



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

**MODELACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS MEDIANTE ESFUERZOS EFECTIVOS.**

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias (Geotecnia)

**Presenta:**  
Ing. Cesar Isaac Verdín Montes

Dirigido por:  
Dr. Eduardo Rojas González

**SINODALES**

Dr. Eduardo Rojas González  
Presidente



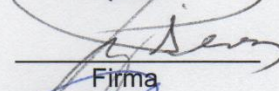
Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Secretario



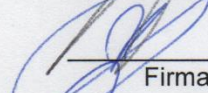
Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Vocal



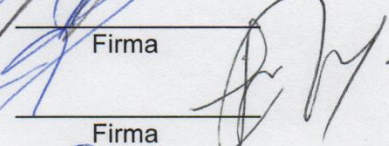
Firma

Dr. Omar Chávez Alegría  
Suplente



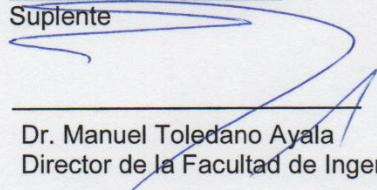
Firma

Dra. Teresa López Lara  
Suplente

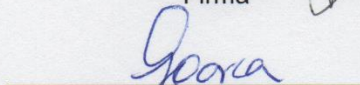


Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad de Ingeniería



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado



Firma

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Diciembre, 2018  
México

## RESUMEN

La modelación del comportamiento de los suelos inicio con el modelado de suelos saturados, concebido como un medio bifásico (Suelo y agua) para lo cual se adoptó la ecuación de esfuerzos efectivos y la noción de estado crítico. No obstante, la mayoría de los suelos en el cual se desplantan las obras civiles se encuentra en un estado no saturado. Dentro de ellos se encuentran los suelos expansivos que son arcillas del tipo montmorillonita. El modelado del comportamiento expansivo propone desafíos propios vinculados a sus fases que la conforman, su estructura, y la influencia de fenómenos como la histéresis de las curvas retención suelo-agua, el endurecimiento por succión y el acoplamiento hidromecánico. Por esta razón es ineludible el uso del concepto de esfuerzo efectivo como variable constitutiva para poder estudiar de manera más completa y sencilla el comportamiento de estos materiales además de unificar la teoría de los suelos saturados con los suelos no saturados.

En este trabajo se propone un modelo constitutivo basado en el concepto de esfuerzos efectivos que toma en cuenta el esfuerzo de succión del suelo (que involucra el grado de saturación) y el esfuerzo neto. De esta manera, se adopta la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop y se realiza el acoplamiento hidromecánico para simular el comportamiento volumétrico de los suelos expansivos dentro de un marco elastoplástico que toma en cuenta la compacidad relativa del suelo. Se realizan algunas comparaciones teórico experimentales para conocer la precisión del modelo.

Palabras Clave: Suelos no saturados, suelos expansivos, modelo constitutivo, succión, esfuerzos efectivos, acoplamiento hidromecánico.

## **SUMMARY**

The modeling of the behavior of soils started with the modeling of saturated soils, conceived as a two-phase (soil and water) for which the equation of effective stress and the notion of critical state were adopted. However, most of the soils in which the civil works are located is in an unsaturated state. Among them are the expansive soils that are clays of the montmorillonite type. The modeling of the expansive behavior proposes own challenges linked to its phases that conform it, its structure, and the influence of phenomena such as the hysteresis of the soil-water retention curves, the suction hardening and hydromechanical coupling. For this reason, it is essential to use the concept of effective stress as a constitutive variable to be able to study the behavior of these materials in a more complete and simple way, in addition to unifying the theory of saturated soils with unsaturated soils.

In this work a constitutive model is proposed based on the concept of effective stress that considers the stress of suction of the soil (which involves the degree of saturation) and the net stress. In this way, Bishop's effective stress equation is adopted and hydromechanical coupling is performed to simulate the volumetric behavior of expansive soils within an elastoplastic framework that considers the relative compactness of the soil. Some experimental theoretical comparisons are made to know the accuracy of the model.

**Key Works:** Unsaturated Soils, expansive soils, constitutive model, suction, effective stress, hydromechanical coupling.

## DEDICATORIA

*En el desarrollo de esta tesis, se presentaron momentos en los que la única solución viable parecía ser tirar la toalla, en ocasiones todos los apoyos y fuentes de información que tenía a mi mano, empezaron a ser confusos e inconstantes.*

*Pero, en esos mismos momentos, tuve la dicha de poder disfrutar y contar con el apoyo de mi madre, apoyo que más que de carácter moral presento la motivación y planteamiento de metas necesarias para poder proseguir a la meta. Gracias a mi madre María Lucila Verdín Montes por creer y confiar en mí, gracias a Catalina Verdín Avena por ser nuestro ángel y cuidarnos desde el cielo.*



## AGRADECIMIENTOS

*A cada uno de mis amigos que hicieron más agradable la estadía en esta ciudad y a los que desde lejos siempre conté con su apoyo y palabras de aliento para continuar con mi trayecto de vida, a Paulina Lizeth Talamantes Carrillo por enseñarme calma dentro de mis fracasos y continuar combatiendo por mis sueños.*

*A María Lucila Verdín Montes y Catalina Verdín Avena por ser mis guías de vida y construir los cimientos de este hombre que soy hoy.*

*A la persona cercana a este proyecto tesis, el Dr. Eduardo Rojas González, por ser un gran mentor, y dedicar su valioso tiempo en esta investigación, ya que con su apoyo y guía certera fue posible terminar este proyecto. El mejor tutor y profesor que pude haber tenido, además por darme la oportunidad y confianza de trabajar bajo su dirección.*

*Agradezco a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, de quien recibí una valiosa oportunidad en pertenecer a esta maestría y guía dentro de la institución.*

*A los miembros de mi sínodo, el Dr. Jaime Horta Rangel, el Dr. Omar Chávez Alegría, y la Dra. Teresa López Lara por sus sabias enseñanzas dentro y fuera del aula, sus acertados señalamientos para mejorar este trabajo, y su apoyo dentro de esta maestría.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el imprescindible apoyo que finalmente derivó en esta investigación.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	II
SUMMARY .....	III
DEDICATORIA .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
SIMBOLOGÍA.....	XIX
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 HIPOTESIS.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.4.1 <i>Objetivo General:</i> .....	3
1.4.2 <i>Objetivo Particular:</i> .....	3
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>4</b>
2.1 EL SUELO.....	4
2.2 SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSABLES .....	5
2.2.1 <i>Suelos expansivos</i> .....	6
2.2.1.1 Presión de expansión. ....	8
2.2.2 <i>Suelos colapsables</i> .....	9
2.2.3 <i>Estructura interna de un suelo.</i> .....	10
2.3 ESTADO DE ESFUERZOS EN EL SUELO. ....	11
2.4 SUCCIÓN .....	15
2.5 CURVA DE RETENCIÓN AGUA – SUELO (CRAS).....	20
2.6 DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN SUELOS NO SATURADOS.....	21
2.7 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA LOS SUELOS NO SATURADOS .....	24
2.7.1 <i>Modelos basados en variables independientes</i> .....	25
2.7.2 <i>Modelos basados en esfuerzos efectivos.</i> .....	29
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>31</b>
3.1 OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA .....	31
3.2 PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO EN ESTUDIO.....	32
3.2.1 <i>Contenido de humedad (w).</i> .....	32

3.2.2	Densidad de Sólidos ( $S_s$ ).....	32
3.2.3	Granulometría.....	33
3.2.4	Superficie específica.....	34
3.2.5	Límites de Atterberg y Contracción.....	35
3.3	PROCTOR MODIFICA.....	36
3.4	SUCCIÓN.....	37
3.4.1	Obtención de la CRAS.....	38
3.5	PRUEBAS ODOMÉTRICAS Y EN PRENSA TRIAXIAL DE UN SUELO EXPANSIVO.....	39
3.5.1	Labrado en anillo de muestra distinto grado de saturación.....	39
3.5.2	Prueba odométrica.....	39
3.5.3	Prueba en prensa triaxial.....	41
3.6	PLANTEAMIENTO DEL MODELO ELASTOPLÁSTICO BASADO EN ESFUERZO EFECTIVO.....	42
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>48</b>
4.1	CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS ÍNDICE DEL SUELO EN ESTUDIO.....	48
4.1.1	Potencial de expansión y mineralogía de suelo en estudio.....	49
4.2	PROCTOR MODIFICADA.....	49
4.3	CURVA DE RETENCIÓN AGUA – SUELO DEL SUELO ESTUDIADO.....	50
4.4	PRUEBAS ODOMÉTRICAS DEL SUELO ESTUDIADO.....	52
4.4.1	Presión de expansión en odómetro.....	54
4.4.1.1	Método de triple odómetro.....	54
4.4.1.2	Método A por la normativa ASTM D-4546.....	56
4.4.2	Prueba de expansión en prensa triaxial.....	57
4.4.3	Deformaciones unitarias.....	58
4.4.4	Curvas de Compresibilidad.....	59
4.4.5	Resumen de pruebas odométricas.....	61
4.4.5.1	Presión de expansión.....	61
4.5	LÍMITE DE CONTRACCIÓN (MONITOREO DE SECADO).....	62
4.6	COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTALES.....	66
4.6.1	Comparación con resultados experimentales con material de esta tesis.....	66
4.6.2	Resultados con $\chi_{0S0} w=23.77\%$ promedio = 0.390 MPa.....	69
4.6.3	Resultados con $\chi_{0S0} w=7.85\%$ promedio = 0.470 MPa.....	79
4.6.4	Resultados con CRAS, $\chi_{0S0} w=23.77\%$ promedio = 5.839 MPa.....	86
4.6.5	Resultados con CRAS, $\chi_{0S0} w=7.85\%$ promedio = 20.994 MPa.....	94
4.6.6	Comparación con resultados utilizando el Modelo Básico de Barcelona con material de esta tesis.....	101

<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>109</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>110</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
<b>ANEXO A (PROPIEDADES ÍNDICE Y PROCTOR MODIFICADA).....</b>	<b>I</b>
ANEXO A-1 (GRANULOMETRÍA POR TAMICES EH HIDRÓMETRO).....	I
ANEXO A-2 (DATOS DE LIMITES DE ATTERBERG).....	II
ANEXO A-3 (DATOS DE PRUEBA PROCTOR MODIFICADA DE SUELO DE JURICA). ....	II
<b>ANEXO B (DATOS DE CURVAS DE RETENCIÓN AGUA – SUELO DE JURICA). ....</b>	<b>III</b>
ANEXO B-1 (OBTENCIÓN DE CURVAS DE RETENCIÓN AGUA – SUELO DE JURICA POR MÉTODO DE SHENG). ....	V
<b>ANEXO C (RESULTADOS DE ENSAYES DE CONSOLIDACIÓN EXPERIMENTAL Y CÁLCULOS TEÓRICOS).....</b>	<b>VI</b>
C.1.1 CONSOLIDACIÓN ISOTRÓPICA. ....	VI
C.1.2 ENSAYE TRIAXIAL. ....	VI
<b>ANEXO D (CALCULO DE TRAYECTORIA DE HUMEDECIMIENTO Y SUPERFICIE DE FLUENCIA CARGA BAJO COLAPSO). ....</b>	<b>VII</b>
D.1.1 MUESTRA CARGADA A 50 kPA TRAYECTORIA DE HUMEDECIMIENTO. ....	VII
D.1.2 MUESTRA CARGADA A 200 kPA. ....	IX
D.1.3 MUESTRA CARGADA A 300 kPA. ....	XI
D.1.4 MUESTRA CARGADA A 400 kPA. ....	XIII
D.1.5 MUESTRA CARGADA A 500 kPA. ....	XV
D.2.1 MUESTRA CARGADA A 50 kPA SECADO AL HORNO. ....	XVII
D.2.2 MUESTRA CARGADA A 200 kPA SECADO AL HORNO. ....	XIX
D.2.3 MUESTRA CARGADA A 300 kPA SECADO AL HORNO. ....	XXI
D.2.4 MUESTRA CARGADA A 500 kPA SECADO AL HORNO. ....	XXIII
<b>ANEXO E (RESULTADOS DE ENSAYES DE PRENSA TRIAXIAL Y CÁLCULOS TEÓRICOS). ....</b>	<b>XXV</b>
E.1. ENSAYE TRIAXIAL. ....	XXV
E.1.1 MUESTRA CARGADA A 50 kPA TRAYECTORIA DE HUMEDECIMIENTO.....	XXVI
E.1.2 MUESTRA CARGADA A 200 kPA.....	XXVIII
E.1.3 MUESTRA CARGADA A 300 kPA.....	XXX
E.1.4 MUESTRA CARGADA A 400 kPA.....	XXXII
E.1.5 MUESTRA CARGADA A 500 kPA.....	XXXIV

E.2.1 MUESTRA CARGADA A 50 kPA SECADO AL HORNO.....	XXXVI
E.2.2 MUESTRA CARGADA A 200 kPA SECADO AL HORNO.....	XXXVIII
E.2.3 MUESTRA CARGADA A 300 kPA SECADO AL HORNO.....	XL
E.2.4 MUESTRA CARGADA A 500 kPA SECADO AL HORNO.....	XLII

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1.- Ecuaciones para esfuerzos efectivos en suelos no saturados.....	13
Tabla 2-2.- Métodos experimentales para medición de la succión en suelos. ....	18
Tabla 3-1.- Dimensiones para minerales de arcilla. ....	34
Tabla 3-2.- Potencial de Expansión.....	36
Tabla 3-3.- Concentraciones de soluciones de sal para evaluar la succión del suelo. .....	38
Tabla 4-1 Resumen de pruebas para la determinación de las propiedades índices del suelo en estudio. ....	48
Tabla 4-2.- Parámetros obtenidos para CRAS.....	52
Tabla 4-3.- Resultados de primer grupo de muestras con $w = 23.77\%$ .....	53
Tabla 4-4.- Resultados del segundo grupo de muestras con $w = 7.85\%$ .....	53
Tabla 4-5.- Resumen de Presión de Expansión. ....	62
Tabla 4-6.- Parámetros Generales para la ecuación y construcción de Superficies de Fluencia después del secado eh inicial. ....	67
Tabla 4-7.- Parámetros Generales para la ecuación y construcción de deformación volumétrica. ....	69
Tabla 4-8.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento. ....	70
Tabla 4-9.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento. ...	71
Tabla 4-10.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento. .	73
Tabla 4-11.- Parámetros para muestra cargada a 400 kPa en humedecimiento. .	74
Tabla 4-12.- Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento. .	76
Tabla 4-13.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento. ...	79

Tabla 4-14.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento. .	80
Tabla 4-15.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento. .	82
Tabla 4-16.- Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento. .	83
Tabla 4-17.- Parámetros para muestra en ensaye de Prensa Triaxial en humedecimiento. ....	85
Tabla 4-18.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento. ...	87
Tabla 4-19.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento. .	88
Tabla 4-20.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento. .	90
Tabla 4-21.- Parámetros para muestra cargada a 400 kPa en humedecimiento. .	91
Tabla 4-22.- Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento. .	93
Tabla 4-23.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento. ...	95
Tabla 4-24.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento. .	96
Tabla 4-25.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento. .	98
Tabla 4-26.- Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento. .	99
Tabla 4-27.- Parámetros Generales para la construcción de la Superficie de Fluencia Carga-Colapso del BBM. ....	101
Tabla 4-28.- Parámetros para muestra dentro del Modelo (humedecimiento). ...	101
Tabla 4-29.- Parámetros para muestra dentro del Modelo (humedecimiento). ...	105



## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2-1.- Fases de un suelo no saturado (D. Fredlund and Rahardjo, 1993) .....	4
Figura 2-2.- Molécula de arcilla montmorillonita. (Crespo Villalaz, 2007) .....	7
Figura 2-3.- Porcentaje de arcilla en Cd. de Querétaro (Concyteq, 2002). .....	8
Figura 2-4.- Estructura de un suelo colapsable. ....	9
Figura 2-5.- Distribución de la estructura de los suelos (Rojas González, 2013). .	10
Figura 2-6.- Esquema de esfuerzos actuantes en una sección de suelo saturado. .....	11
Figura 2-7.- Esquema de esfuerzos actuantes en una sección de suelo no saturado. .....	14
Figura 2-8.- Modelo capilar (Fredlund et al., 2012) .....	17
Figura 2-9.- Elementos de la curva de retención agua-suelo (D.G. Fredlund and Rahardjo, 1993).....	20
Figura 2-10.- Curva de compresibilidad de suelos. (Chávez, 2015) .....	23
Figura 2-11.- Comportamiento esfuerzo - deformación de una muestra de suelo.	24
Figura 2-12.- Superficie de fluencia (p,q). .....	27
Figura 2-13.- Análisis Volumétrico de una muestra sujeta a proceso secado- humedecimiento (Rojas González, 2013). .....	27
Figura 2-14.- Superficie de carga colapso (Rojas González, 2013). .....	28
Figura 2-15.- Superficie de fluencia par aun suelo expansivo plano (p,s) .....	29
Figura 3-1.- Extracción de muestra inalterada.....	32
Figura 3-2.- Relaciones Volumétricas para a) suelos no saturados y b) suelos saturados.....	33
Figura 3-3.- Ensaye prueba de hidrómetro.....	34

Figura 3-4.- Carta de plasticidad. ....	35
Figura 3-5.- Ensaye de límite de contracción. ....	36
Figura 3-6.- Colocación del papel filtro a) sobre muestra, b) calibración.....	38
Figura 3-7.- Labrado de muestras, a) secado gradualmente al aire, b) secado completamente al horno. ....	39
Figura 3-8.- Croquis de la muestra colocada en consolidómetro y prensa triaxial. ....	40
Figura 3-9.- Ensaye de consolidación del primer grupo. ....	41
Figura 3-10.- Ensaye en prensa triaxial.....	42
Figura 3-11.- Modelo de comportamiento volumétrico utilizando esfuerzos efectivos (Rojas y Chávez, 2013). ....	43
Figura 3-12.- Relación volumétrica contra succión.....	45
Figura 3-13.- Relación "ln e vs ln S" .....	46
Figura 4-1.- Carta de plasticidad SUCS con el suelo en estudio.....	49
Figura 4-2.- Curva de Compactación por Proctor modificada.....	50
Figura 4-3.- CRAS del suelo expansivo estudiado. ....	51
Figura 4-4.- Contenido de humedad (w) vs succión. ....	51
Figura 4-5.- Succión por método Sheng.....	52
Figura 4-6.- Expansión - Colapso en muestras con $W = 23.77\%$ .....	55
Figura 4-7.- Expansión - Colapso en muestras con $W = 7.85\%$ .....	56
Figura 4-8.- Presión de Expansión mediante Método A. ....	57
Figura 4-9.- Presión de expansión en prensa triaxial. ....	58

Figura 4-10.- Deformación unitaria a diferentes incrementos de carga ( $w_0 = 23.77\%$ ). .....	59
Figura 4-11.- Deformación unitaria a diferentes incrementos de carga ( $w_0 = 7.85\%$ ). .....	59
Figura 4-12.- Grafica de Curvas de compresibilidad en esfuerzo neto a distintas humedades iniciales.....	60
Figura 4-13.- Grafica de Curva de compresibilidad en esfuerzo efectivo. ....	61
Figura 4-14.- Relación de vacíos vs Succión en prueba de Limite de Contracción. .....	63
Figura 4-15.- Relación de vacíos vs Grado de saturación en prueba de Limite de contracción.....	63
Figura 4-16.- Relación de vacíos ( $e$ ) vs $\chi_s$ de saturación en prueba de Limite de contracción.....	64
Figura 4-17.- esfuerzo efectivo ( $p'$ ) vs succión en prueba límite de contracción. ..	64
Figura 4-18.- Consolidación Isotrópica.....	65
Figura 4-19.- representación de la SFCC después del secado.....	67
Figura 4-20.- Trayectoria de secado y Superficies de Fluencias Colapso Bajo Carga (SFCC) para cada grupo de muestras obtenidas mediante CRAS. ....	68
Figura 4-21.- Trayectoria de secado y Superficies de Fluencias Colapso Bajo Carga (SFCC) para cada grupo de muestras obtenidas mediante compresibilidad. ....	68
Figura 4-22.- Grafica $P'$ vs $S$ , muestra a 50 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento). .....	70
Figura 4-23.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	71

Figura 4-24.- Grafica P' vs S, muestra a 200 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	72
Figura 4-25.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	72
Figura 4-26.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 300 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	73
Figura 4-27.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	74
Figura 4-28.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 400 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	75
Figura 4-29.- Acercamiento a figura 4-28.....	75
Figura 4-30.- Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	76
Figura 4-31.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 500 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	77
Figura 4-32.- Acercamiento figura 4-31.....	77
Figura 4-33.- Deformación Volumétrica en muestra cargada a 500 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	78
Figura 4-34.- Grafica P' vs S, muestra a 50 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento). .....	79
Figura 4-35.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	80
Figura 4-36.- Grafica P' vs S, muestra a 200 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento). .....	81

Figura 4-37.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	81
Figura 4-38.- Grafica P' vs S, muestra a 300 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento). .....	82
Figura 4-39.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	83
Figura 4-40.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 500 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	84
Figura 4-41.- Acercamiento figura 4-40.....	84
Figura 4-42.- Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	85
Figura 4-43.- Grafica P' vs S, muestra en ensaye de Prensa Triaxial con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	86
Figura 4-44.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 50 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	87
Figura 4-45.- Deformación Volumétrica en muestra cargada a 50 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	88
Figura 4-46.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 200 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	89
Figura 4-47.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	89
Figura 4-48.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 300 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	90
Figura 4-49.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	91

Figura 4-50.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 400 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	92
Figura 4-51.- Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	92
Figura 4-52.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 500 kPa con $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	93
Figura 4-53.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 50 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	95
Figura 4-54.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	96
Figura 4-55.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 200 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	97
Figura 4-56.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	97
Figura 4-57.- Grafica P' vs S, muestra a 300 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento). .....	98
Figura 4-58.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	99
Figura 4-59.- Grafica P' vs S, muestra a 500 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento). .....	100
Figura 4-60.- Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con $w_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	100
Figura 4-61.- Grafica P vs S de muestra ensayadas en $W_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	102
Figura 4-62.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	103

Figura 4-63.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	103
Figura 4-64 Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	104
Figura 4-65.- Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	104
Figura 4-66.- Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con $w_0 = 23.77\%$ (Humedecimiento).....	105
Figura 4-67.- Grafica P vs S de muestra ensayadas en $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	106
Figura 4-68 .- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	106
Figura 4-69.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	107
Figura 4-70.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	107
Figura 4-71 Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con $W_0 = 7.85\%$ (Humedecimiento).....	108



## SIMBOLOGÍA

$p_{0\ net}$  = esfuerzo de preconsolidación.

$p_{net}$  = esfuerzo medio neto.

$G_w$  = Grado de Saturación.

$F$  = Fuerza aplicada a una placa unitaria.

$A$  = área de la placa en función unitaria.

$A_{si}$  = Área de la placa en contacto con solidos

$A_{wl}$  = Área de la placa en contacto con el agua.

$A_{aj}$  = Área de la placa en contacto con el aire

$\sigma$  = Esfuerzo total.

$\sigma'$  = Esfuerzo efectivo.

$u_w$  = Presión de poro de agua

$u_a$  = Presión de poro en el aire.

$P_{si}^*$  = esfuerzo vertical principal aplicado a los sólidos por la placa.

$\sigma_{net}$  = esfuerzo neto.

$\chi$  = Parámetro relacionado con el  $G_w$ .

$S$  =Succión.

$S_0$  =Succión inicial.

$\beta'$  = Factor de unión.

$\psi$  = Parámetro de cero a uno.

$p''$  = Presion de poro de agua negativa.

$\sigma_{ij}$  = esfuerzo total aplicado en las fronteras del suelo.

$\delta_{ij}$  = delta de Kronecker

$p_{net}$  = esfuerzo medio neto.

$\psi$  = Succión total.

$R$  = Constante universal de los gases.

$T$  = Temperatura absoluta.

$v_w$  = volumen especifico del agua.

$\omega_v$  = masa molecular del vapor de agua.

$u_v$  = presión parcial de vapor de agua

$\psi_m$  = Succión mátrica.

$u_{vo}$  = presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie horizontal de agua pura a la misma temperatura.

$\psi_o$  = Succión osmótica.

$r_t$  = Radio del tubo capilar.

$T_s$  = Tensión superficial.

$\alpha_t$  = Ángulo de contacto.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua.

$P_{atm}$  = Presión atmosférica.

$h_c$  = Altura capilar.

CRAS = Curvas de Retención Agua – Suelo.

$\theta$  = Humedad volumétrica

$\theta_r$  = Humedad volumétrica residual.

$\theta_s$  = Humedad volumétrica saturada.

e = Relación de vacíos.

(1+e) = Volumen de la muestra.

p = Esfuerzo medio neto aplicado.

$\lambda$  = Pendiente del estado normalmente consolidado del suelo (Carga).

$\kappa$  = Pendiente del estado preconsolidado del suelo (o descarga del suelo).

q = Esfuerzo desviador.

$\varepsilon^e$  = Deformación elástica.

$\varepsilon^p$  = Deformación plástica.

$f_y$  = Punto de fluencia.

BBM = Modelo Básico de Barcelona.

LEC = Línea del Estado Crítico.

Ps = Esfuerzo de Tensión.

M = Pendiente del estado crítico.

q = Esfuerzo desviador.

LC = superficie de carga y colapso.

BExM = Modelo expansivo de Barcelona.

IS = Incremento de succión.

DS = Decremento de succión.

LN = Línea Neutra.

$\delta_{ij}$  = Delta de Kroncker.

w = Contenido de humedad del suelo.

$\varepsilon_v$  = Deformación volumétrica del suelo

$\Delta V$  = Diferencia del volumen inicial, después de la deformación.

$V_0$  = Volumen inicial.

$e_0$  = Relación de vacíos inicial

$\chi S$  = Endurecimiento por succión.

$\chi_0 S_0$  = Endurecimiento por succión.

$\varepsilon_v^p$  = Deformación volumétrica plástica.

$dp'_0$  = Endurecimiento por deformación plástica durante la carga.

$\Delta \bar{p}$  = incremento de carga.

$P_c$  = carga de sitio y/o carga de fabricación de muestra.

$D_r$  = Densidad relativa.

$e_{max}$  = Relación de vacíos máxima.

$e_{min}$  = Relación de vacíos mínima.

$\lambda_{ex}$  = Índice de expansión.

$\lambda_{cex}$  = Índice de expansión-colapso.

$S_0$  = Succión inicial.

$S_f$  = Succión final.

$\Delta S$  = Diferencia de succión inicial contra la final.

$V_v$  = Volumen de Vacíos.

$V_a$  = Volumen de aire.

$V_w$  = Volumen del agua.

$W_a$  = Peso del aire.

$W_w$  = Peso del agua.

$W_s$  = Peso de sólidos.

Ss = Densidad de Solidos.

Se = Superficie especifica.

LL = Limite líquido.

LP = Limite plástico.

IP = Índice plástico.

SFDS = Superficie de fluencia después del secado,

SFCC = Superficie de fluencia colapso bajo carga.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de suelos se desarrolló con los suelos saturados. Estos materiales están concebidos como un medio de dos fases (Suelo y Agua). El Dr. Karl Von Terzaghi (1936) describe la utilización del esfuerzo efectivo como una variable de estado que controla la relación esfuerzo-deformación para dicho material. Sin embargo, la gran mayoría de los suelos donde se desplantan las obras ingenieriles se encuentran en un estado no saturado. Dentro de estos materiales se encuentran los suelos expansivos. Estos suelos generalmente son arcillas del tipo montmorillonita, los cuales presentan un comportamiento peculiar cuando experimentan cambios en el contenido de humedad (Elarabi, 1997).

La descripción del comportamiento volumétrico en suelos expansivos está influenciada por el humedecimiento y el secado del material. Estos ciclos de humedecimiento y secado provocan incrementos y reducciones de su volumen que influenciados por otras variables como son: las propiedades físico-química del material, su estructura, su relación de vacíos y condiciones de esfuerzo a los que están sometidos.

La creación de modelos constitutivos para suelos no saturados implica generar modelos para el comportamiento de un suelo que va desde el estado saturado hasta el seco. Varios modelos constitutivos están basados en el hecho que la succión aumenta con el decremento del grado de saturación y el esfuerzo medio neto (Alonso et al., 1990, Alonso et al., 1999, Wheeler et al., 2003, Sheng et al., 2008) y muy pocos incorporan el cambio del rango de succión en utilización de un esfuerzo efectivo como variable de estado.

### 1.1 JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo, se pretende exponer aspectos relevantes de la mecánica de suelos no saturados a los que se enfrentan los ingenieros especializados en geotecnia. Entender el comportamiento mecánico e hidráulico de estos suelos es de gran importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de obras civiles. Estos suelos están sujetos a cambios de humedad que causan

importantes modificaciones en su resistencia y deformabilidad. Por lo que el estudio del comportamiento de suelos no saturados ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación debido a las dificultades para la aplicación de la mecánica de suelos tradicional a los problemas geotécnicos que se plantean en este tipo de material.

El problema que nos ocupa en esta tesis es dar luz en el campo de la utilización del modelo de esfuerzo efectivo en los suelos expansivos, con el propósito de impulsar su aplicación en la geotecnia.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelado de un suelo expansivo plantea desafíos propios vinculados a sus fases que la conforman, su estructura, y la influencia de fenómenos como la histéresis de las curvas de retención suelo-agua, el endurecimiento por succión y el acoplamiento hidromecánico.

La implementación de un modelo para suelos no saturados en el cual la variable de esfuerzo efectivo permita simplificar las ecuaciones constitutivas, representa la unificación de todas las teorías de mecánicas de suelos en una sola ecuación.

Los desafíos que representa la implementación de los esfuerzos efectivos se muestran en las diferentes ecuaciones que han sido propuestas. Desde definir el concepto de esfuerzo efectivo para el caso de los suelos no saturados es ya un reto importante.

Esto implicaría una generalización para formar un modelo que simule el comportamiento hidromecánico del suelo, y la utilidad del mismo dependerá que tan bien se pueda representar el fenómeno físico que se pretende adaptar a los cambios volumétricos generados por un suelo expansivo.

### 1.3 HIPOTESIS

Es posible desarrollar un modelo para simular el comportamiento de los suelos expansivos utilizando la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop y el acoplamiento hidro-mecánico.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo General:

Desarrollar un modelo constitutivo acoplado para el comportamiento de los suelos expansivos bajo el principio de esfuerzo efectivo

#### 1.4.2 Objetivo Particular:

- Obtener los parámetros de expansión mediante un programa de ensayos experimentales adecuado para el suelo expansivo y de acuerdo a la normatividad y teoría relevante para el comportamiento del suelo no saturado.
- Estudiar el comportamiento de suelos expansivos bajo diferentes trayectorias de esfuerzo.

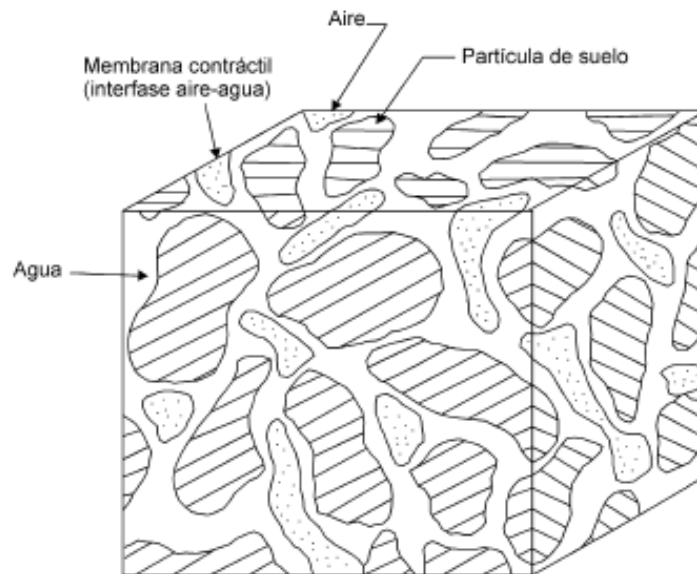


## 2. Estado del arte

### 2.1 El suelo

El término “suelo” ha sido definido de diferentes maneras pero una bastante completa es: “Suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos quien sobre ella se asientan” (Crespo Villaluz, 2007).

