (5.6)$$

En donde Ψ_m es la succión mátrica, U_w es la presión de agua en los poros y U_a es la presión de aire en los poros. La succión mátrica es el resultado del efecto capilar (tensión superficial y radio de curvatura del menisco).

5.4.1 Efectos de la capilaridad

Cuando la presión dada es menor que la atmosférica, el potencial de presión se considera negativo, el cual es el potencial mátrico, o componente mátrica de la succión total. Puede entenderse el efecto de capilaridad en los suelos si se idealiza los espacios vacíos continuos como tubos capilares (Budhu, 2011). Considerando un tubo idealizado como se muestra en la Figura 5.3, la altura a la cual el agua subirá puede encontrarse realizando un equilibrio estático, sumando fuerzas verticales:

$$\sum F_z = \text{Fuerza de tensión capilar} - \text{Peso del agua} - \text{Peso del aire} \quad (5.7)$$

Sustituyendo los valores correspondientes de la Figura 5.3 en la ecuación (5.7) queda lo siguiente:

$$\pi d T_s \cos \theta - h_c \gamma_w \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 - U_a \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0 \quad (5.8)$$

En donde d representa el diámetro del tubo capilar, U_a la presión atmosférica, la cual se considera igual a la presión de poro de aire, γ_w el peso específico del agua y T_s la tensión superficial del agua.

Despejando la ecuación (5.8), queda que lo siguiente:

$$\frac{4T_s \cos \theta}{d} = U_a + h_c \gamma_w \quad (5.9)$$

Si se observa la Figura 5.3, el valor de $h_c \gamma_w$ es igual a la presión negativa del agua, por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.9) queda lo siguiente:

$$\frac{4T_s \cos \theta}{d} = U_a - U_w \quad (5.10)$$

Sustituyendo la ecuación (5.6) en la ecuación (5.10) se tiene que la succión mátrica es:

$$\frac{4T_s \cos \theta}{d} = \Psi_m \quad (5.11)$$

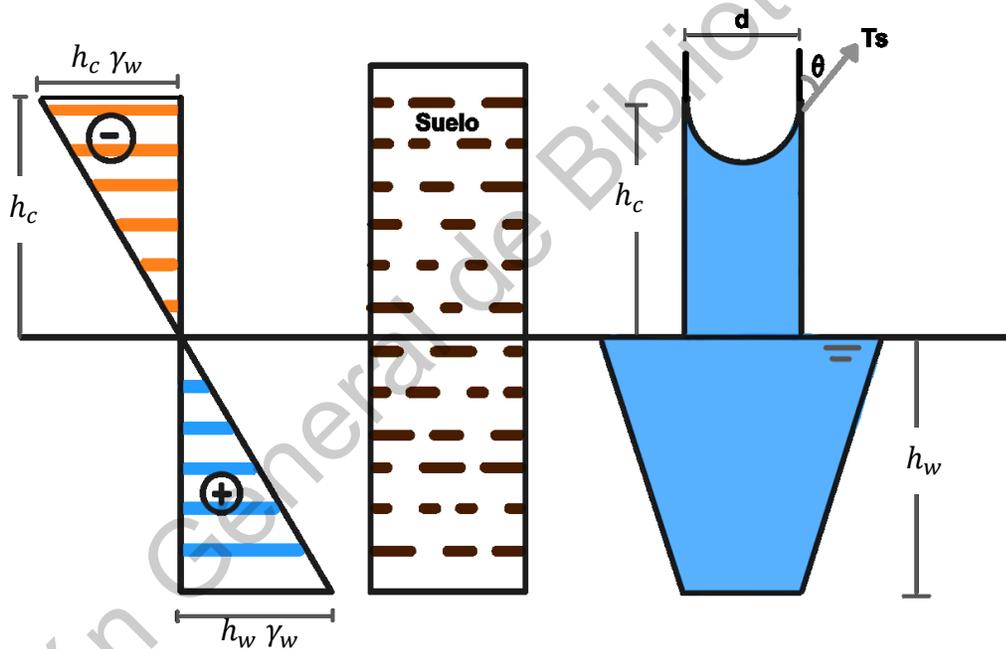


Figura 5.3 Simulación de capilaridad en suelos.

5.4.2 Curva característica suelo-agua

La succión del suelo varía con la humedad, y la relación entre la succión y el contenido de agua es conocida como la curva característica suelo-agua. Hay dos cambios distintos en la pendiente a lo largo de la curva característica. El primer punto se denomina “valor de entrada de aire del suelo” (Figura 5.4), donde los vacíos más grandes comienzan a secarse a medida que aumenta la succión.

El segundo punto se denomina “condiciones residuales”, y define el punto donde la eliminación de agua del suelo se vuelve significativamente más difícil, es decir, requiere mucha más energía para la eliminación del agua (Fredlund *et al.*, 2011). La curva característica de un suelo no es biunívoca, debido al fenómeno de histéresis. Ello origina que la curva para un suelo durante la fase de secado difiera de la correspondiente a la fase de humedecimiento, existiendo diferentes valores de contenidos de humedad para un determinado valor de succión. Se habla por ello de tramos de humedecimiento y secado (Barrera, 2004). En consecuencia, no es posible determinar una designación de estado de esfuerzo único para un suelo basándose únicamente en una medición del contenido de agua. En otras palabras, no es posible saber si el suelo se encuentra actualmente en la curva de secado, la curva de humedecimiento, o en algún lugar entre las dos curvas (Fredlund *et al.*, 2011).

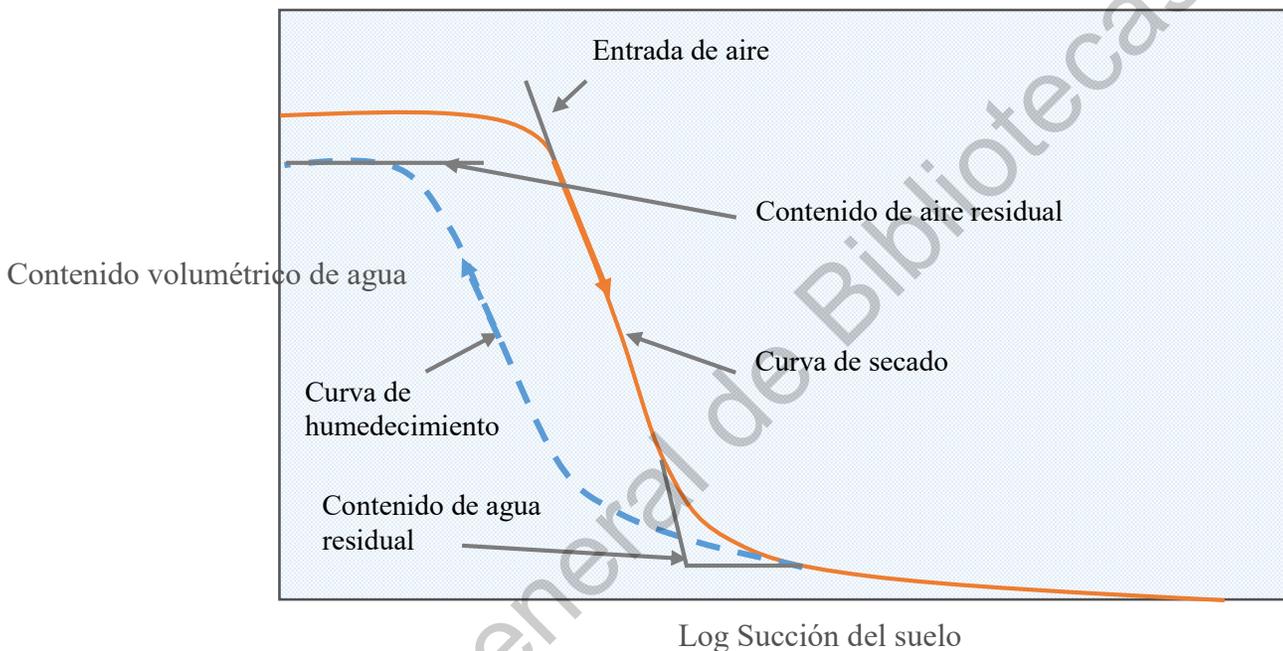


Figura 5.4. Elementos que definen la curva característica suelo-agua (Fredlund y Xing, 1994).

5.4.2.1 Modelo empírico de Van Genuchten

El modelo empírico (van Genuchten, 1980) ha sido ampliamente usado para modelar la curva característica agua-suelo.

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (5.12)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5.13)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)S_e \quad (5.14)$$

En donde α , n y m son parámetros de ajuste, ψ es la succión experimental, θ_s es el contenido de agua volumétrico saturado y θ_r es el contenido de agua residual del suelo.

5.4.2.2 Modelo de Rojas

(Rojas, 2008) desarrolló un modelo sólido-poroso mencionado previamente en la sección 5.2.2.1, con dicho modelo simula el comportamiento hidráulico del suelo y es capaz de reproducir los ciclos de humedecimiento-secado. Este modelo lo construye a partir de la distribución de tamaños de poro y la distribución granulométrica del material.

5.4.2.3 Modelo empírico de Sheng

Los autores (Zhou *et al.*, 2012) adoptan la ecuación de van Genuchten como un ejemplo de una curva característica suelo-agua (para la curva principal de secado y la curva principal de humedecimiento) bajo esfuerzos netos constantes. Las ecuaciones relevantes para la trayectoria principal de secado (S_{ed}) y para la trayectoria principal de humedecimiento (S_{ew}) son las siguientes:

$$S_{ed} = \left[1 + \left(\frac{S}{a_d} \right)^{m_d} \right]^{-n_d} \quad (5.15)$$

$$S_{ew} = \left[1 + \left(\frac{S}{a_w} \right)^{m_w} \right]^{-n_w} \quad (5.16)$$

En donde a_d , m_d y n_d son parámetros de ajuste para la curva de secado principal, y a_w , m_w y n_w son parámetros de ajuste para la curva de humedecimiento principal. El subíndice 'd' hace referencia a secado y 'w' a humedecimiento.

6 METODOLOGÍA

La realización de este proyecto se divide en cuatro partes: revisión del estado del arte, pruebas experimentales, simulación y comparación de resultados experimentales con la simulación.

Para la parte experimental se dividirá en varios pasos que se enlistan a continuación:



Figura 6.1 Proceso metodológico.

6.1 Obtención de la muestra

6.1.1 Localización del sitio de estudio

La localización del sitio donde se obtiene la muestra es en calle Tabachines en la zona de Jurica en el estado de Querétaro, México, ubicado a $20^{\circ}38'50.784''$ latitud norte y $100^{\circ}26'9.204''$ longitud oeste

(Figura 6.2), esto debido a las propiedades de expansión que presenta dicho suelo.



Figura 6.2 Zona de obtención de la muestra. Jurica, Querétaro. Fuente: *Google maps*.

6.1.2 Obtención de la muestra inalterada

Se realiza un pozo a cielo abierto (PCA) que es una excavación hecha con ayuda de una retroexcavadora, con las dimensiones suficientes para que una persona pueda acceder. Se quita el suelo que está intemperizado hasta llegar a una profundidad en la cual el suelo esté inalterado, se marca un cuadro de 20 x 20 cm, una vez hecho lo anterior se comienza a excavar a los lados del cuadro marcado, con barretas y picos cuidando de no dañar la muestra.

Una vez que se haya excavado lo suficientemente profundo, se quita el suelo de la parte superior haciendo un corte con el cuchillo, una vez terminado esto, se coloca plástico adherible alrededor de la muestra, para que la misma no pierda humedad y pueda retirarse y ser llevada hasta el laboratorio. Se mide la profundidad a la cual se obtienen las muestras inalteradas y la extracción se realiza cuando no se presenten precipitaciones pluviales.



Figura 6.3 a) Excavación de un pozo a cielo abierto PCA. b) Labrado de la muestra inalterada.

6.1.3 Obtención de la muestra alterada

Para conocer la variación de la humedad con la profundidad del suelo en el sitio, se obtienen muestras alteradas a cada 50 cm desde la superficie. Se almacenan en bolsas plásticas, se sellan y se colocan en un sitio donde se evite la pérdida de humedad para ser trasladadas posteriormente a una cámara de temperatura controlada en donde inmediatamente se obtiene la humedad de cada muestra con base en la norma (Standard ASTM D2216-98, 1999)



Figura 6.4 a) Medición desde la superficie para obtención de muestras alteradas. b) Muestras alteradas a cada 50 cm desde la superficie.

6.2 Caracterización del suelo

Consiste en la obtención de los parámetros que caracterizan a la muestra, siendo los siguientes ensayos que interesan para esta investigación:

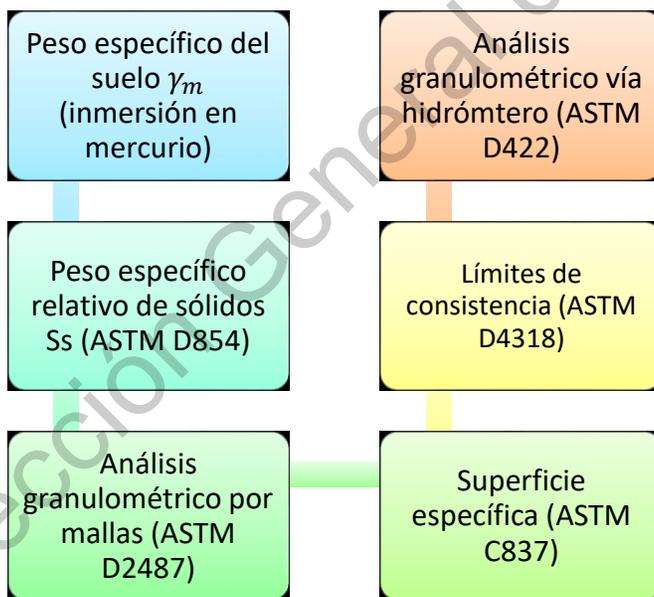


Figura 6.5 Metodología para la caracterización de la muestra.

6.2.1 Determinación de la humedad natural W%

Se realiza tan pronto como sea posible, utilizando la metodología especificada en la norma (Standard ASTM D2216-98, 1999). A continuación, se indica cómo obtener la muestra representativa para el caso de muestras alteradas e inalteradas.

6.2.1.1 Muestras alteradas

Si el material puede ser manipulado sin pérdida significativa de humedad, el material debe ser mezclado y seleccionar una porción representativa con un cucharón. Si el material es tal, que no puede ser mezclado, forma una pila del material, mezclando tanto como sea posible. Toma 5 porciones de material de lugares aleatorios usando una pala o cucharón.

6.2.1.2 Muestras inalteradas

Utilizando un cuchillo, corta la porción exterior de la muestra a una distancia suficiente para ver si el material está en capas y remover material que parece estar más seco o húmedo que la porción principal de la muestra. Si el material está sin capas, obtener la muestra representativa de todo o la mitad de la muestra inalterada.

6.2.1.3 Procedimiento

Con base en la norma (Standard ASTM D2216-98, 1999), se determina la masa del contenedor limpio y seco. Se coloca el espécimen en el contenedor y se determina la masa del contenedor con la muestra húmeda. La diferencia de estas corresponde a la masa de la muestra húmeda (W_m). Si la masa del espécimen (sin el contenedor) es menor a 200 g, la precisión de la báscula debe ser de 0.01 g, si es mayor a 200 g, la precisión será de 0.1 g.

Colocar el contenedor con la muestra húmeda en el horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ por 24 horas. Remover el contenedor del horno y permitir al material y contenedor enfriarse a la temperatura ambiente. Si el espécimen es menor a 200 g, debe colocarse una tapa para evitar pérdida de humedad mientras se enfría. Obtener la masa del espécimen seco (W_s). La diferencia entre W_m y W_s es el peso del agua W_w , y la relación entre W_w y W_s es el contenido de agua (w).

6.2.2 Determinación del peso específico del suelo γ_m

Se realiza utilizando el método de inmersión en mercurio. Se toma una porción de suelo de la muestra inalterada y se obtiene su masa. Utilizando todo el equipo de seguridad que indica la norma (Standard ASTM D427-04, 2004) con respecto al mercurio, se coloca mercurio en un contenedor y se enrasa con una placa de vidrio. Posteriormente se coloca la porción de suelo pesada previamente sobre el contenedor con mercurio, se enrasa nuevamente y se obtiene la masa del mercurio desalojado. La relación entre la masa del mercurio desalojado y la densidad de este es el volumen de la muestra de suelo, así que la relación de la masa inicial de la muestra y el volumen es el peso específico del suelo γ_m .

6.2.3 Determinación del peso específico relativo de sólidos S_s

Se realiza utilizando la metodología especificada en la norma (Standard ASTM D 854-02, 2002). El procedimiento consiste en 2 partes: la calibración del matraz y la realización de la prueba. Para la calibración se afora el matraz con agua destilada a una temperatura de 80°C. Con una bomba de vacío se extraen las burbujas de aire y se deja disminuir la temperatura hasta 60°C, se pesa el matraz, se toma la temperatura y se repite el proceso disminuyendo en intervalos de 5°C, el proceso se termina al llegar a la temperatura ambiente.

Para la realización de la prueba se toma una muestra de suelo y se somete a un proceso de secado en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por 24 horas. Si se tiene un alto contenido de partículas finas se recomienda no secar el material. Una vez terminado el proceso de secado, se extrae el material del horno y se toma una muestra representativa de suelo w_s , se satura en un recipiente durante 24 horas.

Se toman dos matraces de cuello alto, en uno se vierte el material preparado y se agrega agua hasta $\frac{3}{4}$ de la altura del bulbo, el otro matraz se llena de agua. Se calientan ambos matraces hasta una temperatura de 80°C para extraer el aire atrapado y para asegurar la extracción de aire se utiliza la bomba de vacío en ambos matraces. Se afora el matraz que contiene suelo con el agua del segundo matraz, se mide la temperatura y se obtiene la masa del matraz con el suelo. Se realizan 3 mediciones diferentes disminuyendo la temperatura del matraz.

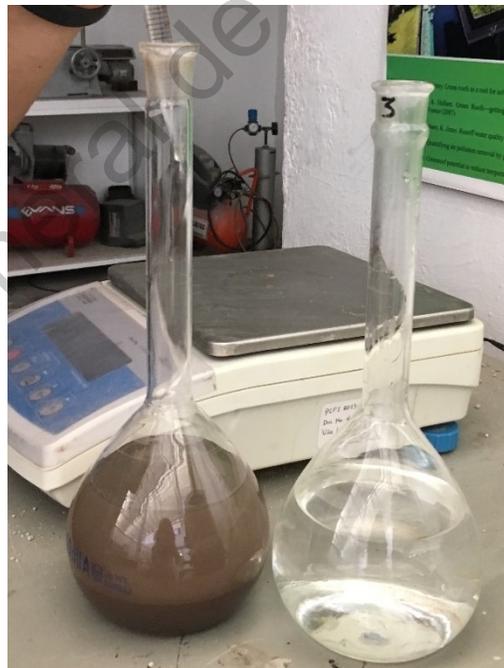


Figura 6.6 Aforo del matraz con suelo utilizando agua destilada durante la prueba de peso específico.

6.2.4 Análisis granulométrico por mallas

Se realiza un procedimiento de clasificación preliminar, se clasifica como agregado fino si 50% o más de peso seco pasa la malla no 200, si es retenido 50% o más se clasifica como grano grueso. Utilizando el procedimiento de la norma (Standard ASTM C 702-98, 2003) se reduce el tamaño de muestra, para suelo fino utilizando el método A, B o C y para el suelo grueso el método A o B de la norma.

El método A consiste en utilizar un cuarteador mecánico, el método B es un cuarteo colocando el material en una pila cónica con pala y el método C un cuarteo con una pila en miniatura.

El análisis granulométrico por mallas se realiza utilizando la metodología especificada en la norma (Standard ASTM D 2487-00, 2000). Se toma una muestra de suelo, se somete a secado y posteriormente a cuarteo con alguno de los métodos mencionados. Se toma una muestra representativa y se criba el material en 3 etapas: grava, arena y finos, pasándolo por las mallas 3'', 2'', 1 ½'', 1'', ¾'', ½'', 3/8'', ¼'', no. 4, no. 10, no. 20, no. 40, no. 60, no. 100 y no. 200. Se mide la masa del suelo retenido en cada malla y se calcula el % con respecto a la muestra total para obtener la curva granulométrica, que es formada por la relación del % retenido y el tamaño de partícula.



Figura 6.7 Análisis granulométrico por mallas.

6.2.5 Análisis del tamaño de partículas

Se realiza utilizando el análisis granulométrico vía hidrómetro (densímetro) especificado en la norma (Standard ASTM D422-63, 2002). Es necesario un agente dispersante, para ello se utiliza una solución de hexametáfosfato de sodio en una relación de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.

Para corroborar que esta relación es adecuada, se realiza un procedimiento en el cual se colocan 0.75 g de suelo seco (que pasa la malla no. 200) en 5 tubos, se coloca en cada tubo una concentración de 2%, 3%, 4%, 5% y 6% de hexametáfosfato de sodio. Se dejan reposar por un periodo de 24 horas, pasado ese tiempo se observa qué concentración de defloculante funcionó mejor para el suelo.

Antes de comenzar con la prueba es necesario calibrar el densímetro. Se realiza la corrección por inmersión, que consiste en obtener la profundidad efectiva “L”, que es la distancia de la superficie libre del agua al centro del bulbo del densímetro. Al ingresar el densímetro a la probeta, se desplaza la lectura a una distancia de V_b/A , siendo V_b el volumen del bulbo y A el área transversal de la probeta, esta distancia debe restarse para obtener la profundidad efectiva “L”.

La siguiente corrección es del menisco, la lectura debe ser en la superficie del agua, pero debido a la dificultad de tomar la lectura en la superficie, se realiza en el menisco. Para esta corrección debe tomarse la lectura en la superficie y en el menisco, la diferencia de ambas dará el valor de corrección. La última corrección es del cero debido al defloculante, ya que este aumenta el volumen en la probeta, por lo tanto, se toma la lectura en el vástago del hidrómetro en agua destilada y después con defloculante. La diferencia entre estas dos lecturas es la corrección del cero.

Para la preparación de muestra de suelo seco se utiliza el procedimiento de la norma (Standard ASTM D 421-85, 2002), se prepara la solución de agente dispersante y agua destilada y se colocan encima de la muestra de suelo, se deja reposar por 24 horas. Se utiliza un aparato de agitación para dispersar la mezcla de suelo e inmediatamente después se transfiere a la probeta y se agrega agua destilada hasta que el volumen sea 1000 ml. Usando la palma de la mano se gira la probeta de arriba hacia abajo por un periodo de 1 minuto y se toman mediciones con el densímetro y el termómetro a diferentes tiempos.



Figura 6.8 Probeta con mezcla de suelo, defloculante y agua destilada durante la prueba de tamaño de partícula mediante densímetro.

6.2.6 Determinación de los límites de consistencia

En 1900, un científico llamado Albert Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad, a los que se llamaron límites de consistencia (Das, 2015). El suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. Se define como límite líquido LL al contenido de agua en % de un suelo que está entre el estado semilíquido y sólido, límite plástico LP al que está entre el estado plástico y semisólido, límite de contracción LC es la humedad para la cual el suelo no se contrae cuando la humedad baja de ese límite y se expande cuando la humedad aumenta sobre ese límite y la contracción lineal CL es la deformación lineal que experimenta un suelo a partir de un proceso de secado.

Para obtener el LL y LP se utiliza la copa de Casagrande cuya metodología está especificada en la norma (Standard ASTM D4318-00, 2000), así mismo puede utilizarse el método del cono inglés. Para la determinación del límite de contracción se utiliza la metodología especificada en la norma (Standard ASTM D427-04, 2004).

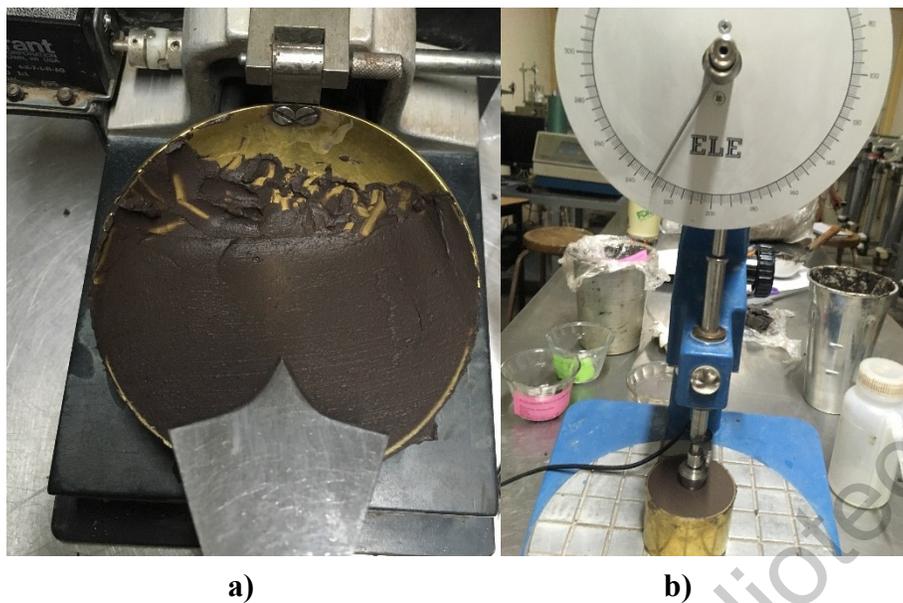


Figura 6.9 Realización de prueba de límite líquido a) Método copa de Casagrande b) Método cono inglés.

6.2.7 Determinación de la superficie específica

Se realiza utilizando el método de prueba estándar, para la determinación del valor de azul de metileno, para relleno fino de agregados utilizando la metodología especificada en la norma (Standard ASTM C837-09, 2009).

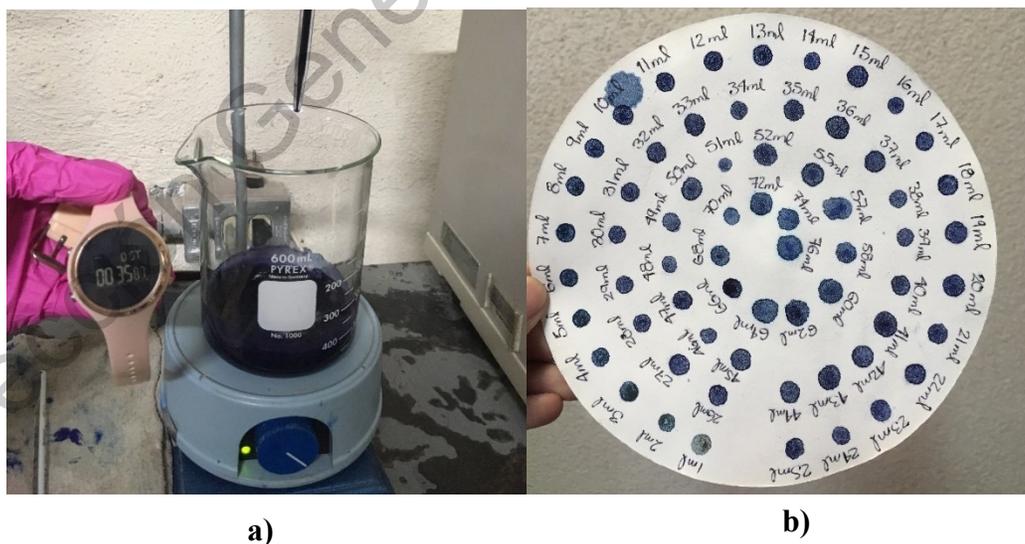


Figura 6.10 a) Realización de la prueba de superficie específica con azul de metileno b) resultados de la prueba.

6.3 Ensayes preliminares

6.3.1 Determinación de la succión del suelo

Existen varias pruebas de laboratorio disponibles para medir la succión, pero la prueba del papel filtro es una de las más utilizadas debido a que puede medirse la succión mátrica y la total, es una prueba económica y que presenta un rango muy amplio de medición, 0.01 a 100 Mpa (Montes Zarazúa, 2010).

La metodología de la técnica del papel filtro fue tomada con base en la norma (Standard ASTM D5298-03, 2003). Las dos marcas más usadas de papel filtro que se mencionan dentro de la norma son Schleicher and Shuell no. 589 o Whatman no. 42. Es necesario primero calibrar el papel filtro antes de comenzar con la prueba.

6.3.1.1 Calibración del papel filtro

La norma ASTM D5298 proporciona una curva de calibración del valor de succión total para los papeles filtro antes mencionados y que se observa en la Figura 6.11.

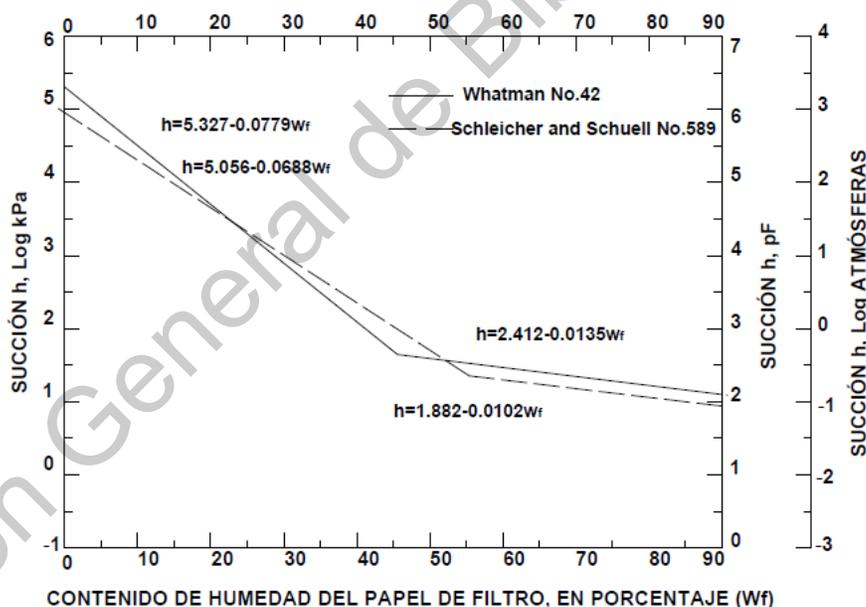


Figura 6.11 Curvas de calibración del papel filtro (Standard ASTM D5298-03, 2003).

El papel filtro que se utilizó para esta prueba fue Whatman no. 42, y la calibración se hizo de la siguiente manera:

- 1) Se colocan guantes cada vez que sea necesario manipular el papel filtro. Se recortan papeles filtro en círculos de un diámetro de 5.5 cm y se levanta un poco la orilla para que quede una pestaña que permita facilitar su manipulación con ayuda de unas pinzas.

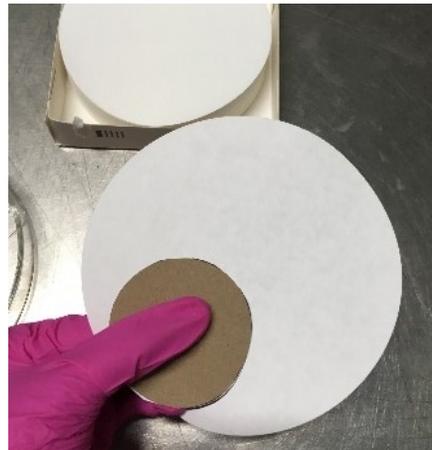


Figura 6.12 Preparación de papeles filtro para la prueba de succión.

- 2) Se seca el papel filtro, al menos 16 horas o toda la noche en el horno. La norma ASTM D5298 indica que estos deben colocarse después en un desecador para almacenarlos hasta que sean usados.
- 3) Se preparan 5 soluciones de succión conocida, compuestas de agua destilada y cloruro de sodio o potasio.
- 4) Dentro de 5 frascos de vidrio se coloca un elemento inerte con un área superficial mínima que permita aislar los papeles filtro de la solución, en esta prueba se hizo con tubos de pvc pegados al centro del frasco con silicón.



Figura 6.13 Elemento inerte para aislar el papel filtro de la solución.

- 5) Se coloca al menos 50 cm^3 de solución dentro de cada frasco y se limpia muy bien las orillas del tubo para que no queden gotas de solución que puedan afectar los resultados.
- 6) Se retira un papel filtro (secado previamente) y con ayuda de unas pinzas se toma el papel filtro de la pestaña e inmediatamente se coloca sobre el elemento inerte dentro del frasco.
- 7) Se coloca la tapa del frasco de vidrio y se sella con una cinta de aislar, se coloca cada uno de los frascos en una caja aislada térmicamente y se introduce en un cuarto de temperatura controlada, cuyas variaciones sean menores de 3°C .
- 8) Debe permitirse el equilibrio entre la succión del papel y la solución dentro del contenedor por un mínimo de 7 días.
- 9) La norma indica que pueden utilizarse contenedores metálicos o bolsas para el proceso de medición de masa del papel filtro, en este caso se utilizaron 2 cajas metálicas de distinto color, y selladas por dentro con una cinta que resiste altas temperaturas. Esto con el objetivo de tapar el orificio generado por las bisagras de la caja y de esta forma aislarla completamente y poder utilizarla en el horno de secado.
- 10) Debe utilizarse una báscula con precisión de 0.0001 g .
- 11) Una vez que han pasado los 7 días de equilibrio se pesa la caja metálica, y después utilizando guantes y pinzas se toma el papel filtro por la pestaña, se saca del frasco, se transfiere a la caja metálica y se cierra la tapa de la caja. Este proceso debe hacerse de 3 a 5 segundos. Inmediatamente se pesa el contenedor con el papel filtro dentro.
- 12) Se coloca el contenedor metálico con el papel filtro en el horno a una temperatura de $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ con la tapa ligeramente abierta para que el papel filtro pierda toda la humedad.
- 13) Los papeles filtro deberán permanecer en el horno por un mínimo de 2 horas. Después de ese tiempo sellar el contenedor metálico y dejar los contenedores en el horno por lo menos 15 minutos para permitir el equilibrio de temperatura.
- 14) Sacar el contenedor metálico con el papel filtro del horno y después determinar la masa total del contenedor metálico caliente con el papel filtro seco, inmediatamente sacar los papeles filtro y determinar la masa del contenedor caliente.
- 15) Una vez que las masas han sido determinadas deseche los papeles filtro, en ninguna circunstancia deberán reutilizarse los papeles filtro que ya fueron secados en esta prueba.

Consideraciones no mencionadas en la norma (Standard ASTM D5298-03, 2003) utilizadas para la realización de esta prueba

- 16) La medición de la masa es un punto crítico para obtener resultados correctos, y debido a las variaciones que se tienen al ser una báscula con tanta precisión, se utilizó un tripié y una cámara para grabar el proceso de medición de masa de los papeles filtro.



Figura 6.14 Cámara para grabar el proceso de medición de masa de los papeles filtro.

- 17) Antes de colocar el papel filtro seco en la solución (punto 6 de esta metodología), se realiza la medición de la masa del contenedor metálico, se toma el papel filtro seco del desecador y se transfiere al contenedor metálico previamente pesado. Inmediatamente se coloca en la báscula y se toma la medición de la masa del contenedor metálico con el papel filtro seco. Después de esto se transfiere el papel filtro seco a la solución como lo indica el punto 6 de esta metodología.

4.1.1.2 Medición de la Succión

La succión total será medida si el papel filtro no está en contacto con el suelo, mientras que la succión mátrica será medida si el papel filtro está en contacto físico con el suelo. Colocar un espécimen de suelo intacto o fragmentos de una muestra de suelo en el contenedor del espécimen.