El suelo se conforma por distintas fases, una sólida (minerales), líquida (agua en suelo, la cual contiene sustancias disueltas), gaseosa (aire) y la membrana contráctil del agua adsorbida que presenta propiedades de la interacción entre la fase sólida y líquida ([Figura 2-1](#)).



**Figura 2-1.- Fases de un suelo no saturado** (D. Fredlund y Rahardjo, 1993)

La fase líquida, compuesta por el agua libre, el aire disuelto y las sales disueltas, ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupados por la fase gaseosa. La materia en esta fase puede ser cualquier líquido miscible o inmiscible (Lu y Likos, 2004).

La presencia de la membrana contráctil afecta la condición de un suelo no saturado ocasionado por la tensión superficial, y la dirección donde actúa depende de la succión mátrica y el acomodo de las partículas del suelo (D. Fredlund y Rahardjo, 1993).

El espesor de la membrana contráctil se considera del orden de algunas capas moleculares; por lo que, al obtener las relaciones volumétricas y gravimétricas su masa se considera parte de la fase líquida.

Lu y Likos, (2004) establecen que las variables de los suelos pueden dividirse en dos tipos generales: Las propiedades físicas, y funciones constitutivas. En el primero se puede mencionar como la densidad, viscosidad del aire y el agua, y tensión superficial del agua. En cambio, en las funciones constitutivas se puede introducir a la curva de retención agua-suelo (CRAS).

Los cambios de volumen por secado de los suelos no saturados se asocian directamente a variaciones de humedad y por ende a variaciones de succión. La relación entre la succión y otras variables como el grado de saturación ( $G_w$ ) se puede representar mediante las curvas de retención agua-suelo (Lu y Likos, 2006).

El primer simposio para suelos no saturados reconocido por investigadores de ingeniería geotécnica fue la conferencia "Pore Pressure and Suction in Soils" (Croney and Coleman, 1961) en Londres, progresivamente ha fascinado el desafío de los suelos no saturados y la búsqueda de un modelo constitutivo unificado que permita modelar todos los suelos no saturados en un marco de mecánica continua.

Establecido lo anterior, en esta tesis se toma en cuenta el comportamiento del suelo bajo diferentes grados de saturación por medio de la CRAS, esta nos brindará la succión que el suelo se encuentra sometida dependiendo su variación de  $G_w$ .

## 2.2 Suelos expansivos y colapsables

Los primeros estudios de suelos no saturados fueron fuertemente influenciados por la hidromecánica y la hidrostática del suelo – agua, además del manejo evidente de los movimientos inducidos por la humedad y el secado de los

suelos expansivos, generalmente el secado es asociado con situación de deficiencia de agua (Fityus y Buzzi, 2009).

Fityus y Buzzi (2009) expresan que el camino parece haber perdido el contacto con el problema inicial, por ejemplo, los suelos expansivos están al margen de la investigación de suelos no saturados y gran parte se centra en arcillas compactas con aplicaciones específicas como el uso de bentonita en revestimiento para depósitos de residuos nucleares.

### 2.2.1 Suelos expansivos

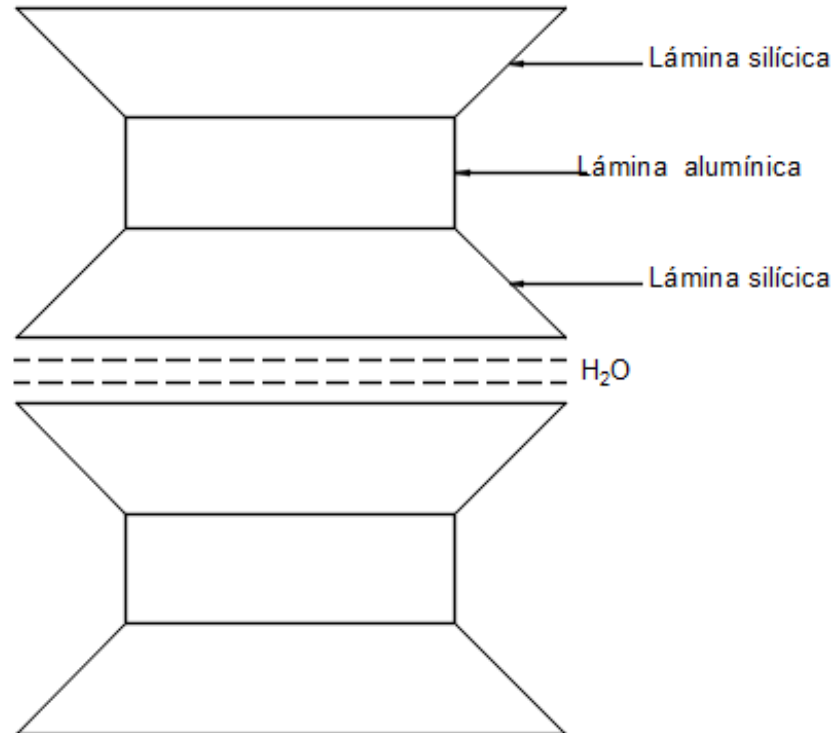
Los suelos expansivos incrementan y reducen significativamente su volumen con respecto al cambio de humedad en su interior. El fenómeno depende de la combinación mineralógica del suelo arcilloso.

Cuando el agua es agregada a arcillas expansivas las moléculas de agua se absorbe entre las placas de arcilla ([Figura 2-2](#)), lo que provoca un aumento de la presión del suelo (Elarabi, 1997).

Después que una arcilla expansiva se desatura, la membrana contractil se hace presente en todo el suelo, y la tensión que ejerce reemplaza la contracción en la partícula como el principal factor que afecta el cambio de volumen (Fityus y Buzzi, 2009).

Gromko (1974) señala las variables de la expansión dependen de diferentes factores que influyen el cambio de volumen del suelo, como son la mineralogía, densidad, condiciones de carga, estructura del suelo, contenido humedad. Además, el potencial de expansión puede ser determinado mediante expansión libre, límites de Atterberg, contenido coloidal, y consolidación.

Gens y Alonso (1999) deducen que los suelos expansivos se caracterizan por la existencia de múltiples niveles estructurales, identificados como una micro y macro -estructura.



**Figura 2-2.-Molécula de arcilla montmorillonita. (Crespo Villalaz, 2007)**

La ciudad de Querétaro ([figura 2-3](#)), presenta un crecimiento poblacional acelerado y se sitúa principalmente sobre arcilla expansiva, lo que ocasiona problemas en cimentaciones y deriva en una falta de la predicción del comportamiento volumétrico de los suelos expansivos.

En este trabajo se analiza el comportamiento expansivo por expansión libre, pruebas odométricas a esfuerzo neto constante y decrementos de succión, límites de Atterberg. Es decir, el suelo se encuentra a una condición de carga dada, y la acción de incrementos de humedad ejercerá una expansión dentro del suelo o un colapso si la carga es demasiada y los enlaces por meniscos de agua se vuelven débiles.

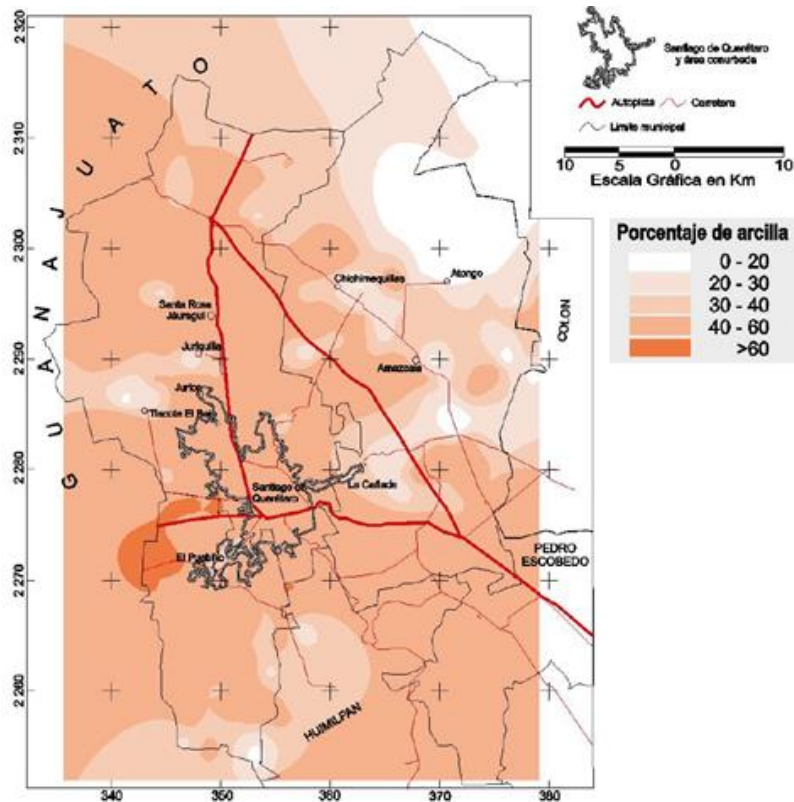


Figura 2-3.- Porcentaje de arcilla en Cd. de Querétaro (Concyteq, 2002).

### 2.2.1.1 Presión de expansión.

Los suelos expansivos requieren una evaluación de la presión de expansión. Por lo que evaluarla es posible considerar pruebas experimentales a carga constante derivado de la respuesta de humedecimiento (Hoffmann,2007), es posible realizar los ensayos de muestras labradas y preparas para distintos niveles de succión por este método y además midiendo mediante métodos directos establecido por la ASTM D-4546, como son:

- Método A: Se inunda el espécimen, posteriormente se le permite la expansión vertical, posteriormente se aplica carga a la muestra hasta llevarla a su relación de vacíos inicial.
- Método B: Se aplica carga a la muestra, donde puede ser la carga “in situ” o si se requiere una carga mayor estimada por la estructura. Posteriormente se hidrata la muestra. Lo que puede derivar en expansiones, contracción, expansión – contracción, o viceversa.

- Metodo C: Se requiere que en el transcurso del ensaye, la muestra permanezca a un volumen constante, es decir, evitar la expansión del suelo al generarse la hidratación.

### 2.2.2 Suelos colapsables

Los suelos colapsables presentan comúnmente una serie de características comunes: Estructura macro porosa con predominación de limos y arcillas o estructura de arena y limo mal distribuido con espacios abiertos cementada entre sí por carbonatos, altas relaciones de vacíos y pesos bajos par a condiciones secas. (Sharma y Singhal, 1994).

El colapso se define como cualquier disminución rápida de volumen del suelo (Zur 1975), se estructura en dos tipos comunes ([Figura 2-4](#)), por cementación producidos por sales el cual da rigidez al suelo, y no saturados los cuales debido al menisco de agua y el endurecimiento por succión producen un esfuerzo de contacto adicional en el suelo.

El Colapso de ambas estructuras es ocasionado debido al aumento de contenido de humedad, en la cementación los enlaces de carbono se disuelven durante el humedecimiento, y en los no saturados el cual al ser cargado más allá de su esfuerzo de preconsolidación ( $p_{0\ net}$ ) y posteriormente humedecido colapsaran.

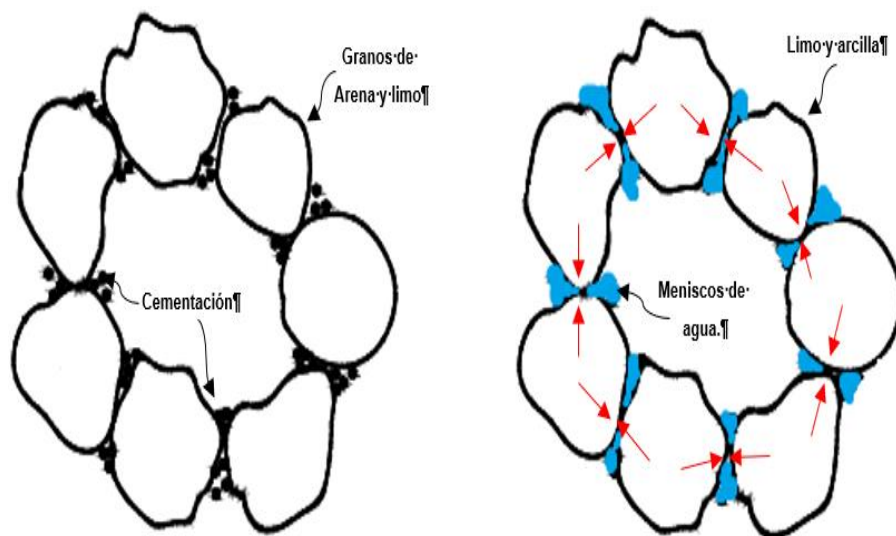


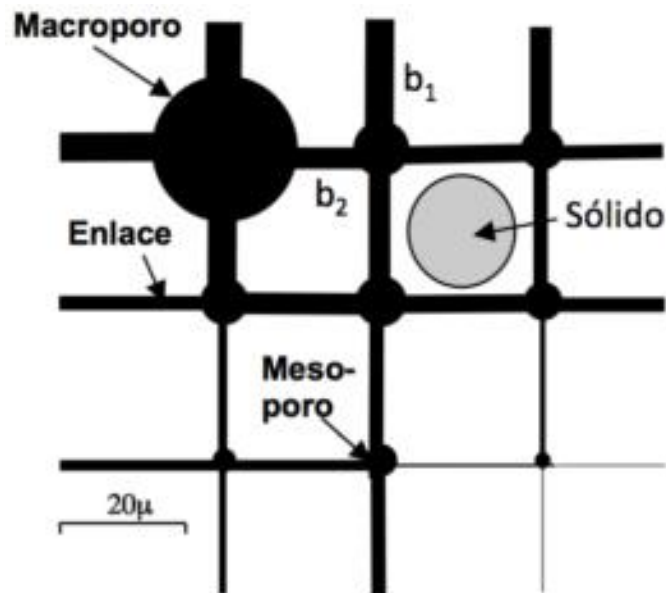
Figura 2-4.- Estructura de un suelo colapsable.

Sharma y Singhal (1994) señalan que una de prueba importante de laboratorio para identificar un suelo colapsable es por edómetro, es decir, por esfuerzo de compresión vertical al inundar el suelo con agua generando el potencial de colapso y otras características importantes de cambio de volumen.

Con base a lo anterior, en este trabajo se considera el colapso por efecto de meniscos de agua (succión), esto representa que al saturarse un suelo los enlaces se hacen frágiles y provocan un colapso por pérdida de succión.

### 2.2.3 Estructura interna de un suelo.

La estructura del suelo se define por la forma que se agrupan las partículas individuales en una masa de suelo. Rojas (2013) expone la estructura de los suelos consta de cuatro elementos: macroporos, mesoporos, microporos y los sólidos. Donde, macroporos y mesoporos forman los espacios que tienen la mayor parte de volumen de vacíos del suelo, colocando en nodos unidos por enlaces horizontales como verticales que representan los microporos, resultando en espacios que representan los sólidos ([Figura 2-5](#)).



**Figura 2-5.- Distribución de la estructura de los suelos (Rojas González, 2013).**

Lambe (1969) plantea en partículas pequeñas de forma plana puede constituir estructuras floculadas o dispersas, la cual están ligada a fuerzas entre partículas de



suelo adyacente. Es decir, fuerzas de atracción (Van der Waals) y de repulsión (resultado de los iones en la superficie de la partícula de suelo).

Es posible de esta forma simular el proceso de secado y humedecimiento del suelo obteniendo curvas de retención de agua – suelo de una muestra de suelo.

### 2.3 Estado de Esfuerzos en el suelo.

Los esfuerzos aplicados a suelos saturados se encuentran en dos tipos: Las presiones que se transmiten directamente a los sólidos del suelo (presiones efectivas) y las que actúan contra el fluido que llena los poros (presión de agua de poro). A partir del punto de vista microscópico, resulta complicado, acentuándose sin duda en los suelos finos como las arcillas. Por lo tanto, es necesario verlo de un punto de vista macroscópico, como si de un medio continuo se tratara. Con estas simplificación el Dr. Terzaghi (1936) estableció un marco teórico bifásico con el fin de analizar la interacción entre las fases.

Para explicar el estado de esfuerzo en un suelo saturado y distinguir con claridad las presiones efectivas de la presión de poro ([Figura 2-6](#)), se desarrolla un equilibrio de fuerzas verticales en una placa (ecuación 2-1).

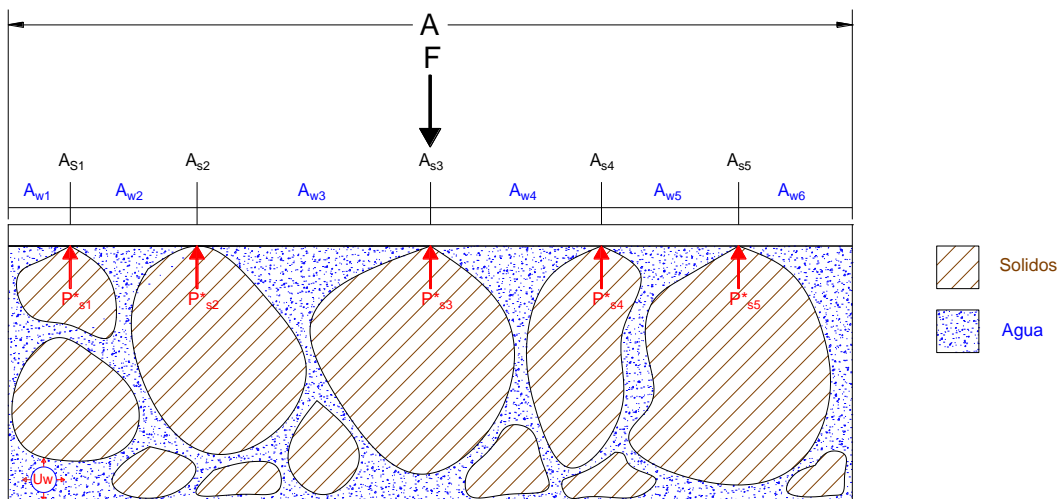


Figura 2-6.- Esquema de esfuerzos actuantes en una sección de suelo saturado.

$$\downarrow \Sigma F_v = \frac{F}{A} - \sum_i^n \frac{P_{si}^* * A_{si}}{A} - \sum_l^m \frac{u_w A_{wl}}{A} = 0$$

### Ecuación 2-1.- Equilibrio de fuerzas a un continuo saturado

Donde  $F$  representa la fuerza aplicada a una placa unitaria,  $A$  representa el área de la placa,  $A_{si}$  el área de la placa en contacto con los sólidos,  $A_{wl}$  el área de la placa en contacto con el agua,  $u_w$  la presión de poro de agua,  $P_{si}^*$  el esfuerzo vertical principal aplicado a los sólidos por la placa.

En el que  $\frac{F}{A}$  representa el esfuerzo total ( $\sigma$ ),  $\frac{P_{si}^* A_{si}}{A}$  incorpora el esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ), y  $\frac{u_w A_{wl}}{A}$  es la presión de poro, por lo tanto, despejando la ecuación a esfuerzo efectivo:

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

### Ecuación 2-2.- Ecuación de esfuerzo efectivo de Terzaghi

Es decir, las diferencias en la [ecuación 2-2](#) representan un exceso de presión sobre la presión de poro, y actúan exclusivamente en la fase sólida del suelo, debido a esto el efecto es medible en un cambio de tensiones, tales como el cambio de volumen, la distorsión o la modificación de la resistencia al corte de un suelo.

El triunfo de Terzaghi (1936) se debe a que es independiente del tipo de suelo (arena, arcilla, o limo). Sin embargo, sólo es representativo para el caso muy particular de suelos saturados con sólidos incompresibles y una relación de vacíos completamente lleno de fluido incompresible.

Años más tarde, numerosos investigadores ambicionan encontrar una ecuación que conduzca a la determinación de los esfuerzos efectivos para suelos bajo cualquier condición de saturación ([Tabla 2-1](#)), por lo que extender la propuesta de Terzaghi a suelos no saturados significa asumir (Nuth y Laloui, 2007):

- Todos los esfuerzos medibles de un cambio de esfuerzo en el suelo se deben exclusivamente a cambios en el esfuerzo efectivo.
- En suelos no saturados, el esfuerzo efectivo se define como el exceso de esfuerzo total ( $\sigma_{ij}$ ) sobre una presión de poro equivalente ( $u^*$ ), en donde la  $u^*$ , puede considerarse como la parte del esfuerzo efectiva en un suelo resultante de la presión de todos los fluidos en los poros.

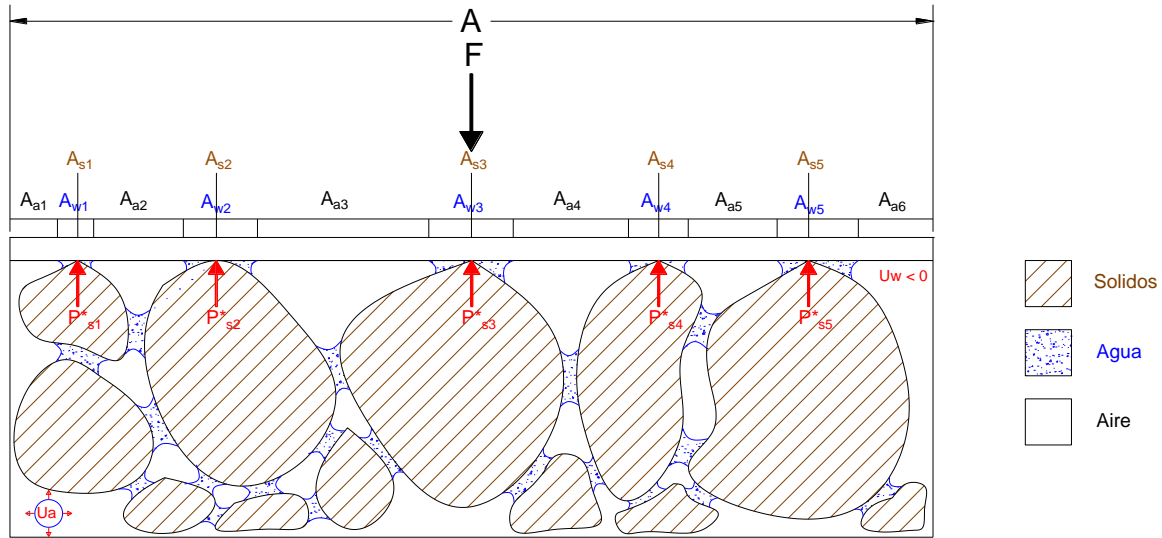
**Tabla 2-1.- Ecuaciones para esfuerzos efectivos en suelos no saturados.**

<b>Ecuación</b>	<b>Variables</b>	<b>Autor</b>	<b>Tipo</b>
$\sigma' = \sigma - u_w$	$\sigma$ = Esfuerzo Total $u_w$ = Presión de poro de agua.	Terzaghi (1936)	Suelos saturados
$\sigma' = \sigma_{net} - \chi S$	$\sigma_{net}$ = Esfuerzo Neto $\chi$ = Parámetro relacionado con el $G_w$ S = Succión	Bishop (1959)	Suelos no saturados
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\beta'$ = Factor de unión	Croney, (1958)	Suelos no saturados
$\sigma' = \sigma + \psi p''$	$\psi$ = Parámetro de cero a uno $p''$ = presión de poro de agua negativa	Aitchison (1961)	Suelos no saturados

Houslby (1997) establece que una formulación de esfuerzo efectivo apropiada debe permitir la implementación a modelos constitutivos saturados, incluyendo la predicción de cambios de grado de saturación.

Donde la ecuación de Bishop (1959) trasciende sobre las demás debido a términos como:  $(\sigma - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$  y  $\chi$ , que se conocen como esfuerzo medio neto ( $\sigma_{net}$ ), succión mátrica ( $s$ ) y el “parámetro de Bishop” el cual es íntimamente relacionado con el grado de saturación y es la relación directa que existe entre el comportamiento mecánico y el hidráulico de un suelo, la analogía de esta ecuación se puede retomar mediante la analogía del caso saturado y trasladarse a un medio no saturado.

Es decir, Si un volumen de suelo no saturado se somete a esfuerzos externos, se desarrollan presiones al interior de los poros en la fase líquida y gaseosa que inciden directamente en la resistencia del mismo. Por lo tanto, partiendo de la analogía de un continuo en un estado no saturado como en [figura 2-7](#) y considerando un equilibrio de fuerzas verticales para distinguir con claridad las presiones efectivas de las presiones de poro ejercidas por el agua y el aire (ecuación 2-3).



**Figura 2-7.- Esquema de esfuerzos actuantes en una sección de suelo no saturado.**

$$\downarrow \Sigma F_v = \frac{F}{A} - \sum_i^n \frac{P_{si}^* \cdot A_{si}}{A} - \sum_l^m \frac{u_w A_{wl}}{A} - \sum_j^k \frac{u_a A_{aj}}{A} = 0$$

**Ecuación 2-3.- Equilibrio de Fuerzas verticales a un continuo no saturado.**

En [ecuación 2-3](#),  $A_{aj}$  representa el área de una placa en contacto con el aire. Retomando la analogía expuesta a un continuo en estado saturado, se despeja la ecuación a esfuerzos efectivos:

$$\sigma' = \sigma - u_a + (u_a - u_w) * \frac{A_w}{A}$$

**Ecuación 2-4.- Despeje a esfuerzos efectivos.**

En el cual los términos  $(\sigma - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$  y  $\frac{A_w}{A}$ . Se conocen como esfuerzo medio neto ( $\bar{\sigma}$ ), succión mátrica ( $s$ ) y el parámetro relacionado con el  $G_w$  ( $\chi$ ), el cual representa la forma de la ecuación de Bishop (1959) y es seleccionada como variable de esfuerzo para este modelo constitutivo. Es representada de forma tensorial (Chávez, 2015), como:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + \chi s \delta_{ij}$$

**Ecuación 2-5.- Representación de esfuerzo efectivo en forma tensorial.**

En  $\sigma_{ij}$  representa el esfuerzo total aplicado en las fronteras del suelo, y  $\delta_{ij}$  representa la delta de Kronecker por lo tanto si la ecuación 2-5 es multiplicada por el delta de Kronecker, se obtendrá un esfuerzo efectivo medio que es expresado en términos del esfuerzo medio neto  $p_{net}$ , la succión multiplicada por el “parámetro de Bishop”, donde la relación succión – Grado de saturación es la unión inmediata para conseguir el acoplamiento hidro-mecánico (ecuación 2-6).

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi s$$

**Ecuación 2-6.- Ecuación de esfuerzo efectivo de Bishop (1959).**

En este trabajo se plantea la ecuación 2-6 como el hecho que el factor  $\chi \approx G_w$  (Obergh y Sälfors ,1995; Araiza, 2012), donde  $G_w$  representa el grado de saturación que posee la muestra en la trayectoria de humedecimiento o secado según sea el caso.

## 2.4 Succión

El suelo es un sistema heterogéneo y poroso, que de acuerdo a la cantidad de agua que presente en su interior este poseerá un valor de succión que genera un estado de agua en tensión (presión negativa), producido por los fenómenos de interfase aire-agua. Aitchison (1965) lo define como las mediciones de presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo; de esta forma, representa la habilidad de un suelo de atraer o retener agua (Baltodano-Goulding, 2006).

La succión total resulta de sumar la succión mátrica y osmótica. Donde la componente mátrica o capilar se obtiene de medidas de presión parcial de vapor de agua en equilibrio con agua del suelo, referente a la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo; mientras que la componente osmótica se obtiene de medir la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo con respecto a la presión parcial del vapor del agua en equilibrio con agua pura (D. Fredlund y Rahardjo, 1993).

Por lo tanto, la succión total se puede representar como:

$$\psi = \psi_m + \psi_o$$

**Ecuación 2-7.- Componentes de la succión total.**

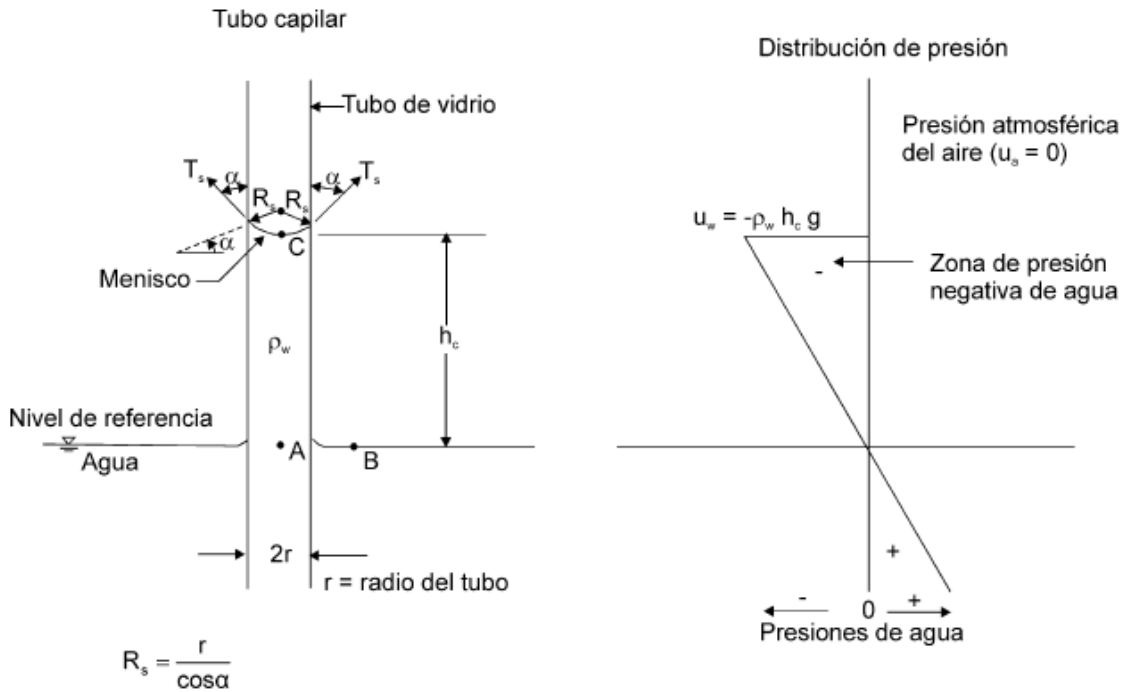
En el que  $\psi_o$  representa la succión osmótica y  $\psi_m$  es la succión mátrica la cual se puede representar como  $(u_a - u_w)$ , donde  $u_a$  representa la presión de poro de aire y  $u_w$  la presión de poro de agua.

La succión mátrica está relacionada al fenómeno de capilaridad que da efecto a la tensión superficial del agua (Pousada,1984). Este efecto se debe a la atracción de las moléculas, que se sitúan en la superficie y provoca una membrana elástica aparente (membrana contráctil). Por lo tanto, consideremos un tubo capilar está sumergido bajo el nivel de agua y sobresale del nivel de referencia como se muestra en la [figura 2-6](#). El agua sube en el tubo como resultado de la adhesión entre las moléculas en la membrana contráctil y el material del tubo.

Considerando equilibrio de fuerzas verticales en el tubo resultara en la vertical de la tensión superficial responsable de mantener la columna de agua, que puede expresarse como:

$$\downarrow \sum Fv = h_c * \frac{r_t^2 * \pi}{2} * \gamma_w - T_s * \pi * r_t * \cos\alpha_t + P_{atm} * \frac{r_t^2 * \pi}{2} = 0$$

**Ecuación 2-8.- Equilibrio de fuerzas verticales capilares.**



**Figura 2-8.- Modelo capilar (Fredlund et al., 2012)**

En el que  $h_c$  representa la altura capilar,  $r_t$  el radio del tubo capilar,  $\gamma_w$  el peso específico del agua,  $T_s$  la tensión superficial en el agua,  $\alpha_t$  el ángulo de contacto.