Se realiza nuevamente el punto 1 y 2 de la metodología de la calibración de los papeles filtro. Remover 2 papeles filtro del desecador e inmediatamente después colocarlos sobre el espécimen, pero aislados del espécimen insertando *o-rings* u otro elemento inerte con área superficial mínima entre los papeles filtro y el suelo.

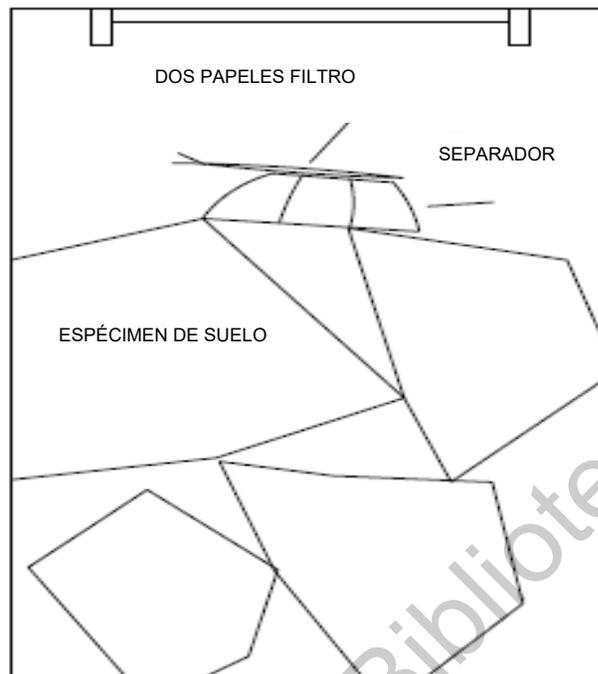


Figura 6.15 Medición de la succión total ASTM D5298.

- 1) Se realizan los puntos 7 al 16 de la metodología de la calibración de los papeles filtro.

Consideraciones no mencionadas en la norma (Standard ASTM D5298-03, 2003)
utilizadas para la realización de esta prueba

- 2) Con el objetivo de observar las variaciones que pueden presentarse al realizar la metodología de la norma ASTM D5298, se determinó la masa de los papeles filtro en 3 etapas: inmediatamente antes de ser colocados en la muestra, después del equilibrio de los 7 días y después de secado en el horno por un mínimo de 2 horas. Además, se realizó la medición de 2 formas distintas en cada etapa: medición del papel filtro con el contenedor metálico y medición del papel filtro sin contenedor (Figura 6.16).

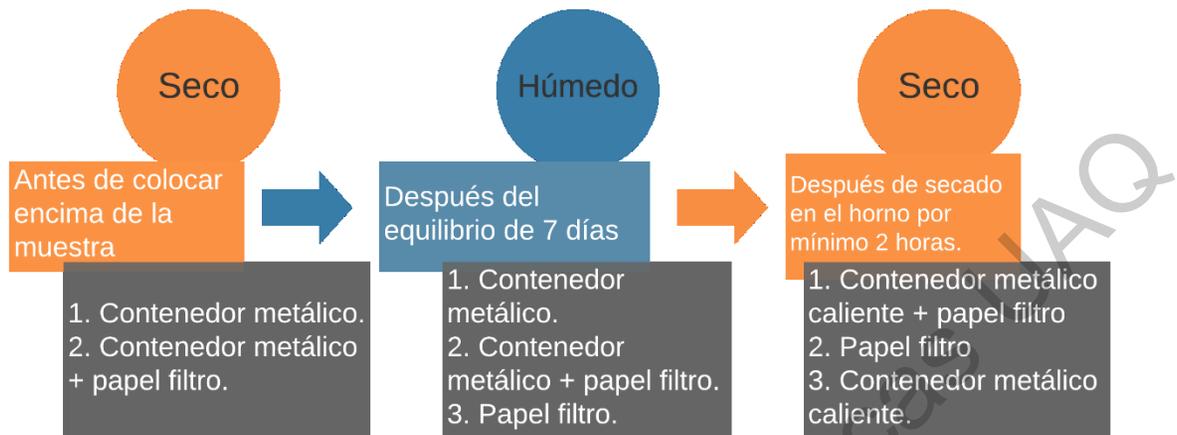


Figura 6.16 Metodología de medición de succión por etapas.

- 3) Uno de los mayores problemas al capturar los datos de medición de masa del papel filtro es decidir qué valor debe tomarse de la báscula, ya que al tener una alta precisión, los valores presentan variaciones que repercuten en gran medida a los resultados finales, así que en esta prueba se decidió tomar el valor justo cuando se cierra la puerta, lo que impide el paso del aire y el segundo valor cuando la balanza se ha estabilizado, que es cuando aparece el valor “g” en la pantalla de la báscula.
- 4) Para las muestras utilizadas en esta prueba (punto 1 de la metodología de medición de succión total) se colocaron tubos de metal (previamente pesados y medidos) y se hincaron en la muestra inalterada para obtener los especímenes.



Figura 6.17 Labrado de muestras inalteradas para prueba de succión.

- 5) Se coloca un cuadrado de papel aluminio y una liga (previamente pesadas) en el fondo de la muestra, para protegerla de pérdidas de material y se mide la masa total del espécimen.
- 6) Con los valores obtenidos en la caracterización del material y las mediciones del punto 7 se procede a calcular la masa necesaria para llevar a cada espécimen a su correspondiente grado de saturación, y una vez que la muestra haya alcanzado esta masa (ya sea por secado o por humedecimiento) se procede a colocar los papeles filtro como fue indicado en el punto 3 de la metodología de medición de la succión total.

Para esta prueba se realizaron seis especímenes para la curva de secado y seis para la curva de humedecimiento, se hicieron dos repeticiones y para corroborar el valor correspondiente a 60% de grado de saturación, se labraron dos probetas extras para una tercera medición.



Figura 6.18 Muestra después del proceso de secado.

6.3.2 Determinación del esfuerzo de preconsolidación

Se realiza utilizando el procedimiento de consolidación unidimensional cuya metodología está especificada en la norma ASTM D2435.

Primero se determina las dimensiones y masa del anillo de consolidación que va a utilizarse, en este caso se usó un anillo con extensiones debido a que el tipo de suelo es expansivo. Se labra una muestra de suelo inalterada dentro del anillo (con la extensión inferior puesta), para esto se corta con ayuda de navajas y se va hincando el anillo por la parte afilada de la extensión inferior en el suelo. Con una segueta se va cortando las partes laterales de la muestra para que el anillo vaya entrando en la muestra, esto se hace hasta que el suelo haya sobrepasado el anillo en la parte superior y la extensión

inferior Figura 6.19. Se quita la extensión y se enrasa el suelo en la parte superior e inferior hasta que ambas caras queden planas. Se toma la masa del anillo con la muestra dentro.



Figura 6.19 Labrado de muestra inalterada en el anillo de consolidación.

Se cortan 2 papeles filtro del diámetro del anillo, se colocan en la parte superior e inferior de la muestra y se colocan las extensiones. La piedra porosa del inferior de la muestra se envuelve con plástico adherible para que no vaya a tomar humedad de la muestra, se coloca también plástico adherible en la extensión inferior y se amarra con una liga, esto debido a que se quiere controlar la humedad por incrementos, y para asegurar de esta forma que el agua de la muestra no será adsorbida por la piedra porosa.

Se coloca la placa superior que transfiere la carga arriba de la muestra y todo el conjunto dentro de una cazuela, la cual fue cubierta con plástico adherible para evitar pérdidas de humedad. Se coloca la cazuela en el equipo de consolidación, se nivela el brazo de palanca y se ajusta el micrómetro de medición de deformación.

Se aplica una carga de 1 kPa, y después se satura el suelo en 5 incrementos de agua (1 incremento por día).

La cantidad de agua por incremento para cada muestra se obtiene con el grado de saturación inicial, se calcula la cantidad de agua que se necesita para tener un 100% de grado de saturación, esta cantidad de agua se va a dividir entre 5, que serán los incrementos en las 5 etapas de humedecimiento. Este incremento se inyecta con una jeringa a cada muestra de suelo y se deja que el suelo expanda completamente durante 24 horas, terminadas esas 24 horas se aplicará el siguiente incremento de agua para pasar a la siguiente etapa.

En cada incremento de agua se toman lecturas del micrómetro en periodos de tiempo (2, 5, 10, 15, 30 segundos, 1, 2, 5, 10, 15, 30 minutos, 1, 2, 3, 4 y 24 horas). Una vez finalizados los incrementos de agua se aplican las siguientes cargas: 100, 200, 400 y 800 kPa. En cada incremento de carga se toman las lecturas en los mismos periodos de tiempo que en los incrementos de agua, una vez que cumplen las 24 horas se toma lectura al siguiente día de forma continua hasta que la curva empiece a ser asintótica, muestra de que la consolidación primaria ha terminado y comienza la consolidación secundaria.

Cuando se ha terminado con la última carga, comienzan a descargarse de la misma forma en que se fueron aplicando las cargas y se toma lectura de la misma forma que en las cargas. Es importante en todo el proceso asegurarse que la muestra esté completamente húmeda, por lo que diario se aplica agua mediante una jeringa por la parte superior de la muestra.

6.4 Ensayes

6.4.1 Pruebas oedométricas

Se realizan 2 grupos de pruebas oedométricas, cada grupo con un valor de succión elegido, el primero con una succión correspondiente a un grado de saturación de 45% y el otro grupo con una succión correspondiente a un grado de saturación de 15%. Se labran 4 muestras por cada grupo, teniendo un total de 8 muestras. Por lo cual se tendrán 2 grupos correspondientes a las succiones S1 y S2, y cada grupo tendrá 4 valores de carga diferentes para cada muestra (Figura 6.20).



Figura 6.20 Metodología pruebas oedométricas.

Una vez que se han labrado las muestras, se colocan en el equipo de consolidación y se procede a aplicar carga, la cual será en 2 incrementos para la muestra 1 y 2 de cada grupo y en 3 incrementos

para la muestra 3 y 4 de cada grupo, llegando a la carga correspondiente que se muestra en la Figura 6.21.

Cuando han finalizado las cargas se realizan 5 incrementos de agua (1 por día). Una vez finalizados los 5 incrementos se procede a realizar las descargas de la misma forma en que se aplicaron los incrementos y tomando lecturas del micrómetro en los mismos tiempos que el ensaye preliminar.



Figura 6.21 Humedecimiento de muestra en el equipo de consolidación.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización geotécnica

Las muestras utilizadas para esta investigación se obtuvieron de la zona de Jurica en el estado de Querétaro, México. Las muestras fueron extraídas en el mes de febrero de 2018. La excavación se realizó a una profundidad de 2 m, que fue donde se encontró el material homogéneo. Las muestras inalteradas se obtuvieron a 1.5 y 1.9 m de profundidad y las muestras alteradas para la obtención del perfil de humedades se obtuvieron a cada 50 cm desde la superficie hasta los 2 m. Los cálculos y resultados de cada prueba se muestran en el ANEXO A.

El rango de humedades naturales que presentó el sitio donde se obtuvo la muestra se observa en la Figura 7.1, el cual fue del 29.35% a 39.36%.

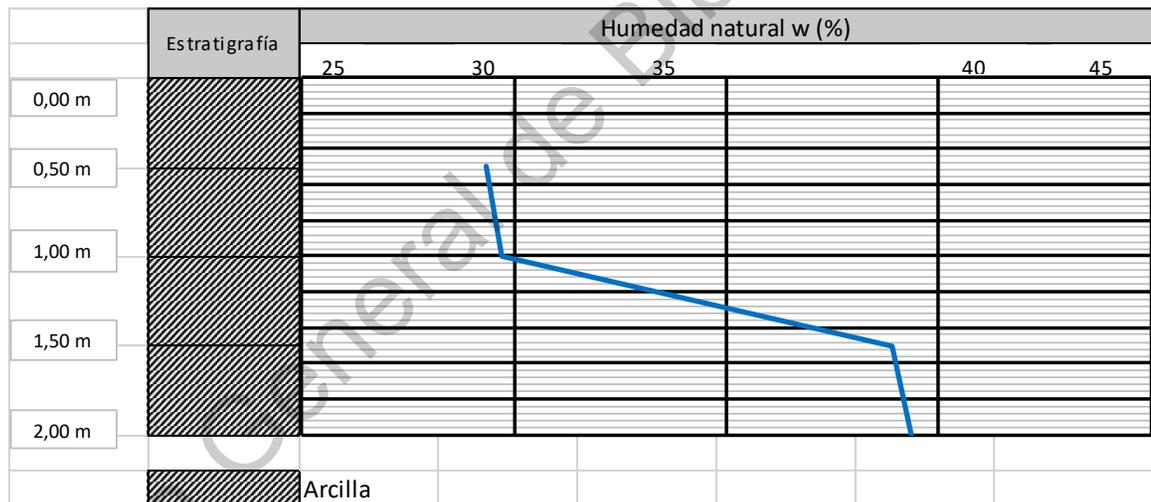


Figura 7.1 Perfil de humedades naturales, muestreo febrero 2018, Jurica, Querétaro.

En la Tabla 7.1 se presentan los resultados de caracterización del suelo, el cual muestra un índice de plasticidad $IP=13.89\%$ el cual de acuerdo a la Tabla 1.3 corresponde a un suelo con un grado de expansión alto y un % de expansión probable mayor a 30. El valor de superficie específica que presenta el suelo de Jurica es de $391.46 \frac{m^2}{g}$ (Tabla 7.1) y de acuerdo a los valores de la Tabla 1.2 éste corresponde a un mineral tipo montmorilonita.

Tabla 7.1. Caracterización del suelo, Jurica Querétaro.

Límites de consistencia		
Límite líquido (LL)	85.91	%
Límite plástico (LP)	34.86	%
Índice de plasticidad (IP)	51.05	
Límite de contracción (LC)	13.89	%
Contracción lineal (CL)	22.16	%
Relaciones volumétricas y gravimétricas		
Humedad natural a 2 m de prof (w)	39.36	%
Gravedad específica (S_s)	2.55	
Peso específico de la masa (γ_m)	1.59	g/cm ³
Relación de vacíos (e)	1.18	
Grado de saturación (G_w)	82.01	%
Tamaño de partícula		
Grava (G)	0.012	%
Arena (S)	2.4	%
Finos	97.58	%
Limos (M)	40.81	%
Arcillas (C)	56.77	%
Clasificación SUCS	CH	
Superficie específica	391.46	m ² /g

En la Figura 7.2 se observa la carta de plasticidad del Sistema unificado de suelos (SUCS) y el punto de color verde representa los valores obtenidos de Límite Líquido e Índice de Plasticidad, dando como resultado que el suelo es una arcilla de alta plasticidad CH.

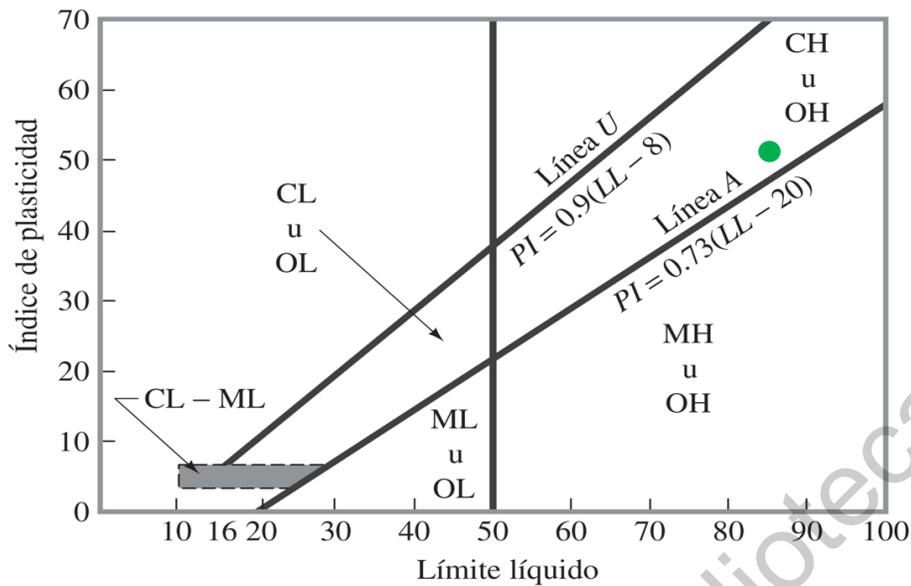


Figura 7.2 Carta de plasticidad, clasificación SUCS del suelo Jurica, Querétaro México.

En la Figura 7.3 se tienen los valores de Límite Líquido, Límite plástico y Límite de contracción en una gráfica de volumen contra humedad. Se observa cómo hay un gran cambio de volumen entre el límite líquido y límite plástico cuando la muestra es secada, llegando al valor de Límite de Contracción, el cual corresponde a un 13.89% de humedad de la muestra.

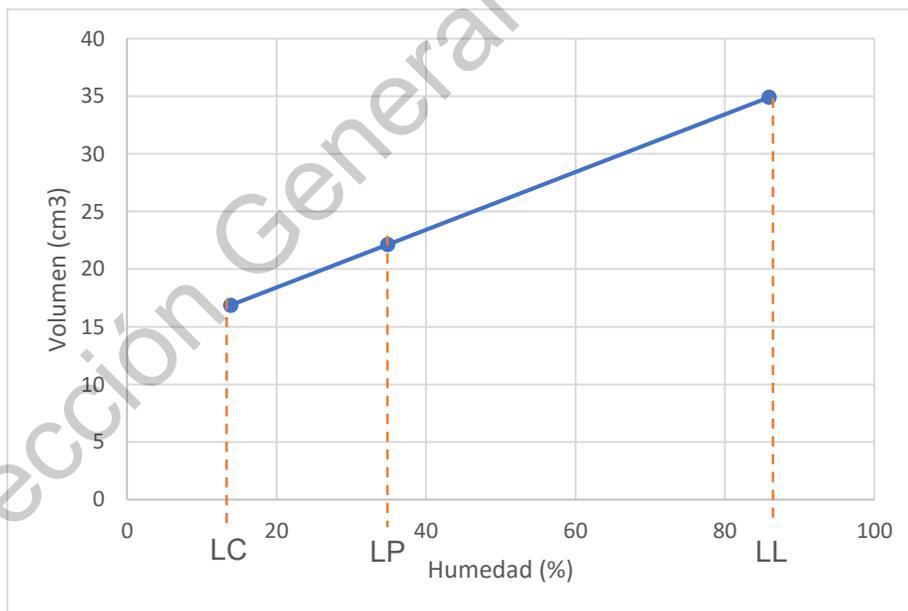


Figura 7.3 Límites de consistencia graficados en los ejes volumen vs humedad.

7.2 Curva de retención agua-suelo de un suelo expansivo en el área Jurica, Querétaro

En el análisis del comportamiento de suelos expansivos es de gran importancia conocer la succión del suelo, la cual se representa en una gráfica en función del grado de saturación. Se obtiene una curva característica, también conocida como curva de retención suelo-agua. En esta curva se presenta el fenómeno de histéresis, al tener una trayectoria de secado y otra de humedecimiento.

La realización de la prueba de succión mediante la prueba de papel filtro es complicada, esto debido a lo sensible que es la prueba en la precisión de la medición de la humedad de los papeles filtro. Así mismo los factores como la rapidez al sacar el papel y dejarlo expuesto lo menos posible al aire para que no pierda humedad, hacen que los valores de succión puedan variar drásticamente hasta en miles de kPa. Prueba de esto es la Figura 7.4, en la cual se presentan los resultados de 3 diferentes autores que realizaron la prueba del papel filtro al mismo suelo, ubicado en el mismo predio de la zona de Jurica en Querétaro.

Se puede observar en la Figura 7.4 que las tres pruebas comienzan y terminan relativamente en el mismo rango de valores de succión. Sin embargo, en el rango de humedad de 80% a 30% los valores de succión varían por miles de kPa, donde las curvas del autor 1 tienden hacia la izquierda, el autor 2 al centro y el autor 3 a la derecha. Para atacar este problema y resolver porqué las curvas de retención están dando diferentes valores a pesar de ser el mismo suelo, se tomaron varias consideraciones y variables que fueron explicadas a detalle en la sección 6.3.1.

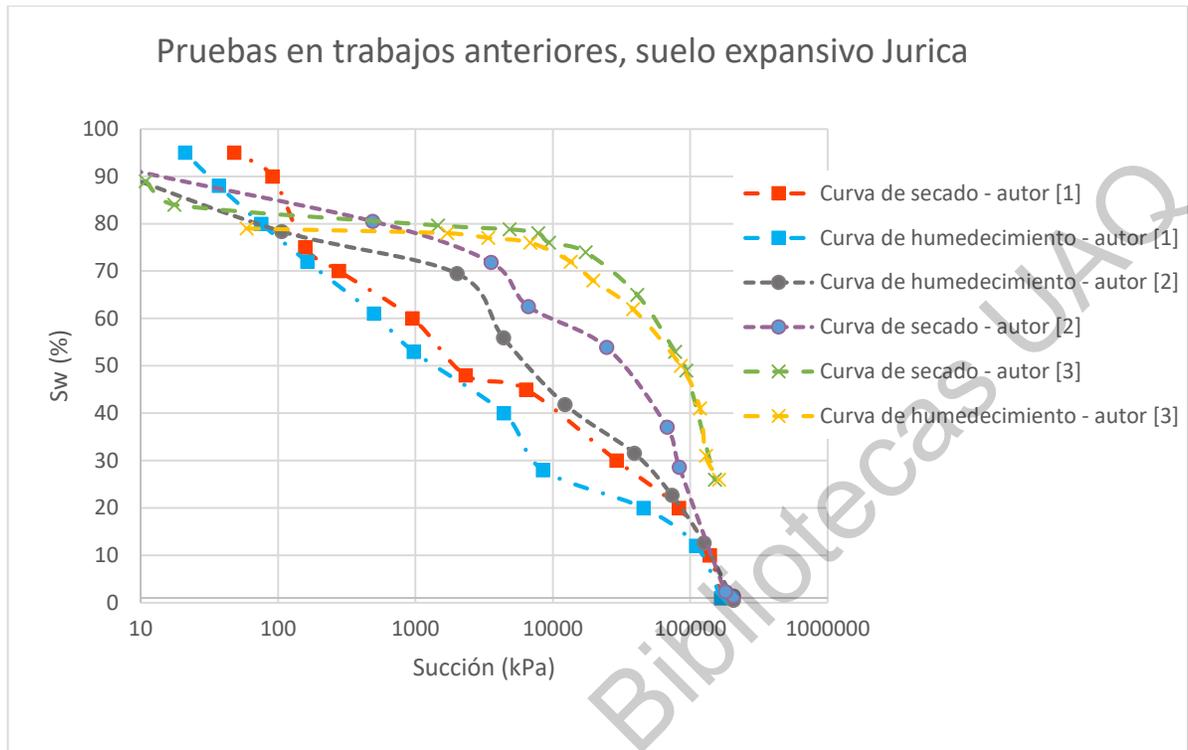


Figura 7.4 Curvas características suelo-agua de pruebas realizadas anteriormente, por 3 autores, en el mismo predio en la zona de Jurica, Querétaro México.

En la Figura 7.5 se presentan los resultados de la primera prueba de papel filtro utilizando las 3 variables descritas en la sección 6.3.1. Se observa que las curvas “después del equilibrio de 7 días utilizando contenedor metálico” tienden a la izquierda, mientras que las curvas con la medición “antes de colocar en la muestra con contenedor” y “después del equilibrio de 7 días sin contenedor” tienden a la derecha.

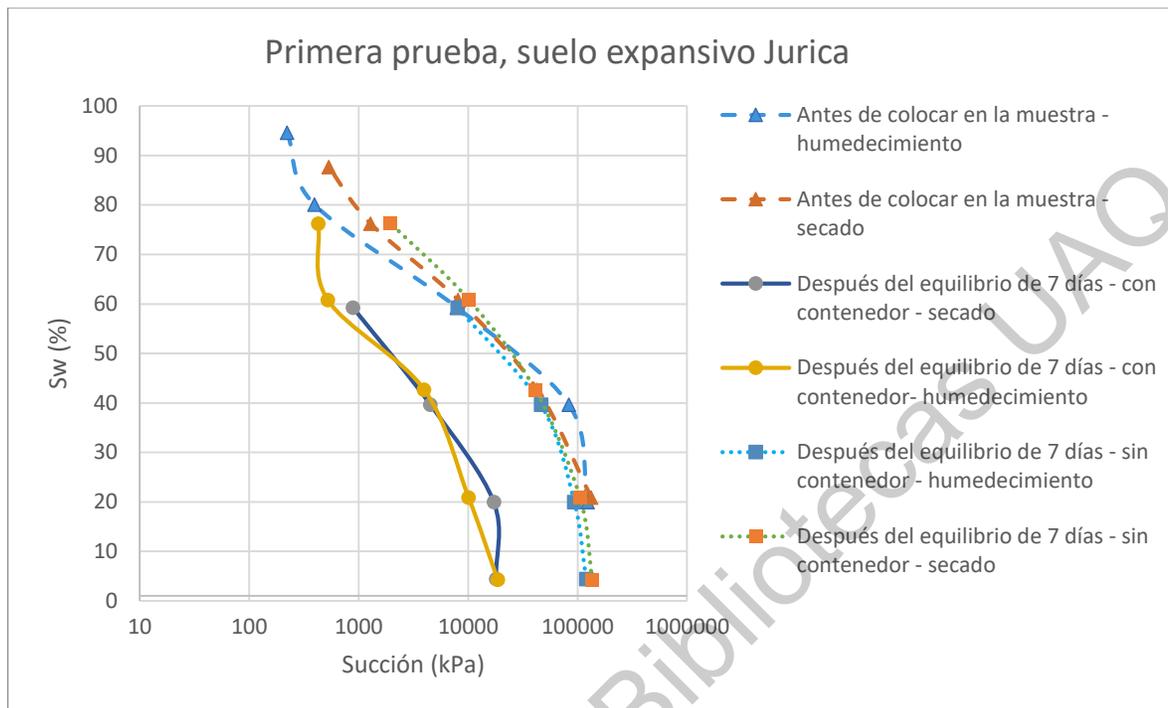


Figura 7.5 Resultados de la primera prueba de papel filtro - Curvas Características utilizando tres variables: antes de colocar en la muestra con contenedor, después del equilibrio con contenedor y después del equilibrio sin contenedor.

Si comparamos los resultados obtenidos en la primera prueba (Figura 7.5) con los resultados de autores anteriores (Figura 7.4) podremos observar la tendencia de las curvas características. Para hacer más clara la gráfica se realizará la comparativa primero con el grupo que tiende a la izquierda en los resultados, el cual corresponde a la variable “después del equilibrio de los 7 días con contenedor” (Figura 7.6).

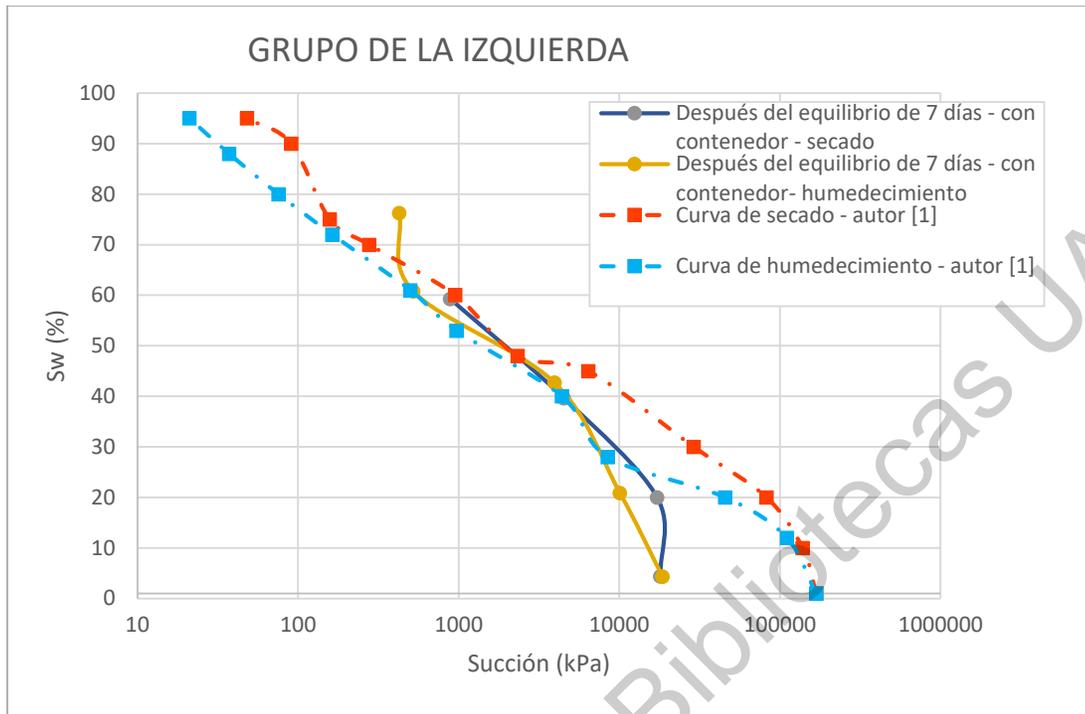


Figura 7.6 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [1] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días con contenedor”.

En la Figura 7.6 se observa la comparativa del autor [1] cuyas curvas tienden a la izquierda, con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días con contenedor”. Se observa que para los valores intermedios ambas curvas se encuentran en el mismo rango de succión, y aunque los valores finales no coinciden podría considerarse que hay una correlación entre ambas. Sin embargo, para poder hacer una conclusión es necesario comparar las demás curvas.

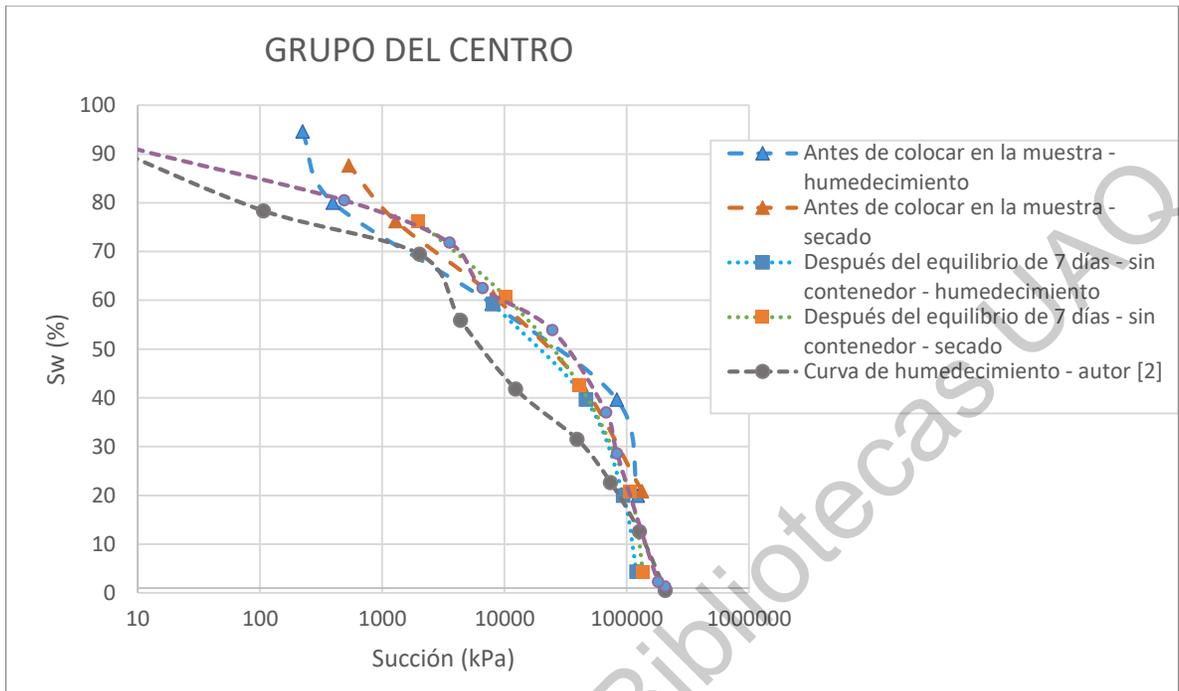


Figura 7.7 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [2] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.

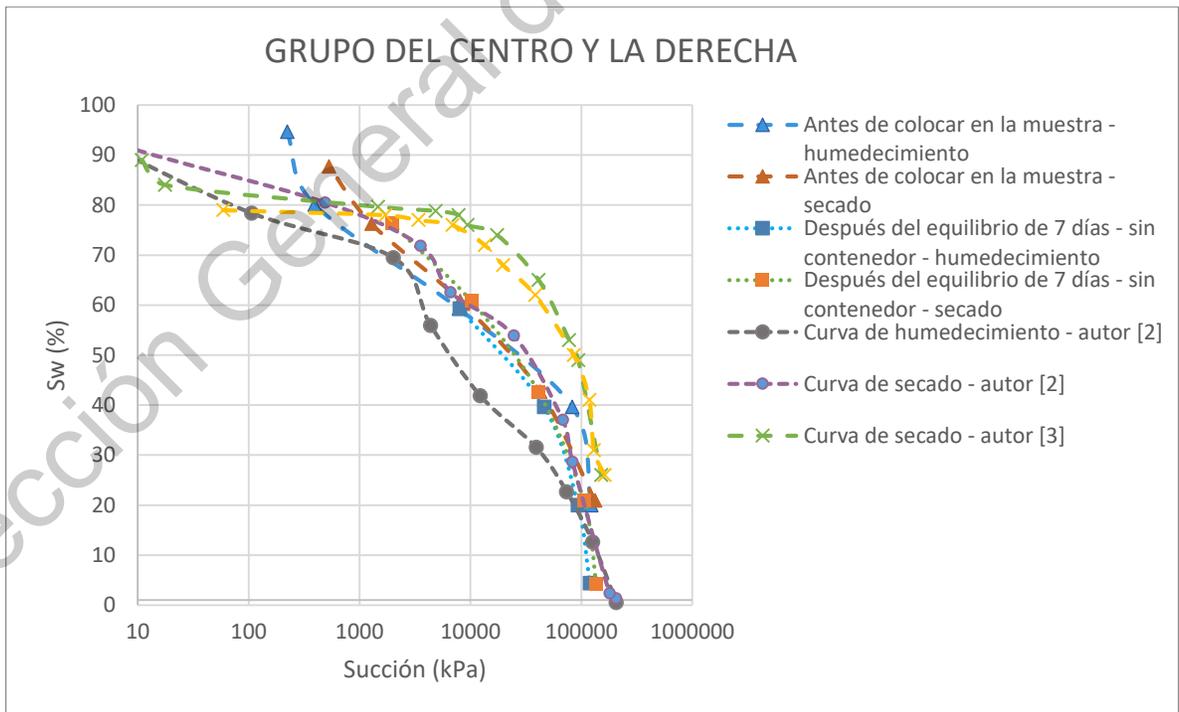


Figura 7.8 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [2] y [3] con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.

En la Figura 7.7 se observa la comparativa del autor [2] cuyas curvas tienden al centro, con los resultados obtenidos en la primera prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”. A diferencia de la comparativa del grupo de la izquierda, en este caso los valores de succión de la primera prueba coinciden en todo el rango de grados de saturación entre ellas mismas y también con el autor [2], lo que hace pensar que este es el grupo correcto.