La [ecuación 2-8](#) puede arreglarse de forma que se obtenga  $h_c$ :

$$h_c = \frac{2 * T_s * \cos \alpha_t}{r_t * \gamma_w} - \frac{P_{atm}}{\gamma_w}$$

**Ecuación 2-9.- Obtención de la altura capilar.**

En donde despejando  $\gamma_w$  al lado izquierdo de la ecuación 2-9 se puede relacionar la expresión  $\gamma_w * h_c = u_w$  a la presión de poro de agua y  $P_{atm} = u_a$  a la presión de poro en el aire, relacionando la tensión superficial con la succión como:

$$u_a - u_w = \frac{2 * T_s * \cos \alpha_t}{r_t}$$

**Ecuación 2-10.- Representación de la succión mátrica.**

D.G. Fredlund y Rahardjo (1993) indican una ecuación que correlaciona la relación termodinámica entre la succión y la presión parcial del vapor de agua en los poros del suelo y puede expresarse como ecuación

$$u_a - u_w = \frac{R * T}{v_w * \omega_v} \ln \left( \frac{u_v}{u_{vo}} \right)$$

**Ecuación 2-11.- Succión Mátrica**

En el que  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta,  $v_w$  es el volumen específico del agua,  $\omega_v$  es la masa molecular del vapor de agua,  $u_v$  es la presión parcial de vapor de agua,  $u_{vo}$  es la presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie horizontal de agua pura a la misma temperatura.

Las técnicas para medir la succión se exhiben en la tabla 2-2, en la cual se pueden dividir en dos grupos principales: métodos de medición directa e indirecta. En donde todas las técnicas que se basan en la medición de la humedad relativa generada por los poros de los suelos, se consideran en el primer grupo, así como aquellas que miden la fuerza de tracción ejercida por el agua (Tensiómetros y mini – Sonda). Por lo tanto, las técnicas de medición indirecta toman mucho más tiempo para alcanzar el equilibrio y poder establecer un valor correcto de succión.

Entre los métodos de medición de succión, la técnica de papel filtro es el único donde la succión total y mátrica puede inferirse. El contacto directo entre el papel y el suelo permite que el agua y materiales disueltos se intercambien libremente. La absorción del agua por parte del papel filtro por capilaridad, permite obtener la succión mátrica a través de la humedad del papel. La medición de la succión total se realiza mediante la obtención de la humedad del papel que no está en contacto directo con el suelo, ocasionado por el flujo que ocurre en la transferencia de vapor incorporando las fuerzas osmóticas y capilares que retiene a la molécula de agua (Bulut, 2008).

**Tabla 2-2.- Métodos experimentales para medición de la succión en suelos.**

<i>Equipo</i>	<i>Medida</i>	<i>Fenómeno Asociado</i>	<i>Succión medida (MPa)</i>	<i>Tiempo para el equilibrio</i>
---------------	---------------	--------------------------	-----------------------------	----------------------------------



<i>Psicómetro de transistor</i>	Succión Total	Humedad relativa	0.3 – 7.0	Minutos
<i>Higrómetro capacidad / resistivo</i>	Succión Total	Humedad relativa	10 – 400	Minutos
<i>Higrómetro de espejo (Punto de rocío)</i>	Succión Total	Humedad relativa	3 – 400	Minutos
<i>Papel Filtro</i>	Succión Total o mátrica	Contenido de agua	0 – 100 MPa	7 a 15 días
<i>Tensiómetro</i>	Succión Mátrica	Tensión del agua	0 – 0.08	Minutos
<i>Mini – Sonda</i>	Succión Total o mátrica	Tensión del agua	0 – 2.1	Minutos
<i>Celulosa Porosa</i>	Succión Mátrica	Resistencia eléctrica	0 – 1.5	Días/Semanas
<i>Sensor de conductividad térmica</i>	Succión Mátrica	Conductividad térmica	0 – 1.5	Días/Semanas
<i>Técnica de “Squeezing”</i>	Succión Osmótica	Conductividad eléctrica	0 – 3	Horas/Días

La medición de la succión puede ser usada junto con otros parámetros de suelos y ambientales para evaluar el potencial de expansión o contracción, resistencia al esfuerzo cortante, modulo esfuerzo-deformación, esfuerzos in situ y conductividad hidráulica de suelos no saturados.

La importancia de la succión depende del contenido de agua del suelo no saturado, el efecto del cambio de succión es doble: modifica directamente el estado de esfuerzos del material y la saturación comienza a cambiar la interface en el comportamiento mecánico. Estos efectos de unión se denominan endurecimiento por succión.

## 2.5 Curva de Retención Agua – Suelo (CRAS)

La CRAS define la relación entre la succión y el contenido de agua en el suelo (Vanapalli, 1996), por lo que definir sus límites es de amplia importancia debido que su forma y posición no es única para un suelo (arena, limo, arcilla) a causa que refleja el tamaño y la distribución de las estructuras de los poros en un suelo (Figura 2-9).

Cuando los poros de un suelo están completamente llenos de agua (condición saturada) el contenido volumétrico de agua es máximo ( $\theta_{sat}$ ) y la succión es cero, por otro lado, cuando la succión aumenta el contenido volumétrico de agua disminuye; es decir, el dominio de la succión varía de 0 a  $\infty$ , mientras que el dominio para  $\theta$  es variando de  $\theta_{sat}$  a  $\theta_{res}$  (Zepeda Garrido, 2004).

La elaboración de la CRAS se realiza por procedimientos de secado y humedecimiento, verificándose de esta forma el fenómeno de histéresis (figura 2-9), que representa el desfase de las curvas ocasionado por la estructura aleatoria de las cavidades y enlaces que conforman la estructura del suelo, la obtención de los valores de succión puede ser conseguida por la norma ASTM-D-5298.

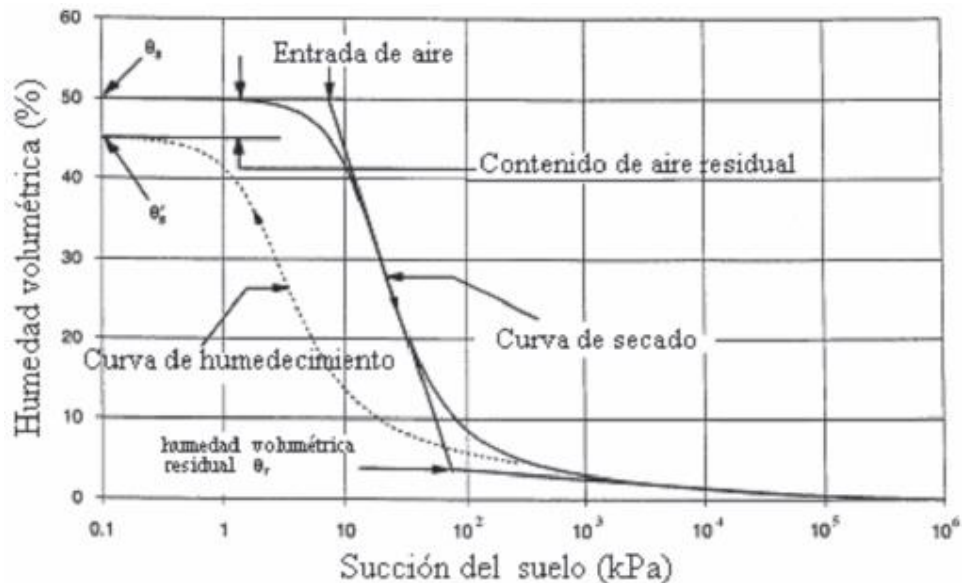


Figura 2-9.- Elementos de la curva de retención agua-suelo (D.G. Fredlund and Rahardjo, 1993)

Rojas (2008) desarrolla un modelo solido-poroso que simula el comportamiento hidráulico de los poros ([Figura 2-5](#)), el cual puede simular el aspecto más importante del fenómeno de secado – humedecimiento, que es la histéresis en la CRAS.

Zhou y Sheng (2012) elaboran un método alternativo para predecir la variación de saturación por histéresis, de modo que se puede calcular el grado de saturación ( $G_w$ ) bajo las rutas de esfuerzo y succión, dentro de la CRAS.

Concebir un tratamiento separado de las componentes mecánicas e hidráulicas en la modelización del comportamiento de un suelo no saturado tiene limitaciones en la reproducción de observación experimental. Es decir, considerar la dependencia del grado de saturación ( $G_w$ ) en un modelo mecánico independiente del comportamiento hidráulico, como de un modelo hidráulico independiente de los efectos de la densidad del suelo en la CRAS.

## 2.6 Deformación volumétrica en suelos no saturados.

Los procesos que dan lugar al cambio volumétrico en suelos no saturados son numerosos, siendo los más comunes los de compresión en contenido de agua constante y los de hidratación o secado bajo carga constante (Zepeda Garrido, 2004). El primero hace referencia a la construcción rápida de una edificación, y el segunda se origina después de finalizar la construcción por medio de la evaporación generando el secado (generando colapso) o las lluvias o algún otro elemento que genere hidratación en el suelo (generando expansión).

El fenómeno que forma la expansión desprende de la combinación mineralógica de un suelo expansivo, el cual con valores de límite líquido (LL) mayores a 50 e índice Plástico (IP) mayor a 30 se considera un suelo de mineralogía expansiva como lo es la montmorillonita (Elarabi, 1997).

El comportamiento esfuerzo-deformación ha sido analizado en diferentes trayectorias en el espacio de esfuerzos  $p - s$  (Araiza, 2012) por distintos autores:

- La carga de preconsolidación aumenta con la succión, denominada como preconsolidación aparente (Alonso, 1987).
- La carga controla una cantidad de expansión de un suelo al someterse a humedecimiento (Hoffmann, 2007).
- Un suelo no saturado puede expandirse, colapsar o una combinación de ambas dependiendo de la carga aplicada y el valor de succión a la respuesta del humedecimiento (Galaviz-González, 2013).
- Al presentar una expansión en un suelo no saturado se presenta mediante dos diferentes niveles de estructura (Alonso, 1999), en donde un primer nivel (microestructura) produce la expansión debido a los minerales, posteriormente un segundo nivel (macroestructura) es responsable de la reorganización estructural.

En el estudio del comportamiento volumétrico de suelos no saturados existen varios planteamientos bajo el principio de los esfuerzos efectivos, es habitual usar la ecuación para materiales saturados a los no saturados (S.J. Wheeler, 2003), utilizando una variante propuesta por Juarez Badillo (1975) para el comportamiento de los suelos saturados, y traducida a suelos no saturados por Rojas y Chávez, (2013), donde se escribe en términos de la relación de vacíos en lugar del volumen específico.

Analizar el comportamiento de suelos no saturados con respecto a las características de compresibilidad de suelos saturados toma en cuenta el comportamiento normalmente consolidado y preconsolidado (Chávez, 2015). Donde 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. Este esfuerzo crítico depende de la historia de carga – descarga del suelo y de la succión (figura 2-10). Por lo tanto, se puede generalizar el comportamiento volumétrico sujeto a compresión isotrópica, que parte de una gráfica de volumen  $(1+e)$  contra esfuerzo aplicado  $(p)$ .

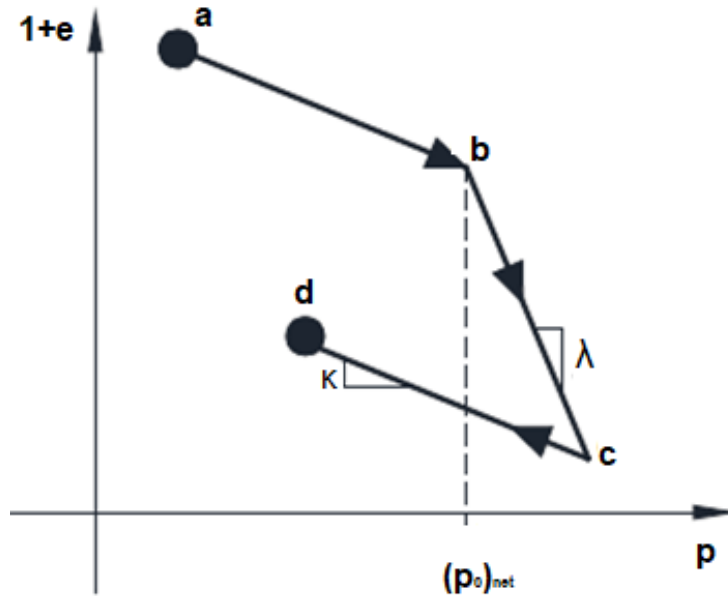


Figura 2-10.- Curva de compresibilidad de suelos. (Chávez, 2015)

Se observa que el suelo se comprime inicialmente dentro de una zona elástica el cual está delimitado por el esfuerzo de preconsolidación ( $p_{0\ net}$ ) en la línea  $\overline{ab}$  que representa la historia de carga del suelo, cuando el suelo se carga más halla de dicho esfuerzo se genera la línea  $\overline{bc}$  formando un cambio de pendiente en el cual el suelo a un estado de normalmente consolidado y posteriormente a su descarga el suelo genera una línea  $\overline{cd}$  con pendiente igual a la línea  $\overline{ab}$ , en donde  $\kappa$  y  $\lambda$  son las pendientes de los estados preconsolidados y normalmente consolidado respectivamente (figura 2-10).

Para garantizar el requisito de continuidad es necesario que el cambio de volumen de la estructura de suelo representa el volumen total y debe ser igual a la suma del cambio de volumen asociado a las fases, el cual asegura la conservación de la masa, de este modo la deformación volumétrica puede usarse como la variable de estado de deformación para la estructura del suelo y define el cambio de volumen del mismo como resultado de la deformación:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

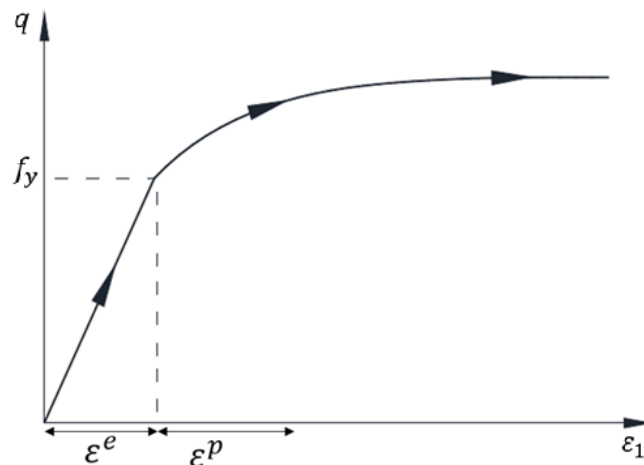
Ecuación 2-12.- Deformación Volumétrica.

Donde  $\varepsilon_v$  representa la deformación volumétrica del suelo,  $\Delta V$  el diferencial del volumen inicial y después de la deformación,  $V_0$  es la referencia el volumen inicial de la muestra de suelo,  $\Delta e$  el diferencial de la relación de vacíos inicial y después de la deformación y  $e_0$  es la referencia de relación de vacíos inicial de la muestra de suelo.

La respuesta volumétrica de un suelo no saturado no solo depende la los esfuerzos iniciales y finales, si no de la succión y la trayectoria en particular que siga.

## 2.7 Modelos constitutivos

Los modelos elastoplásticos aparecen, del estudio de materiales como el acero, que muestra comportamientos de esfuerzo – deformación, elásticas ( $\varepsilon^e$ ) hasta antes del punto de fluencia ( $f_y$ ) el cuales se denominan deformaciones recuperables, posteriormente de este punto comienza el comportamiento plástico ( $\varepsilon^p$ ) en el cual los materiales como los suelos sufren deformaciones irre recuperables antes de alcanzar el estado de falla ([figura 2-11](#)).



**Figura 2-11.- Comportamiento esfuerzo - deformación de una muestra de suelo.**

Es necesario definir los elementos esenciales que constituyen un modelo constitutivo elastoplástico (Rojas, 2004):

- Superficie de fluencia.
- Criterio de endurecimiento.

- Criterio de flujo.

Predecir la respuesta de los suelos ha llevado a desarrollar modelos que infieren el comportamiento de los suelos en tres aspectos fundamentales (Sheng, 2011):

- El estado de deformación.
- La resistencia a los esfuerzos cortantes
- El comportamiento hidráulico.

Estos aspectos resultan en que los suelos se encuentran acoplados, es decir, debe considerarse la influencia de uno sobre los demás, es de echo el cambio volumétrico un componente absolutamente necesario para extender un modelo de suelos saturado a uno no saturado (Sheng, 2011). Por lo tanto, es necesario plantear modelos constitutivos cuya finalidad es la de correlacionar estos aspectos y describir el comportamiento del material en estudio bajo cualquier sollicitación.

El desarrollo de modelos constitutivos, trata a menudo la succión mátrica como una variable de estado de esfuerzos adicional en un espacio de esfuerzos que establece las leyes constitutivas. Este enfoque fue pionero en el Modelo Básico de Barcelona (Alonso, 1990 BBM por sus siglas en ingles), con algunas excepciones donde la succión se trata como una variable interna (Loret y Khalili, 2000) dentro de la ecuación de Bishop.

Por lo tanto, si se asume las variables de estado independientes esto conlleva que el acoplamiento entre las relaciones esfuerzo – deformación no existe y por lo tanto los modelos formulados en estos términos, en contra parte, si a un modelo se le asigna valores en función de la succión y el grado de saturación, la formulación considerara de forma natural el acoplamiento hidro-mecánico debido a que se encuentra implícita en el CRAS (Chávez, 2015).

#### 2.7.1 Modelos basados en variables independientes

Burland y Jennings (1962) fueron de los primeros en cuestionar la validez de la ecuación de Bishop (1959) considerando que no parecía dar una explicación para

el fenómeno de colapso en suelos no saturados, lo que posteriormente apoyo la determinación de otra variable del estado de esfuerzo.

Considerando que cualquier modelo constitutivo con la ecuación de Bishop parecía incapaz de describir todas las características del comportamiento de los suelos no saturados en una forma simple, se adoptó un enfoque de variables de esfuerzo múltiples.

Fredlund y Morgenstern (1977) sugirieron dos variables de estado de esfuerzo independientes, que resulto en la necesidad de una matriz constitutiva doble el cual se puede describir como el esfuerzo medio neto ( $p_{net}$ ) y la succión ( $s$ ), basada en la mecánica de medios continuos múltiples.

Alonso planteo un modelo constitutivo para suelos no saturados formulado en un marco de elasto-plasticidad empleando variables independientes,  $p_{net}$  y  $s$ . Este modelo (Alonso, 1990), el cual parte del modelo de estado crítico (CSM por sus siglas en ingles), propone una superficie de fluencia de forma elíptica en el plano de esfuerzo medio neto ( $p$ ) - esfuerzo desviador ( $q$ ), donde esta superficie se endurece isotrópicamente con la succión y la resistencia del material aumenta debido a la cohesión mientras que el ángulo de fricción del suelo permanece constante ([figura 2-12](#)).

El modelo permite representar múltiples aspectos del comportamiento observado en los suelos no saturados y que hasta ese momento se trataban de forma independiente. Asume los mecanismos de cambio volumétrico actuantes en el suelo por efecto de carga y humedecimiento son similares ([figura 2-13](#)), considera una misma superficie de fluencia para ambos ([figura 2-14](#)), denominada superficie de carga y colapso (LC por sus siglas en ingles), representa el límite de comportamiento elástico frente a cambios en el nivel de carga y contenido de humedad del material. Por ende, el colapso ocurre inmediatamente después del humedecimiento.



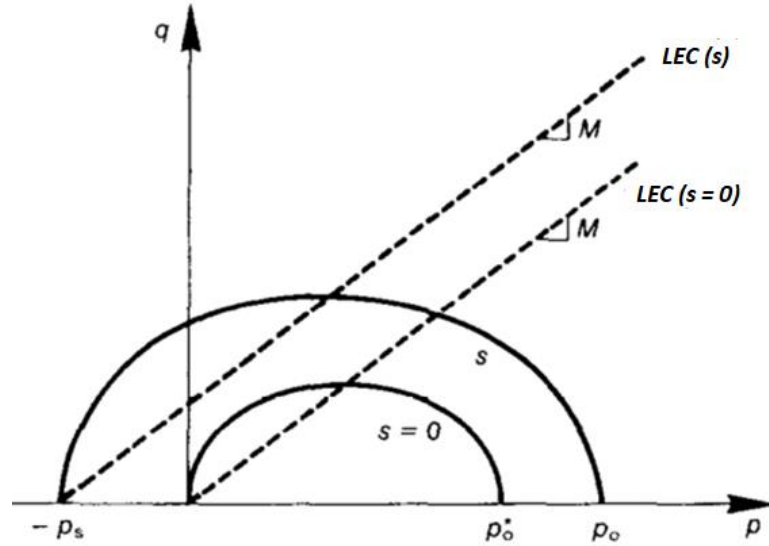


Figura 2-12.- Superficie de fluencia ( $p, q$ ).

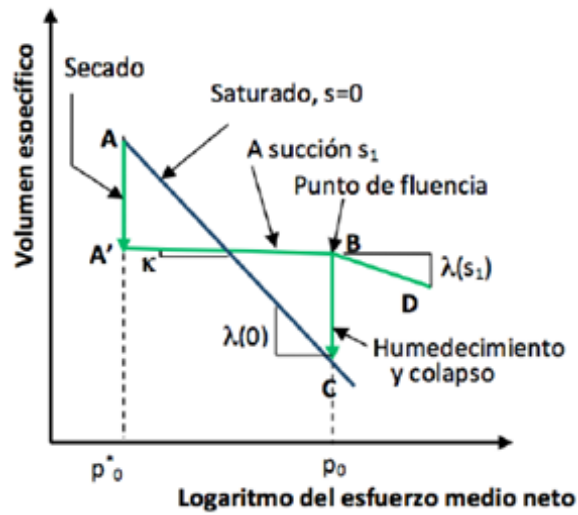


Figura 2-13.- Análisis Volumétrico de una muestra sujeta a proceso secado-humedecimiento (Rojas González, 2013).

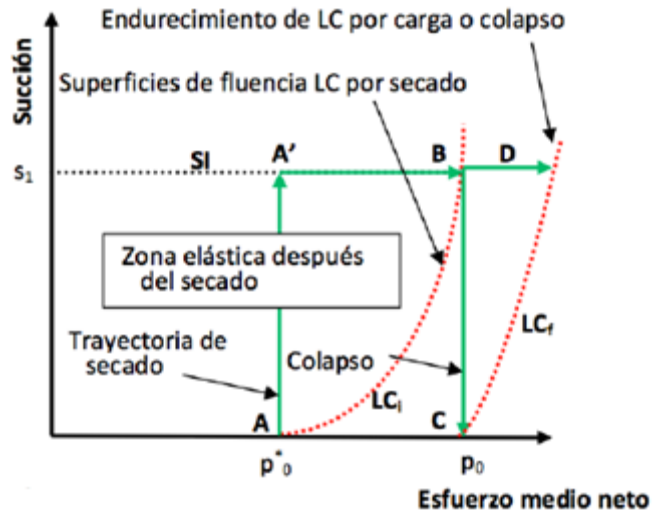


Figura 2-14.- Superficie de carga colapso (Rojas González, 2013).

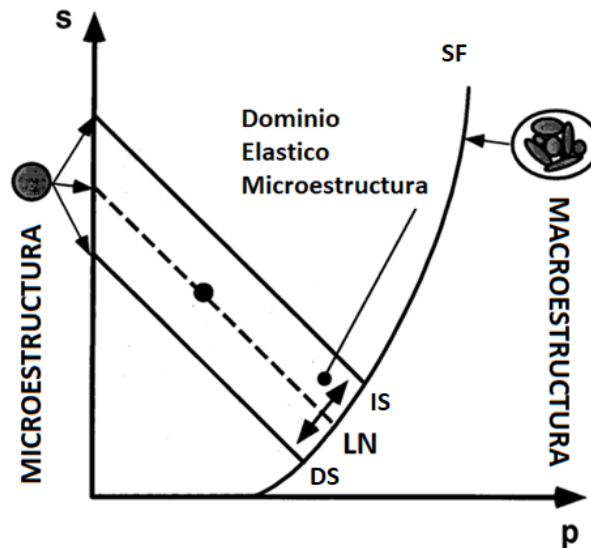
Para suelos expansivos, es necesario identificar y estudiar los mecanismos internos de cambio de volumen que actúan durante la expansión y el colapso, las cuales se pueden resumir en (Hoffmann, 2005):

- Los suelos expansivos se caracterizan por la existencia de múltiples niveles estructurales.
- Se identifica un nivel microestructural formado por los conglomerados de partículas de arcilla y un nivel macroestructural, caracterizado por las acciones entre conglomerados de partículas de arcilla.
- El fenómeno de expansión tiene su origen a nivel microestructural.
- El comportamiento a nivel macroestructural está controlado tanto por el efecto de la succión capilar y por el efecto de la carga.

Tomando dichas ideas, Alonso (1999) formula un modelo para reproducir los suelos expansivos, el Modelo Expansivo de Barcelona (BExM, Barcelona Expansive Model por sus siglas en ingles), el cual propone la existencia de una superficie de fluencia (SF) ([figura 2-15](#)) que aparece en forma diagonal en el plano ( $p - s$ ).

Los modelos han logrado reproducir los comportamientos volumétricos y de resistencia de suelos no saturados con cierto éxito, considerando sus principales características como:

- Considera el flujo asociado.
- Endurecimiento por succión.
- Endurecimiento isotrópico y cinemático.
- Incluye Zona de Tensión.
- Explica el fenómeno de colapso por humedecimiento.



**Figura 2-15.- Superficie de fluencia para un suelo expansivo plano (p,s)**

Si bien, los modelos han logrado tener una popularidad por su simplicidad, sin embargo, muestra fallas que tienen que ver con no tomar en cuenta el comportamiento hidráulico de los suelos (Sun, 2007). Lo cual motivo a estudios más profundos a el uso del esfuerzo efectivo de Bishop (S. J. Wheeler, 2003).

### 2.7.2 Modelos basados en esfuerzos efectivos.

A partir del conocimiento de un acoplamiento hidromecánico para el comportamiento de un suelo no saturado, investigadores se centraron en formas de unificar el esfuerzo efectivo de Bishop (1959) combinando con otras variables de esfuerzo para construir un modelo adecuado. Es decir, las variables de estado identificadas por Fredlund y Morgenstern (1977) podrían combinarse de diferentes maneras para formar el esfuerzo efectivo.

Algunos otros como Bolzon (1996), Tamagnini (2004), fueron de los primeros en incorporar el esfuerzo efectivo a sus modelos, pero Wheeler (2003) propuso un

modelo que combina los componentes hidráulicos y mecánicos del comportamiento de los suelos no saturados, el cual se realizó mediante el uso de esfuerzos efectivos del trabajo de Houslby (1997), siendo uno de los modelos que ha capturado la mayor cantidad de características esfuerzo-deformación e hidráulicas de los suelos.

Mediante la ecuación establecida por Rojas González, (2008), que es análoga a la de Bishop, (1959), Chávez (2015) comprueba mediante un modelo constitutivo basado en el principio de esfuerzo efectivo para suelos no saturados el acoplamiento hidráulico con el mecánico sin introducir parámetros adicionales.

Wheeler (2003) formula su modelo para el comportamiento hidráulico a través de la CRAS. Por lo tanto, el modelo puede tomar en cuenta los cambios irreversibles del grado de saturación, pero a su vez desestima la influencia de la relación de vacíos en la CRAS lo cual el acoplamiento hidro-mecánico no se logra completamente (Chávez, 2015).

Araiza (2012) estudia una ecuación general del comportamiento volumétrico para suelos no saturados a partir del principio de esfuerzo efectivo considerando  $\chi = G_w$ , posteriormente Zazueta Rodríguez (2015) analiza el comportamiento del suelo en términos de esfuerzo efectivo obteniendo un comportamiento de tendencia lineal sin superficie de expansión como es propuesto por el modelo expansivo de Barcelona (Alonso, 1999).

### **3. METODOLOGÍA**

Esta sección se dedica a detallar el procedimiento experimental con base a una investigación del área llevada para definir pruebas experimentales a ejecutar durante el desarrollo de la investigación, serán utilizadas para en el proceso del modelo de suelos expansivos, posteriormente establecer comparaciones experimentales con otros modelos.

Las pruebas se realizaron con el equipo adecuado y necesario para su realización, en la Universidad Autónoma de Querétaro, en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática, dentro de la facultad de Ingeniería.

La determinación de la metodología se conforma mediante la extracción y caracterización del material, pruebas índices, realización de pruebas experimentales, que se describe en las secciones siguientes.

#### **3.1 Obtención y caracterización de la muestra**

La obtención del suelo empleado para este proyecto es ubicada en la ciudad de Querétaro, Querétaro, México en un predio desocupado ubicado en el fraccionamiento Colonos de Jurica, con coordenadas geográficas latitud igual 20°38'49.4" N y longitud 100°26'09.1" O, en el cual predominan suelos de origen aluvial constituidos por arcillas, limos (Franco, 2005).

En el cual se realizó un sondeo superficial con el debido cuidado que dicta la norma NMX-C-431-ONNCCE-2002. Por lo que se realizó la apertura de una zanja con ayuda mecánica, a profundidad de 1.80 metros en el mes de marzo del año 2017, y obtuvieron muestras inalteradas y alteradas (figura 3-1).

Durante el muestreo se llevó a cabo la obtención de cuatro muestras inalteradas, que fueron almacenadas dentro de la cámara de temperatura del laboratorio de geotecnia, materiales y geomática, dentro de la facultad de ingeniería.



**Figura 3-1.- Extracción de muestra inalterada.**

### 3.2 Propiedades índices del suelo en estudio.

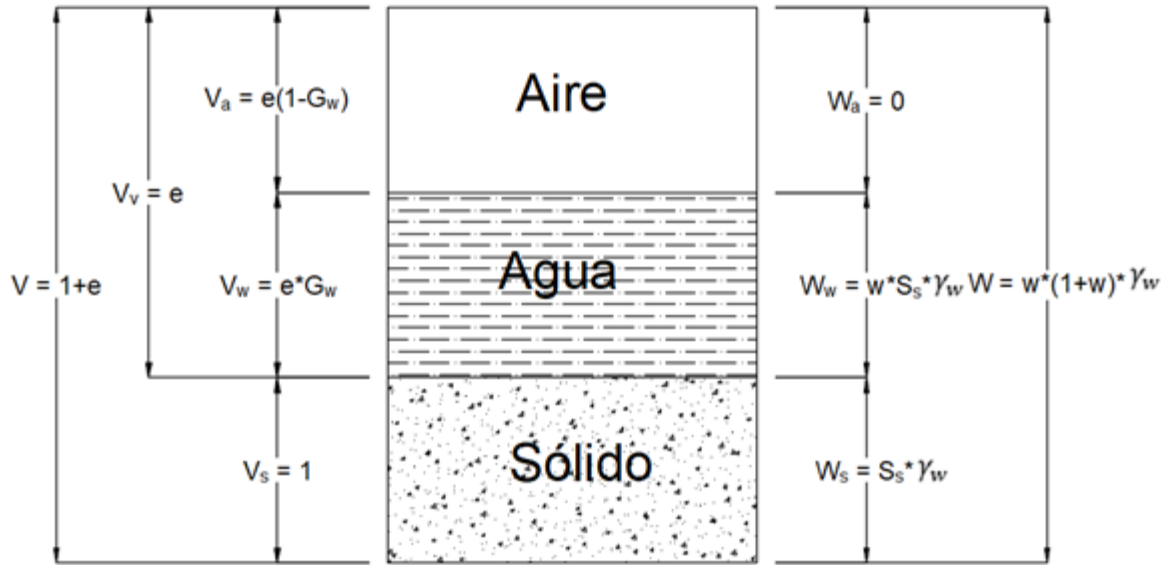
Se realizó la determinación de las propiedades y relaciones volumétricas del suelo extraído (figura 3-2) para determinar si el material extraído corresponde a un suelo expansivo, las cuales se realizaron mediante normativa establecida.