Para finalizar con todas las comparativas, en la Figura 7.8 se añaden los resultados del autor [3], cuyas curvas tienden a la derecha. Se observa que las curvas del autor [3] no coinciden con los valores de succión del grupo del centro, por lo que podría considerarse al grupo de la derecha (autor [3]) como resultados no representativos. Sin embargo, no podemos tener una conclusión con base en esto, ya que seguimos teniendo un grupo que tiende a la izquierda y uno que tiende al centro, así que para resolver esto se decidió analizar qué pudo haber generado esta variación en la prueba.

La observación que se realizó fue que, en la primera prueba, los papeles filtro se secaron y se colocaron en el desecador, siendo que se mantuvieron por algunos días ahí antes de ser colocados en las muestras que aún no estaban listas, mientras que las muestras que ya estaban listas se les colocó el papel filtro inmediatamente. Esto pudo haber generado la variación en los resultados, ya que de alguna forma los papeles filtro pudieron haber adquirido humedad durante el periodo que estuvieron en el desecador. Tomando esto en cuenta, se decidió que los papeles filtro se pasarían del horno al desecador, se esperaría a que se disipe la temperatura (unos minutos) como lo indica la norma, e inmediatamente después se pesarían y se colocarían en las muestras. De esta forma se procedió a realizar la segunda prueba.

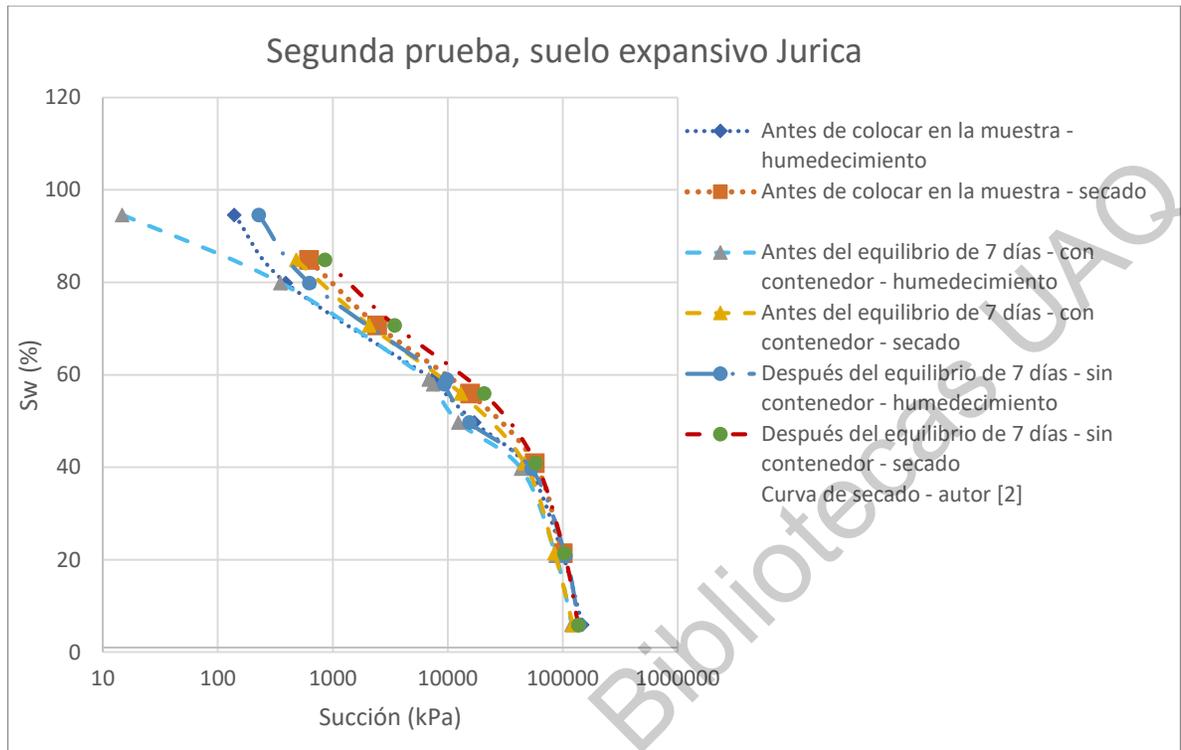


Figura 7.9 Resultados de la segunda prueba de papel filtro - Curvas Características utilizando tres variables: antes de colocar en la muestra con contenedor, después del equilibrio con contenedor y después del equilibrio sin contenedor.

A diferencia de la primera prueba (Figura 7.5) en donde se tenía un grupo hacia la derecha y otro hacia el centro. En la segunda prueba (Figura 7.9) se observa que todas las curvas coinciden en el rango de succión. Esto nos permite concluir que la variable que estaba afectando la medición de la succión era el tiempo que se quedaba el papel filtro en el desecador, ya que quizá no estaba completamente sellado y como consecuencia el papel filtro adquirió cierta humedad en la primera prueba.

En la primera prueba las mediciones de peso del papel filtro “seco” antes de colocar el papel en la muestra son mayores que cuando se ha terminado la prueba y se colocan los papeles filtro en el horno para secarlos nuevamente (donde se asegura que sí están completamente secos). Esto fue lo que hizo que en la prueba 1 (Figura 7.5), las curvas que se midieron “después del equilibrio de 7 días con contenedor” se fueran hacia la izquierda, ya que, al ser la humedad del papel mayor, los valores de succión son menores.

En cambio, en la Figura 7.9 el peso del papel filtro antes de la prueba y después, muestra resultados consistentes, y al estar todas las curvas alineadas en el grupo del centro confirmamos que ese grupo de curvas es el correcto.

La comparativa de los resultados de la segunda prueba con los resultados de otros autores se observa en la Figura 7.9. Las curvas del autor [1] y del autor [3] quedan fuera del rango de succión de los resultados de la segunda prueba, los cuales se observa que coinciden con los del autor [2].

Esto puede explicar por qué las curvas de los 3 autores no coinciden entre sí, ya que dependiendo la forma de medición que cada autor haya utilizado, pudo haber generado estas variaciones. Esto se confirma principalmente porque en el caso de los resultados de la primera prueba, las curvas del grupo de la izquierda que corresponden a la medición hecha pesando el papel filtro después del equilibrio de los 7 días, coinciden con los resultados del autor [1], quien quizá utilizó la misma forma de medición.

Ahora que sabemos que las curvas de la segunda prueba son correctas, queda determinar cuál de las tres variables utilizadas arroja valores homogéneos para considerarla como la curva final a utilizar.

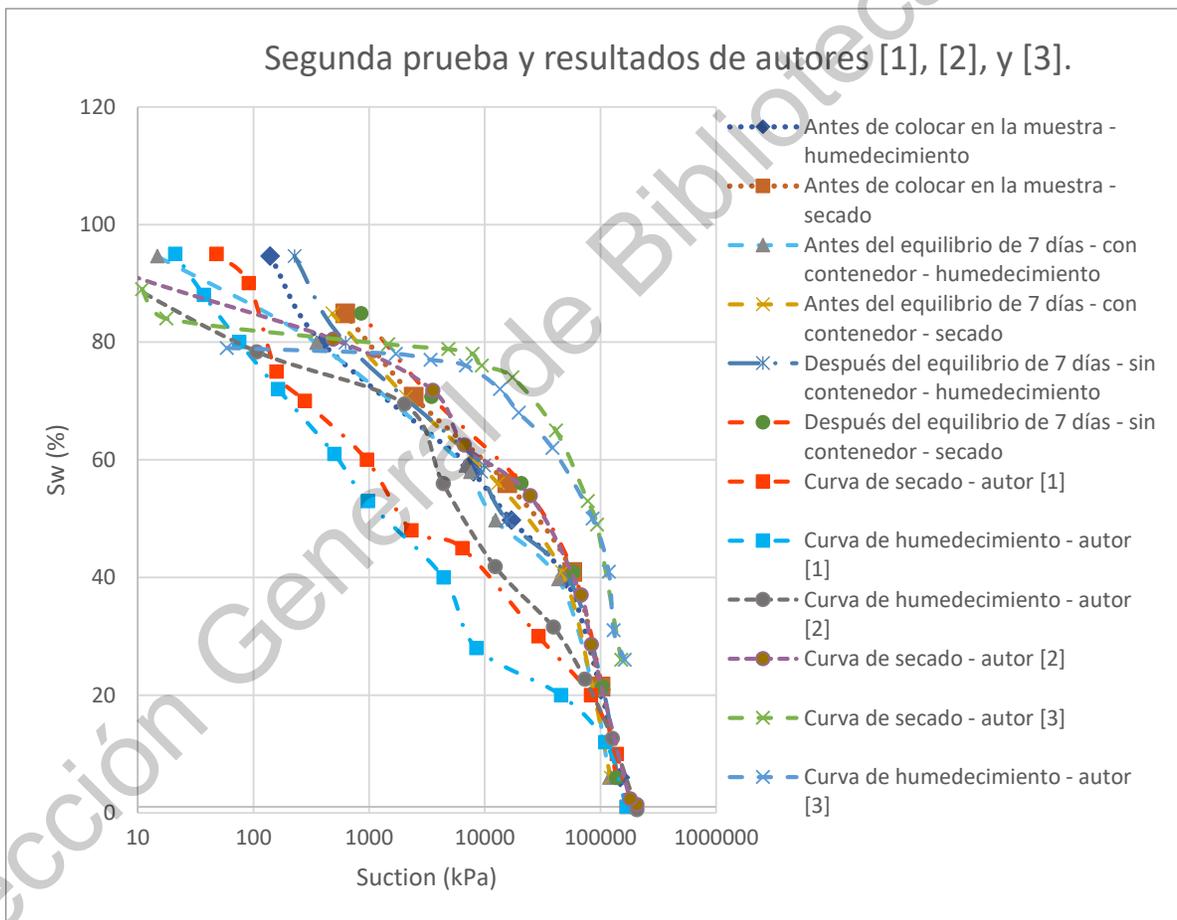


Figura 7.10 Comparativa de Curvas Características agua-suelo del autor [1], [2] y [3] con los resultados obtenidos en la segunda prueba para la variable “Después del equilibrio de 7 días con contenedor”, “Después del equilibrio de 7 días sin contenedor” y “Antes de colocar en la muestra con contenedor”.

En las tablas del anexo B.1. Y B.2 se observa que los valores de medición en el caso “al cerrar la puerta de la báscula” presenta valores inconsistentes, que tienen mucha variación y que no permiten

construir una curva de secado o humedecimiento, mientras que los valores obtenidos en el caso de medición “cuando la báscula se ha estabilizado” son consistentes en ambas pruebas.

También se observa en las tablas que cuando el grado de saturación $S_w\%$ se acerca a cero, se presentan valores negativos de $\%W$ de agua en el papel filtro (celdas de fondo de color rosa), para el caso de los valores medidos antes del equilibrio de los 7 días esto indica que el papel filtro “seco” al ser colocado en la muestra tomó cierta humedad (la cual pudo ser por el tiempo que permaneció en el desecador). El valor negativo que se presenta en el caso de los valores medidos después del equilibrio de los 7 días puede ser debido a 2 cosas: que el papel filtro haya tomado humedad al ser transferido del horno a la báscula o debido a la variación de valores que se presentan en la medición “al cerrar la puerta de la báscula”, ya que para el caso de medición “cuando la báscula se ha estabilizado” no se presentan valores negativos.

En la tabla del anexo B.2. se observa que los valores de humedad de los papeles filtro disminuyen cuando no se utiliza contenedor metálico, por lo que la utilización de este permite conservar la humedad del papel cuando es transferido de la muestra de suelo a la báscula.

Tomando en cuenta lo anterior se determina que las curvas con mejores resultados son cuando se mide utilizando contenedor metálico, esperando a que la báscula se estabilice (lo cual es aproximadamente en un periodo de 10 segundos desde que se saca el papel filtro del desecador, se coloca en el contenedor, se coloca en la báscula y se cierra la puerta de la báscula de precisión) y tomando el valor del papel filtro seco antes de colocar el papel en la muestra. Así que las curvas a utilizar en este trabajo se muestran en la Figura 7.11.

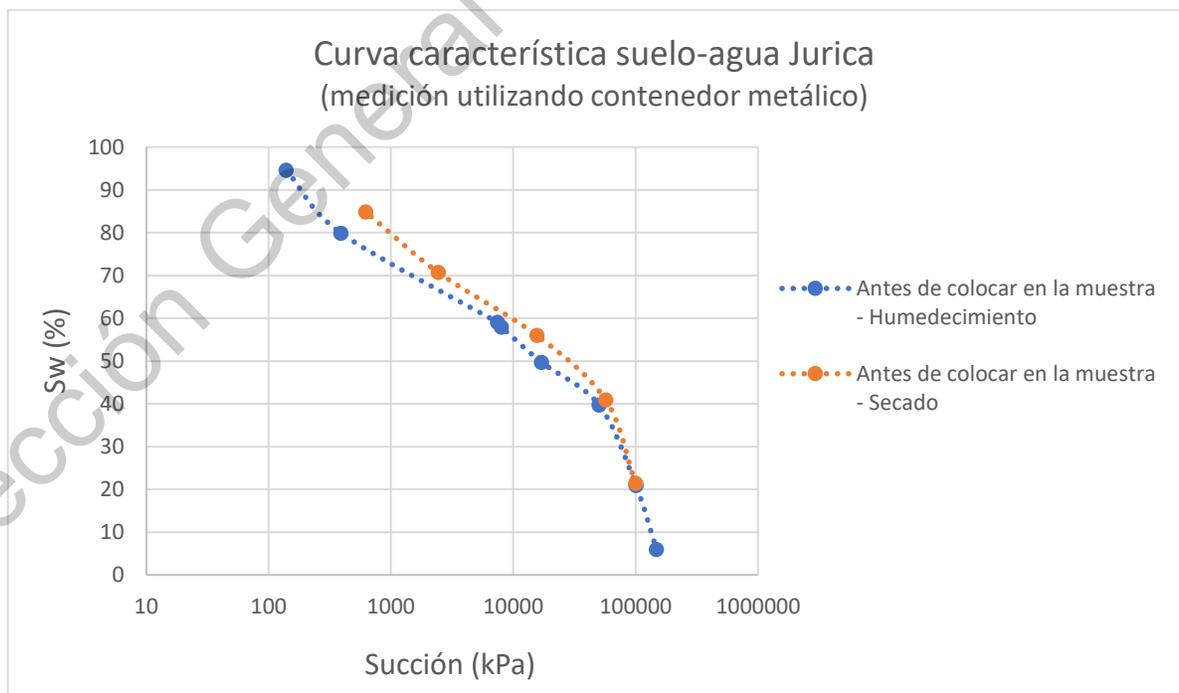


Figura 7.11 Curva característica de la segunda prueba, suelo zona de Jurica.

7.2.1 Ajuste de Curva Característica suelo Jurica

El ajuste de la curva característica se realizó por distintos métodos; Van Genuchten, Sheng y Rojas (los cuales se explicaron a detalle en la sección 5.4.2), cuyas tablas de resultados se presentan en el Anexo B. La comparativa de estos tres métodos y los datos experimentales para la curva de humedecimiento se observa en la Figura 7.12. Van Genuchten y Sheng presentan buen ajuste hasta un grado de saturación de 25%. Sin embargo, valores menores hacen que las curvas tiendan de forma asintótica, dando valores muy altos de succión comparados con los experimentales, motivo por el cual se eligió el método de Rojas, el cual presenta un mejor ajuste (Figura 7.14).

Es importante resaltar que el valor χ que se utiliza en la ecuación (5.3) se obtiene en el modelo de rojas como un valor denominado χ_{corr} , el cual no es lineal con el grado de saturación (Figura 7.15). En trabajos realizados por otros autores (Zazueta Rodríguez, 2015) (Verdín Montes, 2018) se consideró χ igual al grado de saturación. En este trabajo se considerará χ igual al valor χ_{corr} .

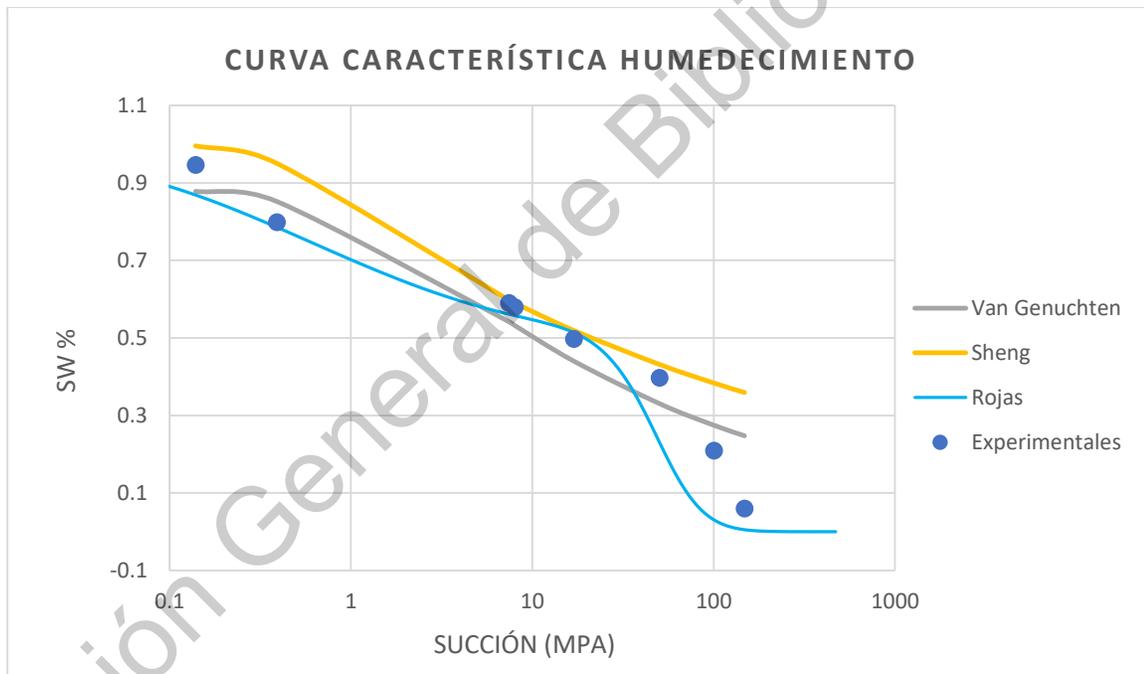


Figura 7.12 Ajuste de curva característica de humedecimiento por los métodos: Van Genuchten, Sheng y Rojas.

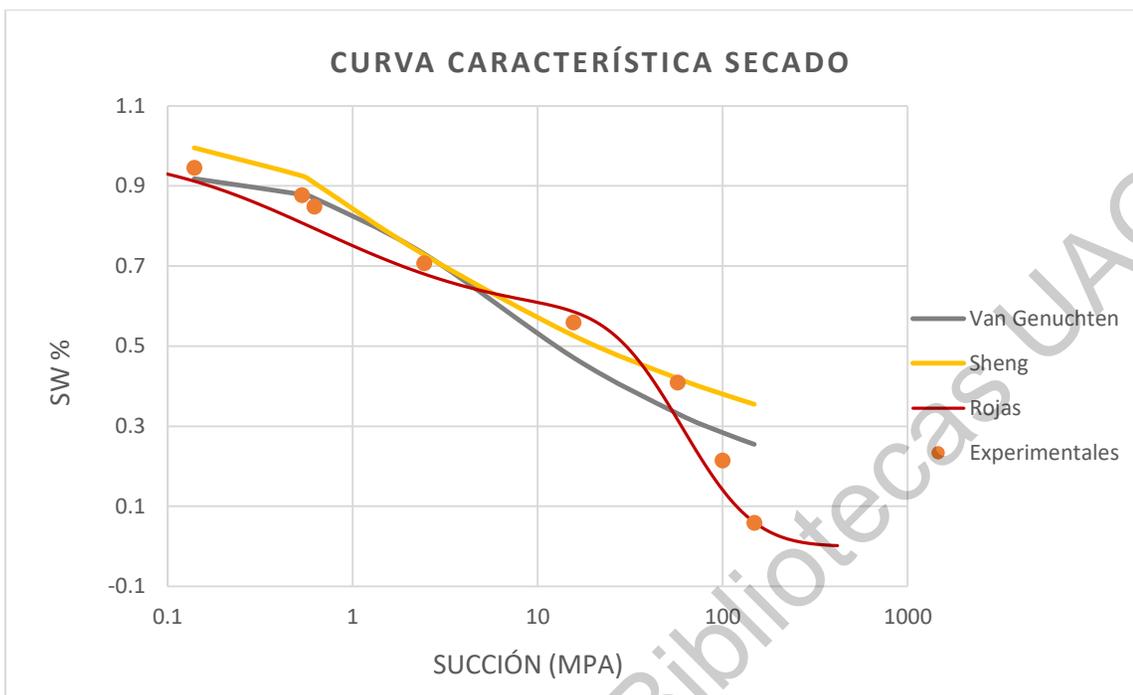


Figura 7.13 Ajuste de curva característica de secado por los métodos: Van Genuchten, Sheng y Rojas.

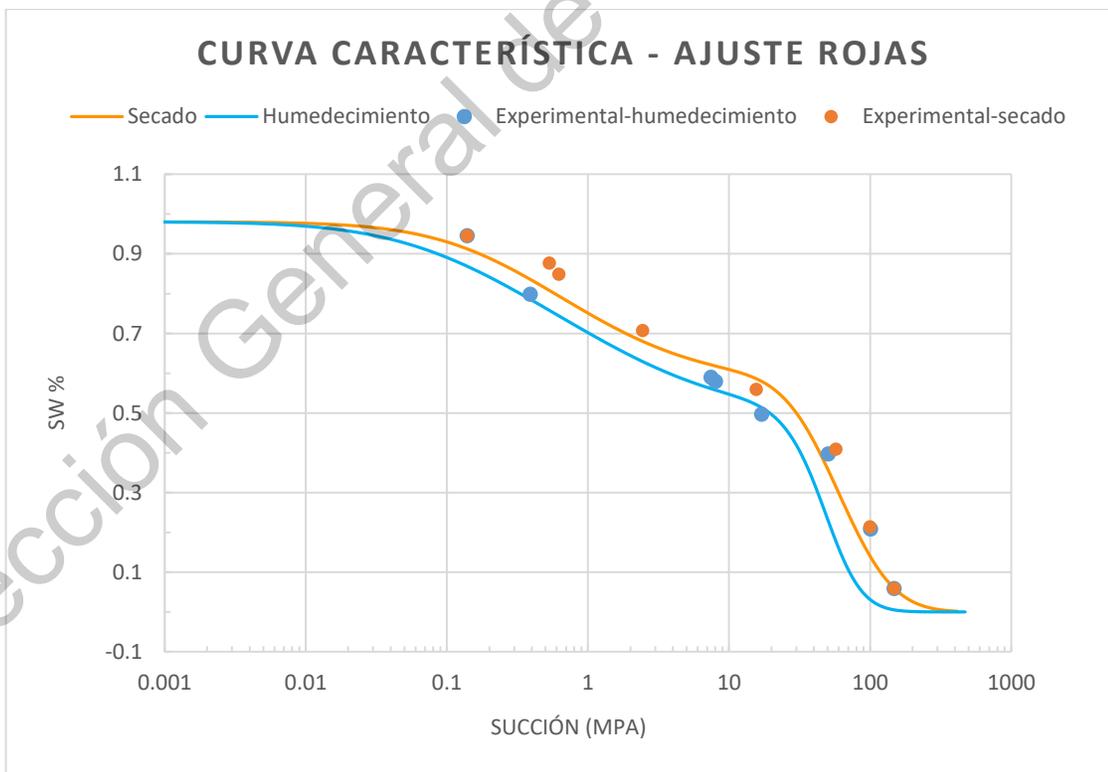


Figura 7.14 Curva característica suelo Jurica para humedecimiento y secado ajustadas por el método de Rojas.



Figura 7.15 Relación entre grado de saturación y valor χ_{corr} para trayectoria de secado obtenido del modelo de Rojas.

7.3 Presión de expansión en oedómetro

La presión necesaria que evita que el suelo expanda se conoce como “presión de expansión” y existen distintos métodos para su obtención. En este trabajo se realizó la prueba de triple oedómetro en 2 grupos de pruebas oedométricas, cada grupo con un valor de humedad y succión inicial. El primero con una humedad promedio inicial de $W=15.4\%$, la cual corresponde a un grado de saturación promedio de 46.3% , con una relación de vacíos inicial (antes de la carga) de $e_0 = 0.625$ y el segundo grupo se secó en el horno por un periodo de 24 a 36 horas obteniendo una humedad promedio de $W=4\%$ y una relación de vacíos inicial $e_0 = 0.545$. Esta humedad, aunque es muy baja, genera un grado de saturación promedio de 17.5% , debido a que el crecimiento del grado de saturación con la humedad no es lineal, y aunque se secaron en el horno y se labraron inmediatamente después de sacarlas, se pudo haber adquirido un poco de humedad al momento de manejar la muestra para insertarla en el anillo de consolidación. Los resultados de las distintas curvas de compresibilidad obtenidas se presentan en el anexo C.

En la Figura 7.16, se observa en la línea punteada en color naranja la relación de vacíos generada para cada muestra después de cargar, en la línea punteada azul la relación de vacíos después de saturar completamente cada muestra. Se observa que la muestra cargada a 200 kPa expandió, mientras que la muestra cargada a 350 kPa colapsó. Obteniendo la intersección de las 2 curvas punteadas se observa que la presión de expansión es de 273 kPa .

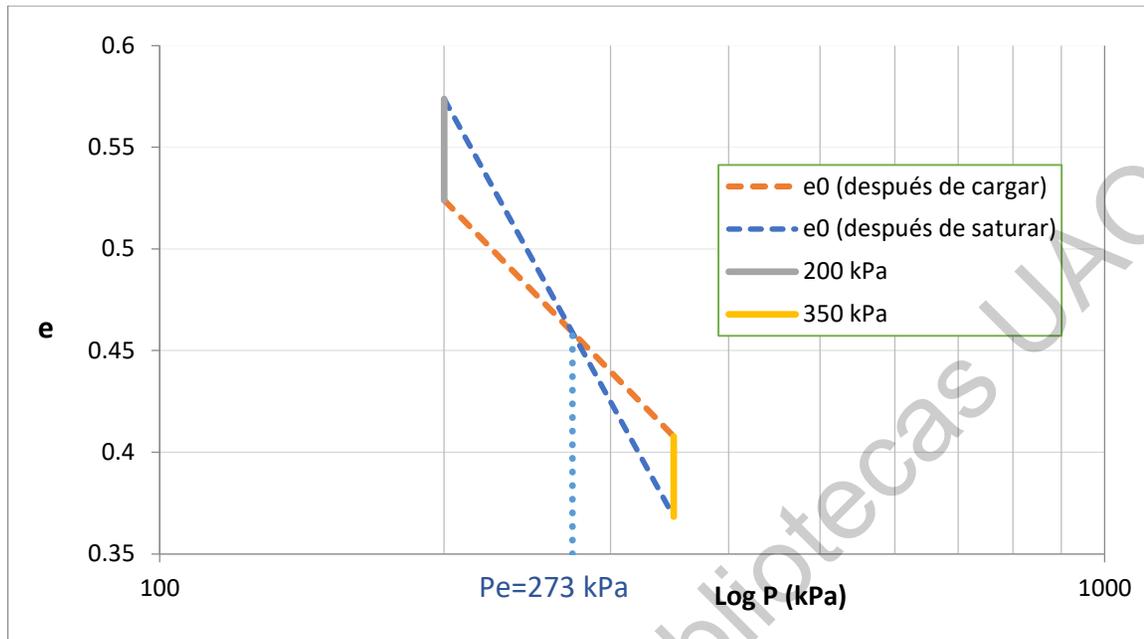


Figura 7.16 Expansión – colapso en muestras con $W=15.4\%$.

En la Figura 7.17 se observa en la línea punteada de color naranja, la relación de vacíos generada para cada muestra después de cargar, en la línea punteada azul, la relación de vacíos después de saturar completamente la muestra.

Se observa que las 4 muestras presentaron expansión, la cual fue disminuyendo conforme se aumentó la carga. Sin embargo, los 500 kPa no fueron suficientes para llevar la muestra a colapso, por lo que se prolongó la línea naranja utilizando la pendiente κ y la línea azul utilizando la pendiente λ del estado seco, para conocer el valor aproximado de presión de expansión que fue de 1200 kPa. Por lo cual se decidió hacer una prueba más, cargando la muestra hasta 1200 kPa con lo cual se compactó hasta una relación de vacíos de $e = 0.505$. Después se saturó en 5 incrementos de agua destilada, en el primer incremento la muestra colapsó llegando a una relación de vacíos $e = 0.490$. Si se observa la Tabla 7.2, se observa que después de colapsar, en los incrementos 2 a 4, la muestra expandió y finalmente en el incremento 5 colapsó un poco. Dando como resultado una variación de relación de vacíos $\Delta e = 0.003$, por lo que prácticamente el cambio volumétrico final es cercano a cero, y por lo tanto corresponde al valor de presión de expansión $P_e = 1200$ kPa.

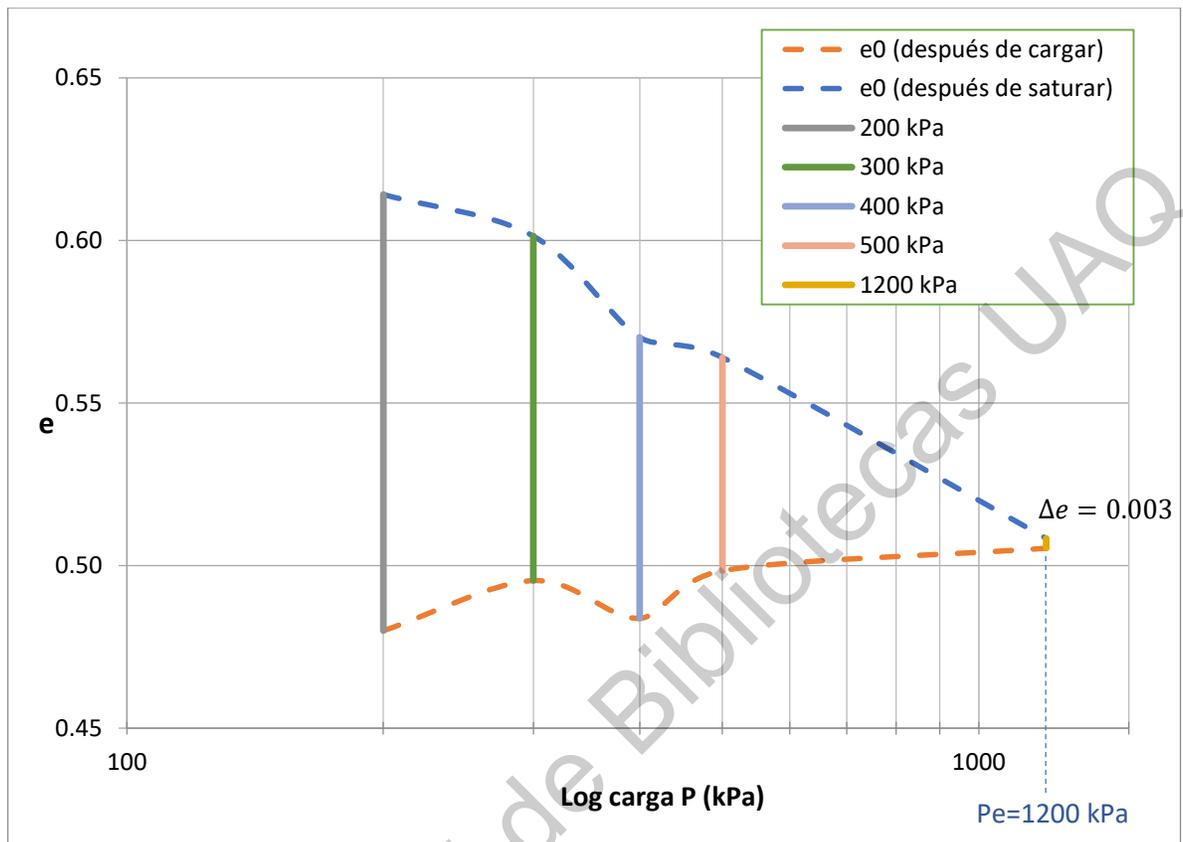


Figura 7.17 Expansión – colapso en muestras con $W=4\%$.

Tabla 7.2 Resultados de cambio de relación de vacíos en la muestra seca cargada a 1200 kPa.

Condición	e
Carga 1200 kPa	0.505
Incremento 1 de agua	0.490
Incremento 2 de agua	0.492
Incremento 3 de agua	0.500
Incremento 4 de agua	0.509
Incremento 5 de agua	0.508

El valor de presión de expansión $P_e = 1200$ kPa es un valor alto debido a que las muestras están prácticamente secas, con solo un 4% de humedad, por lo que la presión necesaria para evitar la expansión es mucho mayor que el de las muestras de la Figura 7.16, que tienen una humedad de 15.4%.

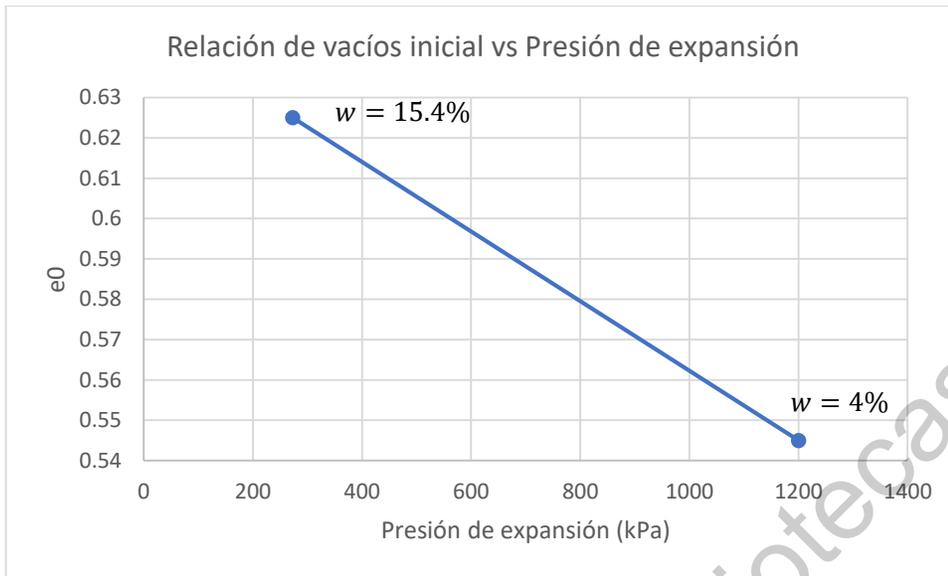


Figura 7.18 Relación de vacíos inicial (antes de cargar) vs presión de expansión para grupo de muestras con $w=15.4\%$ y $w=4\%$.

7.4 Pruebas Oedométricas.

7.4.1 Curva de compresibilidad

Se realizó una prueba de compresibilidad (Figura 7.19) a una muestra de suelo inalterado, con un grado de saturación inicial igual a $G_w = 40\%$. La muestra se saturó en cinco incrementos de agua destilada, después se cargó en cuatro incrementos hasta llegar a 800 kPa y finalmente se descargó la muestra en cuatro incrementos. Se observa que la relación de vacíos máxima es de $e = 1.338$.

Se utilizó la curva de retención suelo-agua para calcular los valores de succión correspondientes. Con la ecuación (5.4) se obtuvieron los valores de esfuerzo efectivo P' y estos se graficaron contra la relación de vacíos en la Figura 7.20.