#### 3.2.1 Contenido de humedad ( $w$ ).

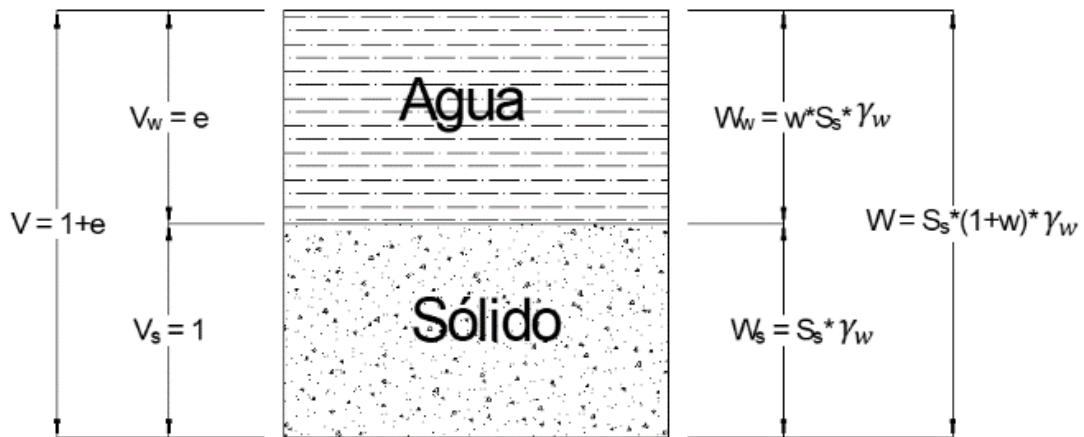
Medición del peso de una muestra representativa del total, este proceso se realiza lo más pronto posible del muestreo el cual se determina con base a la norma ASTM-D-2216.

#### 3.2.2 Densidad de Sólidos ( $S_s$ ).

Se establece con base a la norma ASTM-D-854, esta propiedad se instaure para calcular relaciones volumétricas de los suelos tales como el grado de saturación y relación de vacíos.



a)

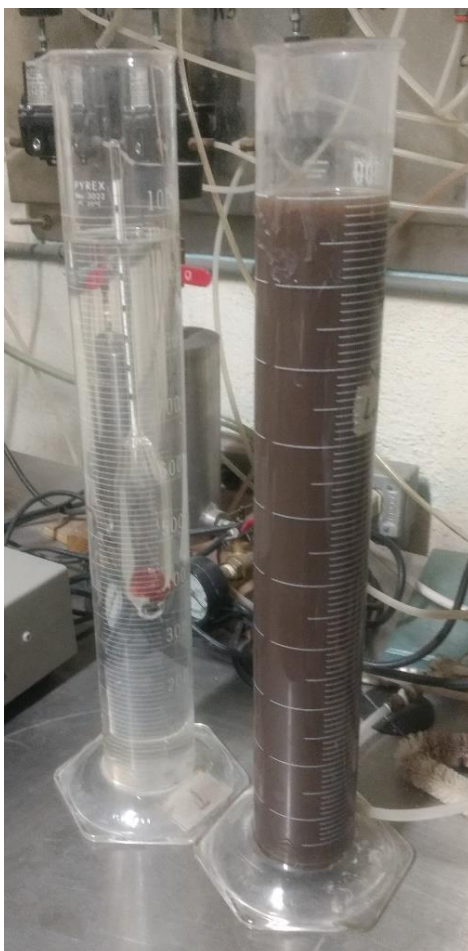


b)

Figura 3-2.- Relaciones Volumétricas para a) suelos no saturados y b) suelos saturados.

### 3.2.3 Granulometría.

Se determina mediante la distribución de los tamaños de las partículas de la muestra mediante tamices basada en la norma ASTM D-2487 eh hidrómetro basado en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libre a través de un fluido basada en la norma ASTM D-2974 y como se observa en la [Figura 3-3](#).



**Figura 3-3.- Ensayo prueba de hidrómetro.**

#### 3.2.4 Superficie específica

La superficie específica ( $S_e$ ) es la relación de la superficie de una partícula y su masa. Determina el balance entre las fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas, el cual afecta la estructura, la permeabilidad y controla la adsorción.

En suelos finos se logran relaciones sumamente grandes en partículas con forma de placa, en este tipo de partículas, con tamaños del orden de una micra ( $\mu\text{m}$ ) las moléculas que forman la superficie constituyen una gran proporción del número total de moléculas, de ahí las fuerzas asociadas con moléculas de superficie tienen un gran efecto sobre la partícula y, por tanto, sobre la masa del suelo como se muestra en tabla 4-1 (Díaz-Rodríguez, 2014).

**Tabla 3-1.- Dimensiones para minerales de arcilla.**



Mineral de arcilla	Dimensiones en Amstroms (A)			Superficie específica
	Largo	Ancho	Espesor	Rangos en $m^2/g$
Caolinita	1000	20000	100 a 1000	10 a 20
Illita	1000	5000	50 a 500	65 a 100
Montorillonita	1000	5000	10 a 50	hasta 800

Este dato se presenta con el objetivo de identificar, de manera adicional el estudio de granulometría y su carácter que poseen las partículas del suelo.

### 3.2.5 Límites de Atterberg y Contracción.

Con base a las normas ASTM-D-4318 y ASTM-D-427 se determina el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice plástico (IP) con respecto a la carta de plasticidad (Figura 3-4) y la contracción (LC).

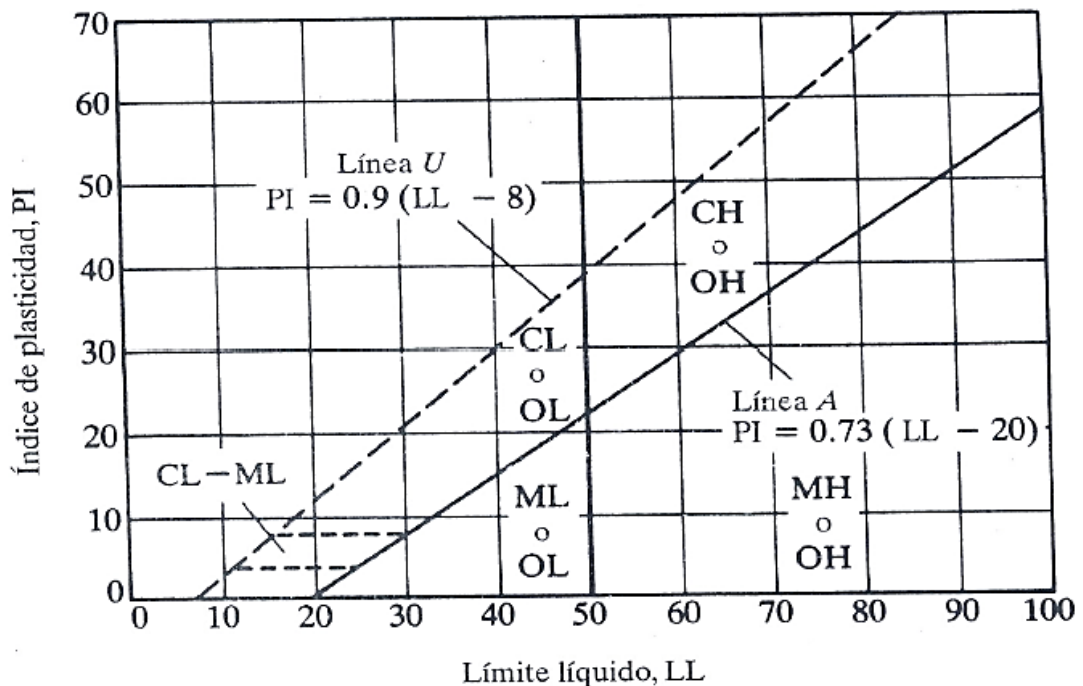


Figura 3-4.- Carta de plasticidad.

En donde el LL representa la frontera entre el estado semilíquido y plástico, el LP la frontera entre el estado plástico y semisólido y el parámetro IP resulta de la diferencia entre el LL y LP, de esta forma estos parámetros nos sirven para la clasificación del suelo mediante la carta del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).



**Figura 3-5.- Ensayo de límite de contracción.**

El potencial de expansión de un suelo puede determinarse mediante los límites de Atterberg y la norma AASHTO T-258 (tabla 3-2).

**Tabla 3-2.- Potencial de Expansión.**

<i>Grado de Expansión</i>	<i>LL %</i>	<i>IP %</i>	<b><math>\zeta</math> nat</b> <i>Ton / pie<sup>2</sup></i>
Elevado	> 60	> 35	> 4
Marginal	50 - 60	25 - 35	1.5 - 4
Bajo	< 50	< 25	< 1.5

El límite de contracción es monitoreado y registrado mediante la norma ASTM-D-427 por un periodo determinado de días hasta observar que posee la rigidez necesaria para secarla al horno, de esta forma se registran los cambios de relación de vacíos (volumétricos) que le ocurren al ir disminuyendo el grado de saturación en la muestra y la evolución de la succión dentro de la muestra hasta ser secada al horno.

### 3.3 Proctor Modifica.

Este ensayo abarca procedimiento de compactación para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos, con base en la norma ASTM D -1557 consiguiendo una curva de compactación.

Con el objetivo de obtener “ $e_{min}$ ” mediante una fuerte compactación.

### 3.4 Succión.

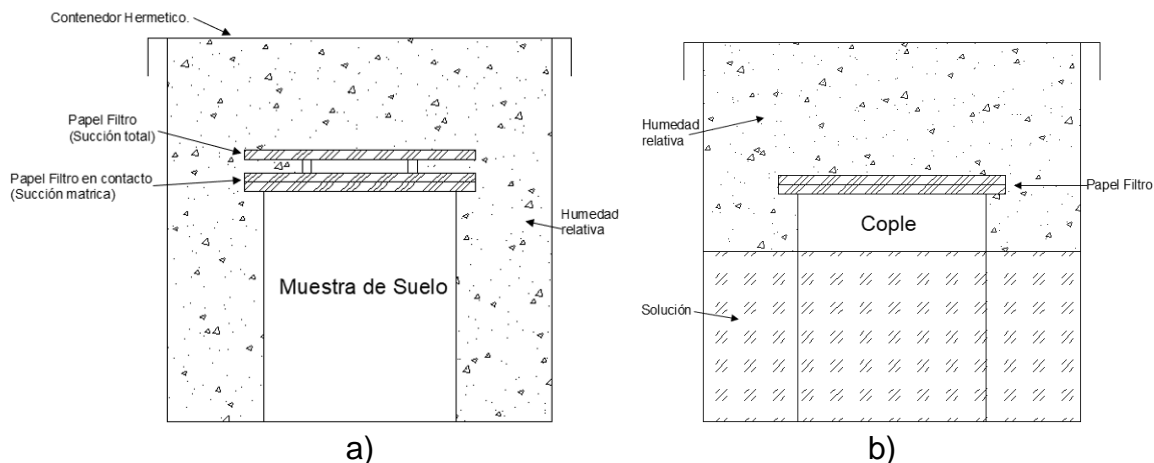
La succión de un suelo es la medida de la energía libre del agua en los poros del suelo, y es relacionada con el contenido de humedad a través de la CRAS. Por lo tanto, para la obtención del mismo, se realizó con base a la norma ASTM D-5298, con la finalidad de obtener datos de succión a diferentes grados de saturación y distintos caminos, es decir, del estado seco al saturado y viceversa.

Para realizar el ensaye se empleó papel tipo Whatman No. 42, el cual será expuesto como un sensor pasivo para evaluar la succión mátrica y la succión total. Controlando la humedad del papel filtro en contacto directo con el suelo y el equilibrio con la presión de vapor de agua en el contenedor hermético.

La realización de esta prueba es de sumo cuidado e importancia, debido a el largo periodo que conlleva su realización y el valor agregado que tiene para la construcción de la CRAS.

El lugar donde se realizó la medición de la succión fue dentro de la cámara de temperatura evitando una variación de temperatura menor a 3°C y minimizando los efectos de condensación. Donde la temperatura nominal típica es de 20°C.

La calibración del papel es realizada por medio de varias soluciones con agua destilada y NaCl (Cloruro de Sodio) o KCl (potasio). Se preparan diferentes soluciones a distintas concentraciones las cuales se muestran en [tabla 3-3](#) (ASTM D-5298) que serán vertidas en 5 diferentes contenedores ([Figura 3-6-b](#)). Paralelamente se realiza la medición de succión a muestras de suelo. Cada muestra será colocada en su contenedor hasta alcanzar el grado de saturación establecido, en el cual se pone dos papeles filtro, un o-ring, y un papel ([Figura 3-6-a](#)), para después ser sellados y aislados en una hielera por un periodo mínimo de 7 días.



**Figura 3-6.- Colocación del papel filtro a) sobre muestra, b) calibración.**

Cada papel filtro antes de ser colocado en la muestra o cople es retirado mediante pinzas del desecador y pesado, posteriormente el contenedor es sellado y aislado en la hielera por un periodo mínimo de 7 días, por último, es retirado y pesado el papel filtro para designar el peso que adquirió en el periodo de equilibrio.

**Tabla 3-3.- Concentraciones de soluciones de sal para evaluar la succión del suelo.**

Succión <i>kPa</i>	Log <i>kPa</i>	<i>pF</i>	<i>atm</i>	$R_h$	20° C	
					<i>gNaCl</i>	<i>gKCl</i>
					En 1000 ml de agua	En 1000 ml de agua
-98	1.99	3.0	-0.97	0.99927	1.3	1.7
-310	2.49	3.5	-3.02	0.99774	3.8	5.3
-980	2.99	4.0	-9.68	0.99278	13.1	17.0
-3099	3.49	4.5	-30.19	0.97764	39.0	52.7
-9800	3.99	5.0	-96.77	0.93008	122.5	165

### 3.4.1 Obtention de la CRAS.

Se consiguieron datos experimentales mediante la prueba de papel filtro generando curvas de secado y humedecimiento.

Se realiza 10 determinaciones de la succión para la curva de humedecimiento para generar el rango de saturación del suelo de 0 a 100% grado de saturación. De misma manera se realizó para la determinación de la curva de secado. En el cual se desarrollaron dos curvas definidas en el plano Log S contra  $G_w$ .

El grado de saturación es viable obtenerlo mediante los procedimientos de la norma ASTM-D-427 para obtener su volumen y el peso de la muestra, es posible mientras que las muestras sea rígida, debido a que cuando contiene un alto grado de saturación la muestra se vuelve muy frágil, en este trabajo se midió la altura efectiva dentro de un cilindro metálico en especímenes con grado de saturación alto para cuidar las muestras y no se altere logrando la manipulación del espécimen y obteniendo los datos necesarios para los cálculos posteriores.

Además posteriormente a la obtención de los datos de la CRAS, se puede realizar mediante el método propuesto por Zhou y Sheng (2012) la obtención de ciclos de histéresis dentro de la CRAS, con el objetivo de hacer una proceso a la trayectoria de humedecimiento dentro del modelo.

### 3.5 Pruebas Odométricas y en prensa triaxial de un suelo expansivo.

#### 3.5.1 Labrado en anillo de muestra distinto grado de saturación.

Se labran distintas muestras a dos tipos de contenido de humedad inicial, un primer grupo de muestras es labrado a una rigidez determinada del material, es secada gradualmente presentando un contenido de humedad promedio inicial de  $w = 23.77\%$  ([Figura 3-7-a](#)), el segundo grupo se labra mediante cubos y colocado en cazuelas, después es secado gradualmente para no generar grietas en la muestra hasta poder ser secada al horno por un periodo de 24 horas ([Figura 3-7-b](#)).

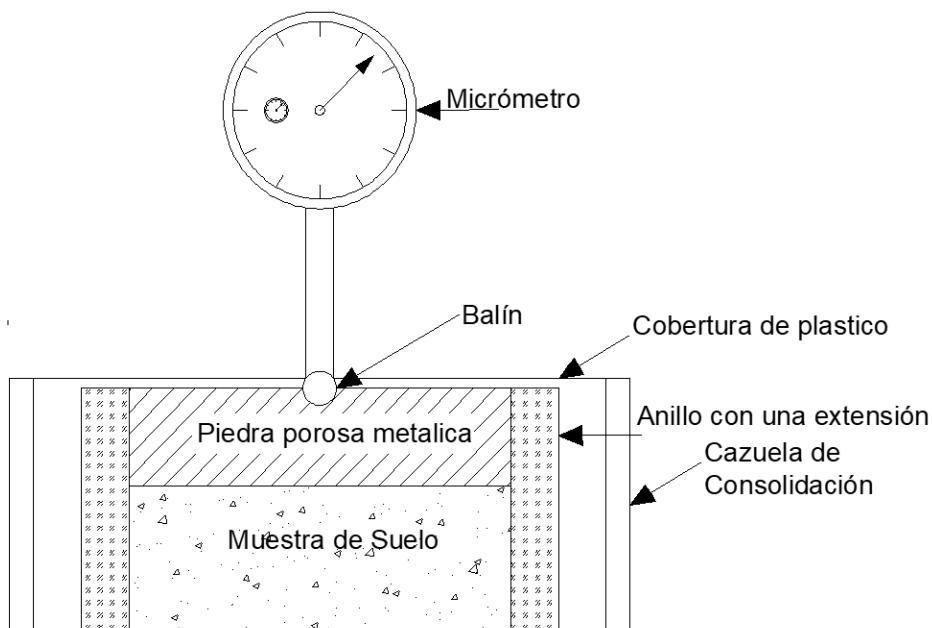


**Figura 3-7.- Labrado de muestras, a) secado gradualmente al aire, b) secado completamente al horno.**

#### 3.5.2 Prueba odométrica.

Se realizaron 3 grupos de ensayos en los odómetros, sujetos a distintas cargas verticales y a dos efectos de succión inicial, con el objetivo de decretar la influencia que tiene la succión en el fenómeno de colapso bajo carga por humedecimiento y el cambio volumétrico en un suelo expansivo.

El primer ( $w = 23.77\%$ ) y segundo (*secado al horno*) grupo, son colocados con una extensión del anillo, con el fin de instalar una piedra porosa metálica sobre la muestra, posteriormente se sitúa en una cazuela de consolidación para ser cubierta por plástico con el propósito de evitar el cambio de humedad en la muestra ajeno a la prueba (Figura 3-8), después las muestras se colocan en el consolidómetro para iniciar el ensaye mediante cargas de 50, 200, 300 y 500 kPa para cada muestra en cada grupo (Figura 3-9) y ser registrada las lecturas de micrómetro como marca la norma ASTM D-2435. Más adelante, se añade por medio de jeringa dentro de la piedra porosa metálica incrementos de humedad a las muestras que se espera asimilen y registre las lecturas para añadir el próximo incremento de humedad y repetir la operación hasta saturar, el cual se añaden 3 incrementos y 5 incrementos respectivamente para cada grupo.



**Figura 3-8.- Croquis de la muestra colocada en consolidómetro y prensa triaxial.**

Un tercer grupo, consiste en un ensaye de muestra completamente seco, es llevado a la saturación por medio de 6 incrementos de humedad repitiendo la misma

operación que para grupo uno y dos, más adelante recibe carga y descarga a 3 incrementos y decrementos, se aplican 100, 200 y 300 kPa de carga sumando un total de 600 kPa, con el objetivo de obtener las pendientes de carga-descarga.



**Figura 3-9.- Ensaye de consolidación del primer grupo.**

### 3.5.3 Prueba en prensa triaxial.

Se coloca una muestra completamente seca como se muestra la [Figura 3-8](#) sobre la prensa triaxial hasta topar con el transductor de esfuerzo ([Figura 3-10](#)), la muestra es sujeta a 6 incrementos de humedad hasta saturar y posteriormente inundar la muestra, el cual se sigue la metodología de incrementos de humedad en los ensayos en prueba odometrica.

El objetivo de este ensaye es registrar el esfuerzo ejercido por el suelo expansivo sin permitir que el espécimen cambie de volumen. Los datos son registrados en tiempo real con ayuda de la computadora y es graficada en el plano tiempo – esfuerzo, terminada la prueba se descargan los datos para realizar los resultados deseados.





**Figura 3-10.- Ensayo en prensa triaxial.**

### 3.6 Planteamiento del Modelo elastoplástico basado en esfuerzo efectivo.

El planteamiento realizado por Alonso (1999) a partir de la distinción de dos niveles estructurales responsables del comportamiento de suelos expansivos se adopta como la base para desarrollar un modelo de esfuerzos efectivos para suelos expansivos en el plano  $p'$ (esfuerzo medio efectivo) –  $s$ (Succión).

El modelo utiliza la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop para determinar el comportamiento volumétrico de los suelos expansivos ([Figura 3-11](#)) y considera que existe una relación entre las deformaciones de la microestructura y macroestructura, generado por las relaciones de vacíos mínima y máxima que puede alcanzar el material.





figura 3-11 se puede relacionar que para cada punto existe una relación de vacíos distinta.

Para obtener el endurecimiento por la deformación volumétrica plástica " $d\varepsilon_v^p = \frac{de^p}{1+e_a}$ " generado en  $s = 0$ , durante la carga ( $dp'_0$ ), Araiza (2012) mediante su analogía propone la siguiente ecuación:

$$dp'_0 = \frac{e_E * (\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0)}{e_G * (P_c + 2\chi_0 s_0)} * P_c$$

**Ecuación 3-1.- Endurecimiento, con  $s = 0$ .**

Donde  $e_E$  y  $e_G$  representa la relación de vacíos en el punto **E** y **G** respectivamente,  $P_c$  la carga de sitio y/o generada en prueba,  $\Delta\bar{p}$  representa el incremento de carga en esfuerzo medio neto,  $\chi_0 s_0$  el endurecimiento por succión generado por secado.

Obtener el endurecimiento generado cuando  $s \neq 0$  se retoma la analogía para el caso de  $s=0$  y desprende la siguiente ecuación:

$$dp'_s = \frac{e_E * (\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0)}{e_s (P_c + 2\chi_0 s_0)} * (P_c + \chi s + \chi_0 s_0)$$

**Ecuación 3-2.- Endurecimiento, con  $s \neq 0$ .**

Donde  $e_s$  representa la relación de vacíos dentro de la trayectoria **E-G**.

Por lo tanto, una muestra de suelo expansivo se hincha por humedecimiento, una porción del aumento de volumen se produce en la macroestructura, por lo que la densidad del material juega un papel muy importante. Esto se puede tomar en cuenta con el parámetro de Densidad Relativa ( $D_r$ ). Se considera una relación de vacíos mínima " $e_{min}$ " y una relación de vacíos máxima " $e_{max}$ ", la cual implica comparar la densidad del suelo respecto de sus estados más denso y más suelto posible, estableciendo que la deformación volumétrica plástica transmitida por la microestructura a la macroestructura es función de la " $D_r$ ", (ecuación 3-3) mientras que las deformaciones elásticas no se ven afectadas por este parámetro.

De acuerdo a lo anterior, se puede utilizar estas consideraciones dentro de la figura 3-11 al sobrepasar la trayectoria **C-D** se consideran comportamiento elastoplástico expansivo (figura 3-12) de la macroestructura se utilizará la [ecuación 3-4](#).

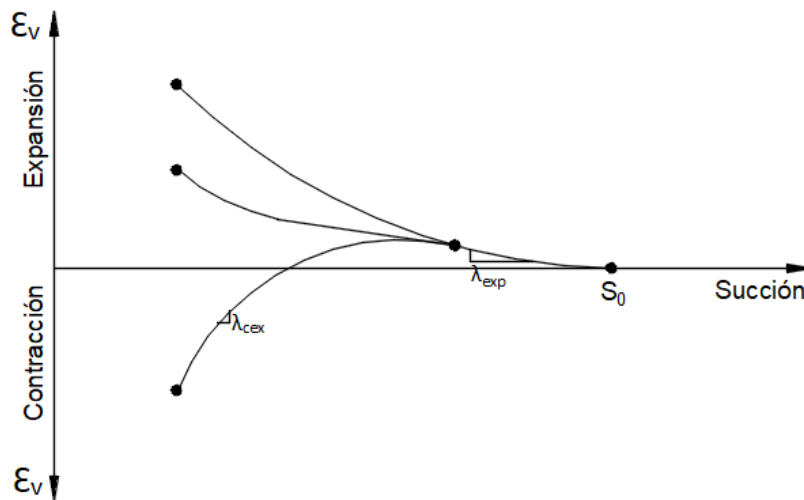
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

**Ecuación 3-3.- Densidad relativa.**

$$\lambda_{ex} = (\lambda - \kappa)(D_r) + \kappa$$

**Ecuación 3-4.- Índice de expansión.**

Donde  $\lambda$  y  $\kappa$  representan las pendientes de carga – descarga respectivamente.



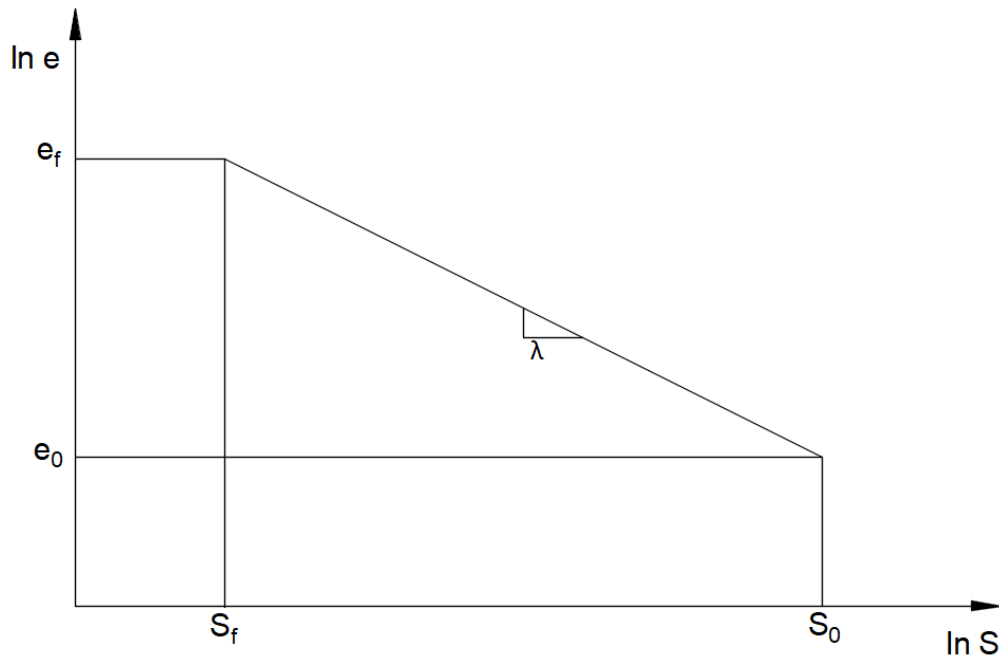
**Figura 3-12.- Relación volumétrica contra succión.**

Si un suelo muestra un incremento de carga suficientemente grande como el que genera la superficie de fluencia (**E-G**) en la [figura 3-11](#), y posteriormente se hidrata, se produce un colapso (**F**) de la macroestructura mientras que la microestructura expande (figura 3-12). En este caso, es necesario utilizar la siguiente ecuación que representa un fenómeno simultáneo de colapso – expansión:

$$\lambda_{cex} = (\lambda - \kappa)(1 - D_r) - \kappa$$

**Ecuación 3-5.- Índice de expansión - colapso.**

En esta tesis se plantea utilizar una variante de la relación propuesta por Juárez Badillo (1975) y Rojas y Chávez (2013) para el comportamiento volumétrico de los suelos saturados. La ecuación se escribe en términos de la relación de vacíos contra la succión en un plano  $\ln e - \ln S$  (figura 3-13).



**Figura 3-13.- Relación "ln e vs ln S"**

Para obtener la deformación volumétrica en función de la succión y la cual se encuentra implícita dentro de la formulación de Bishop, se muestra las siguientes relaciones:

Mediante la relación de la [figura 3-13](#), se obtiene:

$$\ln \frac{e_f}{e_0} = \ln \frac{p'_f{}^\lambda}{p'_0{}^\lambda} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Empleando el concepto de base neperiana en ambos miembros de la ecuación 3-6, queda:

$$e^{\ln\left(\frac{e_f}{e_0}\right)} = e^{\ln\left(\frac{p'_f}{p'_0}\right)^\lambda} \quad \text{Ecuación 3-7)}$$

simplificando y despejando "e<sub>f</sub>" de ecuación 3-7:

$$e_f = e_0 * \frac{p'_f{}^\lambda}{p'_0{}^\lambda} \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Donde  $\lambda$  será sustituido en por la el índice  $\lambda_{ex}$  o  $\lambda_{cex}$ , o por la pendiente  $\kappa$  si es que la muestra no ha sobrepasado la zona elástica.

Sustituyendo ecuación 3-8 en [ecuación 2-12](#):

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 * \frac{p_f^\lambda}{p_0} - e_0}{1 + e_0}$$

**Ecuación 3-9.- Deformación Volumétrica en termino de Succión.**

## **4. Resultados y Discusiones**

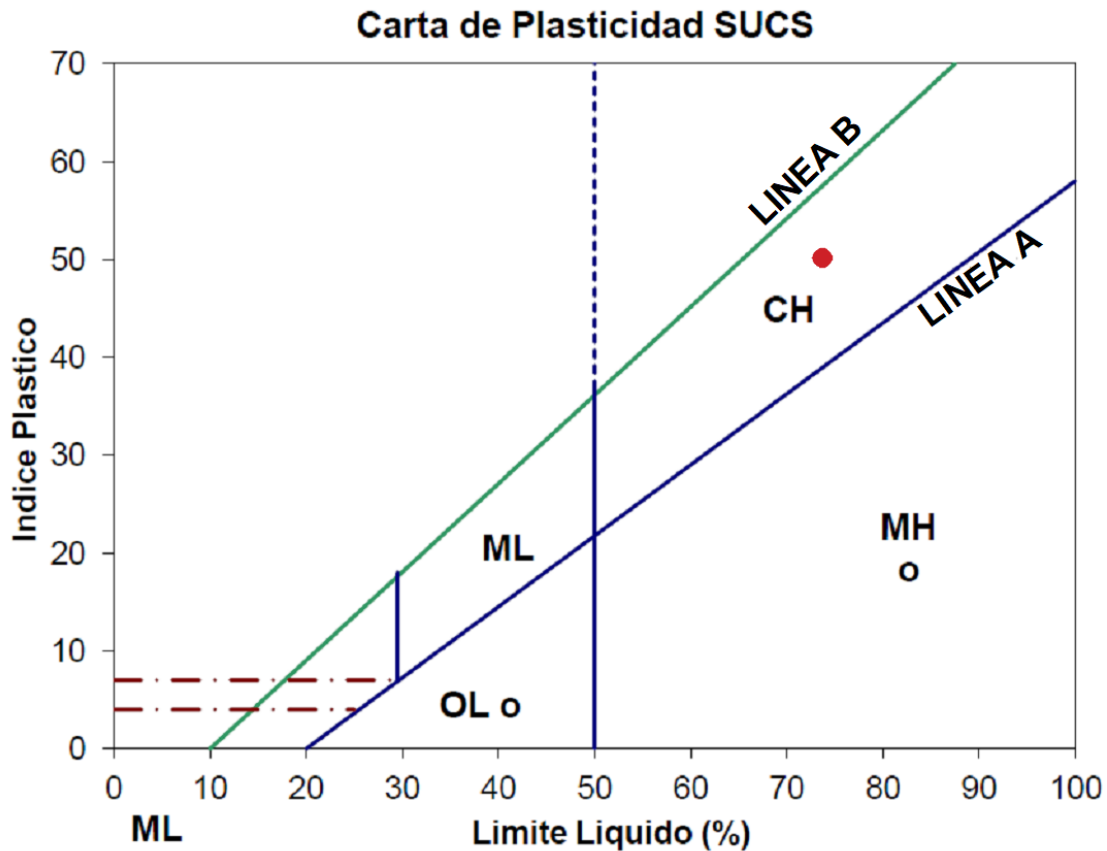
### **4.1 Caracterización y pruebas índice del suelo en estudio.**

Para esta investigación fue necesario la obtención de cuatro muestras inalteradas, y un poco de muestra altera extraídas a una profundidad de 1.80 metros. Con estas muestras se realizaron pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades índices (tabla 4-1).