Por medio de la Figura 7.20 se obtuvieron los parámetros κ y λ para la muestra con un grado de saturación $G_w = 40\%$.

Tabla 7.3. Resultados de pendiente κ y λ para un grado de saturación $G_w = 40\%$

κ	λ
0.04240	0.21784

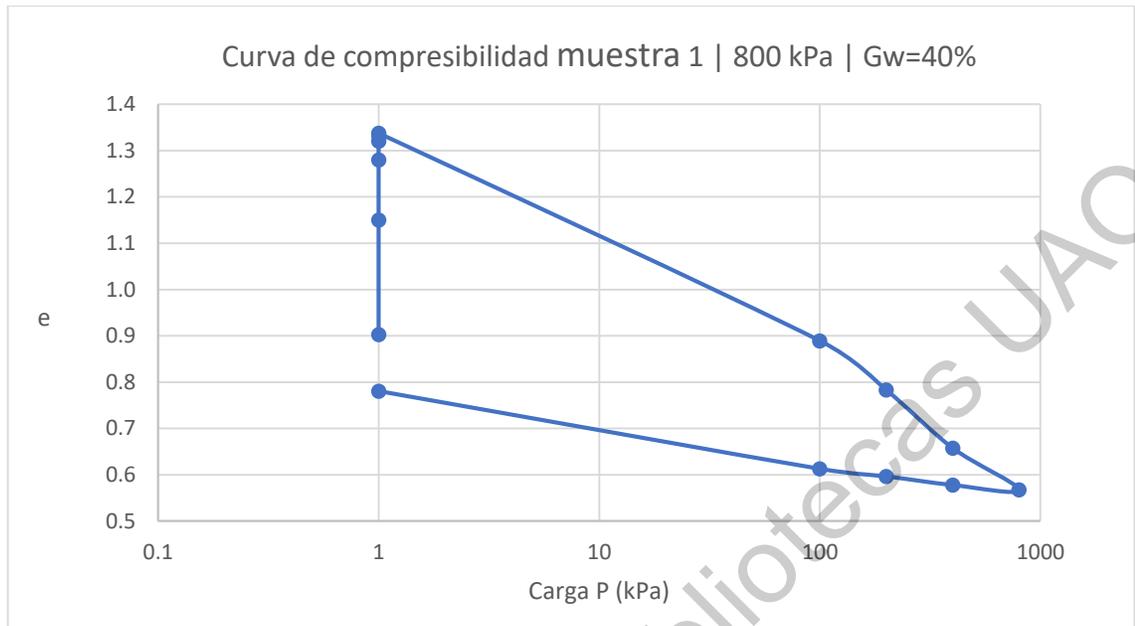


Figura 7.19 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial Gw=40% saturada en 5 incrementos de agua.

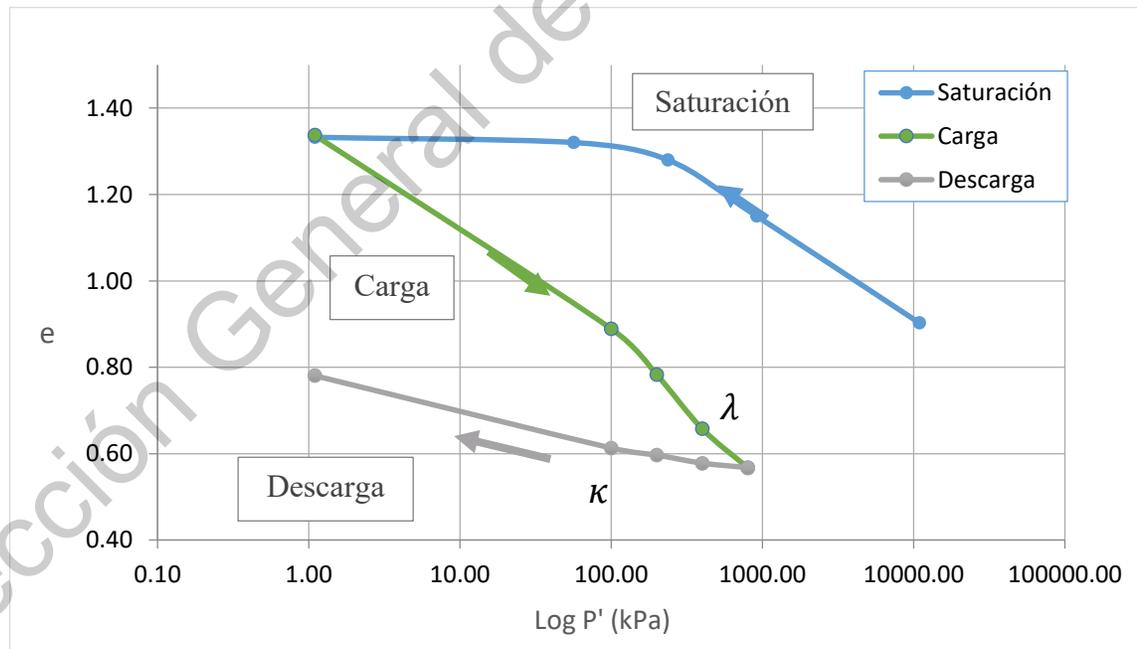


Figura 7.20 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial Gw=40% utilizando esfuerzos efectivos.

La segunda prueba se realizó secando el suelo inalterado en el horno. Una vez seco se labró en el anillo de consolidación y se logró tener un grado de saturación de $G_w = 13\%$, el cual corresponde a una humedad de $w = 3\%$.

Se observa que la relación de vacíos máxima es de $e = 1.234$, el cual es un valor menor que la relación de vacíos máxima ($e = 1.338$) de la curva de compresibilidad de la muestra con humedad inicial $G_w = 40\%$. Esto se debe a que, en el tercer incremento de agua, el consolidómetro llegó a su límite en la palanca, y aunque se siguieron haciendo los incrementos de agua, el medidor se quedó en la misma lectura, por lo que el valor de e máximo para muestras secas es mayor a 1.23. En el trabajo realizado por (Verdín Montes, 2018) en el mismo suelo, se reporta una relación de vacíos máxima para suelo seco de $e = 1.5$, por lo que se tomará ese valor como máximo.

Al igual que con la muestra 1, se utilizó la curva de retención suelo-agua para calcular los valores de succión correspondientes y estos se graficaron contra la relación de vacíos en la Figura 7.22.

Por medio de la Figura 7.22 se obtuvieron los parámetros κ y λ para la muestra con un grado de saturación $G_w = 13\%$.

Tabla 7.4 Resultados de pendiente κ y λ para un grado de saturación $G_w = 13\%$

κ	λ
0.0356	0.2111

Se observa que los resultados de los índices κ y λ son mayores para el grado de saturación $G_w = 40\%$ y estos disminuyen para la muestra con grado de saturación $G_w = 13\%$.

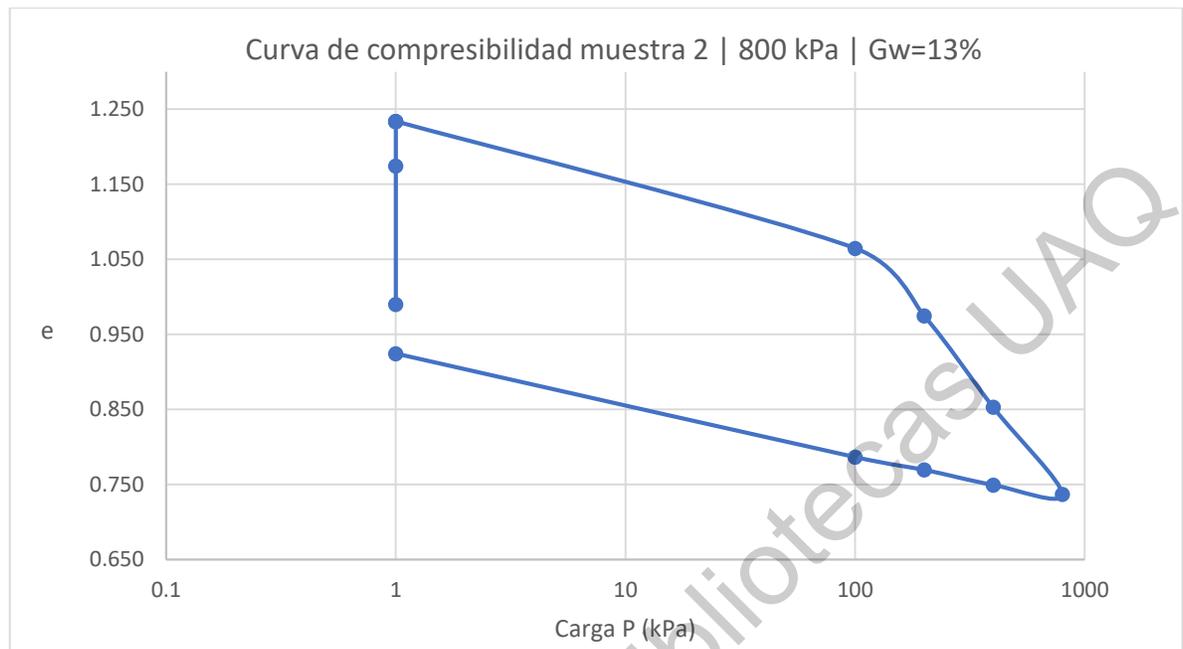


Figura 7.21 Curva de compresibilidad de la muestra 2 con un grado de saturación inicial Gw=13% saturada en 5 incrementos de agua.

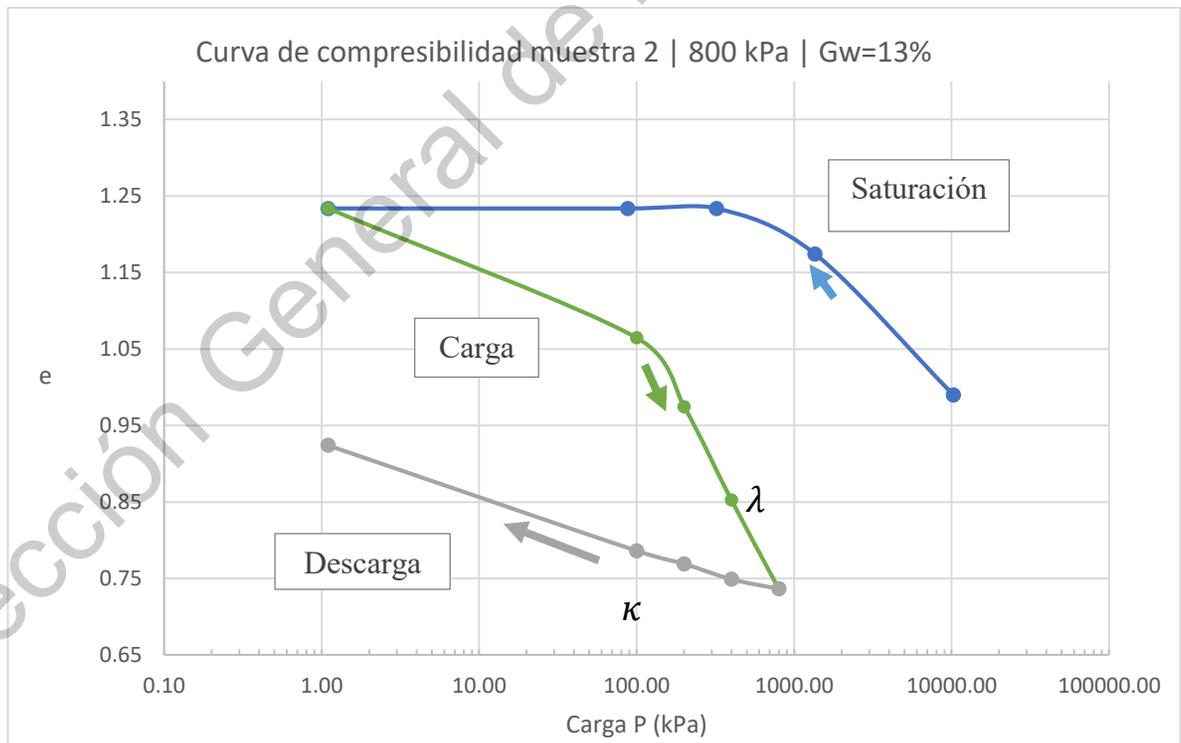


Figura 7.22 Curva de compresibilidad de la muestra 1 con un grado de saturación inicial Gw=13% utilizando esfuerzos efectivos.

7.5 Variación de volumen con prueba de límite de contracción por inmersión en mercurio (trayectoria de secado)

En la Figura 7.23 se observan los resultados de 3 muestras graficados en los ejes de volumen contra humedad, utilizando la prueba de variación de volumen por inmersión en mercurio, mientras que en la Figura 7.24 se grafican los mismos resultados pero en función del logaritmo del tiempo. Se observa que a partir de la medición inicial pasaron 50 h aproximadamente para la segunda medición. Esto se debió a la consistencia del suelo, siendo 2 días el tiempo necesario para que las muestras se pudieran manipular y medir con el mercurio, ya que antes de eso el suelo se encuentra en un estado muy líquido.

Si vemos el volumen de la muestra a las 50 h (Figura 7.24), corresponde a 23 cm^3 promedio, lo cual en la Figura 7.23 es 40% de humedad. Este valor es cercano al límite plástico en la Figura 7.3, por lo que se puede recomendar que de forma general se comience a realizar las mediciones con la metodología de inmersión en mercurio cuando la humedad se encuentra cerca del valor del Límite Plástico.

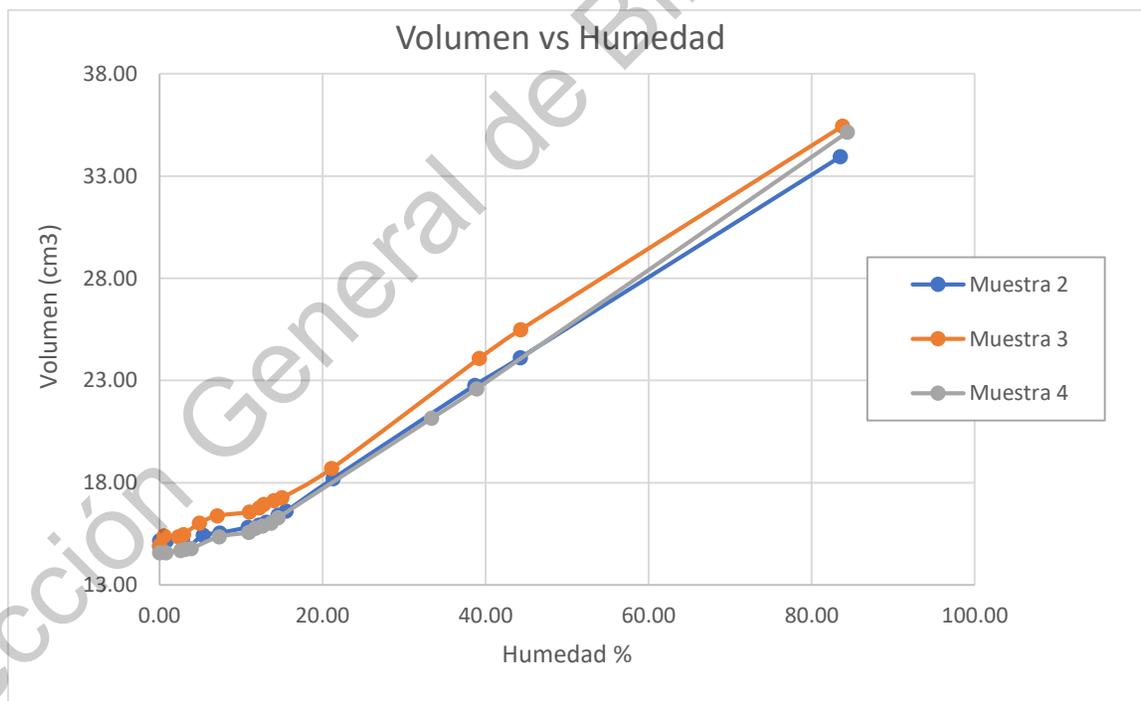


Figura 7.23 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (volumen vs humedad).

En la Figura 7.24 se observa que entre las 170 h (15 días) y 22,000 h (16 días), el cambio volumétrico fue muy bajo, por lo que al ver que al día 16 ya no había cambios volumétricos comparados con el día anterior, se procedió a meter las muestras al horno y sacarlas a cada hora para

medir nuevamente el volumen con mercurio hasta llegar a la medición de la muestra completamente seca.

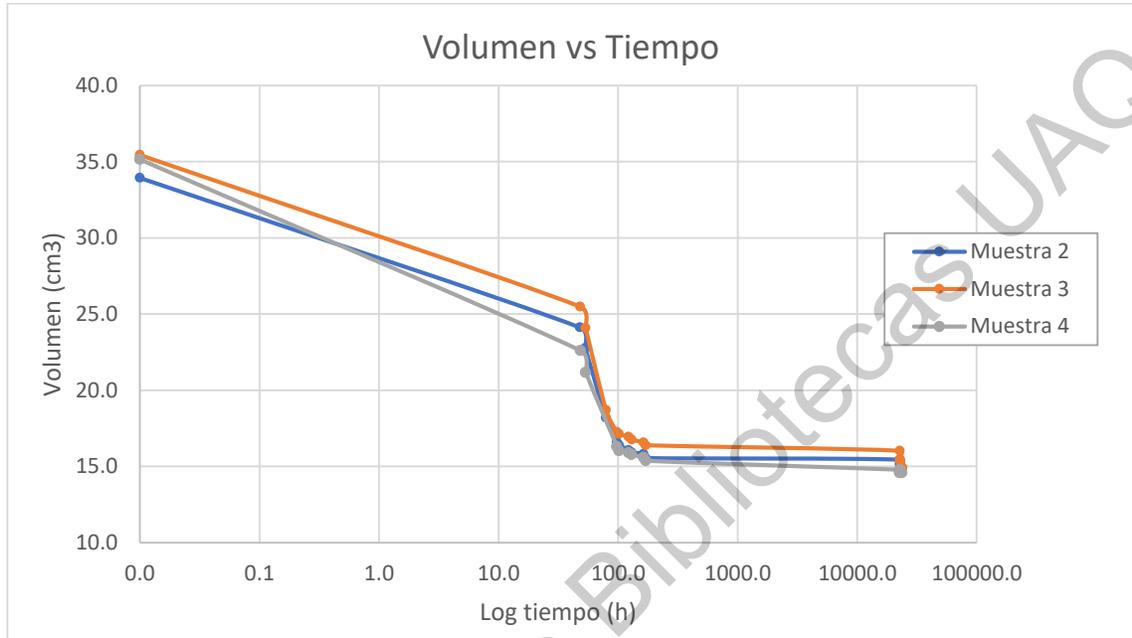


Figura 7.24 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (volumen vs log tiempo).

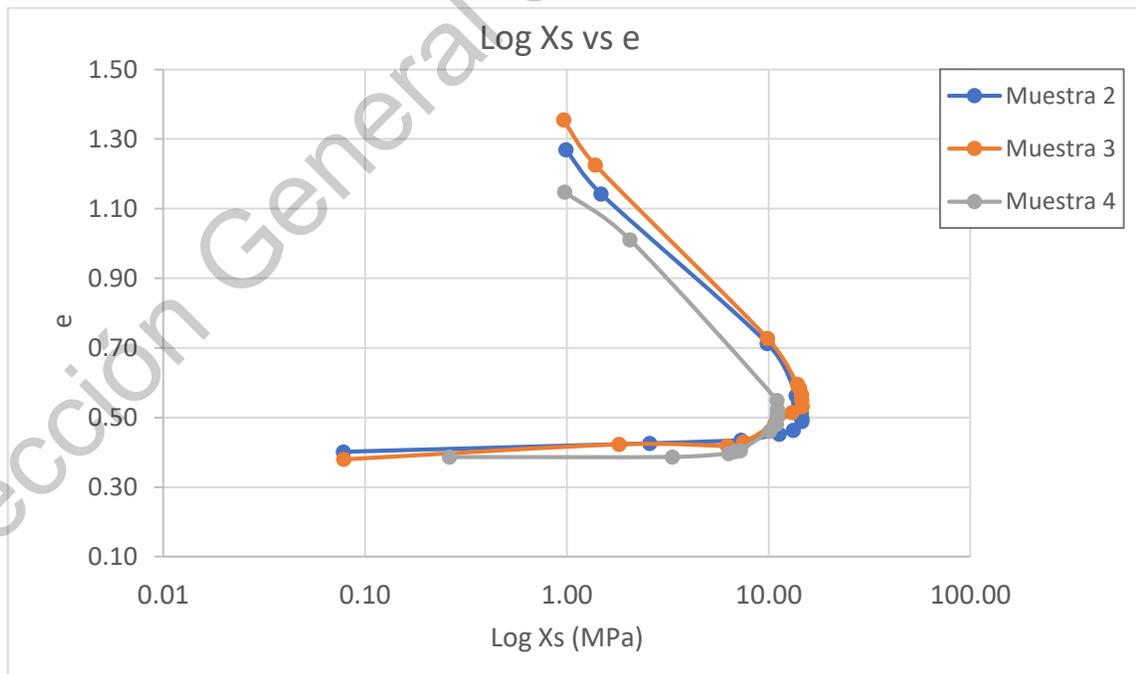


Figura 7.25 Resultados de prueba de variación volumétrica por inmersión en mercurio (e vs log Xs).

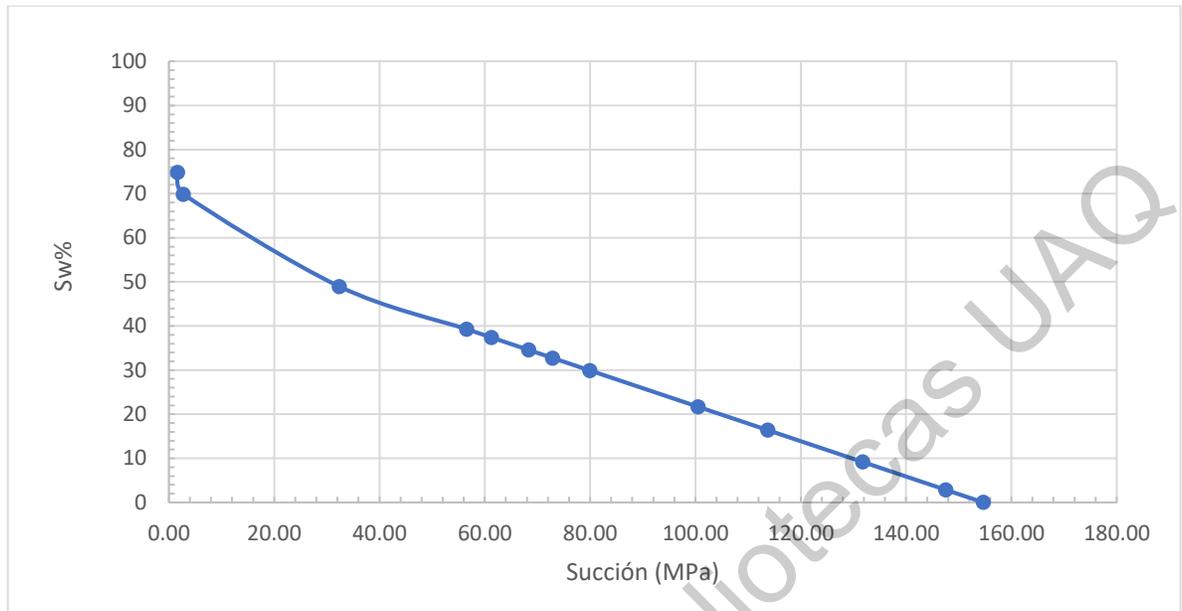


Figura 7.26 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs succión).

Utilizando la curva de retención suelo-agua y considerando el valor de $\chi = \chi_{corr}$ obtenido con el modelo de Rojas, se presenta en la Figura 7.25 los resultados de las 3 muestras graficados en los ejes de relación de vacíos vs $\log \chi_s$. Se observa que las muestras llegan a un valor máximo de $\chi_s = 14.6$ Mpa y después comienza a disminuir hasta llegar a un valor de $\chi_s = 0.07$ Mpa. Esto se debe a que a pesar del gran aumento de succión que hay cuando las muestras se van secando (lo cual puede observarse en la Figura 7.26), el valor de χ comienza a disminuir de tal manera que al llegar al valor de $\chi = 0.2$ Mpa ($\chi_s = 14.6$ Mpa), la multiplicación de χ_s comienza a disminuir.

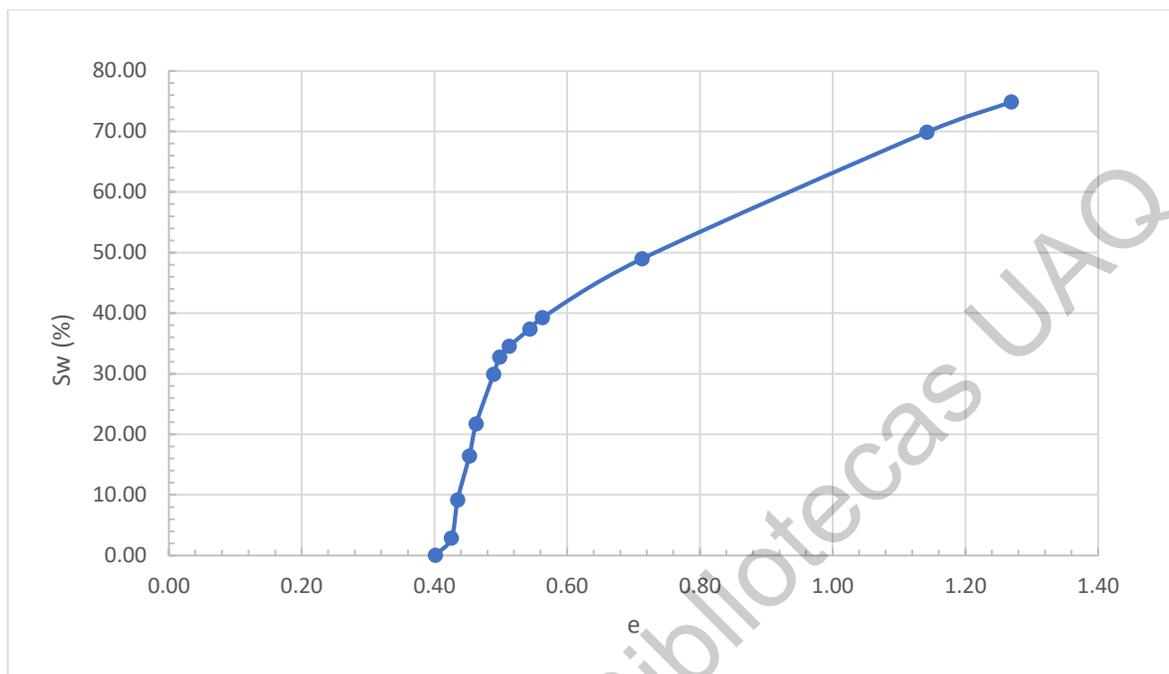


Figura 7.27 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs relación de vacíos).

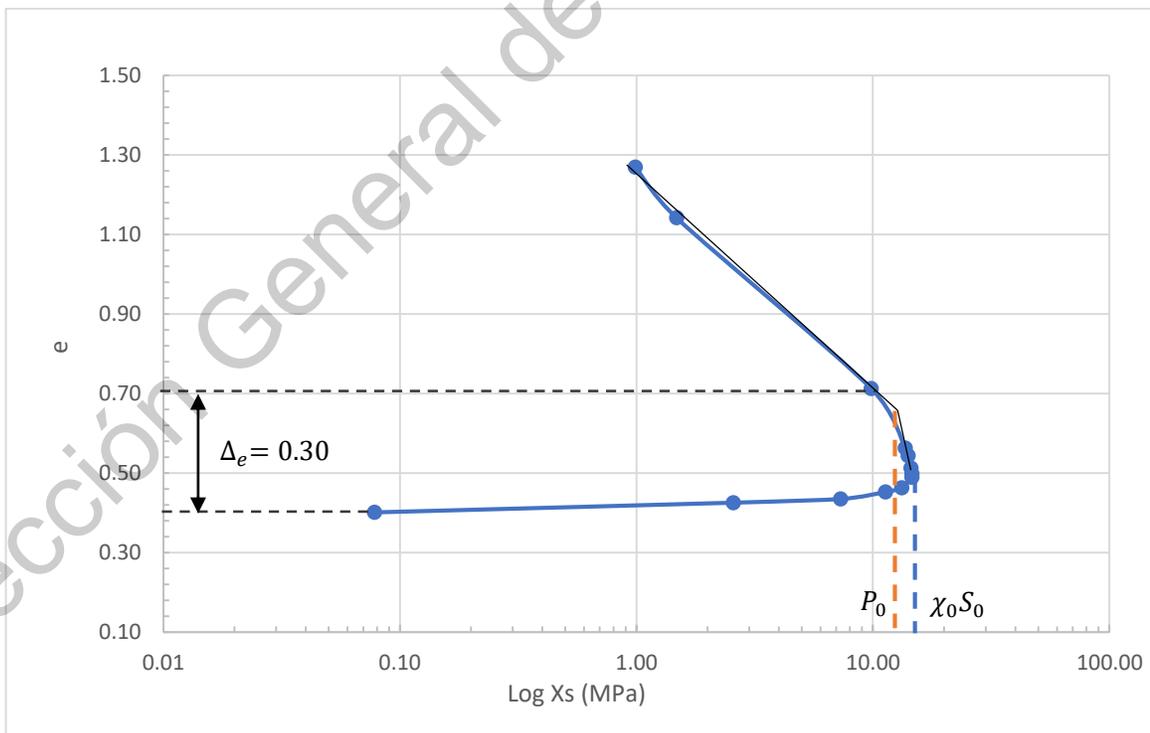


Figura 7.28 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (relación de vacíos vs log Xs).

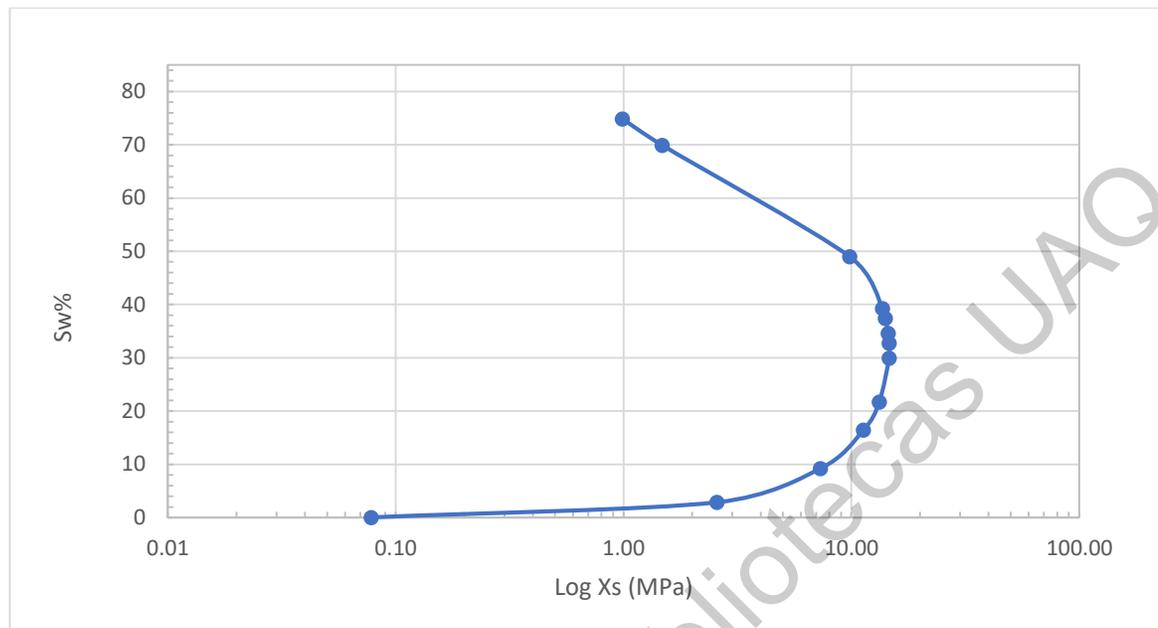


Figura 7.29 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Grado de saturación vs log Xs).

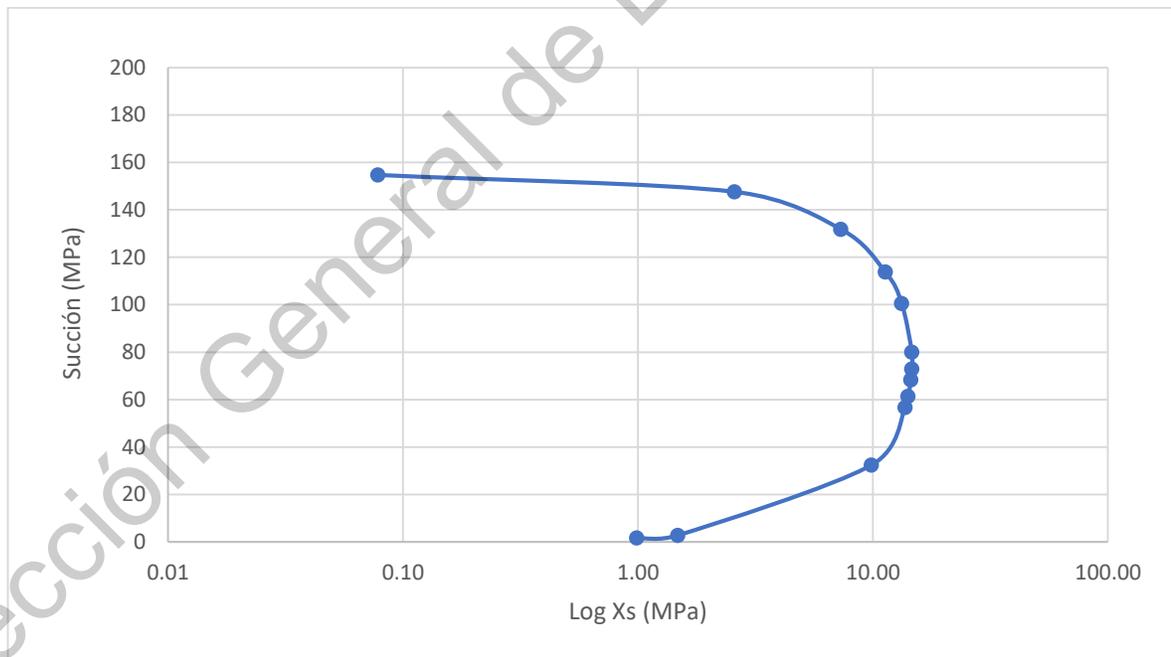


Figura 7.30 Resultados de la muestra 2 en la prueba de límite de contracción (Succión vs log Xs).

En la Figura 7.27 se observa un cambio de pendiente en el rango de 30 a 40% de grado de saturación, lo que significa que la muestra ha pasado por grados de saturación del 100% hasta un 35% aproximadamente mediante ciclos de humedecimiento y secado. Esto nos indica que la muestra en estado natural no ha pasado por un secado más allá del 35% de grado de saturación (que corresponde

a un 10.5% de humedad). Así que al secar la muestra del 35% a 0% de grado de saturación se genera un cambio de pendiente que indica un comportamiento elastoplástico.