**Tabla 4-1 Resumen de pruebas para la determinación de las propiedades índices del suelo en estudio.**

<b>Propiedades</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Limite Liquido (LL)</b>	<b>73.47%</b>
<b>Limite Plástico (LP)</b>	<b>23.49%</b>
<b>Índice Plástico (IP)</b>	<b>49.98%</b>
<b>Límite de Contracción (LC)</b>	<b>20.29%</b>
<b>Densidad de Solidos (<math>S_s</math>)</b>	<b>2.64</b>
<b>Contenido de Gravas</b>	<b>0.00%</b>
<b>Contenido de Arenas</b>	<b>1.56%</b>
<b>Contenido de Finos</b>	<b>98.44%</b>
<b>Humedad de Campo (w)</b>	<b>34.23%</b>
<b>Superficie especifica (<math>S_e</math>)</b>	<b>397.77 m<sup>2</sup>/gr</b>

Mediante granulometrías por medio de tamices eh hidrómetro, límites de Atterberg (ANEXO A) y la carta SUCS es posible clasificar al suelo, el cual representa un suelo tipo CH ([figura 4-1](#)).



**Figura 4-1.- Carta de plasticidad SUCS con el suelo en estudio.**

#### 4.1.1 Potencial de expansión y mineralogía de suelo en estudio

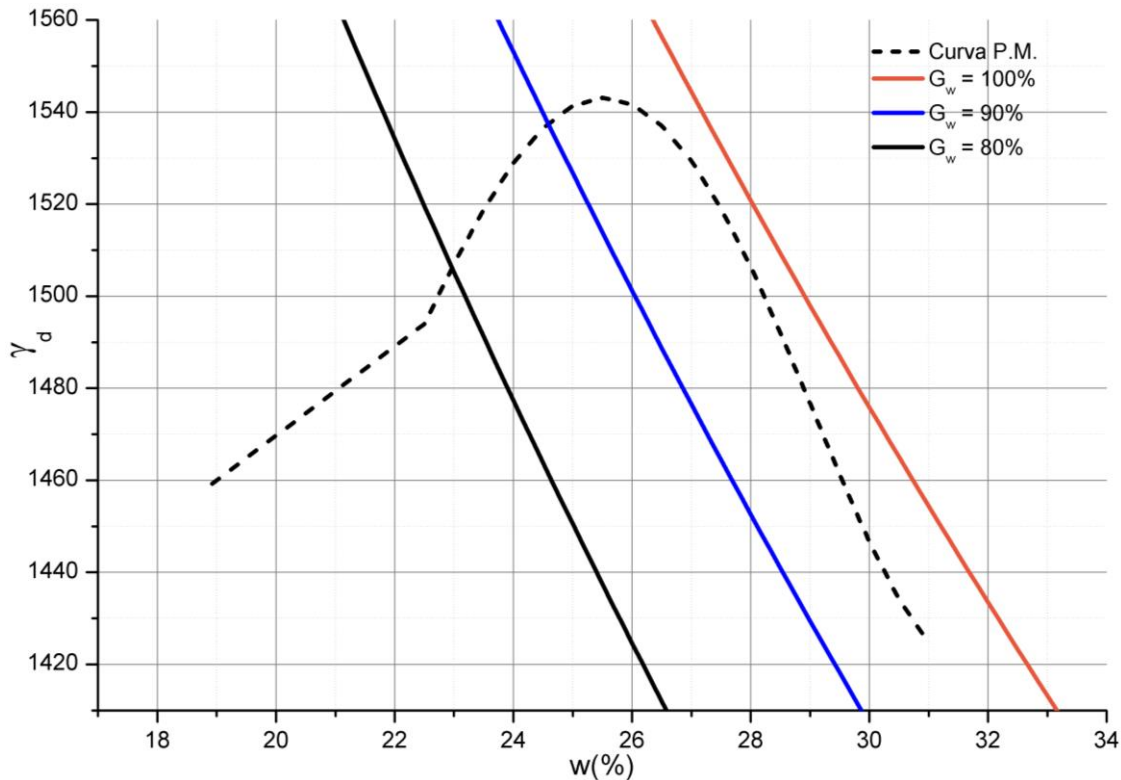
El potencial de expansión de un suelo puede determinarse mediante las propiedades índice en la tabla 4-1 y con ayuda de la norma AASHTO T-258, se determinad un grado de expansión elevado generado por LL mayor a 60%, IP mayor a 35%.

Usando la relación de Superficie específica es posible integrar el tipo de mineralogía del material que se trabajó y el cual pertenece a una mineralogía de arcilla del tipo montmorillonita ([Tabla 4-1](#)).

#### 4.2 Proctor Modificada

Mediante la Prueba Proctor modificada, es posible obtener densidad seca del suelo con relación al contenido de agua del suelo. Estos datos, cuando son ploteados, representan una relación conocida como curva de compactación. Los

valores de óptimo contenido de agua y máximo peso unitario seco modificado son determinados de la curva de compactación, y con los cálculos correspondientes es posible obtener la relación de vacíos mínima “ $e_{min}$ ” el cual mediante la [Fig. 4-2](#) y los cálculos realizados en ANEXO A-3 se obtiene una  $e_{min} = 0.7110$  en el óptimo de la prueba.



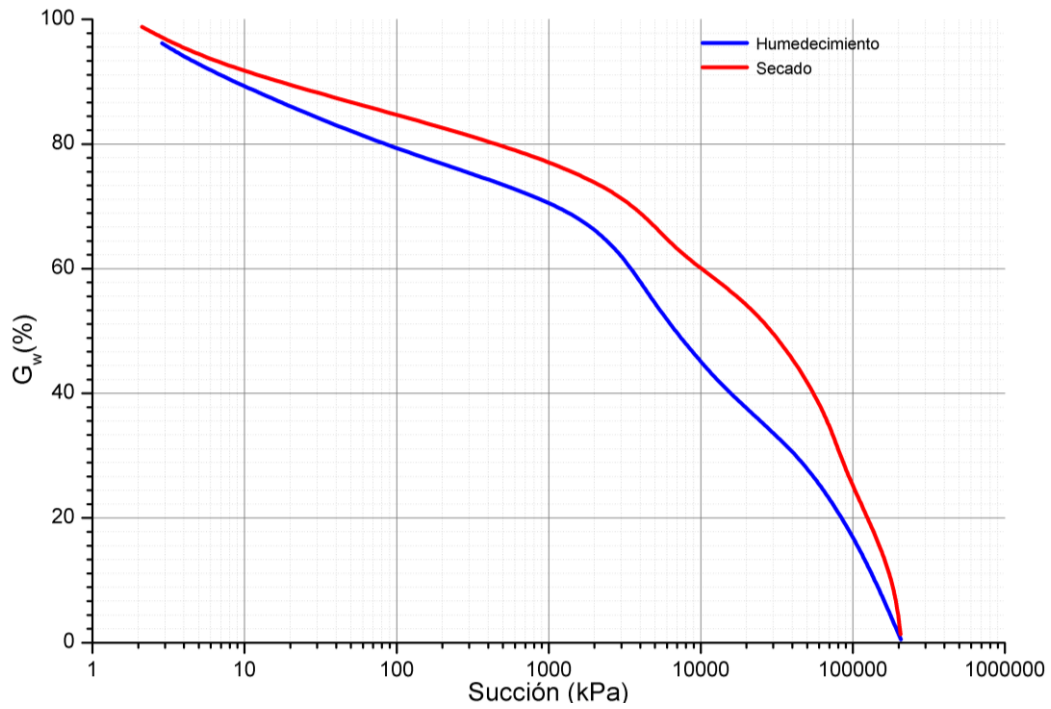
**Figura 4-2.- Curva de Compactación por Proctor modificada.**

#### 4.3 Curva de Retención Agua – Suelo del suelo estudiado.

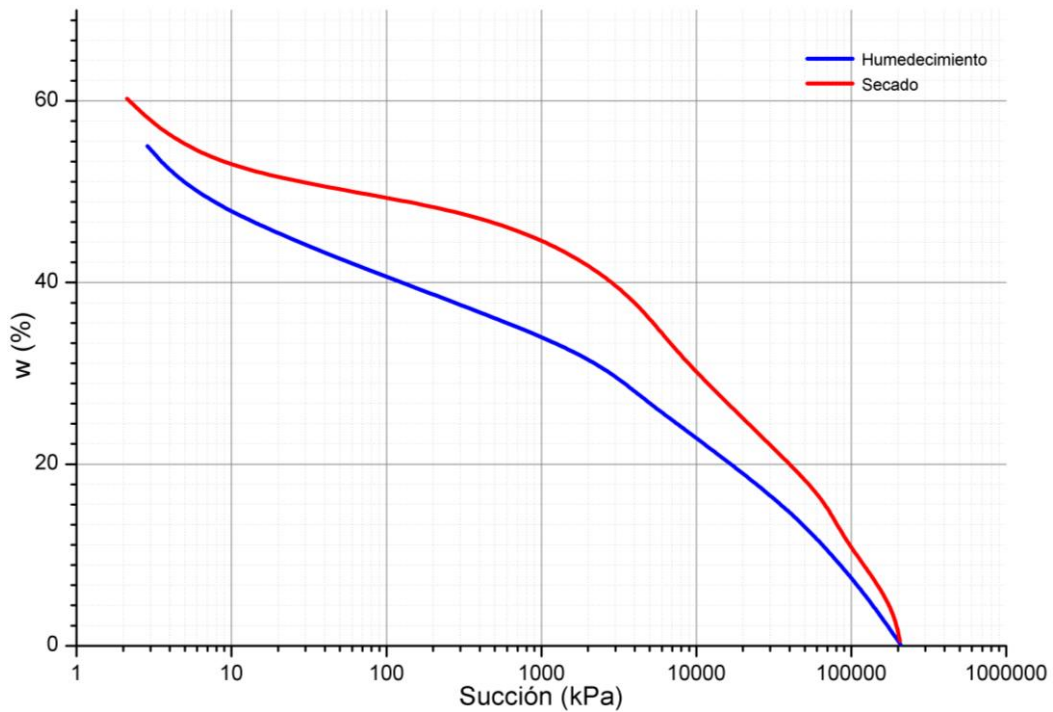
La obtención del CRAS es fundamental para este trabajo de investigación de esta forma se logra conocer el esfuerzo inicial de succión que está sometido el suelo con distintas humedades iniciales.

La [figura 4-3](#) y figura 4-4 muestran las curvas de retención en función del Grado de saturación ( $G_w$ ) contra la succión ( $S$ ) y contenido de humedad ( $w$ ) contra la succión, el cual se encuentran dos trayectorias que generan el efecto de histéresis. Los cálculos de la determinación de la curva características se muestran en [ANEXO B.](#)





**Figura 4-3.- CRAS del suelo expansivo estudiado.**



**Figura 4-4.- Contenido de humedad (w) vs succión.**

Las CRAS presenta los valores de succión se encuentran entre 10 kPa y 210,000 kPa, de esta forma será posible utilizar para los cálculos posteriores.

La obtención de la CRAS por medio del método empleado por Sheng (figura 4-5), resulta útil, el cual conlleva pasar de una trayectoria de secado a una de humedecimiento por un proceso de histéresis, por medio de la obtención de los parámetros para cada curva (tabla 4-2), el proceso de obtención de los parámetros se encuentra dentro del ANEXO B-1, el parámetro “B” de escaneo se realiza mediante el mismo procedimiento que en dicho anexo, y se coloca cada parámetro de escaneo conforme al modelo dentro del ANEXO D

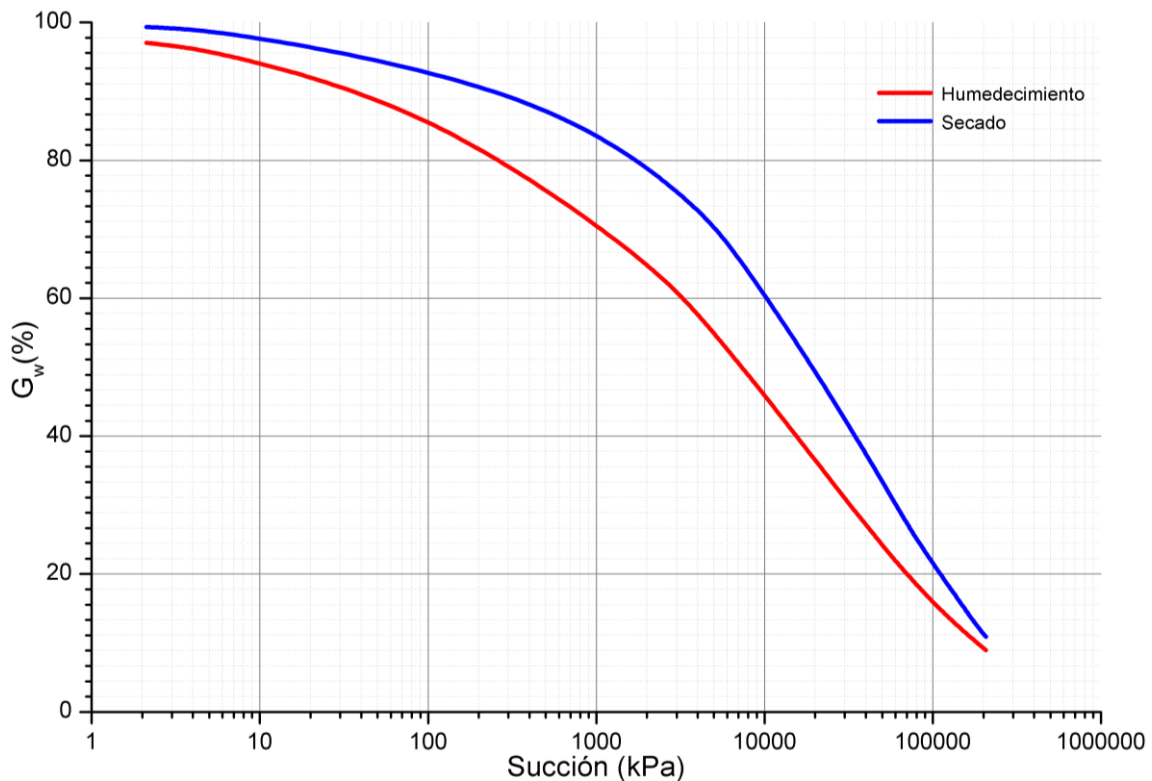


Figura 4-5.- Succión por método Sheng

Tabla 4-2.- Parámetros obtenidos para CRAS

<b><i>A</i>w =</b>	<b>56196431.79</b>
<b><i>M</i>w =</b>	<b>0.3869</b>
<b><i>N</i>w =</b>	<b>22.2831</b>
<b><i>A</i>d =</b>	<b>56196431.79</b>
<b><i>M</i>d =</b>	<b>0.5053</b>
<b><i>N</i>d =</b>	<b>38.7519</b>

#### 4.4 Pruebas odométricas del suelo estudiado.

Las pruebas odométricas realizadas a dos grupos de muestra con distinto contenido de humedad inicial, el primer grupo contiene una humedad promedio inicial de  $w = 23.77\%$ , un grado de saturación promedio inicial de  $G_w = 62.17\%$ , y el segundo grupo de muestras secadas al horno por un periodo de 24 horas, de las cuales se corrobora el contenido de humedad adquirida al momento de labrar las muestras secadas al horno obteniendo un contenido de humedad promedio inicial de  $w = 7.85\%$ , un grado de saturación promedio inicial de  $G_w = 22.48\%$ , el contenido de humedad adquirido es generada por la manipulación de la muestra al labrarla, los cálculos y resultados se muestra en tabla 4-3 y 4-4.

**Tabla 4-3.- Resultados de primer grupo de muestras con  $w = 23.77\%$**

Etapa	Presion kPa	$\Delta H$ mm	$H_x$ mm	$w_x$ %	$Hw_x$ mm	$e$ (Exper.) unid	$Sw_x$ %	$\epsilon_v$ (Exper.)
Carga	1	0	20.1	24.97%	6.60	1.006	63.73%	0.0000
	50	-0.545	19.555	24.97%	6.60	0.9518	63.73%	-0.0271
Consolidado	50	0	19.555	24.97%	6.60	0.9518	67.37%	0.0000
1er. Hidratación	50	0.775	20.33	30.69%	8.12	1.0291	76.58%	0.0396
2da. Hidratación	50	0.49	20.82	36.41%	9.63	1.0780	86.74%	0.0647
3era. Hidratación	50	0.04	20.86	42.13%	11.14	1.0820	100.00%	0.0667
Carga	1	0	19.4	24.96%	6.24	1.047	63.30%	0.0000
	200	-1.415	17.985	24.96%	6.24	0.8979	63.30%	-0.0729
Consolidado	200	0	17.985	24.96%	6.24	0.8979	73.83%	0.0000
1er. Hidratación	200	0.16	18.145	28.21%	7.06	0.9148	81.42%	0.0089
2da. Hidratación	200	0.065	18.21	31.46%	7.87	0.9216	90.12%	0.0125
3era. Hidratación	200	0.001	18.211	34.71%	8.68	0.9217	100.00%	0.0126
Carga	1	0	20.1	24.11%	6.46	0.982	64.35%	0.0000
	300	-1.73	18.37	24.11%	6.46	0.8113	64.35%	-0.0861
Consolidado	300	0	18.37	24.11%	6.46	0.8113	77.88%	0.0000
1er. Hidratación	300	0.05	18.42	26.51%	7.10	0.8163	85.12%	0.0027
2da. Hidratación	300	0.058	18.478	28.91%	7.74	0.8220	92.19%	0.0059
3era. Hidratación	300	-0.013	18.465	31.32%	8.38	0.8207	100.00%	0.0052
Carga	1	0	20.1	20.95%	5.63	0.973	56.82%	0.0000
	400	-1.89	18.21	20.95%	5.63	0.7879	56.82%	-0.0940
Consolidado	400	0	18.21	20.95%	5.63	0.7879	70.21%	0.0000
1er. Hidratación	400	-0.005	18.205	23.49%	6.31	0.7874	78.74%	-0.0003
2da. Hidratación	400	-0.165	18.04	26.02%	7.00	0.7712	89.06%	-0.0093
3era. Hidratación	400	-0.045	17.995	28.55%	7.68	0.7668	100.00%	-0.0118
Carga	1	0	20.1	23.85%	6.31	1.005	62.64%	0.0000
	500	-2.58	17.52	23.85%	6.31	0.7480	62.64%	-0.1284
Consolidado	500	0	17.52	23.85%	6.31	0.7480	84.19%	0.0000
1er. Hidratación	500	-0.285	17.235	24.95%	6.60	0.7195	91.53%	-0.0163
2da. Hidratación	500	-0.045	17.19	26.04%	6.89	0.7150	96.14%	-0.0188
3era. Hidratación	500	0.025	17.215	27.13%	7.18	0.7175	100.00%	-0.0174

**Tabla 4-4.- Resultados del segundo grupo de muestras con  $w = 7.85\%$**

Etapa	Presion kPa	$\Delta H$ mm	$H_x$ mm	$w_x$ %	$Hw_x$ mm	$e_{(Exper.)}$	$Sw_x$ %	$\epsilon_v (Exper.)$
Carga	1	0	20.1	7.73%	2.14	0.917	22.26%	0.0000
	50	-0.16	19.94	7.73%	2.14	0.9013	22.26%	-0.0080
Consolidado	50	0	19.94	7.73%	2.14	0.9013	22.63%	0.0000
1er. Hidratación	50	0.17	20.11	15.27%	4.23	0.9175	43.93%	0.0085
2da. Hidratación	50	1.2	21.31	22.81%	6.31	1.0319	58.35%	0.0687
3era. Hidratación	50	1.175	22.485	30.35%	8.40	1.1440	70.04%	0.1276
4ta. Hidratación	50	0.505	22.99	37.89%	10.49	1.1921	83.91%	0.1530
5ta. Hidratación	50	0.145	23.135	45.43%	12.58	1.2059	100.00%	0.1602
Carga	200	0	19.4	8.37%	2.23	0.926	23.87%	0.0000
	200	-0.6	18.8	8.37%	2.23	0.8665	23.87%	-0.0309
Consolidado	200	0	18.8	8.37%	2.23	0.8665	25.51%	0.0000
1er. Hidratación	200	-0.035	18.765	13.72%	3.65	0.8631	41.96%	-0.0019
2da. Hidratación	200	0.515	19.28	19.06%	5.07	0.9142	55.04%	0.0255
3era. Hidratación	200	0.3	19.58	24.40%	6.49	0.9440	68.25%	0.0415
4ta. Hidratación	200	0.065	19.645	29.75%	7.91	0.9504	82.62%	0.0449
5ta. Hidratación	200	0.025	19.67	35.09%	9.33	0.9529	100.00%	0.0463
Carga	300	0	19.8	6.85%	1.87	0.911	19.85%	0.0000
	300	-0.848	18.952	6.85%	1.87	0.8293	19.85%	-0.0428
Consolidado	300	0	18.952	6.85%	1.87	0.8293	21.81%	0.0000
1er. Hidratación	300	0.008	18.96	12.10%	3.31	0.8301	38.47%	0.0004
2da. Hidratación	300	0.21	19.17	17.34%	4.74	0.8504	53.84%	0.0115
3era. Hidratación	300	0.19	19.36	22.59%	6.18	0.8687	68.64%	0.0215
4ta. Hidratación	300	0.14	19.5	27.83%	7.61	0.8822	83.29%	0.0289
5ta. Hidratación	300	0.03	19.53	33.08%	9.05	0.8851	100.00%	0.0305
Carga	500	0	19.4	8.43%	2.24	0.930	23.94%	0.0000
	500	-1.648	17.752	8.43%	2.24	0.7663	23.94%	-0.0849
Consolidado	500	0	17.752	8.43%	2.24	0.7663	29.06%	0.0000
1er. Hidratación	500	-0.2	17.552	12.50%	3.32	0.7464	44.22%	-0.0113
2da. Hidratación	500	-0.062	17.49	16.57%	4.40	0.7402	59.09%	-0.0148
3era. Hidratación	500	-0.075	17.415	20.63%	5.47	0.7327	74.34%	-0.0190
4ta. Hidratación	500	0.004	17.419	24.70%	6.55	0.7331	88.94%	-0.0188
5ta. Hidratación	500	0	17.419	28.77%	7.63	0.7331	100.00%	-0.0188

#### 4.4.1 Presión de expansión en odómetro.

Mediante el manejo de los ensayos odométricos se obtienen las presiones de expansión – colapso para las muestras ensayadas por medio del método A de la normativa ASTM D-4546 y el método de triple odómetro con el objetivo de conocer la carga suficiente que provoca el colapso dentro de la muestra a diferentes succiones iniciales y el esfuerzo necesario para evitar la expansión.

##### 4.4.1.1 Método de triple odómetro.

Para la interpretación de los ensayos realizados por el método de triple odómetro mediante las [figuras 4-6 y 4-7](#), donde la línea punteada en verde corresponde a la relación de vacíos generada después de carga y la línea punteada

en negro como la relación de vacíos generada por la expansión-colapso debido a la hidratación del suelo.

Los ensayos originales correspondían a una serie de cargas de 50, 200 y 300 kPa, mediante datos preliminares y lo observado en la experimentación se agregó una carga de 500 con el objetivo de generar el colapso para los dos grupos de muestras, y posteriormente se decidió agregar un ensaye adicional de 400 kPa para el grupo de muestras con  $w=23.77\%$ , con el fin observar un equilibrio en la expansión y colapso de la muestra a dicha succión.

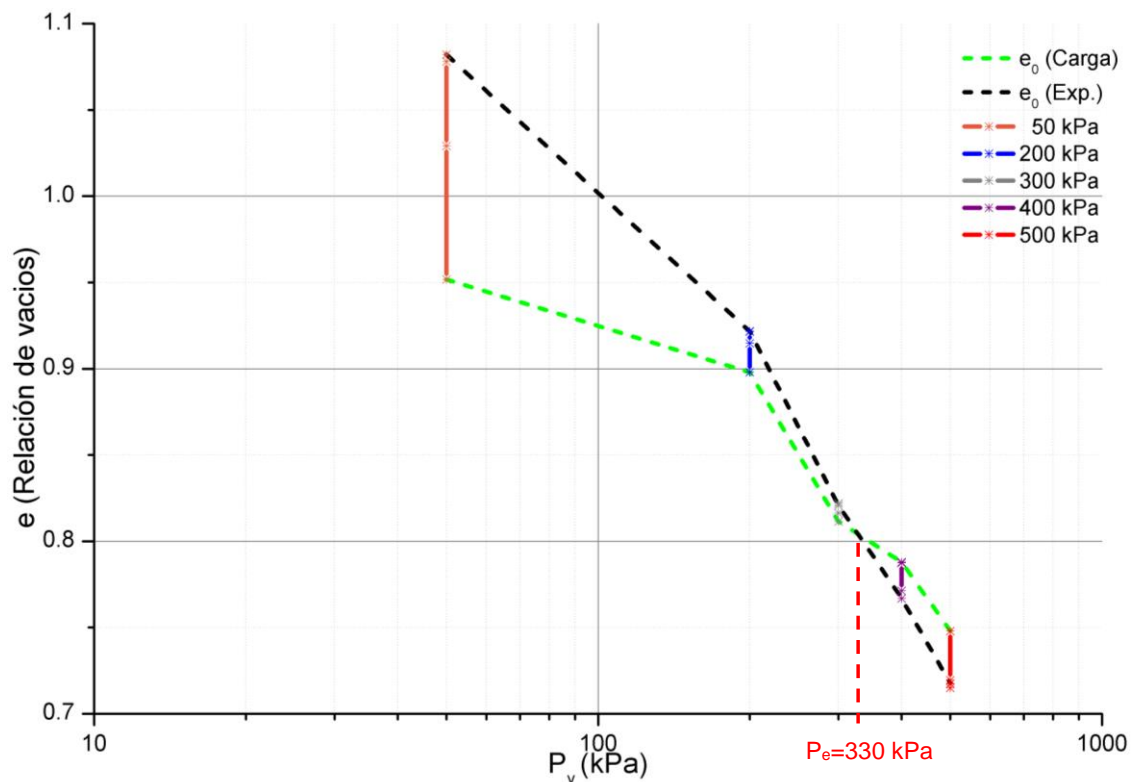
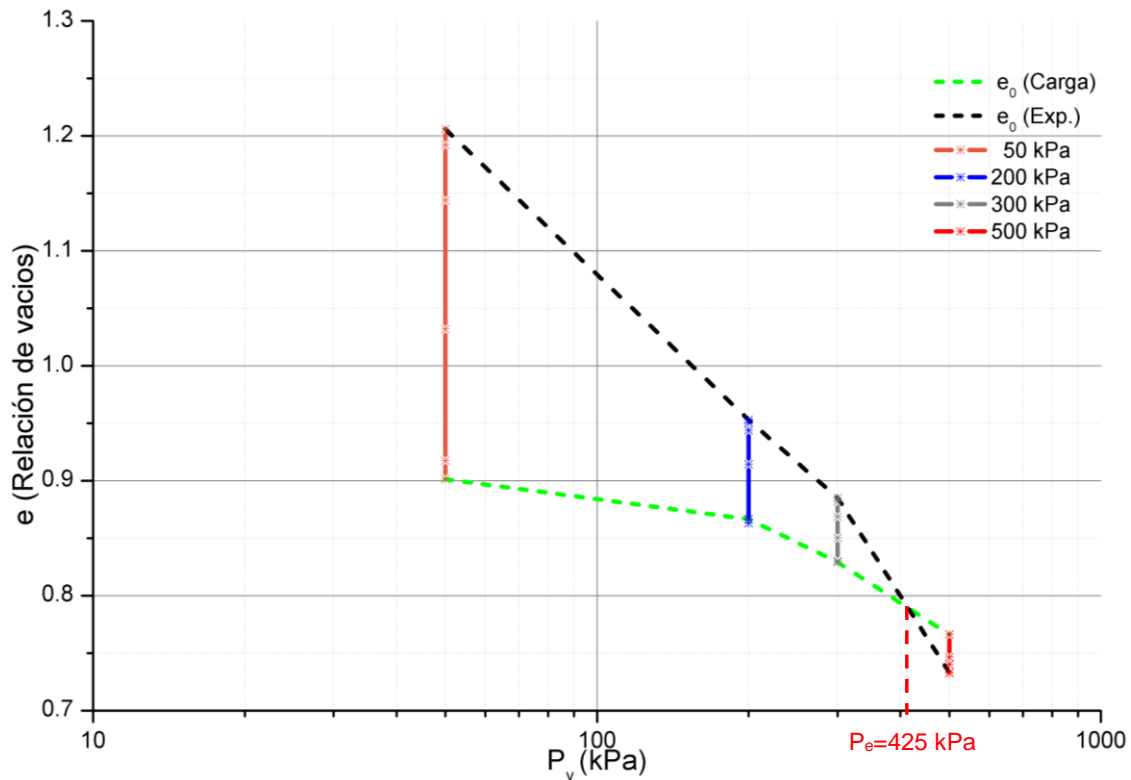


Figura 4-6.- Expansión - Colapso en muestras con  $W = 23.77\%$ .

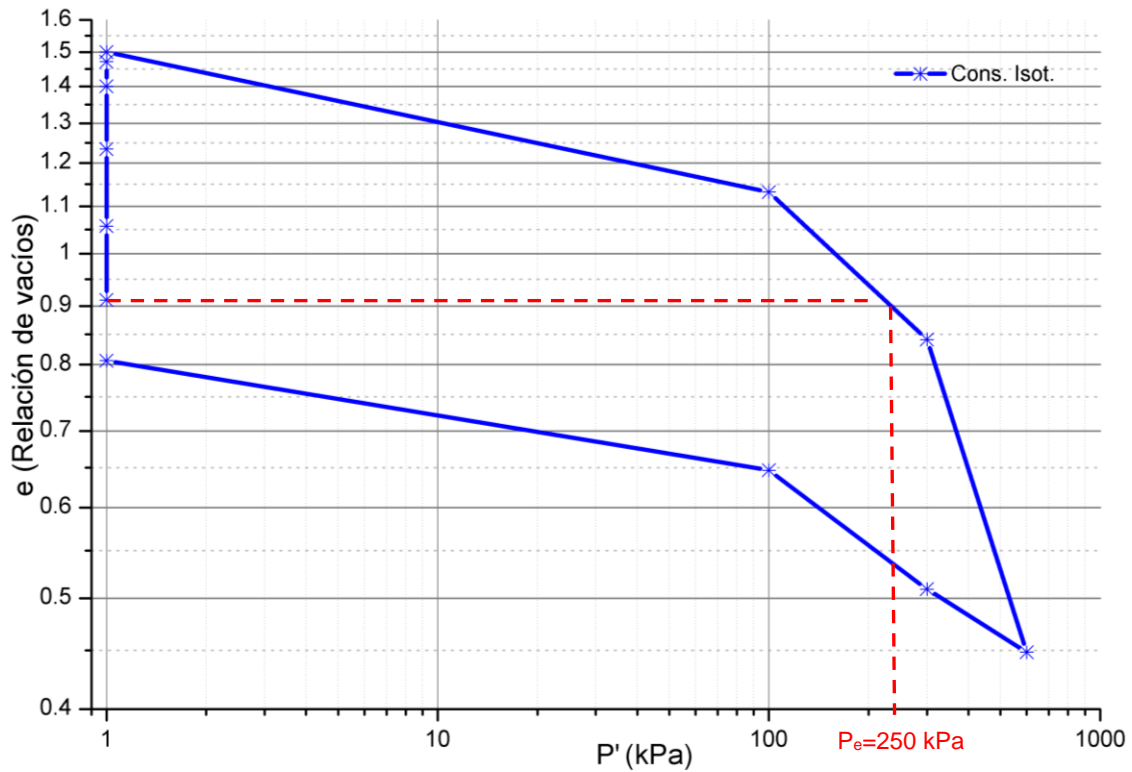


**Figura 4-7.- Expansión - Colapso en muestras con  $W = 7.85\%$ .**

Los resultados de Presión de expansión para los grupos resulto en una  $P_{e\ w} = 23.77\% = 330$  kPa y  $P_{e\ w} = 7.85\% = 425$  kPa esto ocasionado a los dos distintos niveles de succión en los que iniciaron las pruebas.

#### 4.4.1.2 Método A por la normativa ASTM D-4546.

Por medio de una muestra del grupo que fue secada al horno se realizó la prueba hidratando el espécimen hasta saturar en 5 incrementos de humedad y posteriormente se realizaron tres incrementos de carga los cuales se observan en la figura 4-8 y al final del ensaye se retiró la carga en tres decrementos, los cálculos y resultados se pueden obtener en el [ANEXO C.1.3](#).

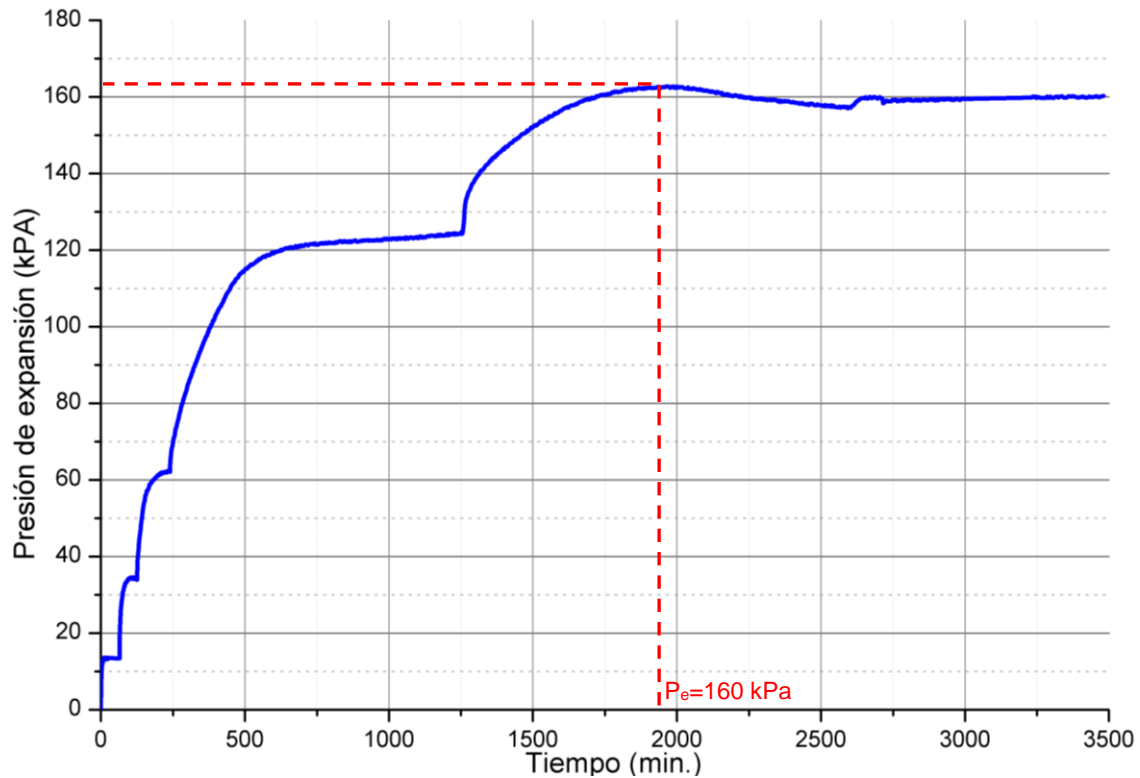


**Figura 4-8.- Presión de Expansión mediante Método A.**

Los datos para la Presión de expansión resulto en  $P_{e\ w = 7.85\%} = 250$  kPa, lo cual difiere mediante el método de triple odómetro el cual genera una presión mayor.

#### 4.4.2 Prueba de expansión en prensa triaxial.

Por medio del ensaye en prensa triaxial se realiza una variante del método C de la normativa ASTM D-4546, el cual por medio del transductor de fuerza conectado a la computadora se registraron los resultados generados por el esfuerzo expansión. Mediante figura 4-9 se observan las etapas de respuestas al ser hidratada la muestra con contenido de humedad inicial  $w = 7.85\%$ , por medio de 5 incrementos hasta su saturación y posteriormente ser inundada la muestra.



**Figura 4-9.- Presión de expansión en prensa triaxial.**

La Presión de Expansión generada por medio de esta variante del método C resulto en  $P_{e w = 7.85\%} = 160 \text{ kPa}$  (ANEXO C.1.2).

#### 4.4.3 Deformaciones unitarias.

Se realizó la interpretación de la deformación unitaria ( $\varepsilon_1 = \Delta H/H_0$ ) contra logaritmo de tiempo en minutos, de los ensayos odométricos en ambos grupos con el propósito de observar la respuesta del comportamiento expansivo que se genera después de haber sido cargadas las muestras y la respuesta a decrementos de succión que afectan la fuerza de expansión dentro de la muestra, se observa dentro de figura 4-10 y 4-11 expansiones en muestras cargadas con 50, 200 y 300 kPa y en muestras cargadas a 400 y 500 kPa se observa una disputa interna dentro de la expansión y el colapso en la primera hidratación manteniéndose evidente en la muestra de 400 kPa de la figura 4-10, y posteriormente colapsando las muestras.



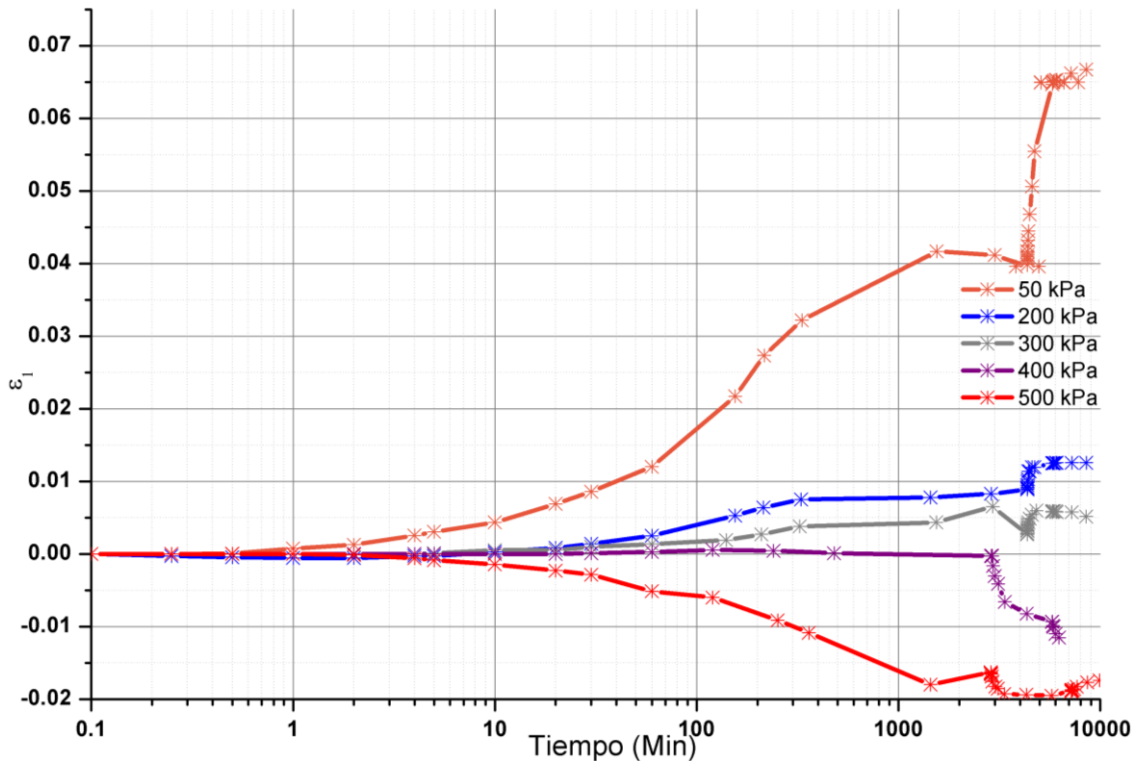


Figura 4-10.- Deformación unitaria a diferentes incrementos de carga ( $w_0 = 23.77\%$ ).

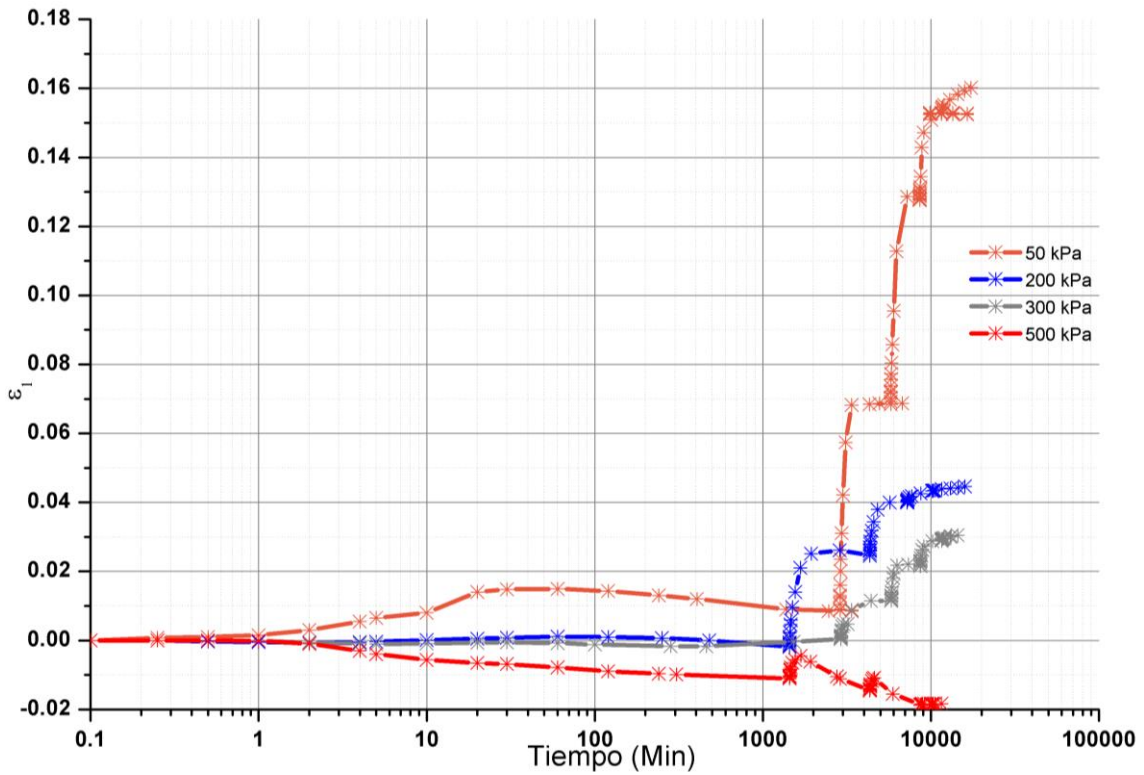
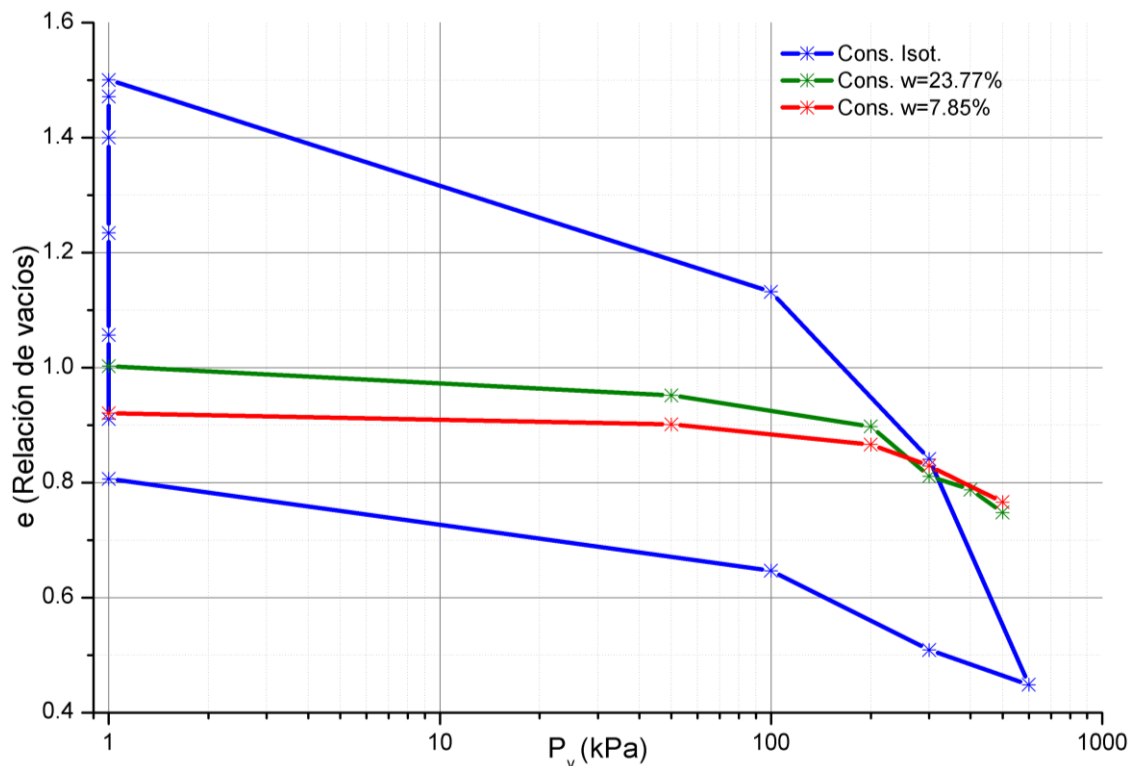


Figura 4-11.- Deformación unitaria a diferentes incrementos de carga ( $w_0 = 7.85\%$ ).

#### 4.4.4 Curvas de Compresibilidad.

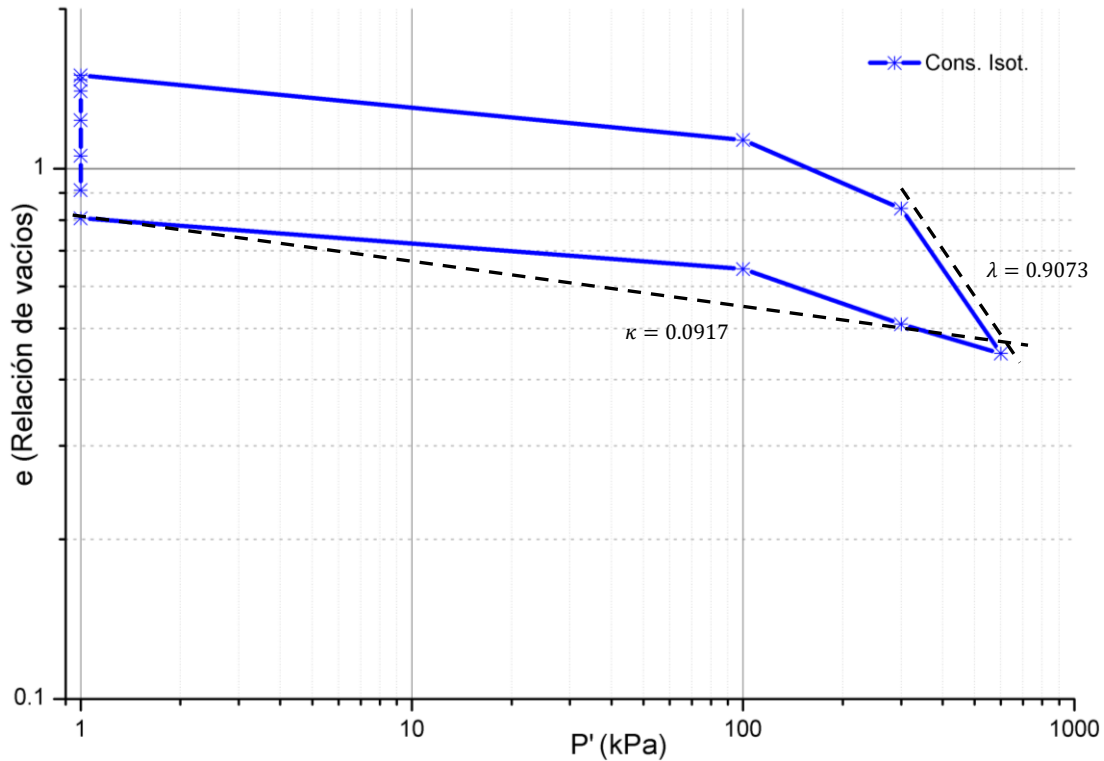
Se muestran las curvas de compresibilidad (Figura 4-12) para distintos contenidos de humedad inicial, generando 3 curvas de compresibilidad, mediante línea verde se genera la curva del primer grupo con  $w = 23.77\%$  y en rojo la segunda curva del segundo grupo de muestras secadas al horno en donde se generan endurecimientos por succión y contribuyen a un esfuerzo de preconsolidación aparente denotando la rigidez del material ocasionado por los distintos niveles de secado, el cual genera que los poros dentro de la muestra se reduzcan y su densidad aumente; la tercera curva se consigue mediante una muestra del grupo secado al horno que fue llevado a la saturación generando una expansión libre de la muestra, posteriormente es cargada en tres incrementos y descargada en tres decrementos formando la curva de línea azul como la curva consolidación isotrópica.



**Figura 4-12.- Grafica de Curvas de compresibilidad en esfuerzo neto a distintas humedades iniciales.**

De los resultados de consolidación isotrópica en la figura 4-12 es posible conseguir la relación de vacíos máxima ( $e_{max}$ ) generado por expansión libre y además traducir los resultados a esfuerzos efectivos (figura 4-13) para conseguir

las pendientes de carga – descarga con valores de  $\lambda = 0.9073$ ,  $\kappa = 0.0917$ ,  $e_{max} = 1.5005$ .



**Figura 4-13.- Grafica de Curva de compresibilidad en esfuerzo efectivo.**

#### 4.4.5 Resumen de pruebas odométricas.

##### 4.4.5.1 Presión de expansión.

Derivado de los distintos métodos para obtener la presión de expansión ( $P_e$ ) generada por el material en estudio, se forma la tabla 4-5, la cual muestra que los valores de " $P_e$ " son diferentes, las condiciones de esfuerzo que influyen dentro de un potencial de expansión y contracción son procedente a la historia de esfuerzos, carga externa, condiciones in-situ.

Los ensayos secados al aire y al horno generan preconsolidación aparente, afectando el potencial de expansión, a continuación, la magnitud de sobrecarga impuesta en estado no saturado determina la cantidad de cambio de volumen que ocurrirá para un contenido de humedad y densidad dada, actuando para balancear las fuerzas, lo cual sucede para los ensayos en triple odómetro.

Mediante el secado al horno y por medio de la norma ASTM D 4546 del método "A" se generó expansión libre y posteriormente una sucesión de cargas a la muestra hasta llevarla a su relación de vacíos inicial, generando una "Pe" menor a la observada en triple odómetro para la misma humedad de  $w=7.85\%$ , lo cual al haber sido saturada la muestra ( $s=0$ ), el agua dentro de la muestra tiende a ser desplazada con mayor facilidad debido en que toda la carga conserva un estado saturado. Mientras que el desarrollo del ensaye por el método "C" ejecutado en la prensa triaxial fue hidratado se observa un poco más de un tercio del generado por triple odómetro.

**Tabla 4-5.- Resumen de Presión de Expansión.**

<b>Método</b>	<b>Presión de expansión (kPa)</b>
<b>Triple odómetro en <math>w_i = 23.77\%</math></b>	<b>330.00</b>
<b>Triple odómetro en <math>w_i = 7.85\%</math></b>	<b>425.00</b>
<b>Método "A" ASTM D 4546 en <math>w_i = 7.85\%</math></b>	<b>250.00</b>
<b>Método "C" ASTM D 4546 en Prensa Triaxial en <math>w_i = 7.85\%</math></b>	<b>160.00</b>

#### 4.5 Límite de contracción (monitoreo de secado)

Con el propósito de dar seguimiento al desarrollo succión "S" durante la prueba por medio de secado, se realizó mediciones de acuerdo a la norma ASTM-D-427 a una prueba de límite de contracción, el cual se monitoreo por periodos de 24 horas hasta por último ser secado al horno por un periodo de 24 horas.

Se generan graficas de la evolución de la relación de vacíos contra el esfuerzo de succión (Figura 4-14), relación de vacíos contra grado de saturación (Figura 4-15), relación de vacíos contra  $\chi_s$  (figura 4-16) y log succión contra log esfuerzo efectivo ( $p'$ ) (figura 4-17).

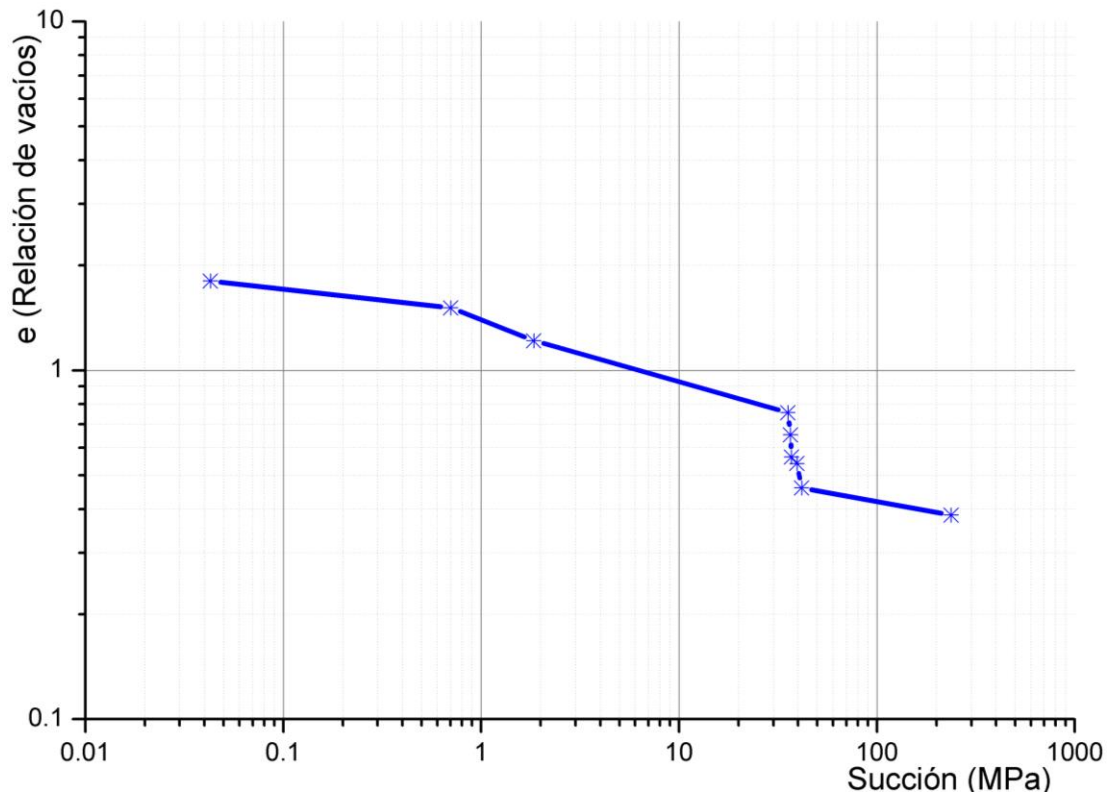


Figura 4-14.- Relación de vacíos vs Succión en prueba de Limite de Contracción.

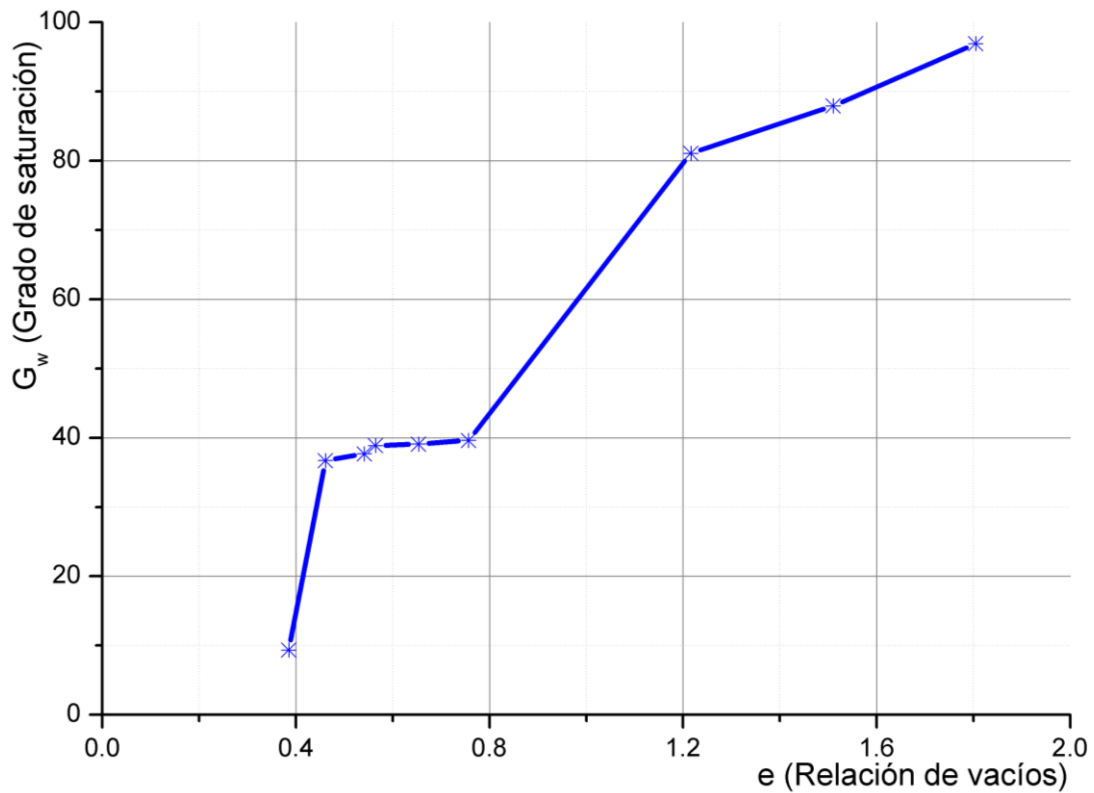


Figura 4-15.- Relación de vacíos vs Grado de saturación en prueba de Limite de contracción.

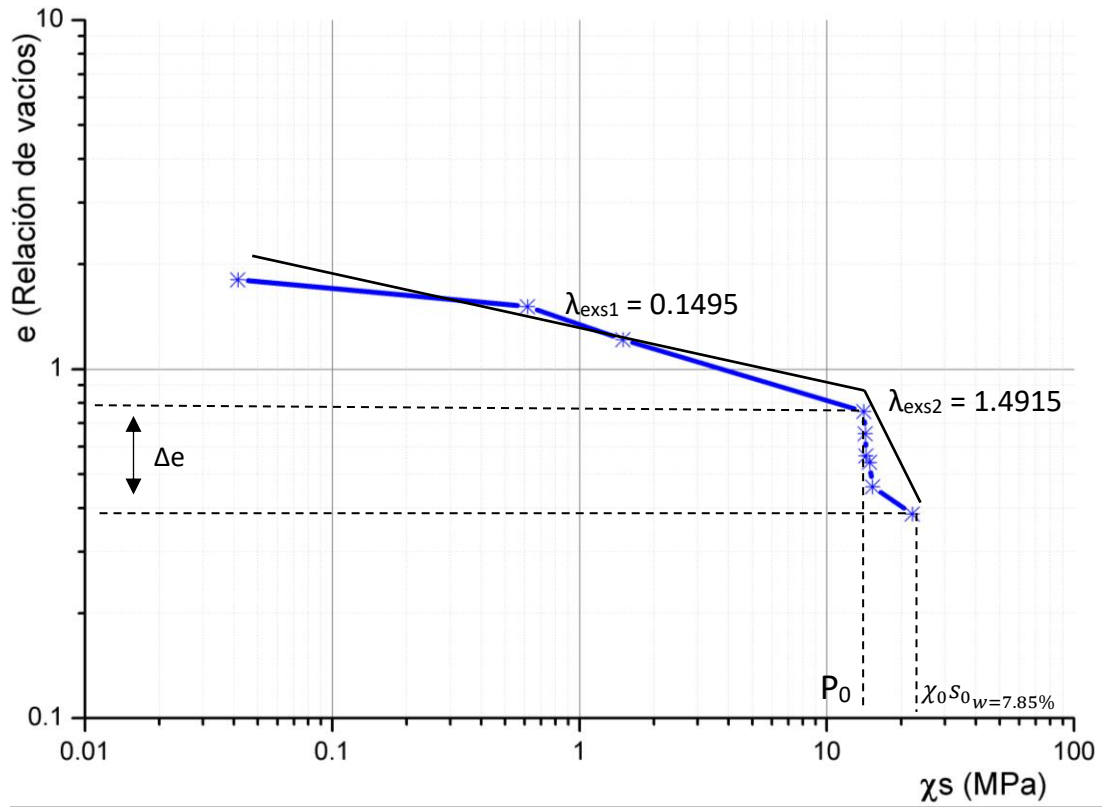


Figura 4-16.- Relación de vacíos ( $e$ ) vs  $\chi_s$  de saturación en prueba de Limite de contracción.

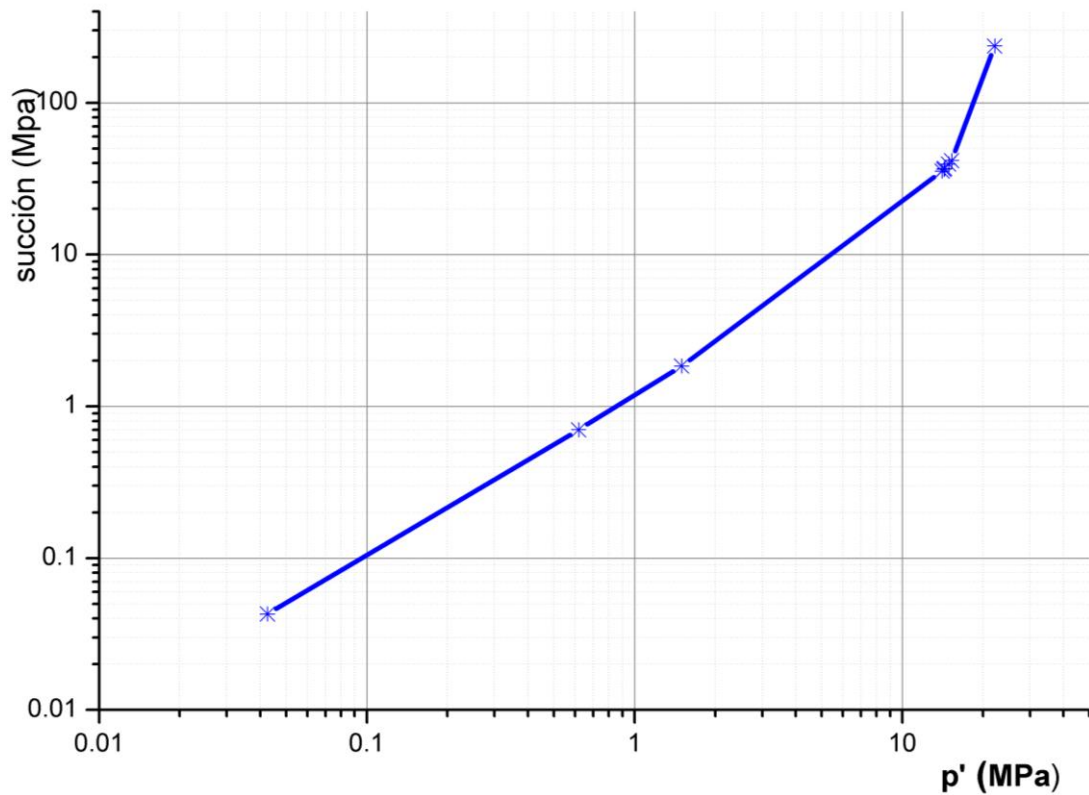


Figura 4-17.- esfuerzo efectivo ( $p'$ ) vs succión en prueba límite de contracción.