El valor que se presenta en el cambio de pendientes de la Figura 7.28 corresponde al límite entre el comportamiento elástico y elastoplástico, el cual es el estado de preconsolidación (P_0). La relación de vacíos que se genera por secado al aire en la prueba de límite de contracción (Figura 7.27) corresponde a $e=0.7$. Por lo tanto, la variación de relación de vacíos máxima que se genera por secado en el horno corresponde a $\Delta e = 0.30$ (entre el primer punto del estado elastoplástico y el último).

De la misma forma podemos obtener la variación de relación de vacíos de los 2 grupos de muestras que se hicieron en las pruebas oedométricas. Tomando la relación de vacíos en la Figura 7.27 que corresponde a la humedad del primer grupo $w=4\%$ resulta $\Delta e = 0.7 - 0.45 = 0.25$ y para el segundo grupo $w=15.4\%$ resulta $\Delta e = 0.7 - 0.67 = 0.03$. Estos se representan en la Figura 7.31 como líneas horizontales con los cuales se puede obtener el endurecimiento por succión ($\chi_0 S_0$) que representa el límite de la superficie de fluencia de colapso inicial como lo indica (Verdín Montes, 2018).

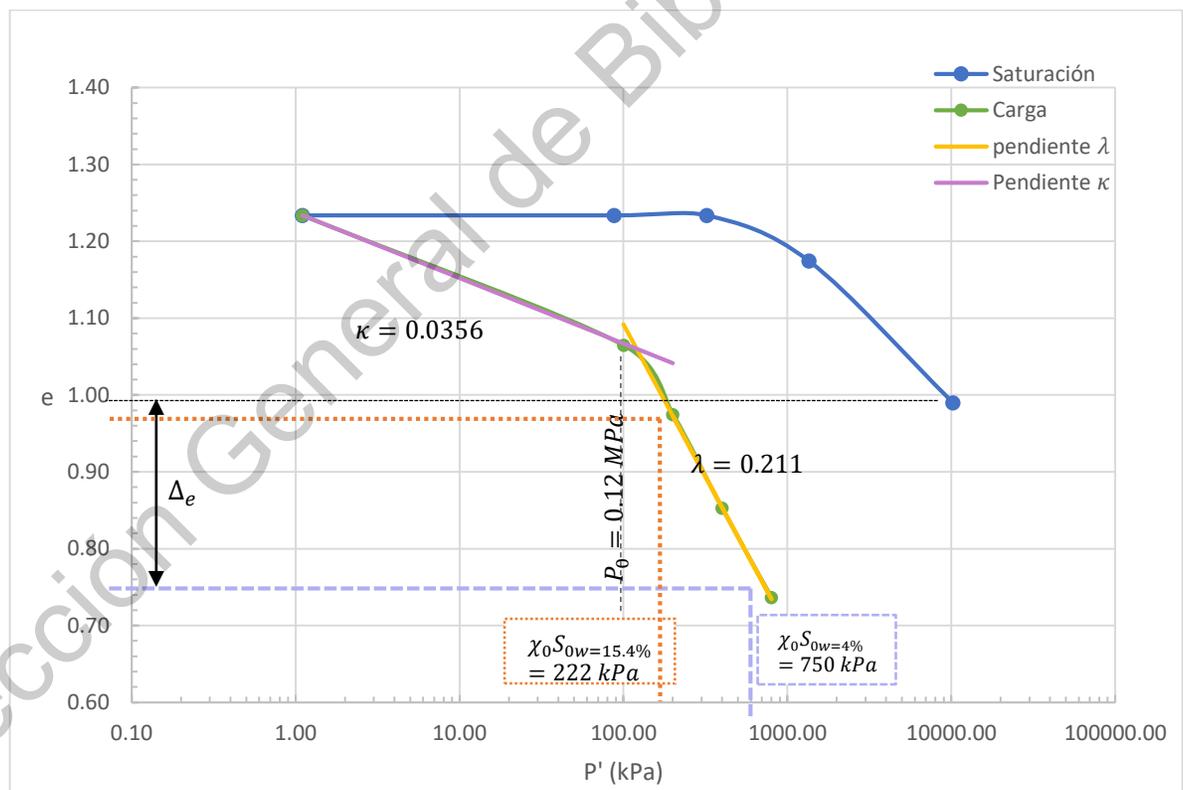


Figura 7.31 Curva de compresibilidad en términos de esfuerzos efectivos.

7.6 Comparaciones teórico – experimentales

Para expresar en un marco elastoplástico los resultados de la sección anterior, son necesarios los parámetros que fueron obtenidos mediante la curva característica suelo-agua y mediante el método de pendiente carga-descarga, los cuales se resumen en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 Parámetros para expresar los resultados obtenidos en un marco elastoplástico de esfuerzos efectivos.

Profundidad de extracción=	1.9 m
Ss=	2.55
W0 en campo=	39.36%
W0 promedio después del secado al aire=	15.40%
W0 promedio después del secado en el horno=	4%
Gw promedio w=15.4%=	46.30%
Gw promedio w= 4%	17.50%
Xo corr * S0 max=	Gw=32.75%
W promedio Gw=32.75%	12.21%
So Gw=32.75% =	72.85 Mpa
X0 corr * S0 Gw=32.75% =	14.63 Mpa
S0 promedio Gw=46.3% (obtenida de curva de retención secado) =	35 Mpa
X0 corr *S0 Gw=46.3% (obtenida de curva de retención secado) =	10.19 Mpa
S0 promedio Gw=17.5% (obtenida de curva de retención secado) =	88.66 Mpa
X0 corr *S0 Gw=17.5% (obtenida de curva de retención secado) =	9.39 Mpa
S0 promedio Gw=46.3% (obtenida por pendientes) =	0.7928 Mpa
X0S0 Gw=46.3% (obtenida de curva de pendientes) =	0.222 Mpa
S0 corr Gw=17.5% (obtenida por pendientes) =	7.08 Mpa
X0S0 Gw=17.5% (obtenida de curva de pendientes) =	0.75 Mpa

La construcción de la trayectoria de secado se realiza utilizando la curva de retención suelo-agua. Se delimita la parte superior de la superficie de fluencia de colapso bajo carga (LCYS) utilizando los valores de succión S_0 (para el grupo de $w=15.4\%$) y S_f (para el grupo de $w=12.2\%$). La LCYS se desplaza hacia la derecha de la trayectoria de secado en una cantidad $\chi_0 S_0$, como se observa en la Figura 7.32. Los resultados se muestran en la Figura 7.33 y Figura 7.34.

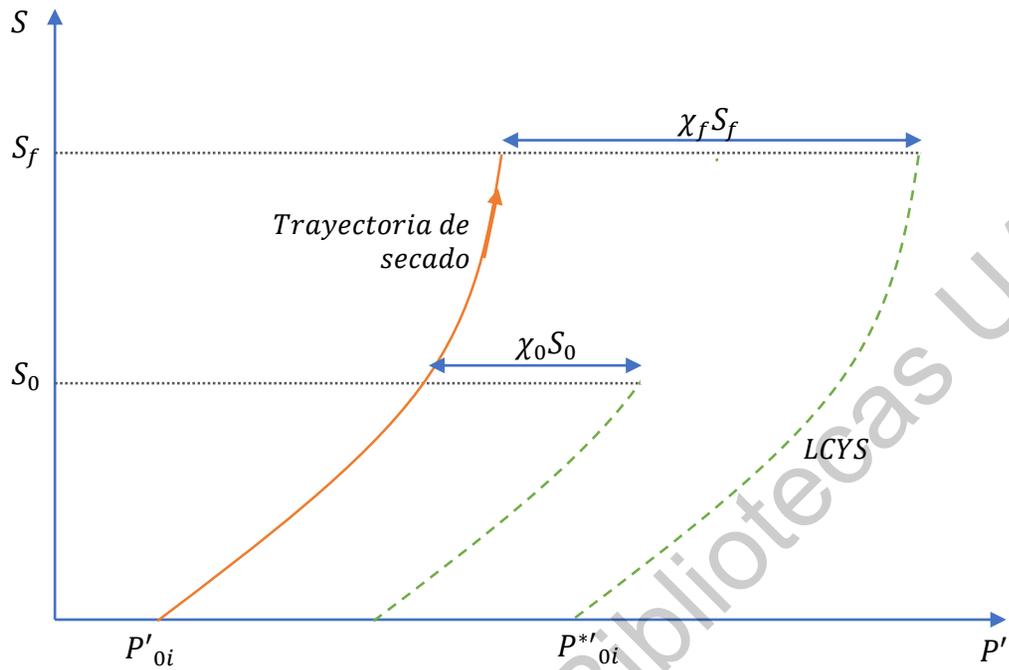


Figura 7.32 Representación de la superficie de colapso bajo carga (LCYS) después de la trayectoria de secado.

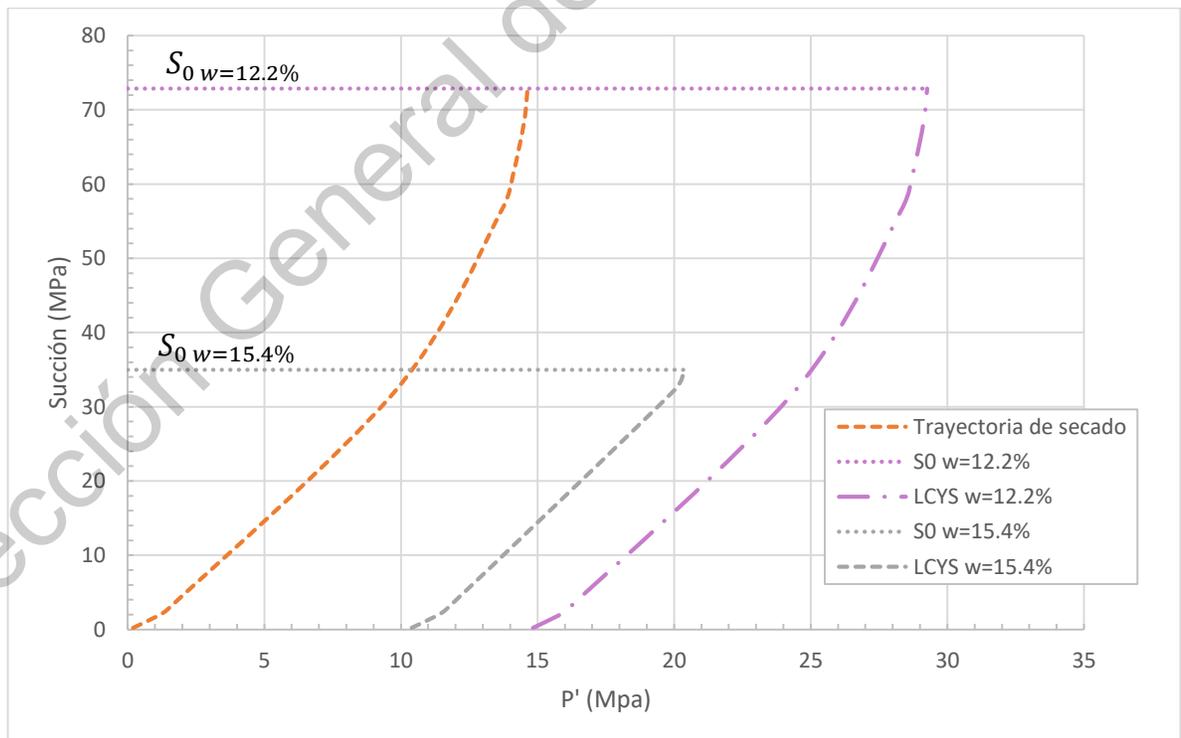


Figura 7.33 Trayectoria de secado y superficies de fluencia de colapso bajo carga (LCYS) para cada grupo de muestras mediante el uso de la curva de retención.

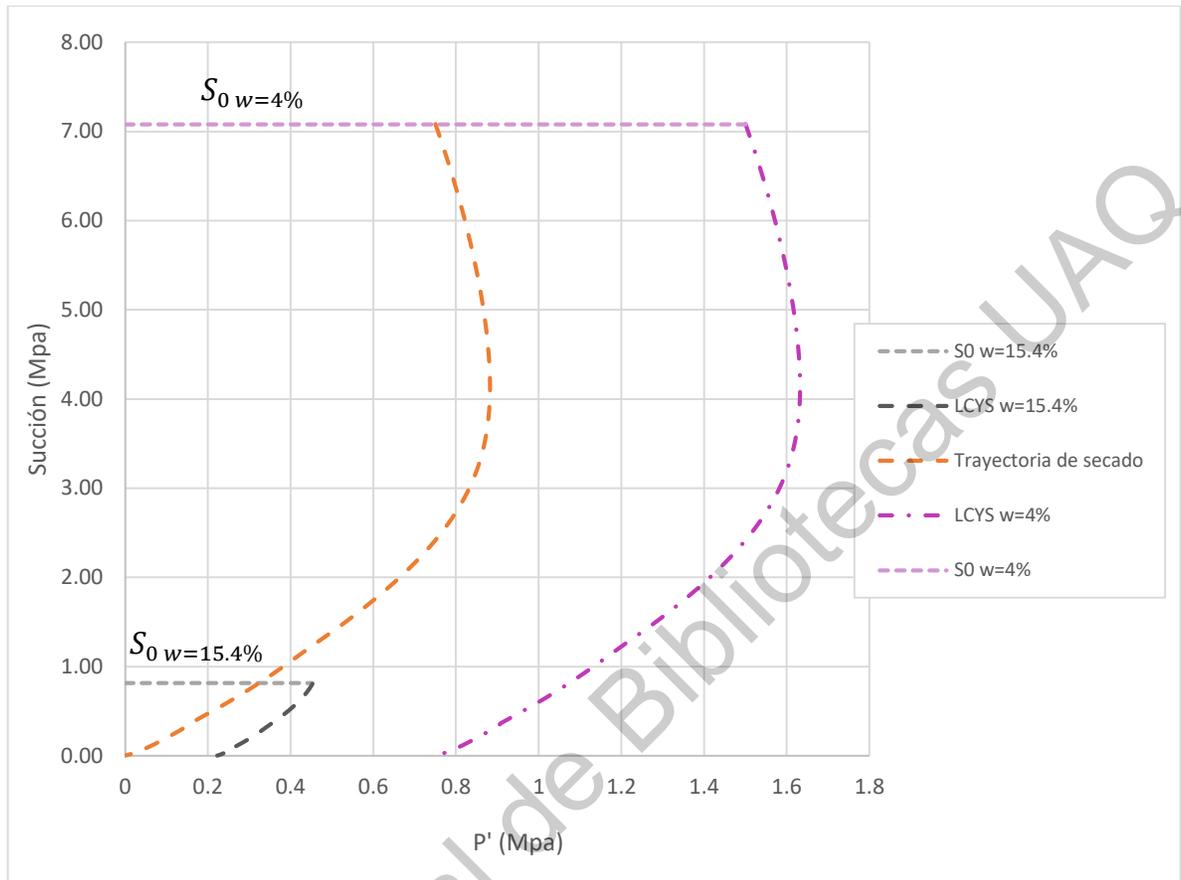


Figura 7.34 Trayectoria de secado y superficies de fluencia de colapso bajo carga (LCYS) para cada grupo de muestras mediante el uso de curva de compresibilidad.

En la Tabla 7.6 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=15.4\%$, la cual fue cargada a 200 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Es necesario utilizar un factor de ajuste de succión, el cual se muestra en la Tabla 7.6. Este factor fue calculado dividiendo el valor de succión de la curva de retención para un grado de saturación $S_w = 46\%$ entre el valor de succión promedio obtenido para el mismo grado de saturación, pero mediante el método de pendientes, el cual se muestra en la Tabla 7.5.

$$\text{Factor de ajuste succión}_{S_w=46\%} = \frac{35 \text{ Mpa}}{0.7928} = 44.14 \quad (7.1)$$

Para obtener el parámetro de escaneo de las curvas de retención suelo-agua, se realizó el cálculo del parámetro 1, el cual se obtuvo mediante la división de la succión en la trayectoria de humedecimiento y el valor de la succión de la trayectoria de secado para el valor de grado de saturación $S_w = 95\%$ que corresponde al último incremento de agua.

$$\text{Parámetro 1 escaneo} = \frac{0.0296 \text{ Mpa}}{0.0394 \text{ Mpa}} = 0.75 \quad (7.2)$$

El parámetro 2 de escaneo se obtuvo mediante la división del parámetro 1 y el número de intervalos que se asignó desde el grado de saturación inicial $S_w = 46\%$ hasta el grado de saturación del último incremento de agua $S_w = 95\%$.

$$\text{Parámetro 2 escaneo} = \frac{0.75}{50} = 0.014 \quad (7.3)$$

Finalmente, el valor de succión (escaneo) se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Succión (escaneo)} = \frac{\text{Succión ajustada}}{1 + [(\text{parámetro 2 de escaneo}) * \text{número de intervalo}] \quad (7.4)$$

Tabla 7.6 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 200 kPa con $S_{wo} = 46\%$.

Pc=	0.2 Mpa
Gw=	46 %
S0=	0.80406 Mpa
λ =	-0.21
e después de carga=	0.524
Parámetro de ajuste de succión=	44.14
Parámetro 1 escaneo=	0.7500
Parámetro 2 escaneo=	0.01499
X0S0=	0.222 Mpa

Para realizar el cálculo del esfuerzo efectivo P' se utiliza la ecuación de Bishop (5.4) y para la relación de vacíos teórica se utiliza la ecuación (2.6). Es necesario calcular el valor de densidad relativa para cada nuevo valor de e , utilizando la ecuación (2.16) y con ese valor calcular el índice de expansión λ_{ex} utilizando la ecuación (2.14).

En la Figura 7.35 se observa la trayectoria de secado, seguida del incremento de carga realizado ($\Delta P_c = 200 \text{ kPa}$). Puede notarse que la trayectoria de humedecimiento no cruza a la superficie de colapso bajo carga, por lo cual solo se presentan expansiones, las cuales se ven reflejadas en la Figura 7.36

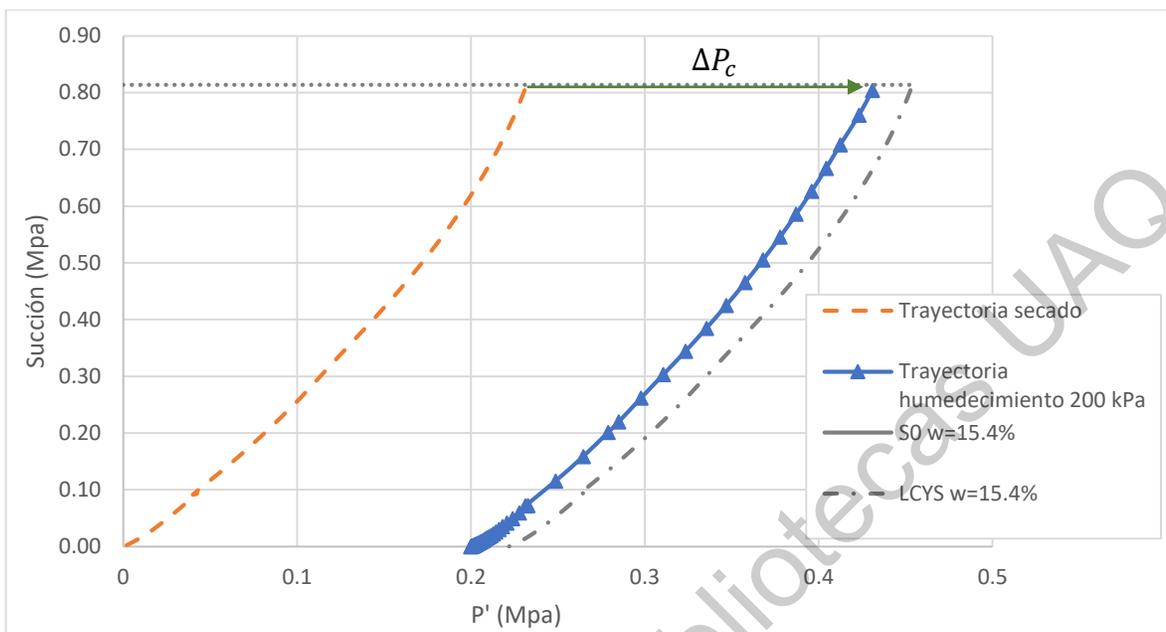


Figura 7.35 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$.

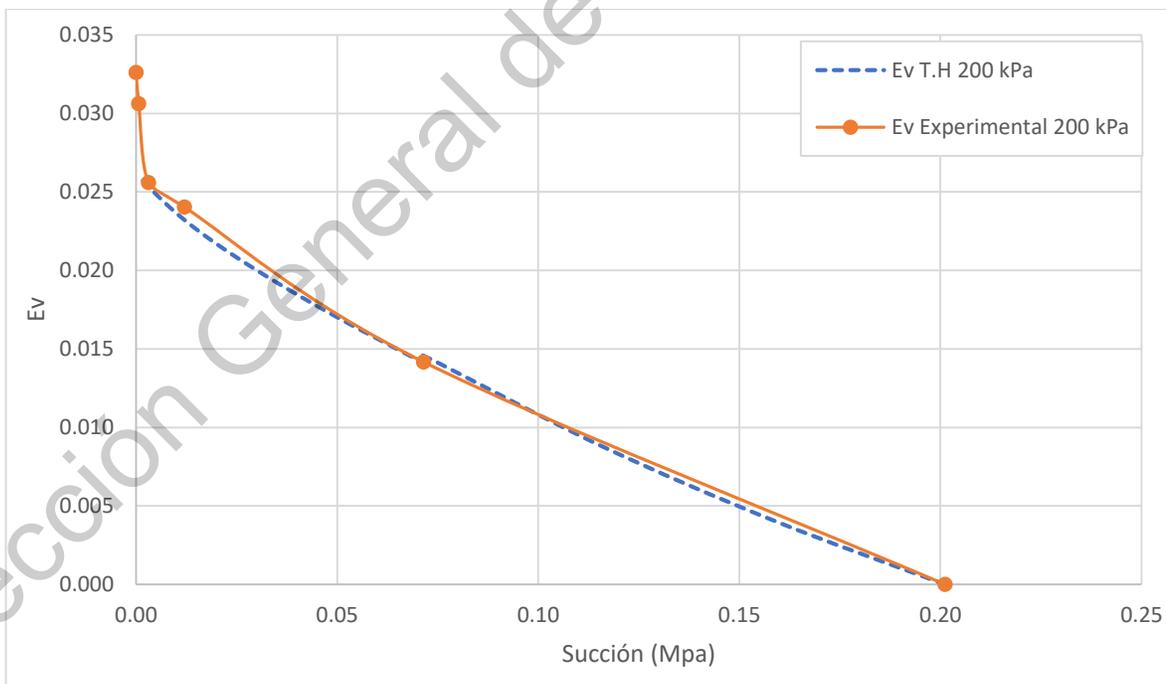


Figura 7.36 Deformación volumétrica de muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$.

En la Tabla 7.7 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=15.4\%$, la cual fue cargada a 350 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Debido a que la carga aplicada (350 kPa) sobrepasa el valor de superficie de colapso bajo carga LCYS (Figura 7.35), es necesario calcular la nueva posición de la superficie de colapso utilizando la ecuación (2.12). Así mismo, el índice que debe utilizarse cuando la superficie de humedecimiento toca a la superficie de colapso será λ_{cex} , el cual se obtiene utilizando la ecuación (2.15). El desarrollo de los cálculos para el modelo teórico se encuentra en el anexo C3.

Tabla 7.7 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 350 kPa con $S_{wo} = 46\%$.

Pc=	0.35	Mpa
Gw=	46	%
S0=	0.80406	Mpa
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.408	
Parámetro de ajuste de succión=	44.14	
Parámetro 1 escaneo=	0.6307	
Parámetro 2 escaneo=	0.01287224	
X0S0=	0.222	Mpa
$\lambda =$	-0.21	

En la Figura 7.37 se observa que la superficie de colapso bajo carga cambia de posición si se compara con la superficie de colapso inicial (Figura 7.35) y la trayectoria de humedecimiento cruza la nueva superficie de colapso bajo carga. Este cruce genera expansión y colapso como se muestra en la Figura 7.38.

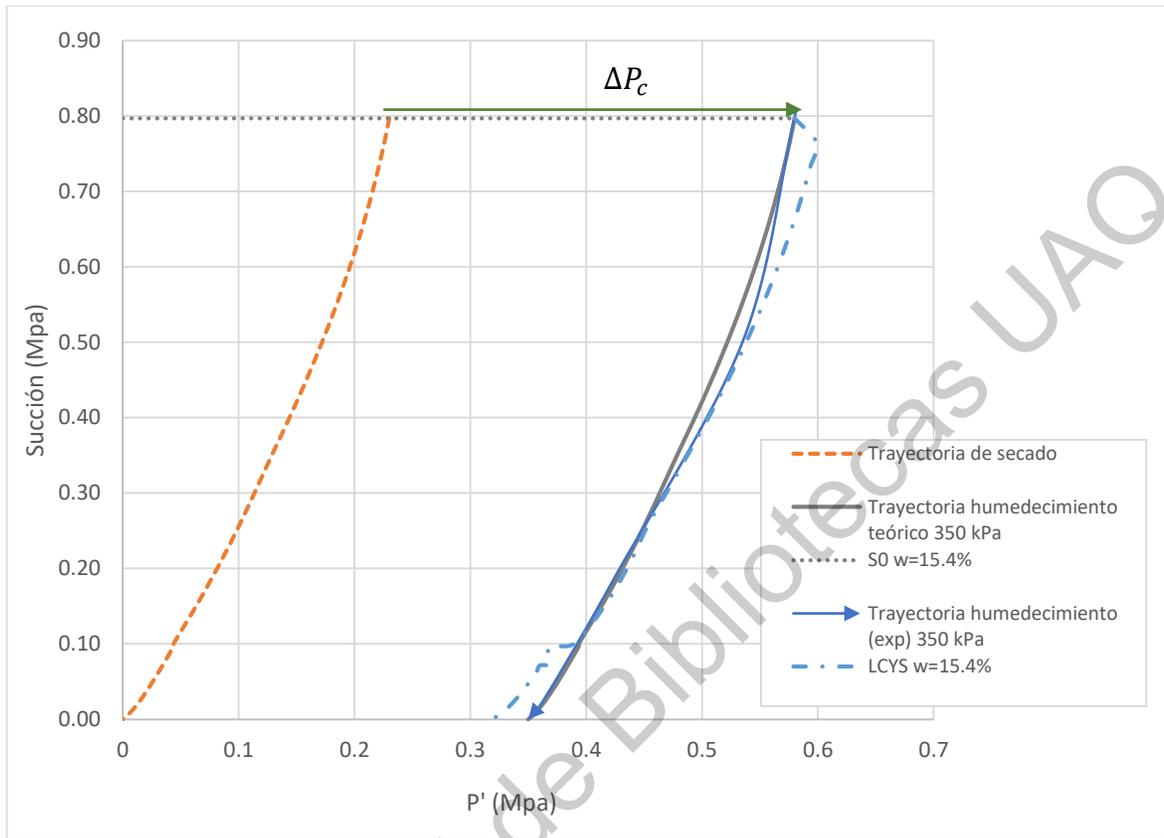


Figura 7.37 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 350 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$.

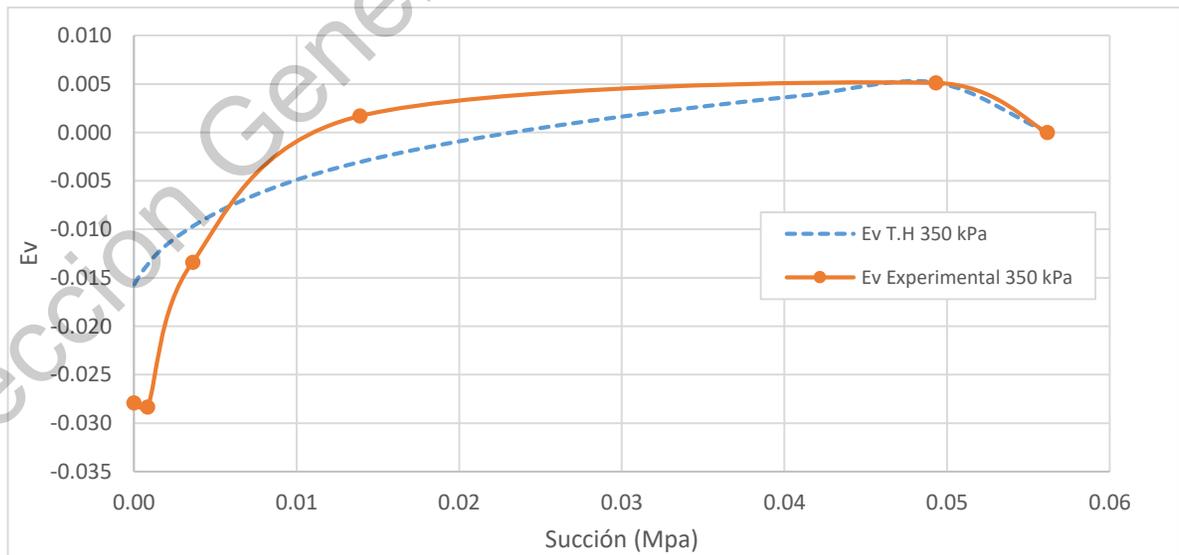


Figura 7.38 Deformación volumétrica de muestra cargada a 350 kPa con humedad inicial $w=15.4\%$.

En la Tabla 7.8 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=4\%$, la cual fue cargada a 200 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Tabla 7.8 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 200 kPa con $S_{w0} = 17.5\%$.

Pc=	0.2	Mpa
Gw=	17.5	%
S0=	7.080	Mpa
$\lambda =$	-0.21	
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.524	
Parámetro de ajuste de succión=	12.52	
Parámetro 1 escaneo=	0.6015	
Parámetro 2 escaneo=	0.00781	
X0S0=	0.75	Mpa

Se observa en la Figura 7.39 que la trayectoria de humedecimiento no cruza la superficie de colapso, por lo que se presenta expansión únicamente. El desfase que se presenta entre la deformación volumétrica teórica y la experimental (Figura 7.40) puede deberse a la pérdida de humedad al momento de realizar las pruebas en el consolidómetro, lo que ocasionaría que el valor de succión sea mayor de lo que se registró con cada incremento de agua.

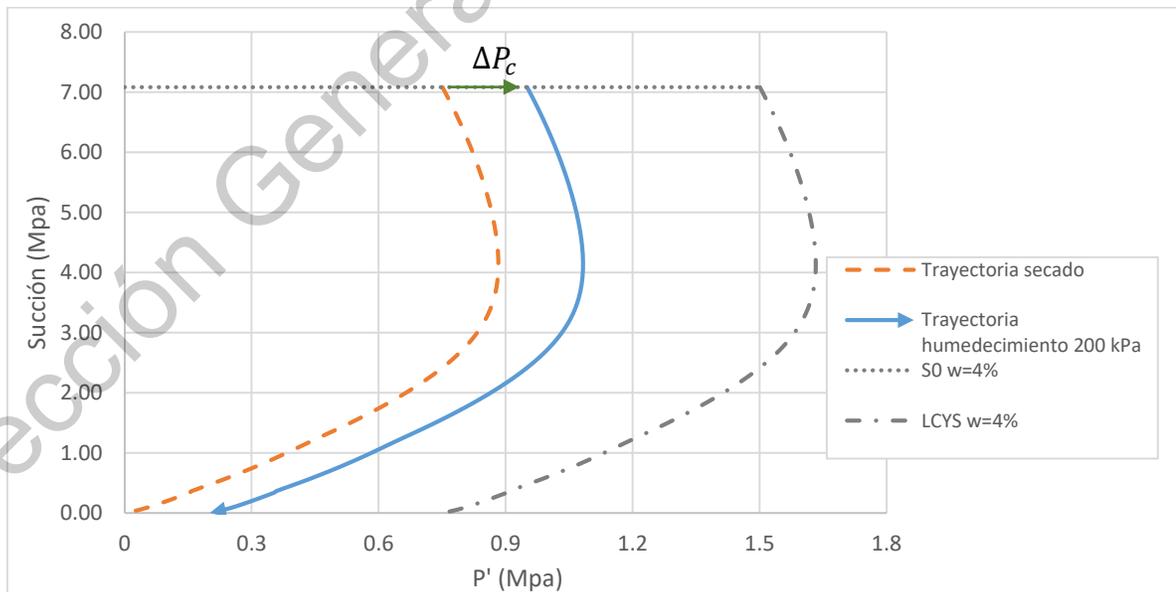


Figura 7.39 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

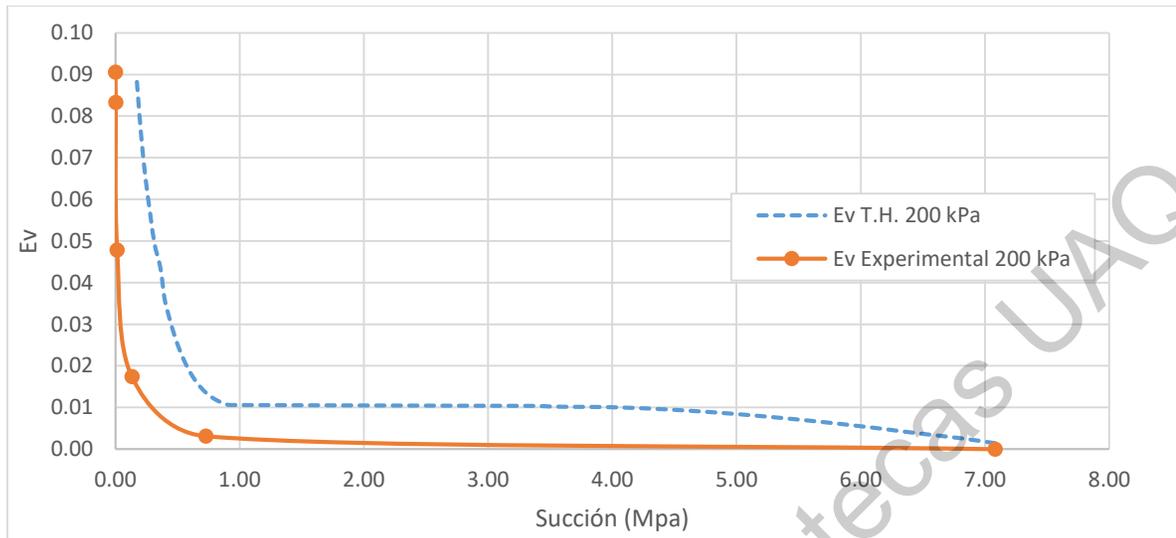


Figura 7.40 Deformación volumétrica de muestra cargada a 200 kPa con humedad inicial w=4%.

En la Tabla 7.9 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de w=4%, la cual fue cargada a 300 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Tabla 7.9 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 300 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$.