Tanto para figura 4.14, 4-15, 4-16, y 4-17 muestran una pendiente intermedia alrededor de 40% de grado de saturación ( $G_w$ ), lo cual puede denotar que el suelo en estado natural ha sido expuesto a ciclos de secado-humedecimiento entre el 100% y 40% del  $G_w$  denotando un comportamiento elástico como se observa en figura 5-16 dentro de esta zona y al disminuir a menos de 40% del  $G_w$  muestra un comportamiento elastoplástico.

Mencionado lo anterior es posible extraer de la figura 4-16 el último punto generado por la zona elástica dentro del secado-humedecimiento como un estado de preconsolidación ( $P_0$ ) y delimita la zona elástica, el diferencial de relación de vacíos de la zona elastoplástico ( $\Delta e$ ) ocasionado al secado al horno, se puede considerar el endurecimiento por succión ( $\chi_{0s0}$ ) que representa el límite de la Superficie de Fluencia Bajo Colapso inicial (SFFC<sub>0</sub>) y relacionarlo con las pendientes carga-descarga del ensaye de compresibilidad de la figura 4-13 y generar en la figura 4-18 el estado de preconsolidación del suelo  $P_0$  y el endurecimiento por succión por secado al horno ( $\chi_{0s0}$ ).

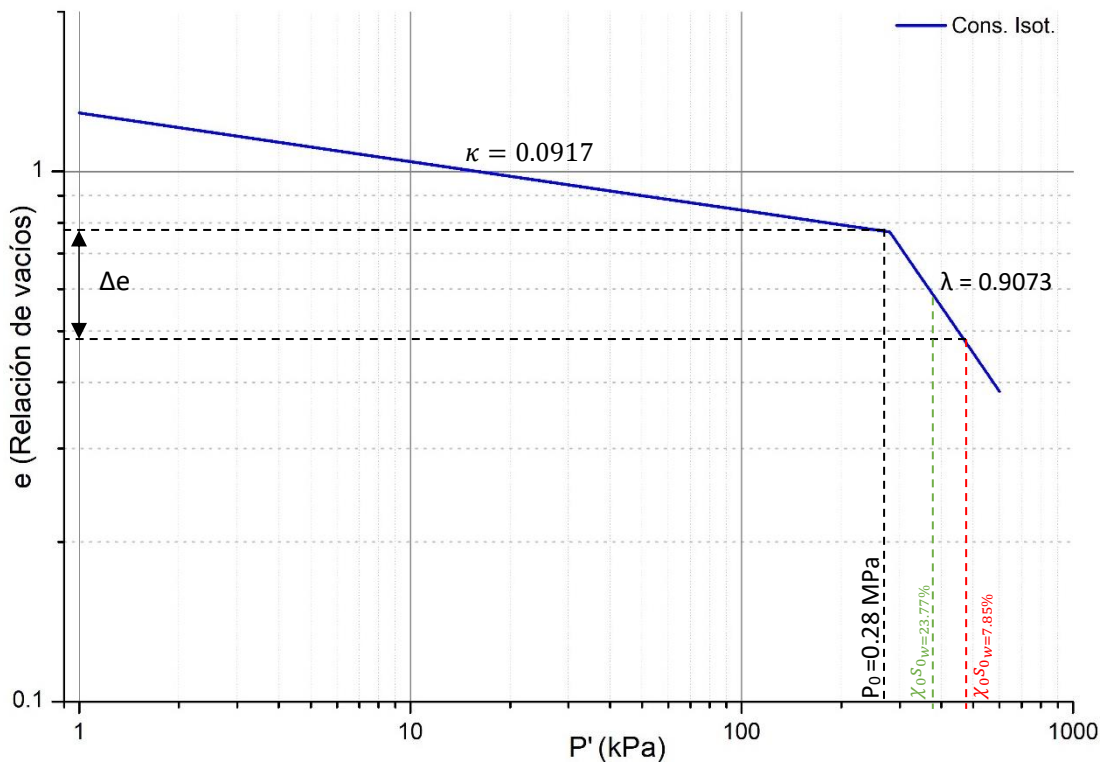


Figura 4-18.- Consolidación Isotrópica.

Donde  $\chi_{0s0 w=7.85\%} = 470$  kPa representa la diferencia máxima de relación de vacíos ocasionado por el secado al horno y  $\chi_{0s0 w=23.77\%} = 390$  kPa, y se obtiene mediante la diferencia de relación de vacíos ( $e$ ) iniciales en secado al aire y al horno de la curva de figura 4.12.

#### 4.6 Comparación teórico experimentales.

En este capítulo se obtienen los resultados aplicando el modelo propuesto en [sección 3.6](#), los resultados logrados en secciones anteriores del suelo (CH) en esta tesis, son aprovechados para obtener los parámetros necesarios para determinar los valores del modelo tal y como se indica más adelante.

Por medio de la ecuación de esfuerzo efectivo y las CRAS es posible traducir los ensayos al modelo y ser representados en un plano  $s - p'$ , el cual se presenta mediante los ensayos experimentales y una trayectoria de humedecimiento. En consecuencia, a los distintos grupos de secados en las muestras se genera una trayectoria de secado en la muestra y la superficie de fluencia colapso bajo carga inicial (SFCC<sub>0</sub>) y nos representa el límite de la zona de deformaciones recuperables.

Las deformaciones volumétricas generadas en el material se utiliza las ecuaciones propuestas en sección 3.6, los parámetros necesarios para la utilización de esta ecuación fueron deducidos anteriormente y se realiza una comparación teórica con la experimental.

##### 4.6.1 Comparación con resultados experimentales con material de esta tesis.

La obtención de la trayectoria de secado inicial y las Superficies de fluencia de colapso bajo carga iniciales (SFCC<sub>0</sub>) son obtenidas mediante los parámetros expuestos anteriormente y resumidas en tabla 4-6, los diferentes valores de endurecimiento por succión ( $\chi_{0s0}$ ) obtenidos mediante CRAS y pendientes de carga-descarga son comparadas en figura 4-20 y 4-21 respectivamente para la delimitación de la construcción del modelo, así como la representación de las zonas recuperables por medio del endurecimiento por succión mediante la figura 4-19.



Tabla 4-6.- Parámetros Generales para la ecuación y construcción de Superficies de Fluencia después del secado eh inicial.

$S_s =$	2.64
$W_0$ en campo =	34.23%
$W_0$ promedio después del secado al aire =	23.77%
$W_0$ promedio después del secado al horno =	7.85%
Profundidad de extracción =	180 cm
$G_w$ promedio $W=23.77\% =$	62.17%
$G_w$ promedio $W=7.85\% =$	22.48%
<hr/>	
$S_0$ promedio $W=23.77\%$ (Obtenida en CRAS) =	9.392 MPa
$\chi_0 S_0$ $W=23.77\%$ (Obtenida en CRAS) =	5.839 MPa
$S_0$ promedio $W=7.85\% =$	93.406 MPa
$\chi_0 S_0$ $W=7.85\%$ (Obtenida en CRAS) =	20.994 MPa
<hr/>	
$S_0$ promedio $W=23.77\%$ (Obtenida por pendientes) =	0.636 MPa
$\chi_0 S_0$ $W=23.77\%$ (Obtenida por pendientes) =	0.390 MPa
$S_0$ promedio $W=7.85\%$ (Obtenida por pendientes) =	2.105 MPa
$\chi_0 S_0$ $W=7.85\%$ (Obtenida en compresibilidad) =	0.470 MPa

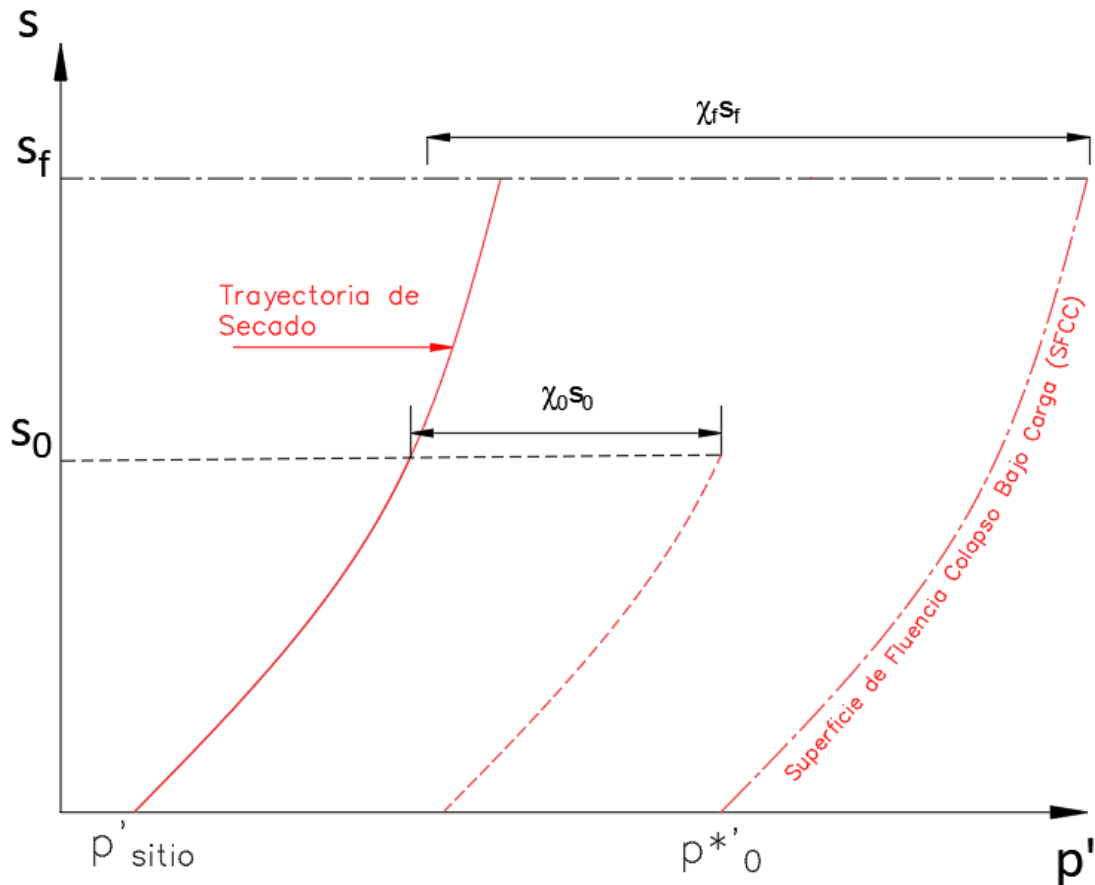


Figura 4-19.- representación de la SFCC después del secado.

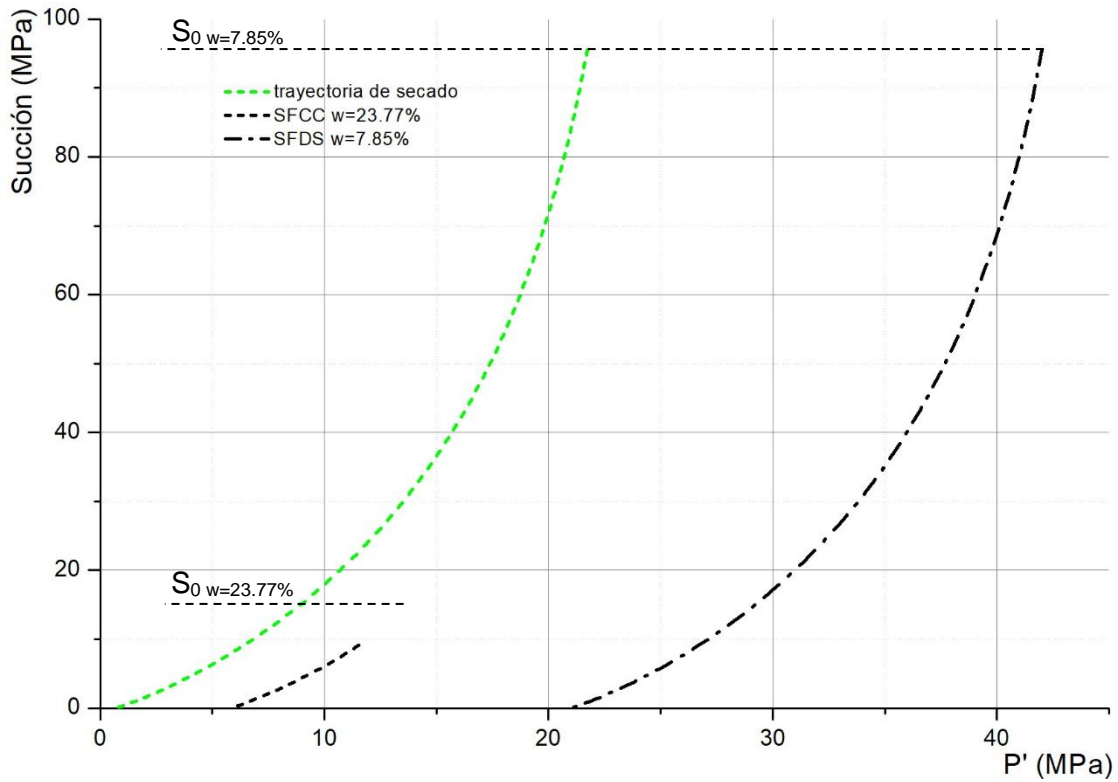


Figura 4-20.- Trayectoria de secado y Superficies de Fluencias Colapso Bajo Carga (SFCC) para cada grupo de muestras obtenidas mediante CRAS.

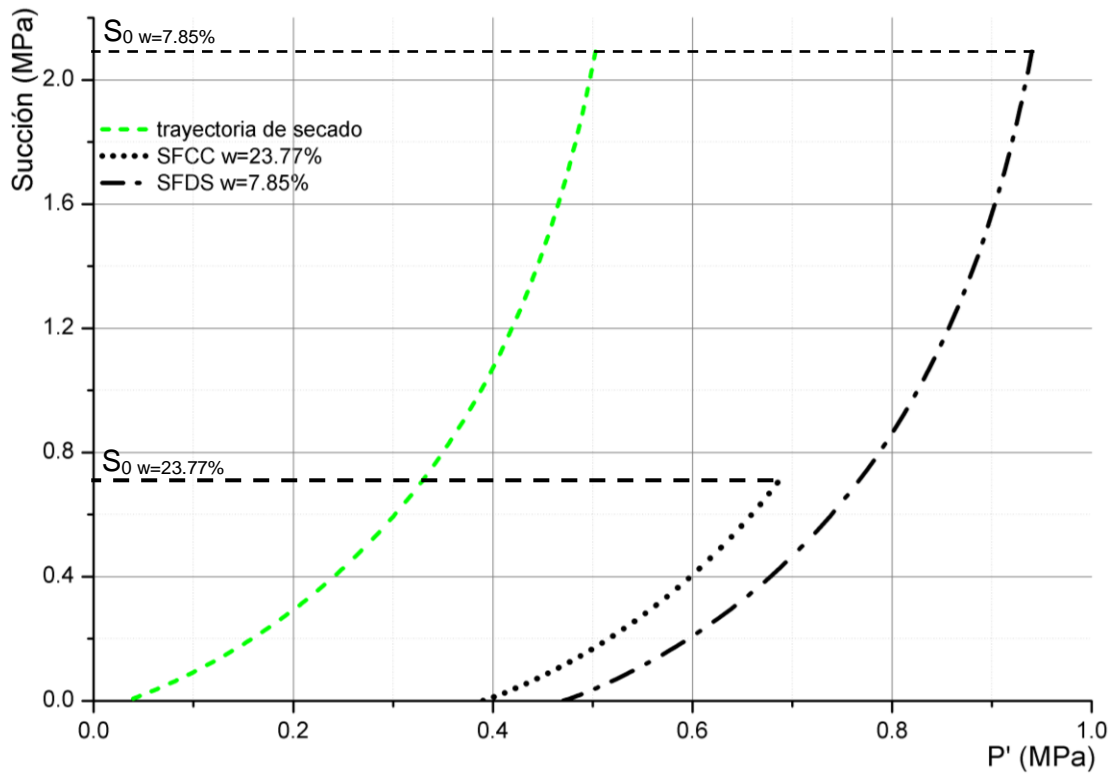


Figura 4-21.- Trayectoria de secado y Superficies de Fluencias Colapso Bajo Carga (SFCC) para cada grupo de muestras obtenidas mediante compresibilidad.

Mediante los valores de endurecimiento obtenidos por la CRAS y la curva de compresibilidad (figura 4-18), se construye el modelo con el objetivo de comparar la respuesta de la muestra al ser cargada a los distintos niveles de endurecimiento.

Para la simulación de la deformación volumétrica se utiliza la CRAS y los parámetros desglosados en tabla 4-7.

**Tabla 4-7.- Parámetros Generales para la ecuación y construcción de deformación volumétrica.**

$K =$	<b>0.0917</b>
$\lambda =$	<b>0.9073</b>
$e_{max} =$	<b>1.5005</b>
$e_{min} =$	<b>0.3850</b>

Donde la  $e_{max}$  es obtenida por medio de expansión libre en la curva de compresibilidad de la figura 4-13 y  $e_{min}$  representa el menor resultado obtenido de la muestra generado por los distintos ensayos el cual por resultado es generado por el monitoreo en límite de contracción.

Cuando los esfuerzos generados en la muestra van más allá del esfuerzo de endurecimiento por succión se generan deformaciones plásticas y generan nuevas Superficies de Fluencia Carga Bajo Colapso, las cuales pueden ser calculados mediante la ecuación 3-1 y ecuación 3-2 anteriormente descrita.

Es necesario señalar que las relaciones de vacíos iniciales ( $e_0$ ) para cada muestra se señalan en tablas 4-3 y 4-4 para el cálculo posterior de las relaciones de vacíos finales ( $e_f$ ) se calcula mediante la ecuación 3-8 dentro de la simplificación por medio de uso de esfuerzos efectivos en sección 3.6, los cálculos experimentales se desglosan en ANEXO D, así como el cálculo del endurecimiento ejercido por los esfuerzos de carga  $dp_0$  y  $dp_s$ .

#### 4.6.2 . Resultados con $\chi_{0S_0}$ $w=23.77\%$ promedio = 0.390 MPa.

La exposición de los ensayos realizados en el modelo se realiza dentro de las siguientes figuras de esta sección en el plano  $s - p'$ , las cuales se presenta una trayectoria de secado (T.S.), seguido de un incremento de carga ( $\Delta P_c$ ) y una trayectoria de humedecimiento (T.H.), en donde mientras el incremento de carga no sobrepase la superficie de colapso bajo carga inicial ( $SFCC_0$ ) se generan expansiones y por el contrario a sobrepasar la superficie se generan deformaciones

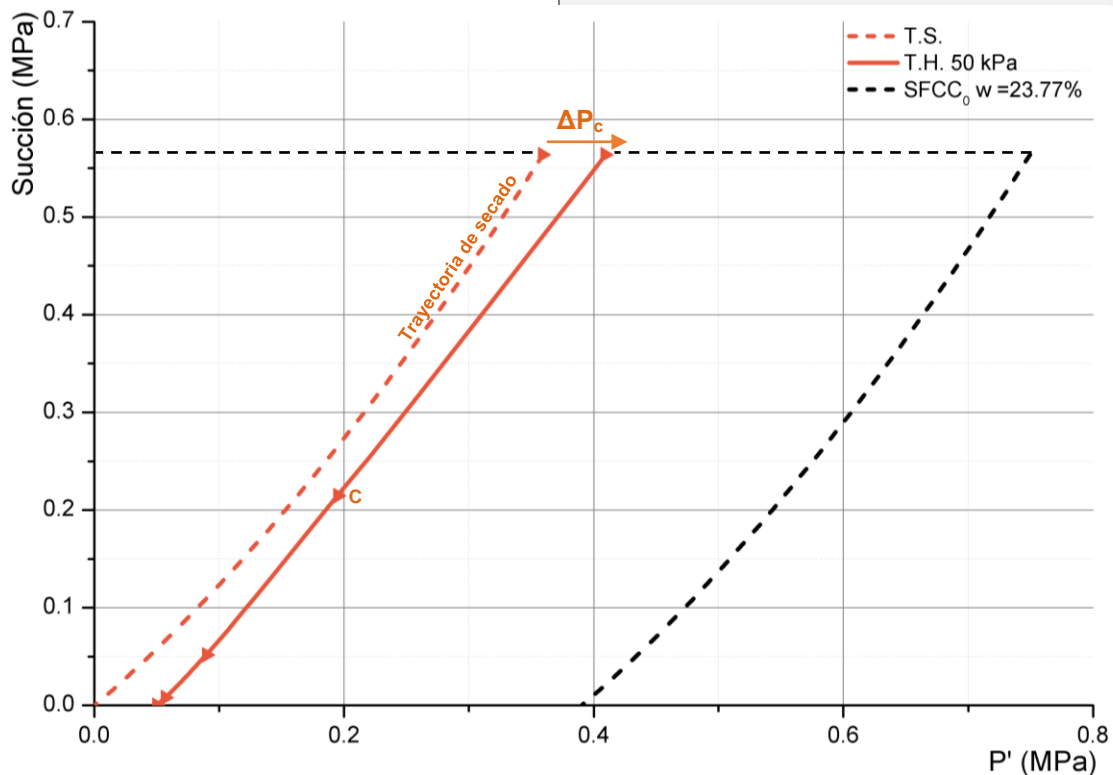
irrecuperables que pueden inducir a la expansión, al colapso o una combinación de ambas, y se explican en las figuras de esta sección en el plano  $\varepsilon_v - s$ .

Dentro de las figuras del plano  $s - p'$  se señalan las etapas donde las muestras se encuentra en trayectoria de secado (T.S.) hasta realizar un incremento de carga " $\Delta P_c$ ", posteriormente pasar a una trayectoria de humedecimiento generada por la consolidación "C" y después de esto se generan los incrementos de humedecimiento dentro de las muestras; los resultados completos se desglosan en ANEXO D.

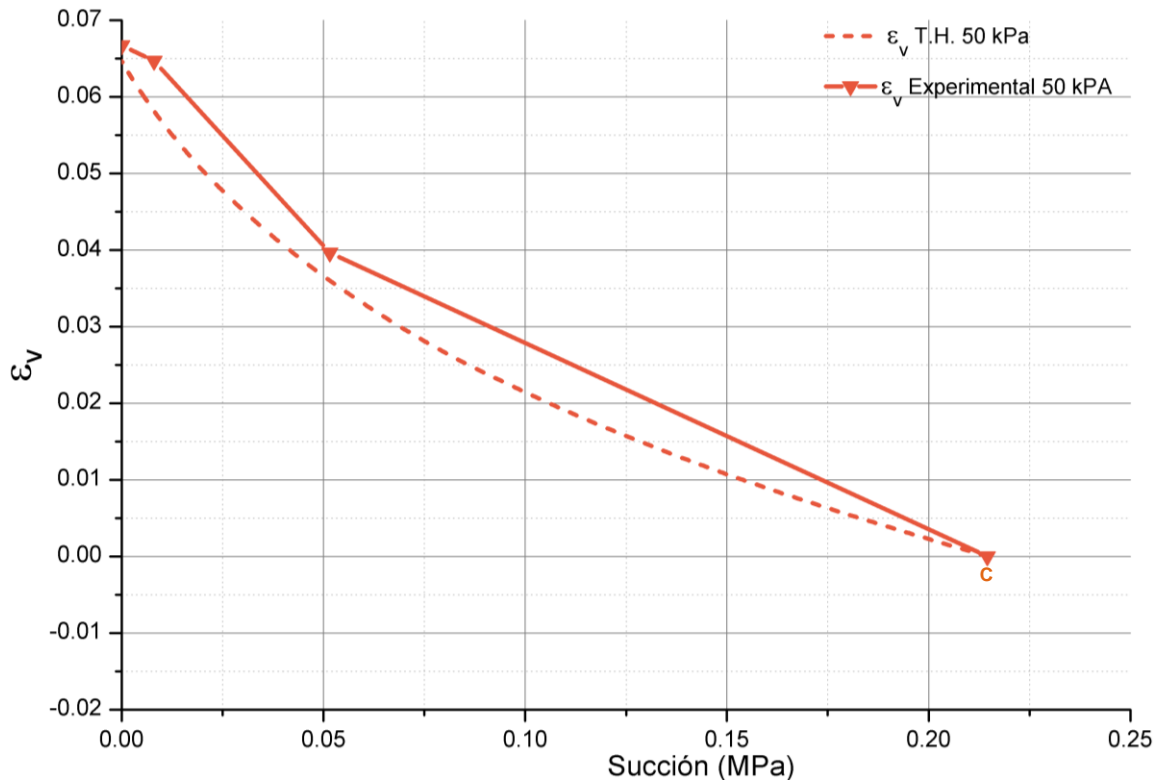
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 50 kPa se presentan dentro de la tabla 4-8 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-22 y 4-23.

**Tabla 4-8.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.05 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>63.73%</b>
$s_0 =$	<b>0.564 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.9592</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-22.- Grafica P' vs S, muestra a 50 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-23.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-9 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-24 en el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-25 se generan expansiones.

**Tabla 4-9.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.20 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>63.30%</b>
$s_0 =$	<b>0.581 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>6.3415</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

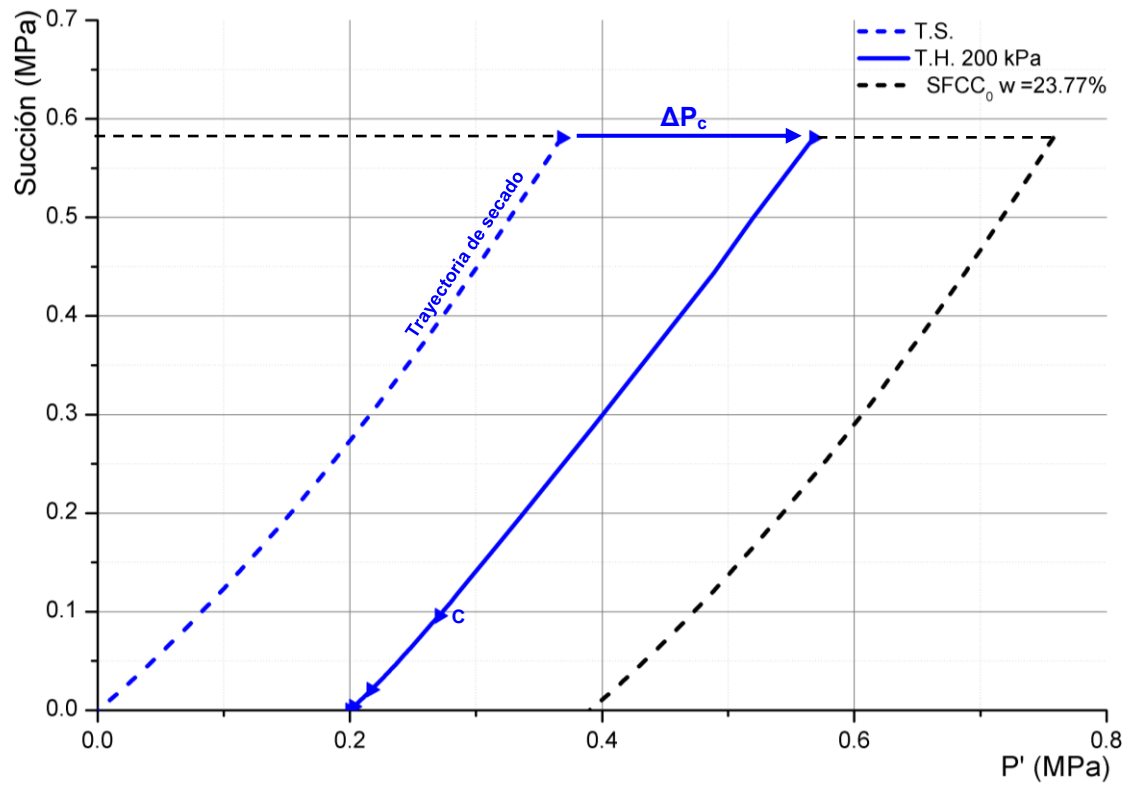


Figura 4-24.- Grafica  $P'$  vs  $S$ , muestra a 200 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