Pc=	0.3	Mpa
Gw=	17.5	%
S0=	7.080	Mpa
$\lambda =$	-0.21	
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.49540	
Parámetro de ajuste de succión=	12.52	
Parámetro 1 escaneo=	0.6630	
Parámetro 2 escaneo=	0.008499	
X0S0=	0.75	Mpa

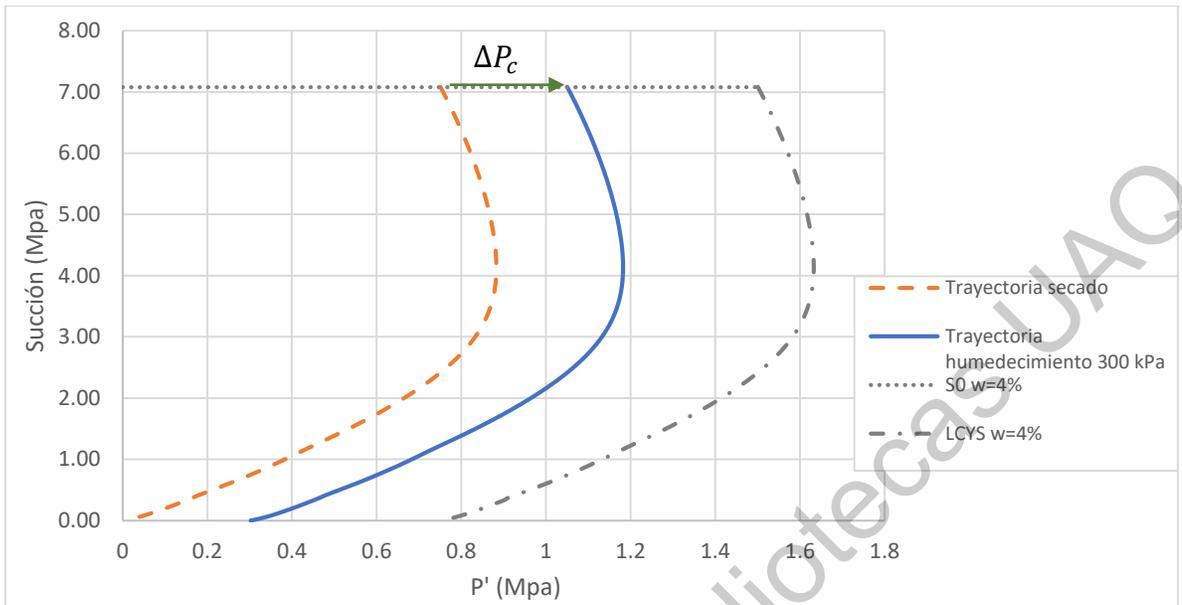


Figura 7.41 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 300 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

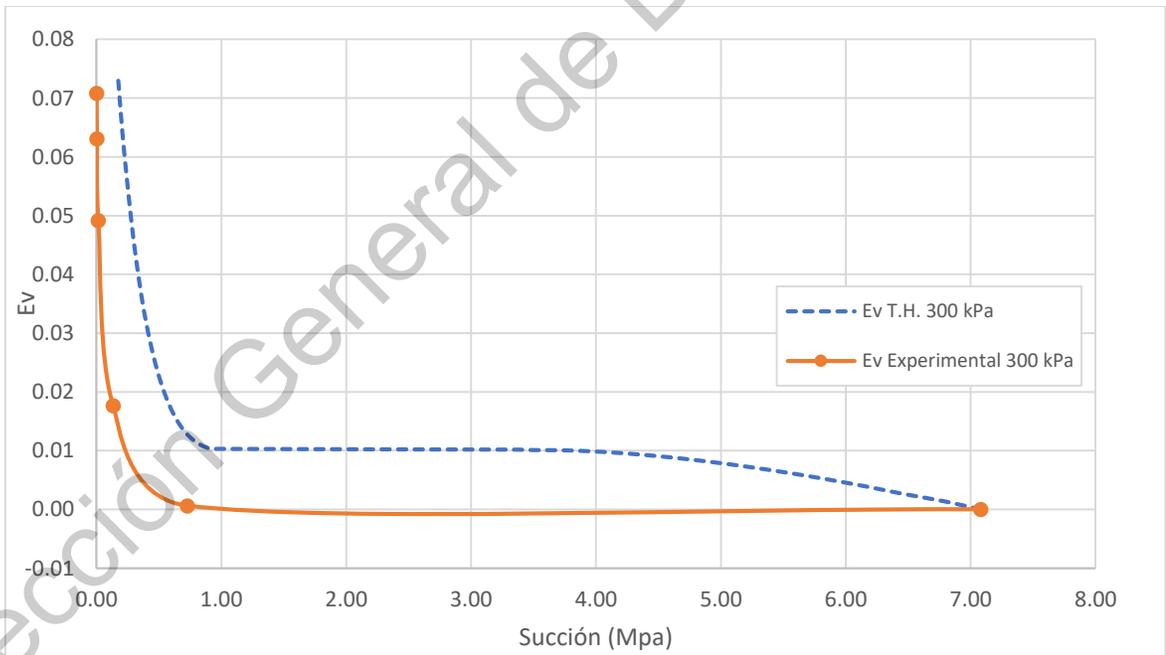


Figura 7.42 Deformación volumétrica de muestra cargada a 300 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

En la Tabla 7.10 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=4\%$, la cual fue cargada a 400 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Tabla 7.10 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 400 kPa con $S_{w0} = 17.5\%$.

Pc=	0.4	Mpa
Gw=	17.5	%
S0=	7.080	Mpa
$\lambda =$	-0.21	
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.48377	
Parámetro de ajuste de succión=	12.52	
Parámetro 1 escaneo=	0.6263	
Parámetro 2 escaneo=	0.00803	
X0S0=	0.75	Mpa

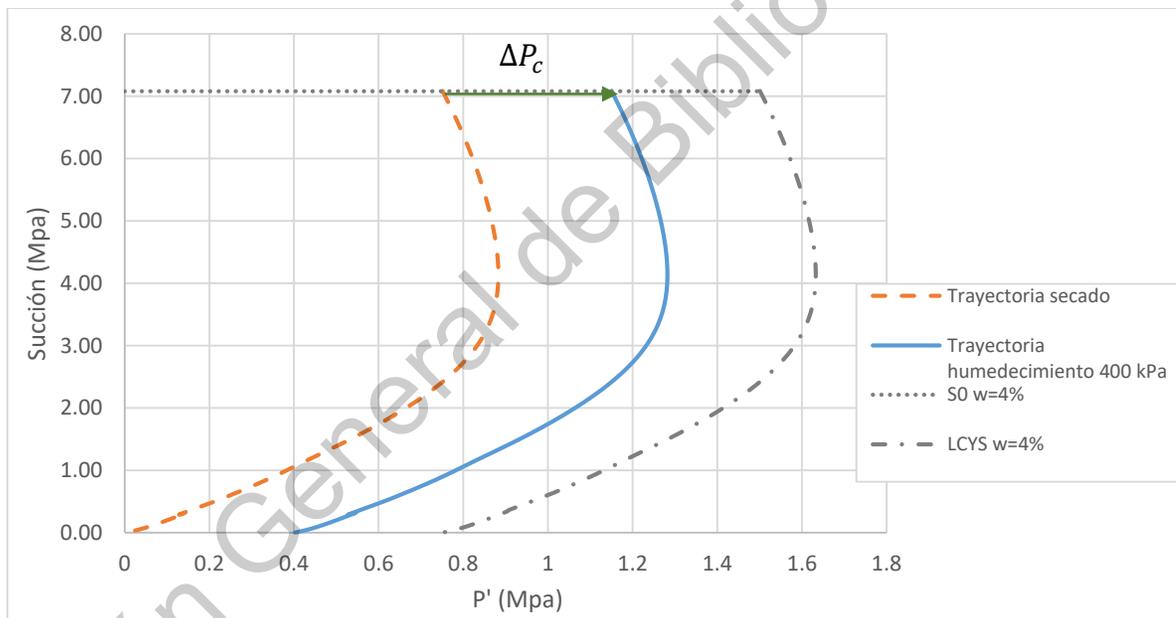


Figura 7.43 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 400 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

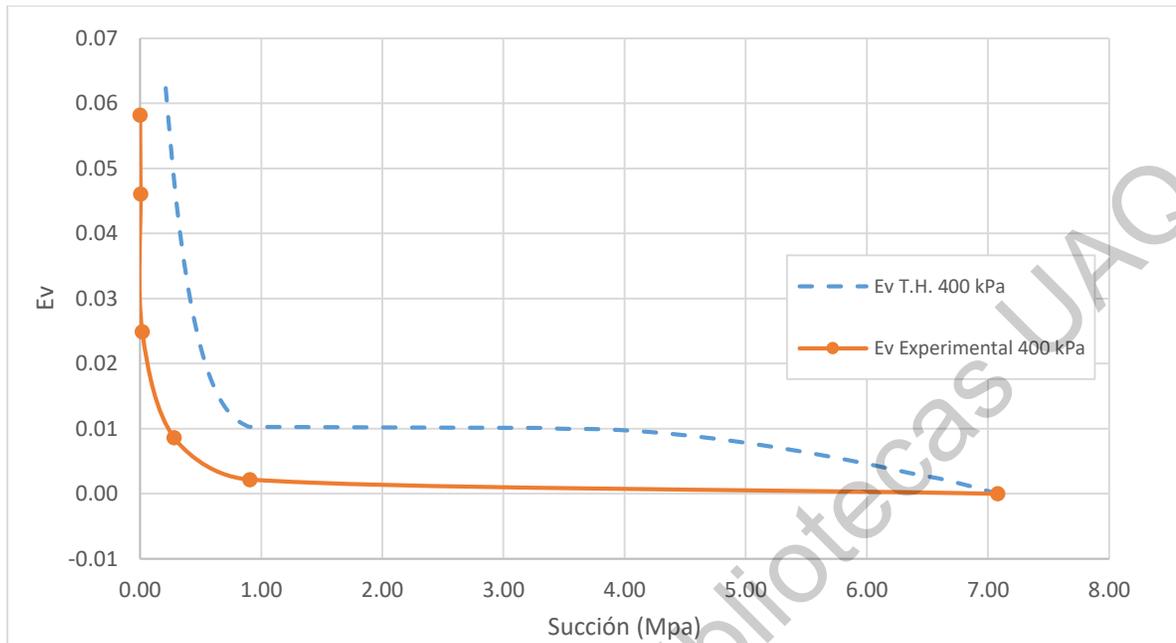


Figura 7.44 Deformación volumétrica de muestra cargada a 400 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

En la Tabla 7.11 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=4\%$, la cual fue cargada a 500 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Tabla 7.11 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 500 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$.

Pc=	0.5 Mpa	
Gw=	17.5	%
S0=	7.080	Mpa
$\lambda =$	-0.21	
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.49844	
Parámetro de ajuste de succión=	12.52	
Parámetro 1 escaneo=	0.6263	
Parámetro 2 escaneo=	0.00803	
X0S0=	0.75	Mpa

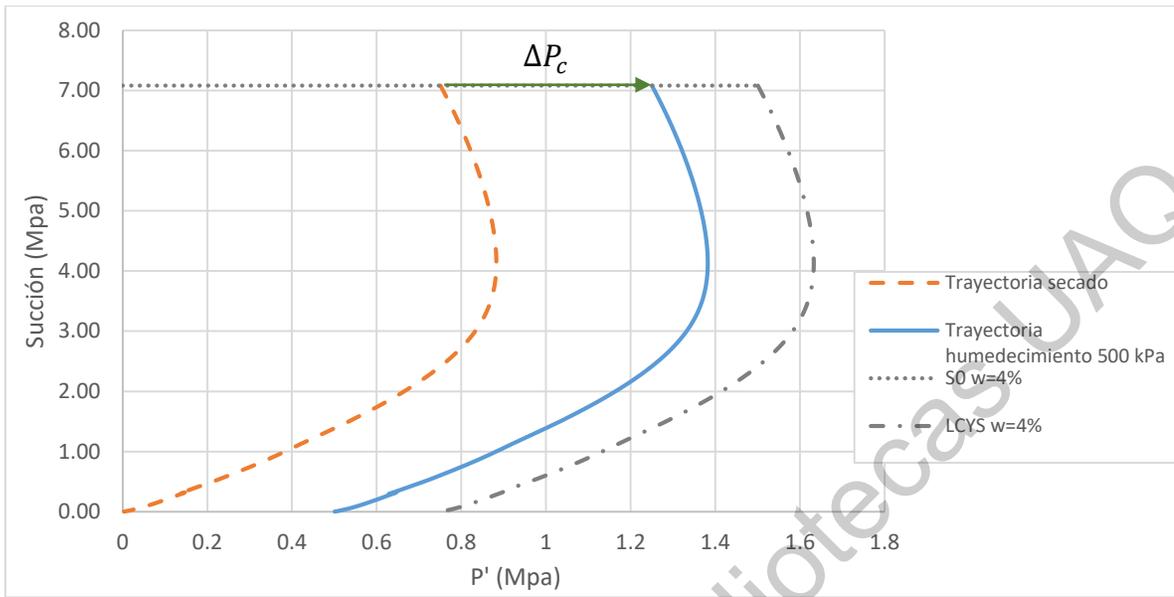


Figura 7.45 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 500 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

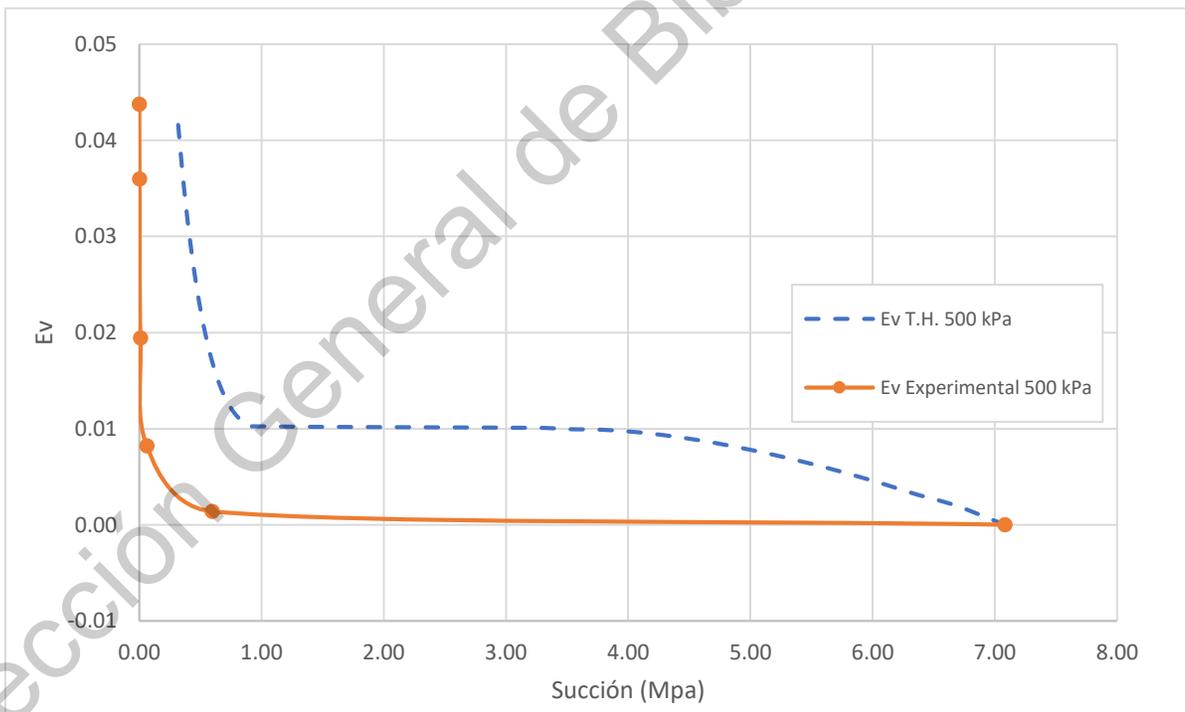


Figura 7.46 Deformación volumétrica de muestra cargada a 500 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

En la realización de las pruebas se planeó hacer incrementos de carga para el grupo de humedad $w=4\%$ de la siguiente manera: 200, 300, 400 y 500 kPa. Sin embargo, se observa en la Figura 7.45 que la trayectoria de humedecimiento no cruza la superficie de colapso, la cual indica que la presión de expansión sería aproximadamente de 800 kPa (0.8 Mpa). Por lo tanto, se decidió hacer una prueba con una carga mayor a ésta, para superar la superficie de colapso. Para decidir qué valor de carga aplicar,

se realizó una extensión de las líneas después de carga de la Figura 7.17 con los valores que se tenían hasta ese momento, que era hasta 500 kPa, y se obtuvo que la presión de expansión sería aproximada a 1200 kPa. Por lo tanto, se realizó la prueba con este valor de carga seguido de los incrementos de agua.

En la Tabla 7.12 se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para una muestra con humedad inicial de $w=4\%$, la cual fue cargada a 1200 kPa y después saturada en 5 incrementos.

Tabla 7.12 Parámetros para generar el modelo de muestra cargada a 1200 kPa con $S_{wo} = 17.5\%$.

Pc=	1.2	Mpa
Gw=	17.5	%
S0=	7.080	Mpa
k=	-0.0356	
e después de carga=	0.408	
Parámetro de ajuste de succión=	12.52	
Parámetro 1 escaneo=	0.6403	
Parámetro 2 escaneo=	0.0083156	
X0S0=	0.75	Mpa
$\lambda =$	-0.21	

Se observa en la Figura 7.47 cómo la trayectoria de humedecimiento supera la superficie de colapso, y los resultados teóricos de humedecimiento son similares a los experimentales.

En la Figura 7.48 se presenta la deformación volumétrica teórica, la cual expande primero y después colapsa, mientras que en los resultados experimentales se obtuvo que la muestra primero colapsa y después expande acercándose a la línea de deformación volumétrica igual a cero, por lo que este valor se define como la presión de expansión, que coincide con lo obtenido en la Figura 7.17.

El motivo por el cual la muestra primero expande en los resultados teóricos, pero en los experimentales colapsa, puede deberse al incremento de agua inicial. Ya que en ese rango inicial de porcentaje de agua pudo haberse presentado una expansión que no quedó registrada, por lo que se recomendaría que en trabajos futuros se hagan incrementos iniciales menores para observar el comportamiento experimental de la muestra.

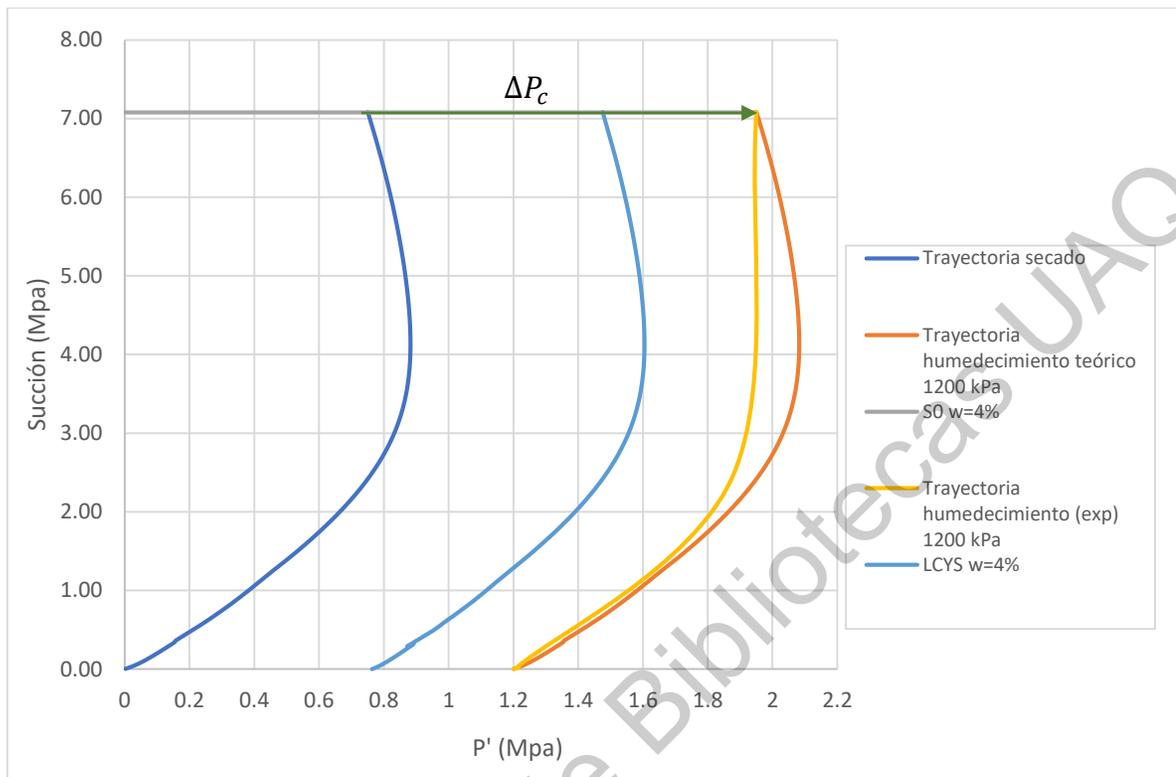


Figura 7.47 Gráfica Esfuerzo efectivo vs Succión, muestra cargada a 1200 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

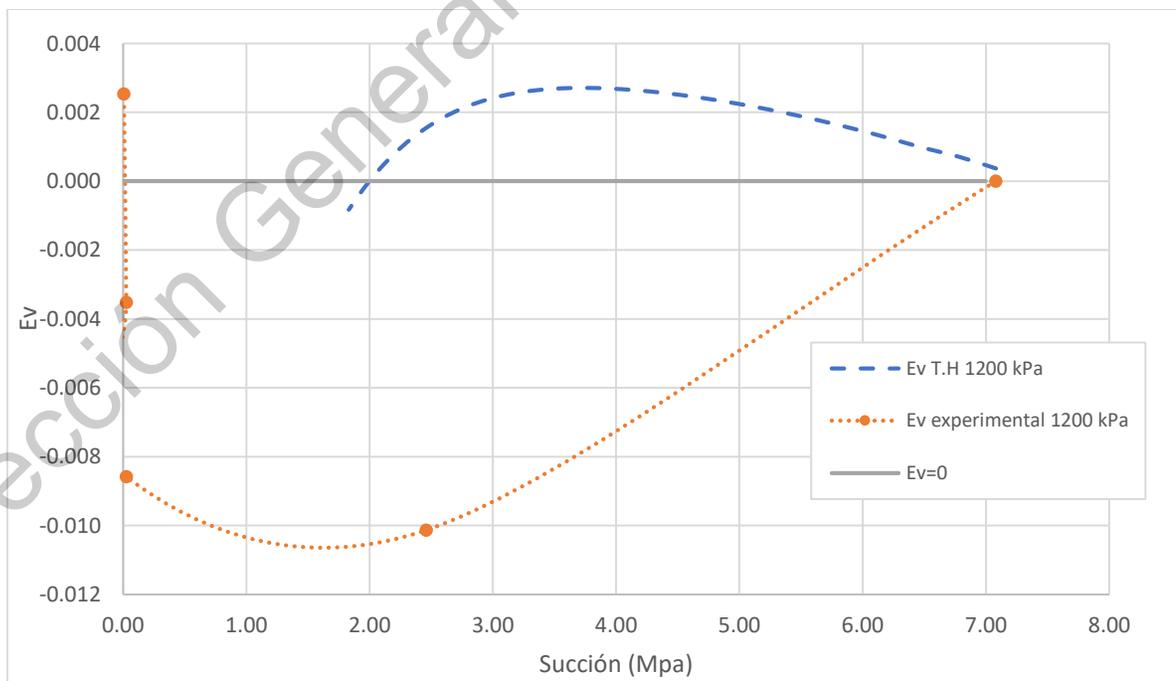


Figura 7.48 Deformación volumétrica de muestra cargada a 1200 kPa con humedad inicial $w=4\%$.

A continuación, en los ejes de relación de vacíos contra el parámetro χ_s , se muestran los resultados de datos experimentales de muestras remodeladas y muestras inalteradas. En el caso de las muestras remodeladas, se graficaron utilizando 2 valores diferentes de succión correspondientes a la trayectoria de secado. Para el primer caso (S der), se utilizaron los valores de las curvas de retención elegidas en la segunda prueba de succión, los cuales se presentan como la curva anaranjada en la Figura 7.49.

Al observar que los valores de succión eran muy altos y la gráfica tendía a irse a la derecha, se decidió graficar los resultados tomando la curva de retención del grupo de la izquierda (S izq.) de la primera prueba de succión, los cuales se presentan como la curva azul. Finalmente se graficó en la curva amarilla los resultados de muestras inalteradas utilizando la succión S izq.

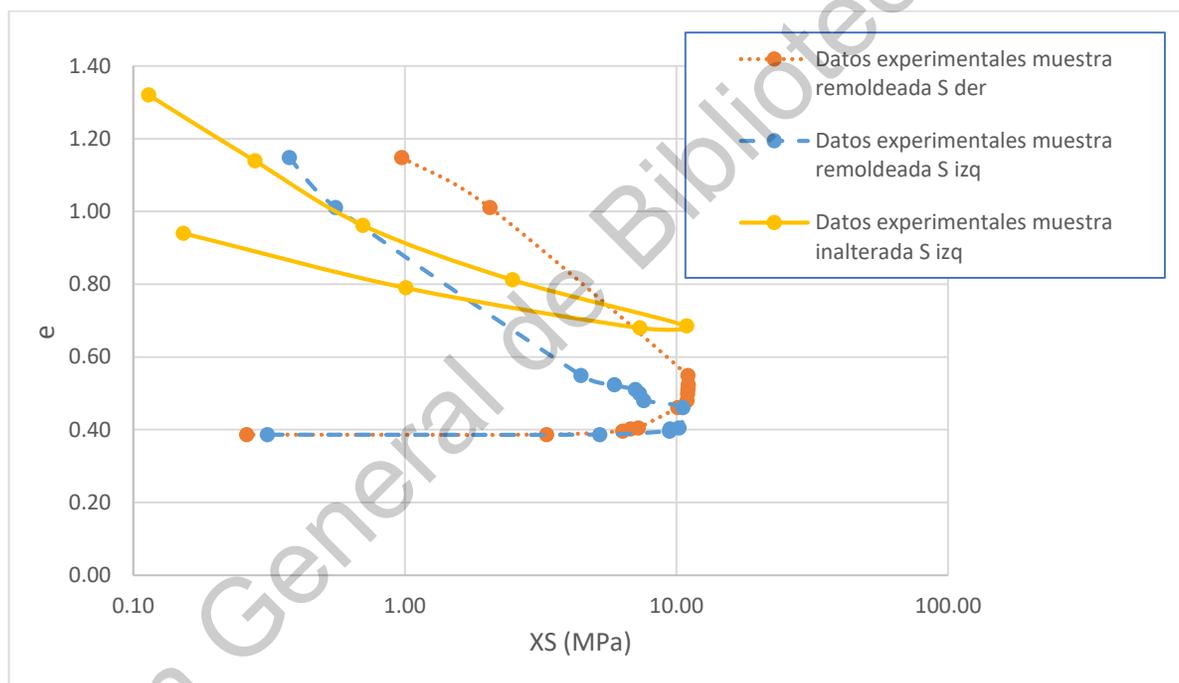


Figura 7.49 Resultados experimentales de muestras remodeladas e inalteradas en función de la relación de vacíos y el parámetro χ_s .

Se observa en la Figura 7.49 que los resultados experimentales de las muestras remodeladas tienden a sufrir una mayor deformación comparado con las muestras inalteradas, las cuales presentan menores variaciones en la relación de vacíos. Esto posiblemente se debe a que las muestras naturales ya han sufrido varios ciclos de humedecimiento-secado.

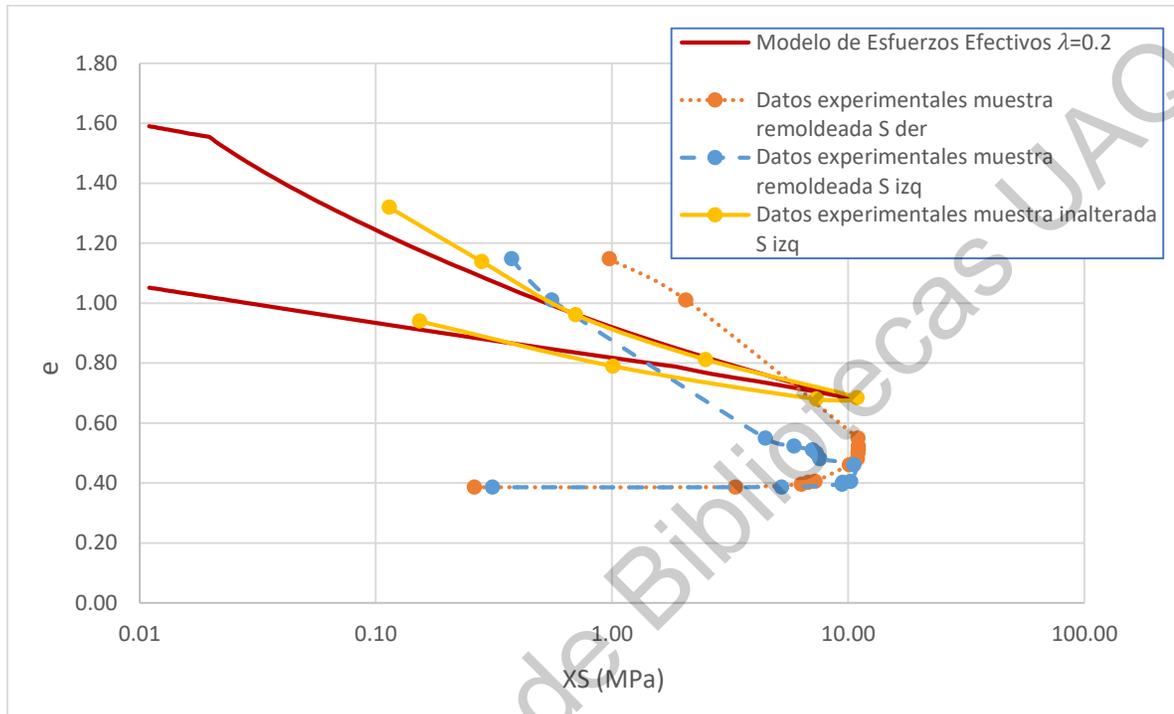


Figura 7.50 Comparación del modelo de Esfuerzos Efectivos con los resultados experimentales de muestras remoldeadas e inalteradas, en función de la relación de vacíos y el parámetro χ_s .

En la Figura 7.50 se muestran los datos teóricos del modelo de Esfuerzos Efectivos, los cuales se observa tienen un mejor ajuste con los datos experimentales de la muestra inalterada, por lo cual se puede concluir que las muestras remoldeadas presentan una mayor deformación, la cual podría ser por el reacomodo de las partículas que sufre la muestra alterada.

8 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

8.1 Observaciones

La variable que más afecta el valor de succión es el peso seco del papel filtro, por lo que, si el papel seco permanece varios días en el desecador, la humedad que adquiere afecta grandemente los resultados en la curva característica, dando variaciones de miles de kPa.

Los valores que presentan más homogeneidad en la técnica del papel filtro son cuando se utiliza recipiente metálico y se espera a que la báscula se haya estabilizado.

El valor de succión de una arcilla expansiva puede ser tan alto en los valores cercanos a 0% de grado de saturación, que la obtención del valor de succión se complica con la prueba del papel filtro, ya que presenta variaciones en esta parte de la curva, e incluso puede presentar valores negativos, indicando que quizá ha superado el límite máximo de medición que permite esta técnica. Los resultados de la prueba de succión muestran que los valores del grupo de la derecha son correctos debido a las repeticiones realizadas y homogeneidad de los datos, sin embargo, se sugiere en futuros trabajos probar con otras técnicas de medición de succión, como es la prueba de celda de presión, para revisar si los valores obtenidos con la técnica de papel filtro son mayores a los que realmente presenta la arcilla.

El desfase que se presenta entre la deformación volumétrica teórica y la experimental (Figura 7.40) puede deberse a la pérdida de humedad al momento de realizar las pruebas en el consolidómetro, lo que ocasionaría que el valor de succión sea mayor de lo que se registró con cada incremento de agua. Por lo que se recomienda cuidar que la temperatura de la cámara donde se realicen las pruebas se mantenga constante, que se cubran las muestras para evitar la pérdida de humedad y controlar mejor este factor.

El motivo por el cual la muestra primero expande en los resultados teóricos, pero en los experimentales colapsa, puede deberse al incremento de agua inicial. Ya que en ese rango inicial de porcentaje de agua pudo haberse presentado una expansión que no quedó registrada, por lo que se recomendaría que en trabajos futuros se hagan incrementos iniciales menores para observar el comportamiento experimental de la muestra.

La relación de vacíos inicial para las pruebas no fue la misma, debido a las dificultades del labrado de muestras secas de arcilla, las cuales son muy rígidas y fáciles de romper. Este factor afecta los resultados experimentales, por lo que, utilizando la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta tesis, se realizó un manual de labrado que se encuentra en los anexos. Este manual tiene el objetivo de poder guiar al usuario que realice estas pruebas en un futuro, y pueda controlar de mejor forma la relación de vacíos inicial.

Para obtener los parámetros necesarios para el modelo deben realizarse distintas pruebas, de las cuales se observó que la de mayor impacto es la curva de retención, la cual generará el valor de χ_s máximo necesario para obtener el comportamiento volumétrico, por lo cual es necesario realizar un ajuste adecuado de la curva, como el que se propone con el método de Rojas y así mismo debe tomarse en cuenta las consideraciones adicionales mencionadas en la metodología de medición de succión para obtener resultados correctos en la prueba.

8.2 Conclusiones

El modelo se desarrolla en un marco elastoplástico en términos de esfuerzos efectivos utilizando un valor corregido χ_{corr} para la ecuación de Bishop y se logra acoplar la curva característica suelo-agua dentro del modelo.

Con los parámetros obtenidos en laboratorio se logra simular el comportamiento con el modelo de esfuerzos efectivos, obteniendo una mejor aproximación para los resultados de muestras inalteradas, ya que en el caso de muestras remoldeadas; se modifica la estructura de la arcilla, disminuye la relación de vacíos y cambia el valor de la pendiente λ .

Para la prueba de succión se determina un procedimiento cuyas consideraciones permiten obtener resultados homogéneos para la prueba de papel filtro. Dicho procedimiento se agregó a los anexos como un manual de procedimientos.

La simulación del modelo muestra un comportamiento desplazado hacia la izquierda en términos de χ_s , comparado con los datos experimentales que se obtuvieron utilizando la curva de retención (grupo S der). Lo que indica que la curva de retención medida con la técnica del papel filtro podría estar mostrando resultados de succión aparentemente mayores a los que en realidad presenta la arcilla, a pesar de haber determinado el procedimiento para su correcta medición.

REFERENCIAS

- Alfaro Soto, M. A. 2008. Geotecnia en suelos no saturados. Rev. la Acad. Colomb. ciencias ... 32:471–481. Available from: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_32/125/471-482.pdf
- Alonso, E. E., A. Gens, y A. Josa. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique. 40:405–430. doi:10.1680/geot.1990.40.3.405.
- Alonso, E. E., J. Vaunat, y A. Gens. 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. Eng. Geol. 54:173–183. doi:10.1016/S0013-7952(99)00079-4.
- Auvinet, G. 2010. Desafíos de la mecánica de suelos en México. 494. 26–30.
- Barrera, M. 2004. Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables. Publicación Técnica Sanfandila. 418. Available from: <http://84.88.10.27/handle/10803/6220>
- Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress. Tek. Ukebl. 106:859–863.
- Budhu, M. 2011. Soil Mechanics and Foundations. 3rd ed. (M. J. W. & S. Danvers, editor.).
- Das, B. M. 2015. Fundamentos de Ingeniería geotécnica. En: 4ta ed. Cengage Learning, México, D.F. p. 587.
- Fredlund, D. G., D. Sheng, y J. Zhao. 2011. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J. 48:186–198. doi:10.1139/T10-060. Available from: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/T10-060>
- Fredlund, D. G., y A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J. 31:521–530.
- Fung, Y. C. 1965. Foundations of solid mechanics. Prentice-Hall Inc., Englewood Clifs. New Jersey.
- Fung, Y. C. 1969. A first course in continuo mechanics. Prentice-Hall Inc., Englewood Clifs. New Jersey.

- García-elías, A., A. A. Melendez, A. Córdova-ceballos, y J. L. Sánchez-amador. 2017. Estimación de la succión total en arcilla expansiva. *Rev. Iberoam. Ciencias*.
- Gens, A., y E. E. Alonso. 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.* 29:1013–1032. doi:10.1139/t92-120. Available from: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t92-120>
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 892–898.
- Holtz, W. G., y H. J. Gibbs. 1956. Engineering Properties of Expansive Clays. *Trans. ASCE.* 121:641–677.
- Juárez Badillo, E., y A. Rico Rodríguez. 1988. *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de Suelos*. Limusa, México.
- King, H. M. 2016. Expansive Soil and Expansive Clay. *Geology.com*.
- Lopez-lara, T., J. B. Hernandez, J. Horta, J. A. Zepeda, y E. Rojas. 2012. Análisis fisicoquímico de arcillas inestables. En: XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C., Cancún, Quintana Roo.
- Lu, N., y W. J. Likos. 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Montes Zarazúa, E. 2010. Uso de papel filtro comercial en las pruebas de succión y su impacto en la curva característica. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Nelson, J. D., y D. J. Miller. 1992. *Expansive Soils Problems and Practice in Foundations and Pavement Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Nowamooz, H. 2014. Effective stress concept on multi-scale swelling soils. *Appl. Clay Sci.* 101:205–214. doi:10.1016/j.clay.2014.07.036. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.07.036>
- Nowamooz, H., y F. Masrouri. 2008. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Eng. Geol.* 101:154–164. doi:10.1016/j.enggeo.2008.04.011.
- Öberg, A. L., y G. Sälfors. 1995. A rational approach to the determination of the shear

strength parameters of unsaturated soils. En: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT '95/PARIS/France/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 1. p. 151–158. Available from: <http://worldcat.org/isbn/9054105836>

P, A. J., y R. J. Ballinas. 2010. Suelos expansivos. XXV Reun. Nac. Mecánica Suelos e Ing. Geotécnica. 1:259–268.

Pérez, M. et. al. 2012. Influencia del cambio volumétrico en la predicción de asentamientos, análisis y diseño de cimentaciones, a través de la determinación de la variación volumétrica. 1–7.

Rojas, E. 2008. Equivalent stress equation for unsaturated soils. Part II: Solid-porous model. *Int. J. Geomech.* doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2008)8:5(291). Available from: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291532-3641%282008%298%3A5%28285%29>

Rojas, E. 2016. Descifrando el enigma de los suelos expanso-colapsables. *Digit. Ciencia@uaqro.* 1–14.

Rojas, E., y O. Chávez. 2013. Volumetric behavior of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 22:209–222. doi:10.1139/cgj-2012-0341.

Rojas, E., O. Chávez, y H. Arroyo. 2017. Modeling the behavior of expansive soils using effective stresses. *Int. J. Geomech.* 17:1–15. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000943.

Rojas González, E. 2018. Un modelo general para suelos no saturados totalmente acoplado. *Digit. Ciencia@uaqro.* 12–24.

Roscoe, K. H., A. N. Schofield, y C. P. Wroth. 1958. On the yielding of soils. *Geotechnique.* 22–52.

Simms, P. H., y E. K. Yanful. 2001. Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests.

Can. Geotech. J. 38:741–754. doi:10.1139/cgj-38-4-741. Available from: http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2_abst_e?cgj_t01-014_38_ns_nf_cgj38-01

Simms, P. H., y E. K. Yanful. 2005. A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils. *Can. Geotech. J.* 42:499–514. doi:10.1139/t05-002. Available from: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t05-002>

Skempton, A. W. 1953. The colloidal activity of clays. En: Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich. p. 57–61.

Standard ASTM C 702-98. 2003. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. 1–5. doi:10.1520/C0702.

Standard ASTM C837-09. 2009. Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. doi:10.1520/C0837-09.2.

Standard ASTM D 2487-00. 2000. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 1–5. doi:10.1520/D2487-11.

Standard ASTM D 421-85. 2002. Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. 1–2. doi:10.1520/D0421-85R07.2.

Standard ASTM D 4546-03. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. 1–7.

Standard ASTM D 854-02. 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 1–7. doi:10.1520/D0854-10.2.

Standard ASTM D2216-98. 1999. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. 1–5.

Standard ASTM D422-63. 2002. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. 1–8. doi:10.1520/D0422-63R07E02.2.

Standard ASTM D427-04. 2004. Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. doi:10.1520/D4943-08.

Standard ASTM D4318-00. 2000. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 1–14.

Standard ASTM D5298-03. 2003. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. 11. doi:10.1520/D5298-10.

Vanapalli, S., y L. Lu. 2012. A state-of-the art review of 1-D heave prediction methods for expansive soils. *Int. J. Geotech. Eng.* 6:15–41. doi:10.3328/IJGE.2012.06.01.15-41. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3328/IJGE.2012.06.01.15-41>

Verdín Montes, C. I. 2018. Modelación de suelos expansivos mediante esfuerzos efectivos.

Universidad Autónoma de Querétaro.

Villalaz, C. 2004. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. (Editorial Limusa, editor.). México.

Zazueta Rodríguez, R. 2015. Modelo constitutivo para suelos expansivos a partir de la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop. Universidad Autónoma de Querétaro.

Zepeda, A. 2004. Mecánica de suelos no saturados. 1ra ed. A.C., UAQ/ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Zepeda, J. A., y A. H. Castañeda. 1987. Distribución de Suelos Expansivos en la República Mexicana. Rev. Investig. No. 21-22 Univ. Autónoma Querétaro.

Zhou, A. N., D. Sheng, S. W. Sloan, y A. Gens. 2012. Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress - Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour. Comput. Geotech. 43:178–187. doi:10.1016/j.compgeo.2012.04.010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.04.010>

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

A.1. Contenido de agua

Cálculo de la humedad natural W%					
Profundidad (m)	No. de flanera	W flanera (g)	W flanera + muestra húmeda (g)	W flanera + muestra seca (g)	w (%)
0.5	158	143.03	200.54	187.49	29.35
1	176	127.85	187.52	173.86	29.69
1.5	103	115.83	196.64	174.01	38.90
2	194	135.20	227.43	201.38	39.36

A.2. Peso específico de la masa de suelo

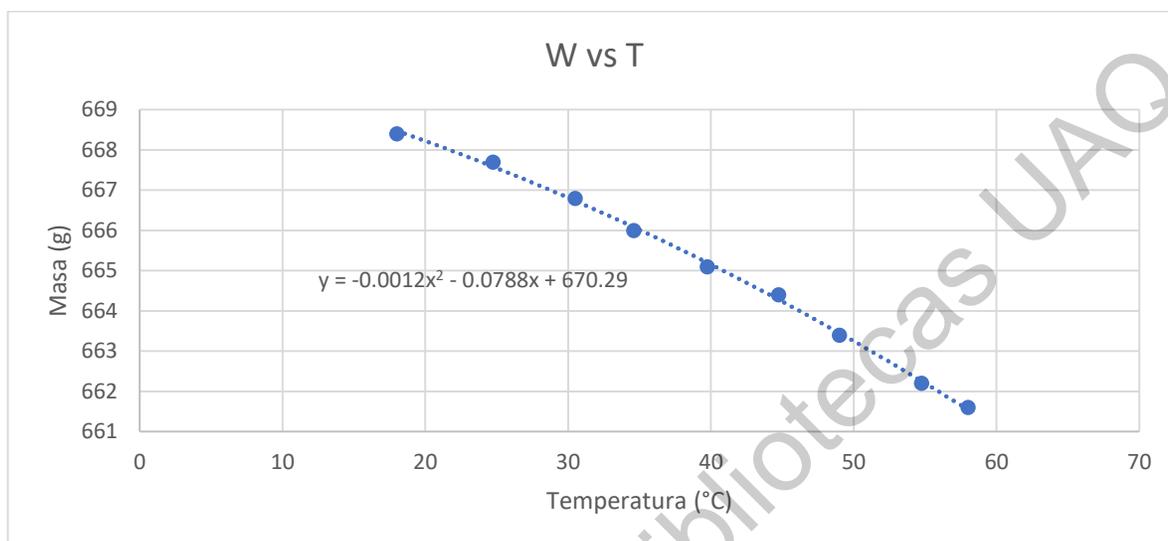
CÁLCULO DEL PESO ESPECÍFICO DE LA MUESTRA DE SUELO							
Peso de la flanera (g)	Peso flanera + suelo húmedo (g)	Peso recipiente para retener mercurio (g)	Peso recipiente para retener mercurio + flanera + HG inicial (g)	Recipiente para retener mercurio + hg desalojado (g)	γ_m (g/cm ³)	Peso flanera suelo seco (g)	Humedad (%)
121.64	158.89	112.71	2484.71	428.61	1.598	148.79	37.201

A.3. Peso específico relativo de sólidos

Para el cálculo del peso específico relativo de sólidos se obtuvo la siguiente curva de calibración.

Matraz 1			
Mat + Agua (g)	T1 (°C)	T2 (°C)	Tp (°C)
661.6	58	58	58
662.2	54.5	55	54.75
663.4	49	49	49
664.4	44.5	45	44.75
665.1	39.5	40	39.75
666	34.5	34.7	34.6
666.8	30.5	30.5	30.5
667.7	24.5	25	24.75
668.4	18	18	18

Curva de calibración del matraz para el cálculo del peso específico relativo de la muestra de suelo.



RESULTADOS MATRAZ + AGUA + SUELO

Matraz 1			Matraz 1 + agua	
Mat + Agua + Suelo (Wfws)	T1 (°C)	T2 (°C)	Tp (°C)	Ajuste curva de calibración [Cuadrática] Wfw (g)
696.3	46	46	46	664.13
698.6	36	36.5	36.25	665.86
699.9	23	23	23	667.84

TABLA DE FACTORES α DE CORRECCIÓN DE DENSIDAD DEL AGUA

T (°C)	γ_m (g/cm ³)	α	T (°C)	γ_m (g/cm ³)	α
20	0.99823	1	35	0.994	0.9958
20.5	0.99812	0.9999	36	0.993	0.9948
21	0.99802	0.9998	45	0.990	0.9918
22	0.9978	0.9996	46	0.989	0.9908
22.5	0.99768	0.9994			
23	0.99757	0.9993			

CÁLCULO DE SS

Tp (°C)	Ws (g)	Wfws (g)	Wfw (g)	Ss	Factor α	Ss corregido
46	52.98	696.3	664.13	2.546	0.9908	2.5226
36.25	52.98	698.6	665.86	2.618	0.9948	2.6040
23	52.98	699.9	667.84	2.532	0.9993	2.5302
Ss promedio						2.55

A.4. Análisis granulométrico por mallas

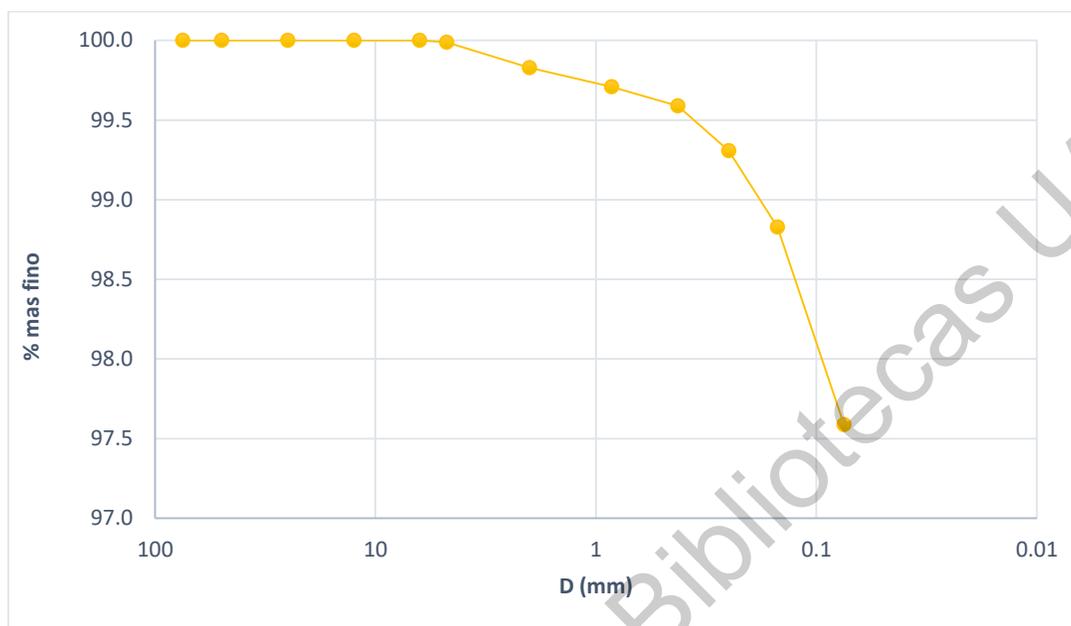
ETAPA 1: GRAVA

No. de malla	Abertura nominal (mm)	Ws retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
3"	75	0	0	0	100.00%
2"	50	0	0	0	100.00%
1"	25	0	0.000%	0.000%	100.00%
½"	12.5	0	0.000%	0.000%	100.00%
¼"	6.3	0	0.000%	0.000%	100.00%
N° 4	4.75	0.03	0.012%	0.012%	99.99%
GRAVA		0.03	0.00012		

ETAPA 2: ARENA

No. de malla	Abertura nominal (mm)	Ws retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
Muestra a analizar		249.97			99.988%
N° 10	2	0.4	0.160%	0.172%	99.828%
N° 20	0.85	0.3	0.120%	0.292%	99.708%
N° 40	0.425	0.3	0.120%	0.412%	99.588%
N° 60	0.25	0.7	0.280%	0.692%	99.308%
N° 100	0.15	1.2	0.480%	1.172%	98.828%
N° 200	0.075	3.1	1.240%	2.412%	97.588%
ARENA		6.00	2.400%		
< N° 200	FINOS	243.97	97.588%		

Curva granulométrica parte gruesa de la muestra de suelo.

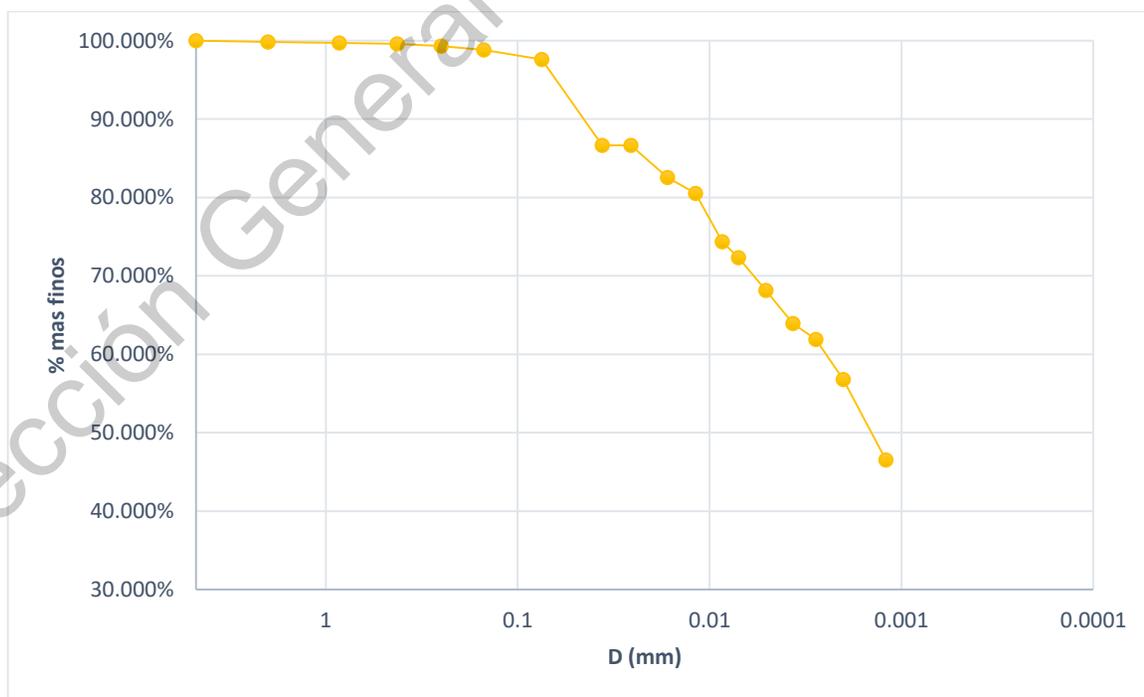


A.5. Análisis del tamaño de partículas

T (°C)	Lectura de Hidrómetro		L1 (cm)	L2 (cm)	L (cm)	K	D (mm)	Rc (gr/L)	% más fino	% más fino respecto al total
	aparente (Real)	corregida (Rc)								
21.5	49	42.781	2.66	12.8	7.79	0.0130	0.0363	42.2810	88.79	86.65
21.5	49	42.781	2.66	12.8	7.79	0.0130	0.0257	42.2810	88.79	86.65
21.5	47	40.781	2.97	12.8	8.10	0.0130	0.0165	40.2810	84.59	82.55
21.5	46	39.781	3.12	12.8	8.25	0.0130	0.0118	39.2810	82.49	80.51
21.5	43	36.781	3.59	12.8	8.71	0.0130	0.0086	36.2810	76.19	74.36
21.5	42	35.781	3.74	12.8	8.87	0.0130	0.0071	35.2810	74.09	72.31
21.4	40	33.753	4.06	12.8	9.18	0.0130	0.0051	33.2530	69.83	68.15
21.2	38	31.698	4.37	12.8	9.50	0.0131	0.0037	31.1980	65.52	63.94
21	36	30.7	4.53	12.8	9.65	0.0139	0.0028	30.2000	63.42	61.89
21	33.5	28.2	4.91	12.8	10.04	0.0139	0.0020	27.7000	58.17	56.77
21	28.5	23.2	5.69	12.8	10.81	0.0139	0.0012	22.7000	47.67	46.52

ETAPA 3: FINOS			
No. de malla	Abertura nominal (mm)	% retenido	% más fino que
N° 200	0.075	1.24	97.58
Finos	0.0363	10.93	86.65
	0.0257	0.00	86.65
	0.0165	4.10	82.55
	0.0118	2.05	80.51
	0.0086	6.15	74.36
	0.0071	2.05	72.31
	0.0051	4.16	68.15
	0.0037	4.21	63.94
	0.0028	2.05	61.89
	0.0020	5.12	56.77
	0.0012	10.25	46.52

Curva granulométrica de la muestra de suelo.



A.6. Límites de consistencia

Límite líquido

Muestra 1					
Límite líquido Cono inglés					
No. de flanera	W flanera (g)	W flanera + muestra húmeda (g)	W flanera + muestra seca (g)	Penetración (mm)	w (%)
C1	117.67	128.72	123.67	187	84.16
C2	120.71	135.10	128.41	203	86.88
C3	137.95	151.12	144.83	231	91.42
C4	127.07	137.32	132.55	207	87.04

Muestra 2					
Límite líquido Cono inglés					
No. de flanera	W flanera (g)	W flanera + muestra húmeda (g)	W flanera + muestra seca (g)	Penetración (mm)	w (%)
CONO 1	123.69	134.52	129.48	198	87.04
CONO 2	130.58	142.68	137.21	182	82.50
CONO 3	119.87	129.75	125.16	217	86.76

Muestra 1					
Límite líquido Copa de Casagrande					
No. de flanera	W flanera (g)	W flanera + muestra húmeda (g)	W flanera + muestra seca (g)	No. de golpes	w (%)
CA - 1	125.00	148.23	137.41	26	87.19
CA - 2	121.46	143.41	133.45	31	83.07
CA - 3	130.90	157.43	145.15	22	86.18

MÉTODO	Límite líquido
Cono inglés	86.22
Cono inglés	85.55
Copa de Casagrande	85.96
LL	85.91

Límite plástico

No. de flanera	Flanera (Wf)	Wf + Wm	Wf + Ws	%w
CONO 4	120.76	126.64	125.12	34.86

Límite de contracción volumétrica

Muestra 1							volumen caja petri 1 (cm3) =	26.09
Día	Peso caja petri grande, para retener mercurio (g)	peso caja petri (g)	W caja petri + muestra (g)	W caja petri corregido+ muestra (g)	Peso suelo (g)	volumen (cm3)	Límite de contracción volumétrica (LC)	
1	94.69	18.57	56.33	56.15	37.58	26.09	14.72	
10	94.69	18.57	39.1	39.00	20.43	11.95		

Muestra 2				Caja petri 49				volumen cm3 =	33.91		
Tiempo (h)	Fecha	Hora	Día	Peso caja petri para retener mercurio (g)	peso caja petri (g)	W caja petri + muestra (g)	W caja petri corregido+ muestra (g)	Peso suelo (g)	volumen (cm3)	Humedad %	Límite de contracción volumétrica (LC)
0.0	08/10/2018	12:15	0	94.69	24.36	74.23	74.09	49.73	33.94	83.51	14.35
48.0	10/10/2018	12:15	2	94.69	24.36	63.57	63.46	39.10	24.12	44.28	
53.2	10/10/2018	17:26	2	94.74	24.36	61.94	61.94	37.58	22.76	38.67	
79.0	11/10/2018	19:16	3	94.7	24.36	57.23	57.23	32.87	18.20	21.29	
97.8	12/10/2018	14:00	4	94.52	24.36	55.67	55.67	31.31	16.61	15.54	
101.8	12/10/2018	18:00	4	94.52	24.36	55.4	55.4	31.04	16.41	14.54	
122.4	13/10/2018	14:40	5	94.52	24.36	55.01	55.01	30.65	16.08	13.10	
129.8	13/10/2018	22:00	5	94.52	24.36	54.77	54.77	30.41	15.92	12.21	
163.6	15/10/2018	07:50	6	94.53	24.36	54.41	54.41	30.05	15.83	10.89	
170.8	15/10/2018	15:00	7	94.53	24.36	53.46	53.46	29.10	15.55	7.38	
	24/10/2018	08:40	16	94.53	24.36	52.91	52.91	28.55	15.44	5.35	
	24/10/2018	10:10	16	94.53	24.36	52.35	52.35	27.99	14.77	3.28	
	24/10/2018	11:10	16	94.53	24.36	52.23	52.23	27.87	15.25	2.84	
	24/10/2018	16:10	16	94.53	24.36	51.69	51.69	27.33	15.15	0.85	
	25/10/2018	10:50	17	94.53	24.36	51.46	51.46	27.10	14.89	0.00	
	25/10/2018	13:30	17	94.53	24.36	51.46	51.46	27.10	15.16	0.00	

Muestra 3					Caja petri 7			volumen (cm3) =	34.49			
Tiempo (h)	Fecha	Hora	Día	Peso caja petri para retener mercurio (g)	peso caja petri (g)	W caja petri + muestra (g)	W caja petri corregido+ muestra (g)	Peso suelo (g)	volumen (cm3)	Humedad %	Límite de contracción volumétrica (LC)	
12.3	08/10/2018	12:15	0	94.69	24.9	75.85	75.61	50.71	35.44	83.79	13.93	
48.3	10/10/2018	12:30	2	94.69	24.9	64.9	64.71	39.81	25.49	44.29		
53.5	10/10/2018	17:45	2	94.74	24.9	63.31	63.31	38.41	24.08	39.22		
79.3	11/10/2018	19:30	3	94.74	24.90	58.31	58.31	33.41	18.69	21.09		
97.8	12/10/2018	14:05	4	94.52	24.90	56.63	56.63	31.73	17.26	15.01		
101.8	12/10/2018	18:05	4	94.52	24.90	56.36	56.36	31.46	17.13	14.03		
122.5	13/10/2018	14:45	5	94.52	24.90	56.02	56.02	31.12	16.94	12.79		
129.8	13/10/2018	22:05	5	94.52	24.90	55.87	55.87	30.97	16.77	12.25		
163.7	15/10/2018	07:55	6	94.52	24.90	55.53	55.53	30.63	16.56	11.02		
170.8	15/10/2018	15:05	7	94.52	24.90	54.44	54.44	29.54	16.39	7.07		
	24/10/2018	09:00	16	94.52	24.90	53.84	53.84	28.94	16.02	4.89		
	24/10/2018	10:20	16	94.52	24.90	53.3	53.3	28.40	15.47	2.94		
	24/10/2018	11:20	16	94.52	24.90	53.13	53.13	28.23	15.35	2.32		
	24/10/2018	16:25	16	94.52	24.90	52.65	52.65	27.75	15.40	0.58		
	25/10/2018	13:50	17	94.52	24.90	52.49	52.49	27.59	14.93	0.00		

Muestra 4					Caja petri 8			volumen (cm3) =	33.83			
Tiempo (h)	Fecha	Hora	Día	Peso caja petri para retener mercurio (g)	peso caja petri (g)	W caja petri + muestra (g)	W caja petri corregido+ muestra (g)	Peso suelo (g)	volumen (cm3)	Humedad %	Límite de contracción volumétrica (LC)	
12.3	08/10/2018	12:15	0	94.69	26.81	76.44	76.25	49.44	35.14	84.36	12.56	
48.5	10/10/2018	12:45	2	94.69	26.81	64.21	64.07	37.26	22.59	38.93		
53.8	10/10/2018	18:00	2	94.74	26.81	62.58	62.58	35.77	21.15	33.37		
97.9	12/10/2018	14:10	4	94.52	26.81	57.53	57.53	30.72	16.30	14.54		
101.9	12/10/2018	18:10	4	94.52	26.81	57.3	57.3	30.49	16.02	13.68		
122.6	13/10/2018	14:50	5	94.52	26.81	57.02	57.02	30.21	15.88	12.64		
129.9	13/10/2018	22:10	5	94.52	26.81	56.79	56.79	29.98	15.77	11.78		
163.8	15/10/2018	08:00	6	94.52	26.81	56.57	56.57	29.76	15.57	10.96		
170.9	15/10/2018	15:10	7	94.52	26.81	55.59	55.59	28.78	15.36	7.31		
	24/10/2018	09:20	16	94.52	26.81	54.67	54.67	27.86	14.78	3.88		
	24/10/2018	10:29	16	94.52	26.81	54.47	54.47	27.66	14.75	3.13		

	24/10/2018	11:33	16	94.52	26.81	54.33	54.33	27.52	14.68	2.61	
	24/10/2018	16:35	16	94.52	26.81	53.84	53.84	27.03	14.58	0.78	
	25/10/2018	14:10	17	94.52	26.81	53.63	53.63	26.82	14.58	0.00	

ANEXO B. CURVA CARACTERÍSTICA SUELO JURICA

B.1. Prueba 1 de succión.

Resultados de humedad de papel filtro para la prueba 1, suelo Jurica.

Primera Prueba		Utilizando peso seco antes de colocar encima de la muestra		Utilizando peso seco después del equilibrio de 7 días			
		Medición con contenedor metálico		Medición con contenedor metálico		Medición sin contenedor metálico	
Curva	Sw%	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]
Curva de humedecimiento	94.65	40.33	31.34	-	-	-	-
	80.09	41.41	28.62	-	-	-	-
	59.30	12.39	14.38	24.65	24.77	16.11	14.29
	39.65	8.84	3.17	25.74	17.00	7.37	5.95
	19.99	-0.17	1.29	5.61	10.66	4.10	2.61
	4.41	-5.20	-1.97	12.60	10.43	2.97	1.42
Curva de secado	4.32	6.84	-0.58	9.63	10.27	-0.18	0.81
	20.90	2.14	0.93	21.42	13.19	6.59	2.04
	42.71	-1.39	6.34	18.02	17.64	6.87	6.53
	60.80	15.61	14.24	29.62	27.28	11.20	13.16
	76.24	18.51	23.01	37.06	28.23	22.29	20.99
	87.70	11.94	27.19	-	-	-	-

Nota: el símbolo "-" significa que no pudo ser medido.

Resultados de succión para la prueba 1, suelo Jurica.

Primera Prueba		Utilizando peso seco antes de colocar encima de la muestra		Utilizando peso seco después del equilibrio de 7 días			
		Medición con contenedor metálico		Medición con contenedor metálico		Medición sin contenedor metálico	
Curve	Sw%	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]
Curva de humedecimiento	94.65	33.60	222.22	-	-	-	-
	80.09	26.76	394.02	-	-	-	-
	59.30	11943.99	7858.21	906.66	884.17	5458.11	8017.04
	39.65	25193.45	82929.58	721.22	4526.70	34339.16	46262.78
	19.99	167256.34	123176.14	49669.60	17174.37	68158.86	93400.89
	4.41	482381.34	244309.98	11432.92	18030.94	86540.47	119809.04
Curva de secado	4.32	38318.81	182318.88	21344.62	18631.44	167613.19	136247.99
	20.90	103095.02	132942.86	1789.66	10092.95	40422.70	105137.08
	42.71	216358.19	42563.69	3658.99	3957.94	38143.12	40964.02
	60.80	6073.20	8102.12	319.00	521.45	15338.45	10162.12
	76.24	3299.64	1282.10	66.75	427.18	1489.64	1956.48
	87.70	13124.53	531.54	-	-	-	-

Nota: el símbolo "-" significa que no pudo ser medido.

B.2. Prueba 2 de succión.

Resultados de humedad de papel filtro para la prueba 2, suelo Jurica.

Segunda Prueba		Utilizando peso seco antes de colocar encima de la muestra		Utilizando peso seco después del equilibrio de 7 días			
		Medición con contenedor metálico		Medición con contenedor metálico		Medición sin contenedor metálico	
Curva	Sw%	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]	Papel filtro W% [al cerrar la puerta]	Papel filtro W% [cuando la balanza se ha estabilizado]
Curva de humedecimiento	94.61	30.01	33.56	47.39	44.24	33.14	31.25
	79.89	28.72	28.66	30.27	29.17	26.16	26.41
	59.03	7.82	14.64	10.42	15.03	8.96	13.30
	57.95	14.93	14.29	11.46	14.61	14.12	13.57
	49.72	16.19	10.71	17.03	12.22	9.69	11.15
	39.73	4.39	5.54	4.32	6.25	5.07	5.25
	20.90	-5.25	2.25	-0.38	2.94	2.01	2.02
	5.97	-6.57	0.41	1.69	1.41	1.28	0.70
Curva de secado	5.91	-6.82	-1.01	2.63	1.32	1.44	0.79
	21.44	-0.16	2.28	-0.78	3.05	3.31	2.11
	40.95	0.72	4.95	-0.11	5.92	1.65	4.84
	55.98	9.37	11.11	6.40	11.98	8.13	9.78
	70.73	17.74	19.96	18.39	20.70	16.58	18.29
	84.88	22.35	26.45	23.86	27.66	27.46	24.94

Resultados de succión para la prueba 2, suelo Jurica.

Segunda Prueba		Utilizando peso seco antes de colocar encima de la muestra		Utilizando peso seco después del equilibrio de 7 días			
		Medición con contenedor metálico		Medición con contenedor metálico		Medición sin contenedor metálico	
Curva	Sw%	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]	Succión [al cerrar la puerta]	Succión [cuando la balanza se ha estabilizado]
Curva de humedecimiento	94.61	294.31	139.32	7.62	14.77	152.30	226.39
	79.89	385.44	390.50	278.52	350.71	661.14	627.02
	59.03	31222.87	7444.22	18069.19	6849.27	24586.01	9857.32
	57.95	7008.31	8003.56	14529.81	7480.92	8296.01	9328.54
	49.72	5374.14	17014.41	4507.23	12387.61	21082.74	15503.45
	39.73	64150.74	50407.71	65192.75	43386.39	55613.99	53527.81
	20.90	487026.27	100750.37	175013.48	87080.80	105972.06	105696.92
5.97	643131.82	148278.47	113217.92	120062.09	123497.04	139449.39	
Curva de secado	5.91	676976.70	199647.64	92964.58	122470.31	119265.80	136696.51
	21.44	167193.08	99966.05	190330.73	85122.11	80619.12	103577.57
	40.95	138779.23	57085.77	165395.60	46504.89	114138.96	58415.19
	55.98	22517.53	15626.28	42055.11	13011.75	29229.10	20681.83
	70.73	3875.30	2434.48	3383.72	2080.97	4954.02	3455.34
	84.88	1472.29	621.35	1071.52	481.68	502.49	852.92

B.3. Ajuste por Van Genuchten.

Van Genuchten					
Parámetros de ajuste					
Secado			Humedecimiento		
$\alpha=$	0.000711	$\alpha=$	0.000783		
$n=$	1.2774	$n=$	1.2685		
$m=$	0.2172	$m=$	0.2117		
$\theta_s=$	0.92858	$\theta_s=$	0.8889		
$\theta_r=$	0.00000422	$\theta_r=$	0.00005707		
Secado			Humedecimiento		
Sw%	Sw efectivo	Succión	Sw%	Sw efectivo	Succión
25%	27.45%	148278.47	88%	98.77%	139.32
28%	30.61%	99966.05	85%	95.84%	390.50
33%	35.73%	57085.77	54%	60.97%	7444.22
47%	50.78%	15626.28	53%	59.90%	8003.56
73%	78.69%	2434.48	44%	49.51%	17014.41
87%	93.66%	621.35	33%	37.20%	50407.71
88%	94.64%	531.54	27%	30.92%	100750.37
92%	98.90%	139.32	25%	27.88%	148278.47

B.4. Ajuste por Sheng.

Sheng					
Parámetros de ajuste					
Humedecimiento			Secado		
ad=	360		ad=	400	
md=	2.7		md=	2.5	
nd=	0.0630		nd=	0.0700	
θ_s =	0.8889		θ_s =	0.92858	
θ_r =	0.00005707		θ_r =	0.00000422	
Humedecimiento			Secado		
Sw %	Sw efectivo	Succión	Sw%	Sw efectivo	Succión
88%	99.53%	139.32	33%	35.52%	148278.47
84%	95.03%	390.50	35%	38.05%	99966.05
53%	59.73%	7444.22	39%	41.97%	57085.77
52%	59.00%	8003.56	49%	52.65%	15626.28
46%	51.90%	17014.41	68%	72.85%	2434.48
38%	43.15%	50407.71	84%	90.74%	621.35
34%	38.35%	100750.37	86%	92.52%	531.54
32%	35.91%	148278.47	92%	99.52%	139.32

ANEXO C. PRUEBAS OEDOMÉTRICAS

C.1. Resultados experimentales de pruebas oedométricas con un grado de saturación inicial promedio $S_w=65.6\%$

C.1.1 Muestra cargada a 200 kPa

Muestra 2				Vs=	60.894	cm3	Vm=	98.929	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	2	mm	Área=	50.014	cm2	Brazo de palanca=	10							
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	S_w	ϵ_v	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm2)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
Sin carga	0	0	0.00	0	0	0	38.03	0.625	46		35910.284	0.2852	10242.24	10242.24	
↓Carga↓	Carga 1	100	5.096	5.147	1.029	1.270	-0.730	34.48	0.566	46		35910.284	0.2852	10242.24	10342.24
	Carga 2	200	5.096	10.244	2.048	0.755	-1.245	31.91	0.524	46	0.00	35910.284	0.2852	10242.24	10442.24
↑Saturación↑	Incremento 1	200	0	10.244	2.048	1.018	-0.982	33.22	0.546	64	0.014	1680.209	0.4749	797.86	997.86
	Incremento 2	200	0	10.244	2.048	1.201	-0.799	34.14	0.561	77	0.024	457.110	0.6228	284.69	484.69
	Incremento 3	200	0	10.244	2.048	1.230	-0.770	34.28	0.563	87	0.026	135.607	0.7182	97.40	297.40
	Incremento 4	200	0.000	10.244	2.048	1.323	-0.677	34.75	0.571	95	0.031	26.684	0.8731	23.30	223.30
	Incremento 5	200	0.000	10.244	2.048	1.360	-0.640	34.93	0.574	100	0.033	0.100032	0.9756	0.0975944	200.10
↑Descarga↑	Descarga 1	100	-5.096	5.147	1.029	1.593	-0.407	36.10	0.593	100		0.100032	0.9756	0.0975944	100.10
	Descarga 2	1	-5.096	0.051	0.010	3.748	1.748	46.88	0.770	100		0.100032	0.9756	0.0975944	1.10

C.1.2 Muestra cargada a 350 kPa

Muestra 3				Vs=	55.976	cm3	Vm=	88.357	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	12.92	mm	Área=	44.179	cm2	Brazo de palanca=			10					
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	Sw	ϵV	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm2)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
	Sin carga	0	0	0.00	0	0	32.3808	0.578	47		34507.50	0.2917	10064.654	10064.65	
↓Carga↓	Carga 1	175	7.684	7.729	1.749	11.504	-1.425	26.09	0.466	47		34507.50	0.2917	10064.654	10239.65
	Carga 2	350	7.71	15.439	3.495	10.765	-2.164	22.82	0.408	47	0.00	34507.50	0.2917	10064.654	10414.65
↑Saturación↑	Incremento 1	350	0	15.439	3.495	10.856	-2.073	23.22	0.415	64	0.005	1680.21	0.4749	797.864	1147.86
	Incremento 2	350	0	15.439	3.495	10.795	-2.134	22.95	0.410	77	0.002	457.11	0.6228	284.694	634.69
	Incremento 3	350	0	15.439	3.495	10.526	-2.403	21.77	0.389	87	-0.013	135.61	0.7182	97.398	447.40
	Incremento 4	350	0.000	15.439	3.495	10.259	-2.670	20.59	0.368	95	-0.028	26.68425	0.8731	23.298	373.30
	Incremento 5	350	0.000	15.439	3.495	10.267	-2.662	20.62	0.368	100	-0.028	0.100032	0.9756	0.097594	350.10
↑Descarga↑	Descarga 1	150	-7.710	7.729	1.749	10.546	-2.383	21.86	0.390	100		0.100032	0.9756	0.097594	150.10
	Descarga 2	1	-7.684	0.045	0.010	13.660	0.732	35.61	0.636	100		0.100032	0.9756	0.097594	1.10

C.2. Resultados experimentales de pruebas oedométricas con un grado de saturación inicial promedio $S_w=17.5\%$

C.2.1. Muestra cargada a 200 kPa

Muestra 6				Vs=	60.122	cm3	Vm=	92.884	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación		Lectura inicial=	9.77	mm	Área=	46.365	cm2	Brazo de palanca=		10					
		σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	S_w	ϵV	S	x corr	Xcorr*S	P'
		kPa	Kg	Kg	(Kg/cm2)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)
	Sin carga	0	0	0.00	0	0	0	32.76	0.545	15		96560.1875	0.0907	8757.2607	8757.26
↓Carga↓	Carga 1	100	4.725	4.772	1.029	9.132	-0.647	29.61	0.492	15		96560.1875	0.0907	8757.2607	8857.26
	Carga 2	200	4.725	9.496	2.048	8.970	-0.809	28.86	0.480	15	0.00	96560.1875	0.0907	8757.2607	8957.26
↑Saturación↑	Incremento 1	200	0	9.496	2.048	9.030	-0.749	29.14	0.485	43	0.003	28724.149	0.2589	7436.2841	7636.28
	Incremento 2	200	0	9.496	2.048	9.304	-0.475	30.41	0.506	62	0.017	2365.223	0.4477	1058.8528	1258.85
	Incremento 3	200	0	9.496	2.048	9.889	0.110	33.12	0.551	75	0.048	150.3906	0.6043	90.8870	290.89
	Incremento 4	200	0.000	9.496	2.048	10.569	0.790	36.27	0.603	86	0.083	156.1853	0.7064	110.3232	310.32
	Incremento 5	200	0.000	9.496	2.048	10.709	0.930	36.92	0.614	94	0.091	36.4776	0.8456	30.8468	230.85
↑Descarga↑	Descarga 1	100	-4.725	4.772	1.029	11.131	1.352	38.88	0.647	100		0.100032	0.9756	0.0975944	100.10
	Descarga 2	1	-4.725	0.047	0.010	13.835	4.056	51.41	0.855	100		0.100032	0.9756	0.0975944	1.10

C.2.2. Muestra cargada a 300 kPa

Muestra 7				Vs=	59.525	cm3	Vm=	91.611	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	9.78	mm	Área=	46.036	cm2	Brazo de palanca=	10							
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	Sw	ϵv	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm2)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
Sin carga	0	0	0.00	0	0	0	32.09	0.539	15		96560.188	0.0907	8757.2607	8757.26	
↓Carga↓	Carga 1	150	7.037	7.083	1.539	9.335	-0.449	30.02	0.504	15		96560.188	0.0907	8757.2607	8907.26
	Carga 2	300	7.037	14.120	3.067	9.220	-0.564	29.49	0.495	15	0.00	96560.188	0.0907	8757.2607	9057.26
↑Saturación↑	Incremento 1	300	0	14.120	3.067	9.232	-0.552	29.54	0.496	43	0.001	28724.149	0.2589	7436.2841	7736.28
	Incremento 2	300	0	14.120	3.067	9.561	-0.223	31.06	0.522	62	0.018	2365.223	0.4477	1058.8528	1358.85
	Incremento 3	300	0	14.120	3.067	10.171	0.387	33.87	0.569	75	0.049	150.391	0.6043	90.8870	390.89
	Incremento 4	300	0.000	14.120	3.067	10.440	0.656	35.11	0.590	86	0.063	156.185	0.7064	110.3232	410.32
	Incremento 5	300	0.000	14.120	3.067	10.589	0.805	35.79	0.601	94	0.071	36.478	0.8456	30.8468	330.85
↑Descarga↑	Descarga 1	150	-7.037	7.083	1.539	11.101	1.317	38.15	0.641	100		0.100032	0.9756	0.0975944	150.10
	Descarga 2	1	-7.037	0.047	0.010	13.990	4.206	51.45	0.864	100		0.100032	0.9756	0.0975944	1.10

Dirección General de Registros y Catastro UJAQ

C.2.3. Muestra cargada a 400 kPa

Muestra 8				Vs=	63.165	cm3	Vm=	98.929	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	2.49	mm	Área=	50.014	cm2	Brazo de palanca=	10							
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	Sw	ϵV	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm ²)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
Sin carga	0	0	0.00	0	0	0	35.76	0.566	7		138181.35	0.0422	5828.501	5828.50	
↓Carga↓	Carga 1	100	5.096	5.147	1.029	1.594	-0.898	31.37	0.497	7		138181.35	0.0422	5828.501	5928.50
	Carga 2	200	5.096	10.244	2.048	1.524	-0.968	31.02	0.491	7		138181.35	0.0422	5828.501	6028.50
	Carga 3	400	10.193	20.437	4.086	1.431	-1.061	30.56	0.484	7	0.00	138181.35	0.0422	5828.501	6228.50
↑Saturación↑	Incremento 1	0	0	20.437	4.086	1.472	-1.020	30.76	0.487	38	0.002	33644.87	0.2299	7733.501	7733.50
	Incremento 2	0	0	20.437	4.086	1.593	-0.899	31.37	0.497	58	0.009	5074.83	0.3858	1957.929	1957.93
	Incremento 3	0	0.000	20.437	4.086	1.898	-0.594	32.89	0.521	73	0.025	360.27	0.5845	210.561	210.56
	Incremento 4	0	0.000	20.437	4.086	2.294	-0.198	34.87	0.552	84	0.046	203.86	0.6853	139.698	139.70
	Incremento 5	0	0.000	20.437	4.086	2.522	0.030	36.01	0.570	92	0.058	58.49	0.7990	46.729	46.73
↑Descarga↑	Descarga 1	200	-10.193	10.244	2.048	3.147	0.655	39.14	0.620	100		0.100032	0.9756	0.097594	200.10
	Descarga 2	100	-5.096	5.147	1.029	3.339	0.847	40.10	0.635	100		0.100032	0.9756	0.097594	100.10
	Descarga 3	1	-5.096	0.051	0.010	6.810	4.318	57.46	0.910	100		0.100032	0.9756	0.097594	1.10

C.2.4. Muestra cargada a 500 kPa

Muestra 9				Vs=	53.941	cm3	Vm=	88.357	cm3	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	18.77	mm	Área=	44.179	cm2	Brazo de palanca=	10							
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	Vv	e	Sw	ϵV	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm2)	(mm)	(mm)	(cm3)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
Sin carga	0	0	0.00	0	0	0	34.42	0.638	23		74000.136	0.1399	10352.389	10352.39	
↓Carga↓	Carga 1	100	4.502	4.547	1.029	17.701	-1.069	29.69	0.550	23	74000.136	0.1399	10352.389	10452.39	
	Carga 2	200	4.502	9.049	2.048	17.455	-1.316	28.60	0.530	23	74000.136	0.1399	10352.389	10552.39	
	Carga 3	500	13.505	22.554	5.105	17.066	-1.704	26.89	0.498	23	0.00	74000.136	0.1399	10352.389	10852.39
↑Saturación↑	Incremento 1	0	0	22.554	5.105	17.092	-1.679	27.00	0.501	48	0.001	22882.166	0.2920	6682.265	6682.27
	Incremento 2	0	0	22.554	5.105	17.216	-1.554	27.55	0.511	65	0.008	1437.541	0.4883	701.997	702.00
	Incremento 3	0	0.000	22.554	5.105	17.422	-1.349	28.46	0.528	78	0.019	411.339	0.6317	259.829	259.83
	Incremento 4	0	0.000	22.554	5.105	17.724	-1.046	29.79	0.552	88	0.036	116.975	0.7312	85.537	85.54
	Incremento 5	0	0.000	22.554	5.105	17.866	-0.904	30.42	0.564	95	0.044	26.684	0.8731	23.298	23.30
↑Descarga↑	Descarga 1	200	-13.505	9.049	2.048	18.600	-0.170	33.66	0.624	100		0.100032	0.9756	0.0975944	200.10
	Descarga 2	100	-4.502	4.547	1.029	19.030	0.259	35.56	0.659	100		0.100032	0.9756	0.0975944	100.10
	Descarga 3	1	-4.502	0.045	0.010	21.405	2.634	46.05	0.854	100		0.100032	0.9756	0.0975944	1.10

Dirección General de Registros y Catastro UAQ

C.2.5. Muestra cargada a 1200 kPa

Muestra 10				V _s =	52.963	cm ³	V _m =	88.357	cm ³	Valores obtenidos de curva característica ajustada					
Condición de carga o saturación	Lectura inicial=	18.77	mm	Área=	44.179	cm ²	Brazo de palanca=	10							
	σ	Δq	Σq	σ	Lec. de Micrómetro	Δh	V _v	e	Sw	ε _v	S	x corr	Xcorr*S	P'	
	kPa	Kg	Kg	(Kg/cm ²)	(mm)	(mm)	(cm ³)	-	%	-	(kPa)		(kPa)	(kPa)	
	Sin carga	1	0	0.05	0	0	36.50	0.662	13		93802.431	0.07850	7363.4242	7364.42	
↓Carga↓	Carga 1	1	0.047	0.047	0.010	18.672	3.820	54.56	0.990	46	35910.284	0.28522	10242.24	10243.24	
	Carga 2	1	0	0.047	0.010	20.879	6.027	64.72	1.174	67	2746.055	0.49287	1353.444	1354.44	
	Carga 3	1	0	0.047	0.010	21.590	6.739	67.99	1.234	81	463.691	0.69264	321.172	322.17	
	Carga 4	1	0	0.047	0.010	21.59	6.739	67.99	1.234	92	103.738	0.83603	86.7282	87.73	
↑Saturación↑	Incremento 1	1	0	0.047	0.010	21.590	6.739	67.99	1.234	100	-0.010	0.100	0.97563	0.0976	1.10
	Incremento 2	100	4.691	4.738	1.029	19.566	4.714	58.67	1.065	100	-0.009	0.100	0.97563	0.0976	100.10
	Incremento 3	200	4.691	9.429	2.048	18.489	3.637	53.72	0.975	100	-0.004	0.100	0.97563	0.0976	200.10
	Incremento 4	400	9.382	18.811	4.086	17.028	2.177	46.99	0.853	100	0.003	0.100	0.97563	0.0976	400.10
	Incremento 5	800	18.764	37.576	8.162	15.639	0.787	40.60	0.737	100	0.002	0.100	0.97563	0.0976	800.10
↑Descarga↑	Descarga 1	400	-18.764	18.811	4.086	15.789	0.937	41.29	0.749	100		0.100	0.97563	0.0976	400.10
	Descarga 2	200	-9.382	9.429	2.048	16.030	1.179	42.40	0.769	100		0.100	0.97563	0.0976	200.10
	Descarga 4	100	-4.691	4.738	1.029	16.233	1.382	43.33	0.786	100		0.100	0.97563	0.0976	100.10
	Descarga 3	1	-4.691	0.047	0.010	17.884	3.033	50.93	0.924	100		0.100	0.97563	0.0976	1.10

C.3. Resultados teóricos de muestra cargada a 350 kpa con un grado de saturación inicial promedio Sw=46.5%

No. Int	Dr	λ_{ex}	λ_{cex}	$\Delta\bar{p}_0$	e	ε_v	S_w	χ_{corr}	Succión (Secado)	Succión (Humedecimiento)	$p' = P_c + \chi_{corr} * S$	Succión ajustada (Secado)	Succión ajustada (Humedecimiento)	Succión (escaneo)	$P'_{secado} = \chi_{corr} * S_{ajustada}$	$P'_{hum} = P'_{secado} + P_c$	$P'_{tilt LCYS} = p'_{LCYS} + \Delta\bar{p}_0$
							%		Mpa	Mpa	Mpa	Mpa		Mpa	Mpa	Mpa	
1	-	-	-	0.1357	0.578	-	46.53	0.29	35.169	24.879	10.50	0.7968	0.5636	0.7968	0.230	0.580	0.5800
2	0.8102	-0.1769	-	0.1351	0.576	-0.001	48%	0.30	33.756	23.559	10.31	0.7647	0.5337	0.7546	0.226	0.576	0.5988
3	0.8122	-0.1773	-	0.1344	0.574	-0.003	49%	0.30	32.319	22.068	10.10	0.7322	0.5000	0.7050	0.221	0.571	0.5934
4	0.8145	-0.1777	-	0.1337	0.572	-0.004	50%	0.31	30.853	20.361	9.85	0.6990	0.4613	0.6647	0.215	0.565	0.5873
5	0.8171	-0.1781	-	0.1328	0.569	-0.006	51%	0.31	29.353	18.384	9.58	0.6650	0.4165	0.6248	0.209	0.559	0.5804
6	0.8202	-0.1786	-	0.1318	0.565	-0.008	52%	0.32	27.814	16.914	9.28	0.6301	0.3832	0.5850	0.202	0.552	0.5727
7	0.8236	-0.1792	-	0.1306	0.562	-0.010	53%	0.33	26.232	14.414	8.94	0.5943	0.3265	0.5452	0.195	0.545	0.5641
8	0.8276	-0.1799	-	0.1293	0.557	-0.013	54%	0.33	24.600	12.161	8.57	0.5573	0.2755	0.5053	0.186	0.536	0.5545
9	0.8322	-0.1807	-	0.1277	0.552	-0.016	55%	0.34	22.914	10.154	8.15	0.5191	0.2300	0.4652	0.177	0.527	0.5438
10	0.8375	-0.1817	-	0.1260	0.547	-0.020	56%	0.35	21.169	8.394	7.70	0.4796	0.1902	0.4249	0.166	0.516	0.5319
11	0.8436	-0.1827	-	0.1240	0.540	-0.024	57%	0.35	19.360	6.880	7.20	0.4386	0.1559	0.3842	0.155	0.505	0.5188
12	0.8508	-0.1840	-	0.1216	0.532	-0.029	58%	0.36	17.481	5.613	6.65	0.3960	0.1272	0.3431	0.143	0.493	0.5042
13	0.8591	-0.1854	-	0.1188	0.523	-0.035	59%	0.37	15.528	4.593	6.05	0.3518	0.1041	0.3014	0.129	0.479	0.4881
14	0.8690	-0.1872	-	0.1158	0.513	-0.041	60%	0.38	13.496	3.819	5.44	0.3058	0.0865	0.2591	0.115	0.465	0.4712
15	0.8799	-0.1891	-	0.1123	0.500	-0.049	61%	0.39	11.379	3.385	4.79	0.2578	0.0767	0.2161	0.101	0.451	0.4534
16	0.8929	-0.1913	-	0.1078	0.485	-0.059	62%	0.40	9.173	2.957	4.06	0.2078	0.0670	0.1723	0.084	0.434	0.4380
17	0.9095	-0.1942	-	0.1020	0.464	-0.072	63%	0.42	6.872	2.589	3.24	0.1557	0.0586	0.1277	0.065	0.415	0.4182
18	0.9318	-0.1981	-	0.0937	0.434	-0.092	64%	0.44	4.471	2.271	2.30	0.1013	0.0514	0.0822	0.044	0.394	0.3906
19	0.9642	-0.2038	-	0.0935	0.433	-0.092	65%	0.45	4.269	1.996	2.28	0.0967	0.0452	0.0777	0.044	0.394	0.3684
20	0.9650	-0.2039	-	0.0894	0.417	-0.102	66%	0.48	3.262	1.658	1.90	0.0739	0.0376	0.0588	0.035	0.385	0.3683

No. Int	Dr	λ_{ex}	λ_{cex}	$\Delta\bar{p}_0$	e	ϵ_v	S_w	χ_{corr}	Succión (Secado)	Succión (Humedecimiento)	$P' = P_c + \chi_{corr} * S$	Succión ajustada (Secado)	Succión ajustada (Humedecimiento)	Succión (escaneo)	$P'_{secado} = \chi_{corr} * S_{ajustada}$	$P'_{hum} = P'_{secado} + P_c$	$P'_{tilt LCYS} = p'_{LCYS} + \Delta\bar{p}_0$
							%		Mpa	Mpa	Mpa	Mpa		Mpa	Mpa	Mpa	
21	0.9816	-0.2068	-	0.0870	0.408	0.000	66.2	0.48	3.150	1.617	1.71	0.0714	0.0366	0.0562	0.034	0.384	0.3602
22	0.9914	-0.2085	-	0.0889	0.415	0.005	66.9	0.49	2.793	1.482	1.57	0.0633	0.0336	0.0493	0.031	0.381	0.3574
23	0.9836	-0.2071	-0.0385	0.0884	0.414	0.004	68%	0.51	2.371	1.311	1.40	0.0537	0.0297	0.0415	0.027	0.377	0.3530
24	0.9856	-0.2075	-0.0381	0.0880	0.412	0.003	69%	0.52	2.035	1.162	1.27	0.0461	0.0263	0.0352	0.024	0.374	0.3494
25	0.9873	-0.2078	-0.0378	0.0876	0.410	0.002	70%	0.54	1.763	1.032	1.15	0.0400	0.0234	0.0302	0.022	0.372	0.3464
26	0.9888	-0.2081	-0.0375	0.0872	0.409	0.001	71%	0.56	1.543	0.918	1.06	0.0350	0.0208	0.0262	0.019	0.369	0.3439
27	0.9902	-0.2083	-0.0373	0.0869	0.408	0.000	72%	0.57	1.361	0.818	0.98	0.0308	0.0185	0.0229	0.018	0.368	0.3417
28	0.9915	-0.2085	-0.0371	0.0866	0.407	-0.001	73%	0.59	1.208	0.729	0.91	0.0274	0.0165	0.0201	0.016	0.366	0.3399
29	0.9927	-0.2087	-0.0369	0.0864	0.406	-0.002	74%	0.60	1.076	0.652	0.85	0.0244	0.0148	0.0178	0.015	0.365	0.3382
30	0.9938	-0.2089	-0.0367	0.0861	0.405	-0.002	75%	0.62	0.961	0.583	0.79	0.0218	0.0132	0.0157	0.013	0.363	0.3366
31	0.9949	-0.2091	-0.0365	0.0859	0.404	-0.003	76%	0.63	0.859	0.523	0.74	0.0195	0.0118	0.0139	0.012	0.362	0.3352
32	0.9959	-0.2093	-0.0363	0.0856	0.403	-0.004	77%	0.64	0.766	0.469	0.69	0.0174	0.0106	0.0123	0.011	0.361	0.3339
33	0.9970	-0.2095	-0.0361	0.0853	0.402	-0.004	78%	0.66	0.682	0.422	0.65	0.0154	0.0096	0.0108	0.010	0.360	0.3326
34	0.9981	-0.2097	-0.0359	0.0851	0.401	-0.005	79%	0.67	0.604	0.380	0.60	0.0137	0.0086	0.0095	0.009	0.359	0.3313
35	0.9991	-0.2098	-0.0358	0.0848	0.400	-0.006	80%	0.68	0.534	0.334	0.56	0.0121	0.0076	0.0083	0.008	0.358	0.3301
36	1.0002	-0.2100	-0.0356	0.0846	0.399	-0.007	81%	0.69	0.470	0.298	0.52	0.0106	0.0067	0.0073	0.007	0.357	0.3290
37	1.0013	-0.2102	-0.0354	0.0843	0.398	-0.007	82%	0.70	0.412	0.265	0.49	0.0093	0.0060	0.0063	0.007	0.357	0.3280
38	1.0023	-0.2104	-0.0352	0.0841	0.397	-0.008	83%	0.71	0.361	0.234	0.46	0.0082	0.0053	0.0055	0.006	0.356	0.3270
39	1.0033	-0.2106	-0.0350	0.0838	0.396	-0.009	84%	0.73	0.316	0.206	0.43	0.0072	0.0047	0.0048	0.005	0.355	0.3261
40	1.0042	-0.2107	-0.0349	0.0836	0.395	-0.009	85%	0.74	0.277	0.181	0.40	0.0063	0.0041	0.0041	0.005	0.355	0.3253
41	1.0051	-0.2109	-0.0347	0.0834	0.394	-0.010	86%	0.75	0.244	0.158	0.38	0.0055	0.0036	0.0036	0.004	0.354	0.3246
42	1.0059	-0.2110	-0.0346	0.0833	0.394	-0.010	87%	0.76	0.215	0.138	0.36	0.0049	0.0031	0.0032	0.004	0.354	0.3240

No. Int	Dr	λ_{ex}	λ_{cex}	$\Delta\bar{p}_0$	e	ε_v	S_w	χ_{corr}	Succión (Secado)	Succión (Humedecimiento)	$P' = P_c + \chi_{corr} * S$	Succión ajustada (Secado)	Succión ajustada (Humedecimiento)	Succión (escaneo)	$P'_{secado} = \chi_{corr} * S_{ajustada}$	$P'_{hum} = P'_{secado} + P_c$	$P'_{tilt LCYS} = p'_{LCYS} + \Delta\bar{p}_0$
							%		Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	
43	1.0067	-0.2112	-0.0344	0.0831	0.393	-0.011	88%	0.77	0.190	0.119	0.35	0.0043	0.0027	0.0028	0.003	0.353	0.3235
44	1.0073	-0.2113	-0.0343	0.0829	0.393	-0.011	89%	0.79	0.168	0.102	0.33	0.0038	0.0023	0.0024	0.003	0.353	0.3230
45	1.0080	-0.2114	-0.0342	0.0828	0.392	-0.011	90%	0.80	0.147	0.086	0.32	0.0033	0.0020	0.0021	0.003	0.353	0.3225
46	1.0086	-0.2115	-0.0341	0.0826	0.391	-0.012	91%	0.82	0.127	0.072	0.30	0.0029	0.0016	0.0018	0.002	0.352	0.3220
47	1.0093	-0.2116	-0.0340	0.0825	0.391	-0.012	92%	0.83	0.106	0.060	0.29	0.0024	0.0014	0.0015	0.002	0.352	0.3215
48	1.0100	-0.2117	-0.0339	0.0823	0.390	-0.013	93%	0.85	0.083	0.048	0.27	0.0019	0.0011	0.0012	0.002	0.352	0.3209
49	1.0109	-0.2119	-0.0337	0.0820	0.389	-0.014	94%	0.87	0.059	0.037	0.25	0.0013	0.0008	0.0008	0.001	0.351	0.3202
50	1.0119	-0.2121	-0.0335	0.0817	0.388	-0.014	95%	0.90	0.034	0.028	0.23	0.0008	0.0006	0.0005	0.001	0.351	0.3195
51	1.0131	-0.2123	-0.0333	0.0813	0.386	-0.016	96%	0.92	0.000	0.018	0.20	0.0000	0.0004	0.0000	0.000	0.350	
52	1.0151	-0.2126	-0.0330	0.0813	0.386	-0.016	97%	0.95	0.000	0.010	0.20	0.0000	0.0002	0.0000	0.000	0.350	
53	1.0151	-0.2126	-0.0330	0.0813	0.386	-0.016	98%	0.98	0.000	0.001	0.20	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.350	
54	1.0151	-0.2126	-0.0330	0.0813	0.386	-0.016	99%	1.02	0.000	-0.008	0.20	0.0000	-0.0002	0.0000	0.000	0.350	

Dirección General de Estadística y Censos

ANEXO D. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS - PRUEBA DEL PAPEL FILTRO

D.1 Calibración del papel filtro

Se colocan guantes cada vez que sea necesario manipular el papel filtro. Se recortan papeles filtro en círculos de un diámetro de 5.5 cm y se levanta un poco la orilla para que quede una pestaña que permita facilitar su manipulación con ayuda de unas pinzas.



Se seca el papel filtro, al menos 16 horas o toda la noche en el horno. La norma ASTM D5298 indica que estos deben colocarse después en un desecador para almacenarlos hasta que sean usados.

Se preparan 5 soluciones de succión conocida, compuestas de agua destilada y cloruro de sodio o potasio.

Dentro de 5 frascos de vidrio se coloca un elemento inerte con un área superficial mínima que permita aislar los papeles filtro de la solución, en esta prueba se hizo con tubos de pvc pegados al centro del frasco con silicón.



- 1) Se coloca al menos 50 cm^3 de solución dentro de cada frasco y se limpia muy bien las orillas del tubo para que no queden gotas de solución que puedan afectar los resultados.
- 2) Se retira un papel filtro (secado previamente) y con ayuda de unas pinzas se toma el papel filtro de la pestaña e inmediatamente se coloca sobre el elemento inerte dentro del frasco.
- 3) Se coloca la tapa del frasco de vidrio y se sella con una cinta de aislar, se coloca cada uno de los frascos en una caja aislada térmicamente y se introduce en un cuarto de temperatura controlada, cuyas variaciones sean menores de 3°C .
- 4) Debe permitirse el equilibrio entre la succión del papel y la solución dentro del contenedor por un mínimo de 7 días.
- 5) La norma indica que pueden utilizarse contenedores metálicos o bolsas para el proceso de medición de masa del papel filtro, en este caso se utilizaron 2 cajas metálicas de distinto color, y selladas por dentro con una cinta que resiste altas temperaturas. Esto con el objetivo de tapar el orificio generado por las bisagras de la caja y de esta forma aislarla completamente y poder utilizarla en el horno de secado.
- 6) Debe utilizarse una báscula con precisión de 0.0001 g .
- 7) Una vez que han pasado los 7 días de equilibrio se pesa la caja metálica, y después utilizando guantes y pinzas se toma el papel filtro por la pestaña, se saca del frasco, se transfiere a la caja metálica y se cierra la tapa de la caja. Este proceso debe hacerse de 3 a 5 segundos. Inmediatamente se pesa el contenedor con el papel filtro dentro.
- 8) Se coloca el contenedor metálico con el papel filtro en el horno a una temperatura de $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ con la tapa ligeramente abierta para que el papel filtro pierda toda la humedad.
- 9) Los papeles filtro deberán permanecer en el horno por un mínimo de 2 horas. Después de ese tiempo sellar el contenedor metálico y dejar los contenedores en el horno por lo menos 15 minutos para permitir el equilibrio de temperatura.

- 10) Sacar el contenedor metálico con el papel filtro del horno y después determinar la masa total del contenedor metálico caliente con el papel filtro seco, inmediatamente sacar los papeles filtro y volver a determinar la masa del contenedor caliente.

Una vez que las masas han sido determinadas deseche los papeles filtro, en ninguna circunstancia deberán reutilizarse los papeles filtro que ya fueron secados en esta prueba.

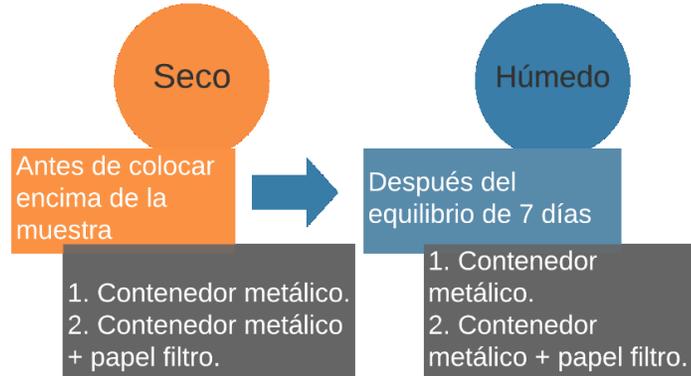
La medición de la masa es un punto crítico para obtener resultados correctos, y debido a las variaciones que se tienen al ser una báscula con tanta precisión, se utilizó un tripié y una cámara para grabar el proceso de medición de masa de los papeles filtro.



Antes de colocar el papel filtro seco en la solución (punto 6 de esta metodología), se realiza la medición de la masa del contenedor metálico, se toma el papel filtro seco del desecador y se transfiere al contenedor metálico previamente pesado. Inmediatamente se coloca en la báscula y se toma la medición de la masa del contenedor metálico con el papel filtro seco. Después de esto se transfiere el papel filtro seco a la solución como lo indica el punto 6 de esta metodología.

D.2 Medición de la succión

- 1) Se realizan los puntos 7 al 16 de la metodología de la calibración de los papeles filtro.
- 2) Se determina la masa de los papeles filtro en 2 etapas: inmediatamente antes de ser colocados en la muestra y después del equilibrio de los 7 días.



- 3) A la hora de tomar las lecturas en la báscula de precisión, se toma el valor cuando la balanza se ha estabilizado, que es cuando aparece el valor “g” en la pantalla de la báscula.
- 4) Para las muestras se colocan tubos de metal (previamente pesados y medidos) y se hinca la muestra inalterada para obtener los especímenes.



- 5) Se coloca un cuadrado de papel aluminio y una liga (previamente pesadas) en el fondo de la muestra, para protegerla de pérdidas de material y se mide la masa total del espécimen.
- 6) Con los valores obtenidos en la caracterización del material se procede a calcular la masa necesaria para llevar a cada espécimen a su correspondiente grado de saturación, y una vez que la muestra haya alcanzado esta masa (ya sea por secado o por humedecimiento) se procede a colocar los papeles filtro como fue indicado en el punto 3 de la metodología de medición de la succión total.

ANEXO E. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS – LABRADO DE MUESTRAS INALTERADAS DE ARCILLAS EN EL ANILLO DEL CONSOLIDÓMETRO

- 1) Si la muestra se va a utilizar con condiciones de humedad natural este paso se omite. Por el contrario, si es necesario disminuir la humedad de la muestra, se debe dejar que la muestra inalterada seque poco a poco. Si la muestra inicialmente tiene mucha humedad, se recomienda ponerla por varios días en una hielera para que comience a secarse. Después se pone en una superficie, como una charola y se coloca en un cuarto de humedad controlada. Se cubre la muestra con una franela húmeda y cada día se revisa, si la muestra se está secando muy rápido (presencia de pequeñas grietas) se humedece nuevamente la franela hasta que se observe que ya puede permanecer la muestra sin franela. Se deja descubierta por varios días y se toma una pequeña muestra para sacar el contenido de humedad y revisar si es cercano al valor que necesitamos, de lo contrario se sigue dejando que seque hasta que llegue a la humedad deseada.
- 2) Si la muestra se requiere completamente seca, y ya pasó por el proceso de secado del paso anterior, se recomienda colocarla en una charola encima del horno de secado, lo cual permitirá perder humedad, pero no de forma drástica y una después comenzar a labrar antes de que esté completamente seca. Las herramientas recomendadas para realizar el labrado son seguetas y navajas de cúter nuevas, que tengan filo. También se recomienda utilizar guantes anticorte, ya que facilita el labrado y evita heridas en las manos.
- 3) Se coloca la muestra inalterada teniendo cuidado de que el lado superior corresponda al mismo que cuando se sacó la muestra. Se toma el anillo de consolidación para tomar las dimensiones como referencia y se traza un cuadrado de tamaño mayor, es importante que se deje espacio mayor al del anillo, ya que al labrar hay mucha pérdida de material y podría no alcanzarnos la muestra que vamos a cortar.
- 4) Una vez trazado el cuadrado, se toma la segueta y con movimientos firmes adelante y hacia atrás se corta la pieza como se observa en la siguiente imagen. Es importante hacerlo con paciencia, ya que un movimiento muy brusco, o azotar la muestra en la mesa de trabajo podría generar fisuras.



- 5) Una vez cortada la pieza de forma vertical, se toma el anillo de consolidación junto con las extensiones y se toma como referencia para la altura. Se hace una marca más allá de la altura del anillo para dejar espacio de sobra y se comienza a cortar con la segueta. Este paso es importante porque si se hizo el corte de la pieza con una altura suficiente, al realizar el corte horizontal podemos obtener 2 piezas que nos van a servir para 2 muestras, y así ahorrar material y disminuir el trabajo de labrado.



Una vez que se tiene la pieza del paso anterior, se coloca el anillo de consolidación encima y se cortan los sobrantes para dejar un rectángulo con el cual trabajar.



Si la muestra que se va a utilizar será completamente seca entonces se procede a colocar el rectángulo del paso anterior en el horno de secado por al menos 24 horas. Una vez seco continuar con el siguiente paso.

Se toma el rectángulo y se coloca el anillo de consolidación encima, se puede marcar el exterior del círculo con un plumón y utilizar esta marca como guía para comenzar a cortar con la segueta. Es importante que el corte se realice un poco más allá de la marca hecha con plumón, para dejar un espacio de sobra que nos permite asegurarnos de no cortar de más.



Conforme se va cortando la pieza es importante revisar continuamente si el corte va de forma correcta, esto se realiza colocando el anillo de consolidación encima y revisando que no se haya pasado.

Cuando ya se dio forma se coloca el anillo encima de la muestra y se trata de insertar, para ello se hacen pequeños cortes con la segueta en las partes de suelo que sobresalgan y poco a poco se va metiendo el anillo.



Una vez que el anillo esté dentro de la muestra, se toma la segueta y se corta con cuidado el sobrante. Es importante no hacerlo bruscamente ya que podemos romper la muestra o dañarla.



Finalmente se toma una navaja, con cuidado y de forma suave se nivela la muestra para que quede pareja de la parte superior e inferior.



Dirección General de Bibliotecas UAQ