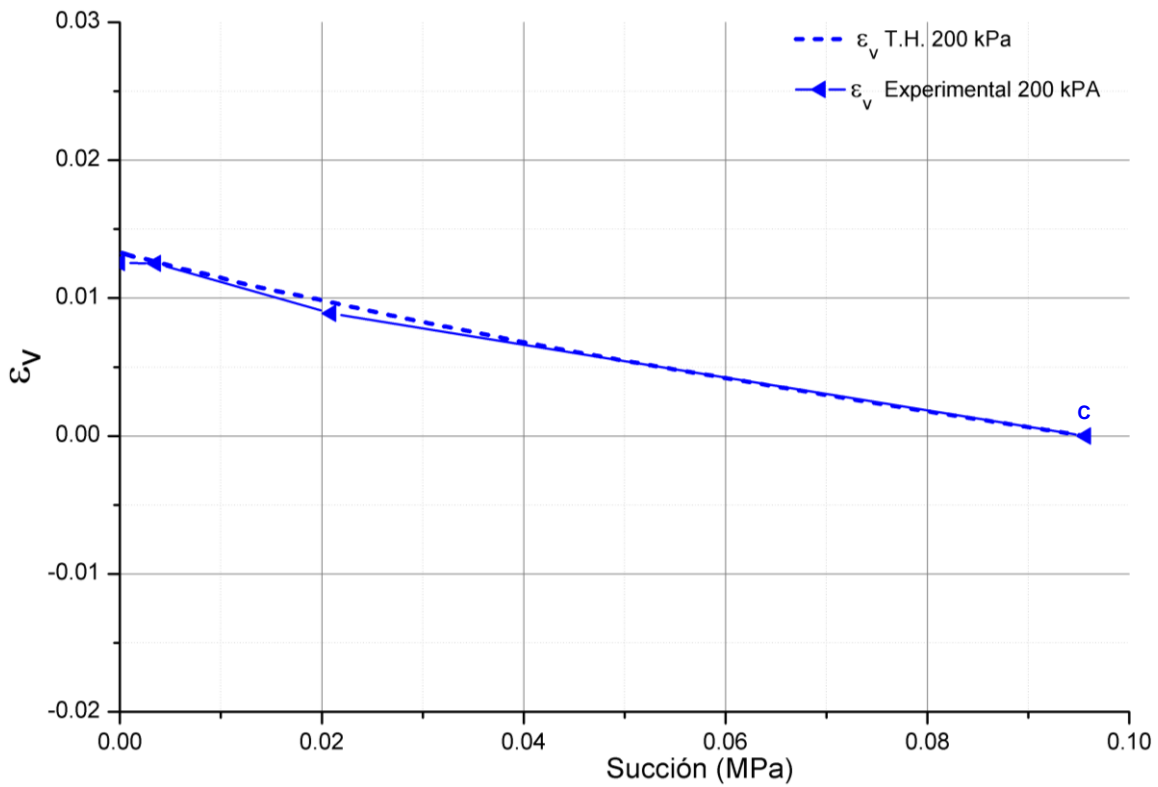
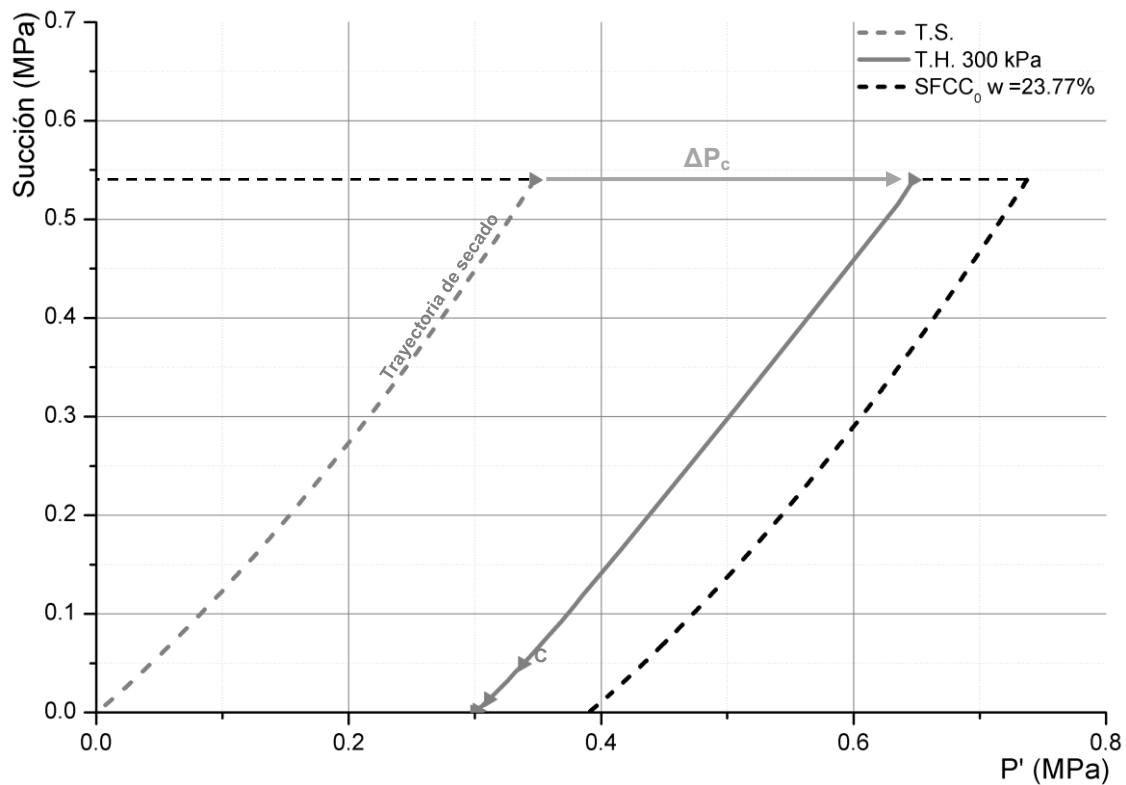


Figura 4-25.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

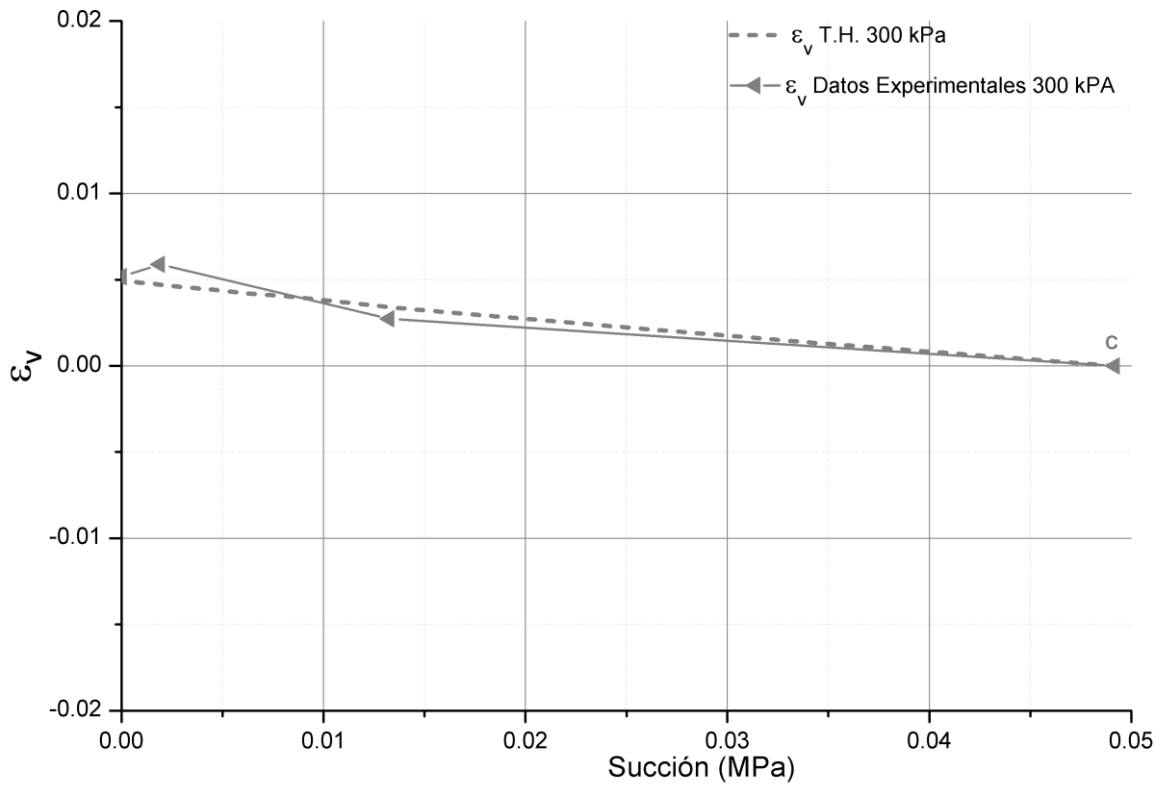
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 300 kPa se presentan dentro de la tabla 4-10 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-26 en el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-27 se generan expansiones.

**Tabla 4-10.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.30 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>64.35%</b>
$s_0 =$	<b>0.539 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>6.0084</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-26.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 300 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-27.-** Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 400 kPa se presentan dentro de la tabla 4-11 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-28 y 4-29 en el cual se muestra que el incremento de carga sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$  generando una nueva SFCC, por lo que en figura 4-30 se generan expansiones y colapso derivado de los humedecimientos.

**Tabla 4-11.-** Parámetros para muestra cargada a 400 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.40 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>56.82%</b>
$s_0 =$	<b>0.886 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.1382</b>
$K =$	<b>0.0917</b>
$\lambda_{cex} =$	<b>0.3725</b>



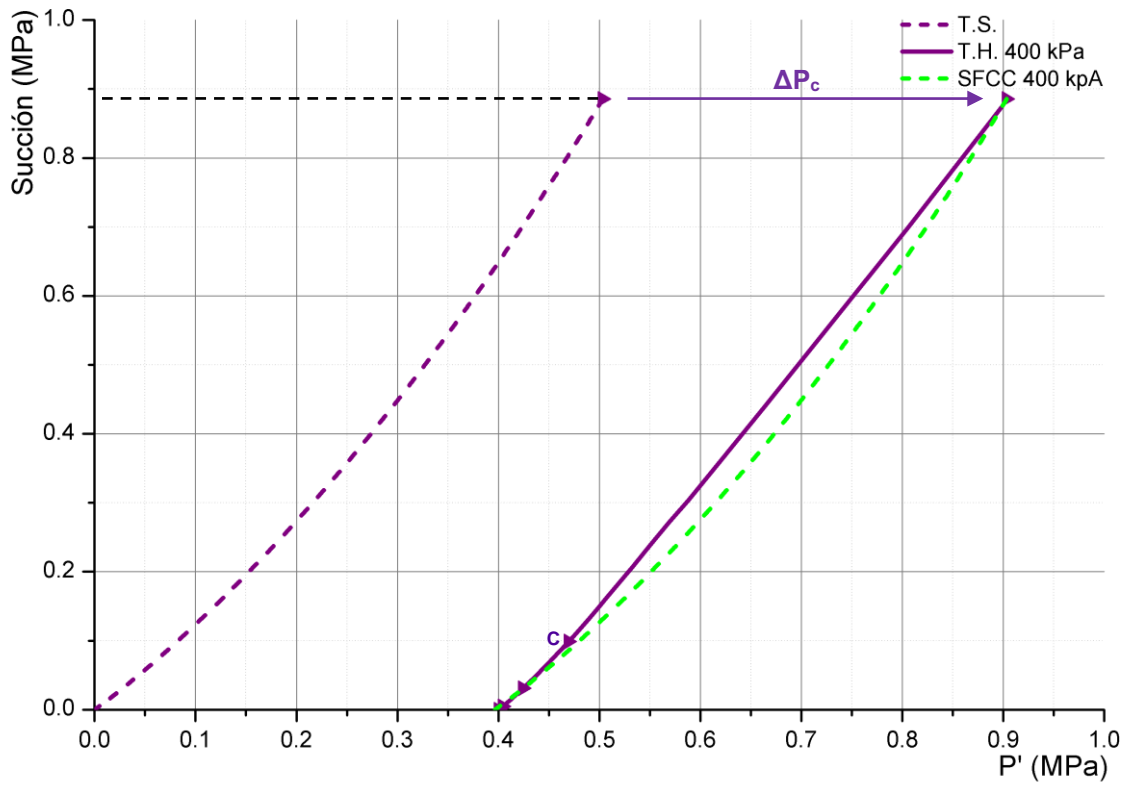


Figura 4-28.- Grafica  $P'$  vs  $S$ , muestra cargada a 400 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

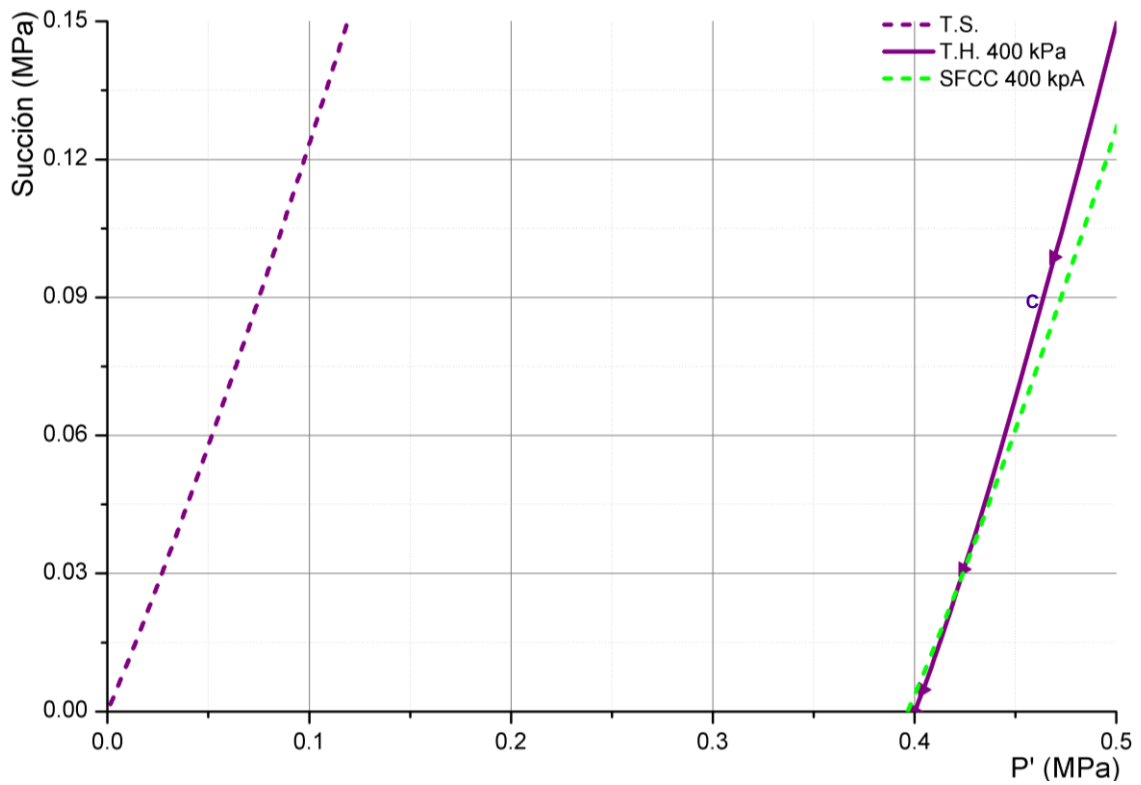
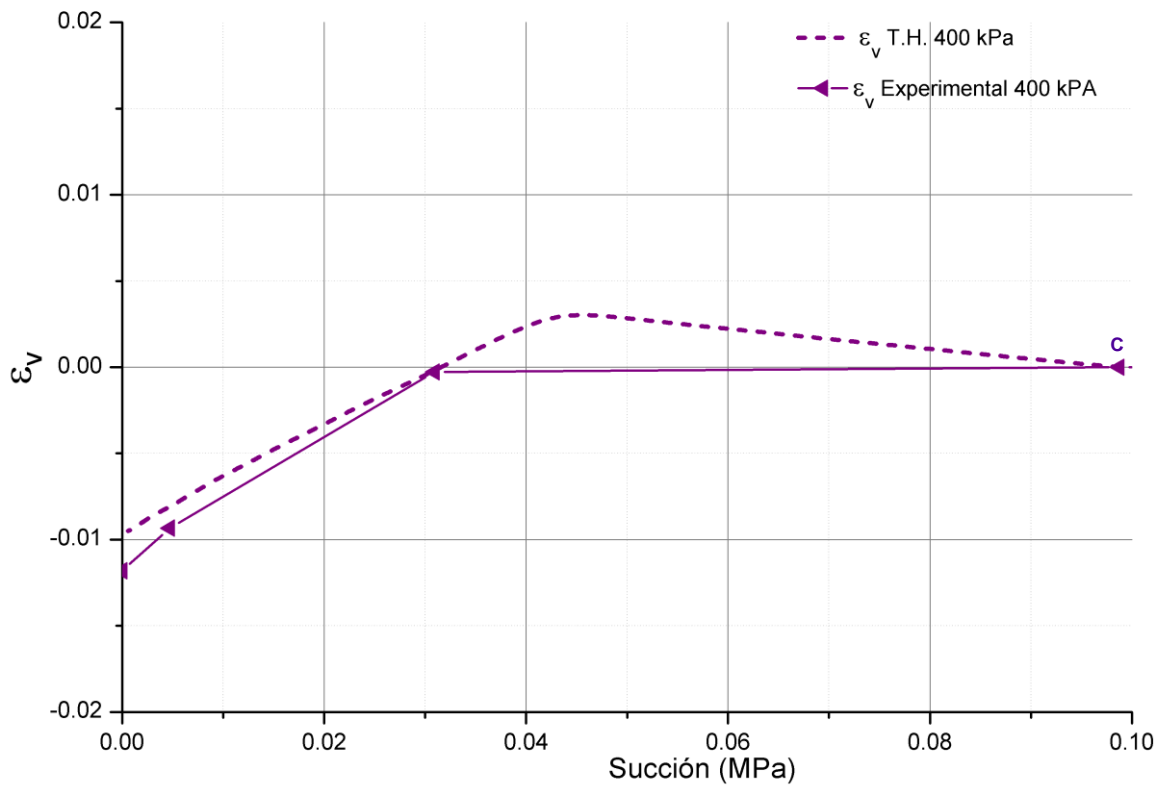


Figura 4-29.- Acercamiento a figura 4-28



**Figura 4-30.-** Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 500 kPa se presentan dentro de la tabla 4-12 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-31 y 4-32 en el cual se muestra que el incremento de carga sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$  generando una nueva SFCC, por lo que en figura 4-33 se genera el colapso inminente.

**Tabla 4-12.-** Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.50 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>62.64%</b>
$s_0 =$	<b>0.607 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.4011</b>
$\lambda_{cex} =$	<b>0.5424</b>

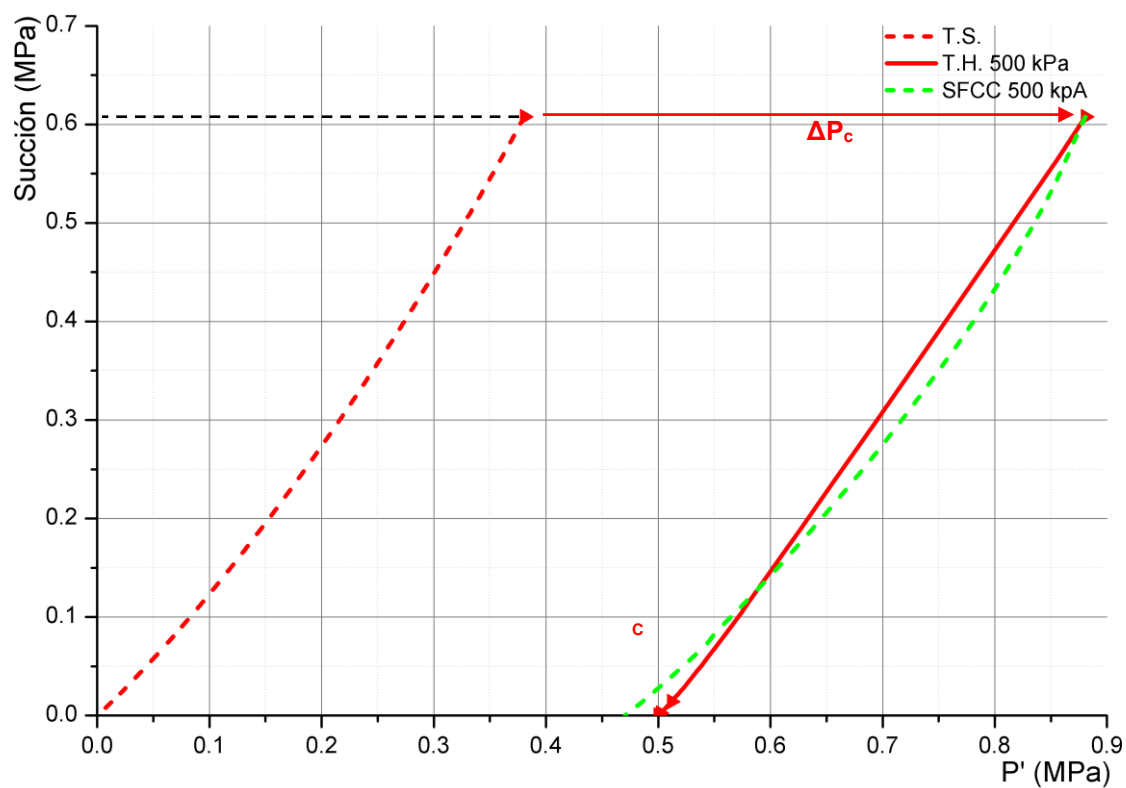


Figura 4-31.- Grafica  $P'$  vs S, muestra cargada a 500 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

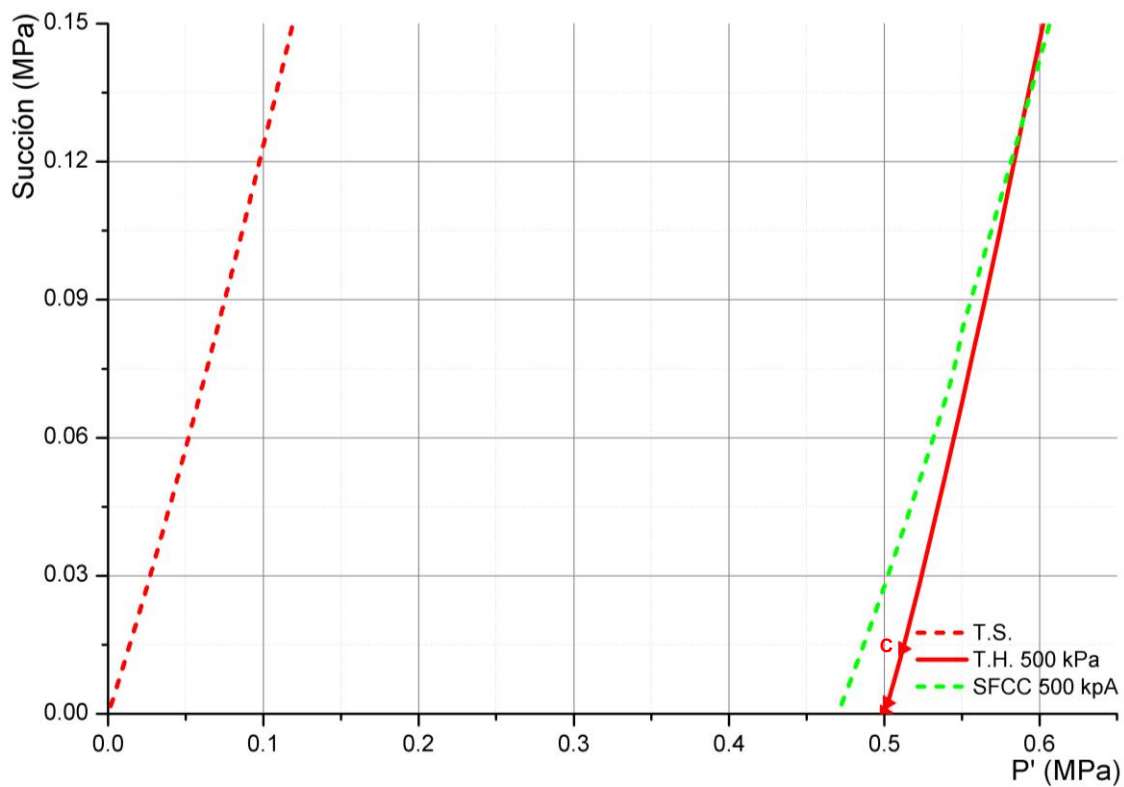
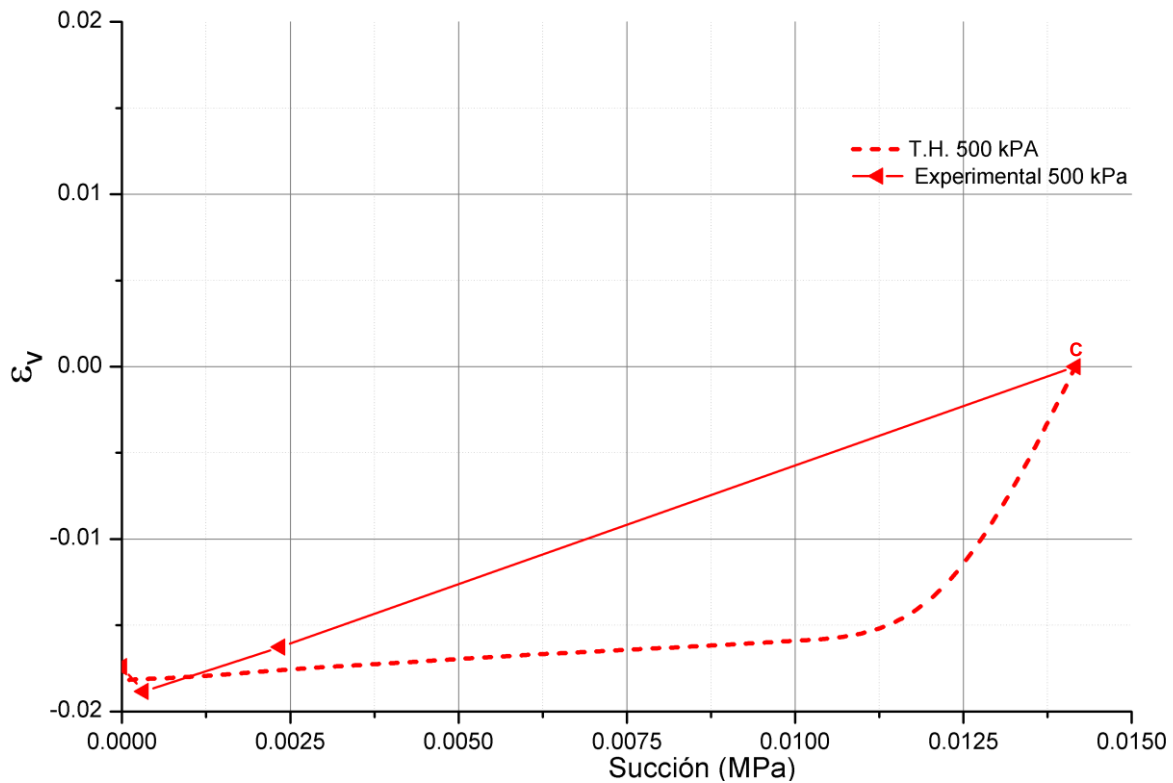


Figura 4-32.- Acercamiento figura 4-31



**Figura 4-33.-** Deformación Volumétrica en muestra cargada a 500 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

Los resultados observados en las figuras anteriores representadas en el plano  $s - p'$  exponen que las muestras con incremento de carga de 50 a 300 kPa sufren expansión en el rango elástico, ocasionado al no rebasar la SFCC<sub>0</sub> generada por el secado de la muestra. Por otro lado, las muestras cargadas de 400 y 500 kPa muestran que debido al incremento de carga empujan la SFCC<sub>0</sub> generando una nueva SFCC para cada carga.

Los ensayos 400 y 500 kPa muestran expansión-colapso y colapso respectivamente; se exponen en el plano  $\epsilon_v - s$ , por lo que en ensaye de 400 kPa se observa durante el primer humedecimiento un débil decremento de su volumen debido a la cercanía de la SFCC generada experimentalmente, posteriormente los siguientes incrementos de humedad colapsa en su totalidad, en cuanto al ensaye de 500 kPa manifiesta por qué el colapso es inminente debido al incremento de carga supera la SFCC generada y posteriores al incrementar la humedad colapsa sin generar expansiones dentro de la macroestructura.

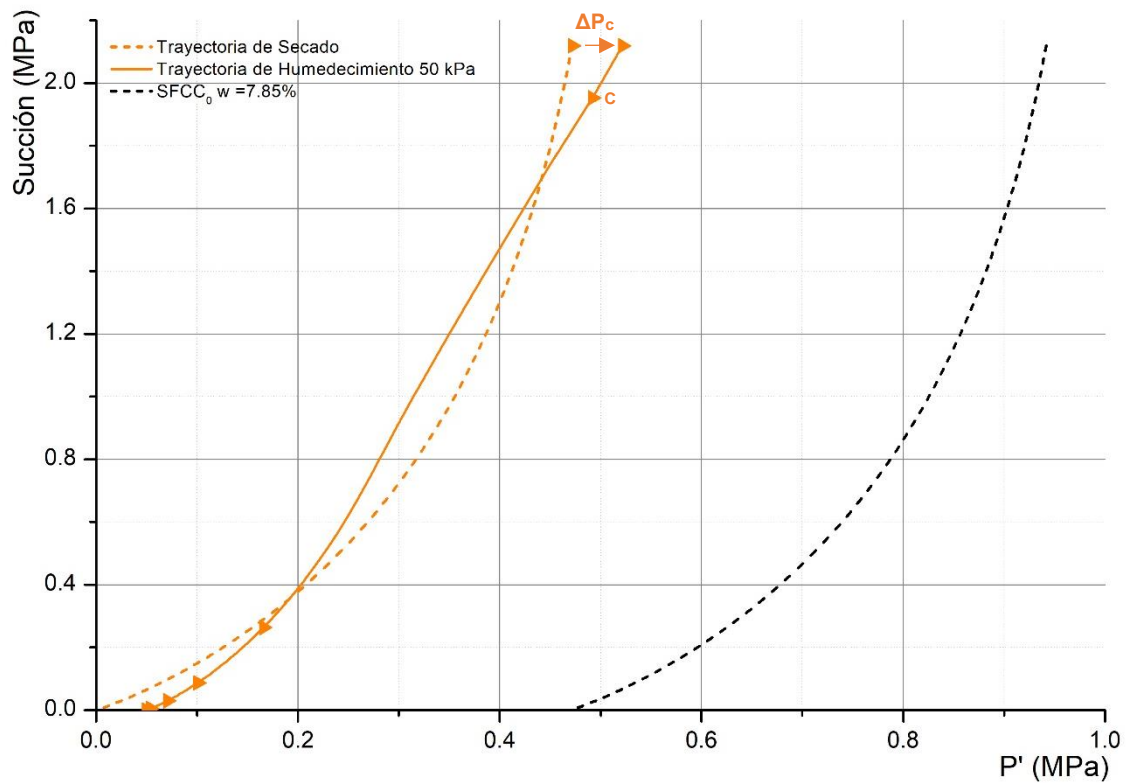
4.6.3 . Resultados con  $\chi_{0s_0} w=7.85\%$  promedio = 0.470 MPa.

Se expone los resultados ensayos en el modelo eh interpreta dentro de las siguientes figuras de esta sección los planos  $s - p'$  y  $\varepsilon_v - s$ , las cuales presentan trayectoria similar a la indicada en sección anterior, se enumeran las etapas de la muestra donde "C" deriva de la consolidación por el incremento " $\Delta P_c$ ", posteriormente se añaden los incremento de humedad dentro de la muestra, los resultados completos se desglosan en ANEXO D.

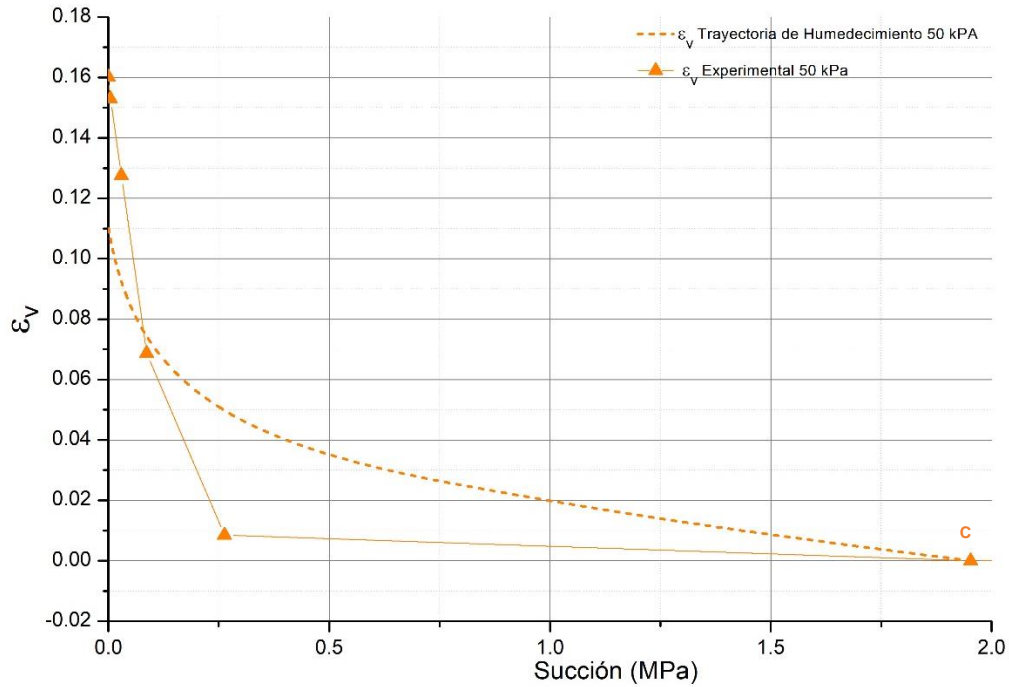
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 50 kPa se presentan dentro de la tabla 4-13 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-34 y 4-35.

**Tabla 4-13.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.05 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>22.26%</b>
$s_0 =$	<b>2.119 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.4091</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-34.- Grafica P' vs S, muestra a 50 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-35.-** Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-14 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-36 en el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-37 se generan expansiones.

**Tabla 4-14.-** Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.20 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>23.87%</b>
$s_0 =$	<b>1.925 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.8278</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

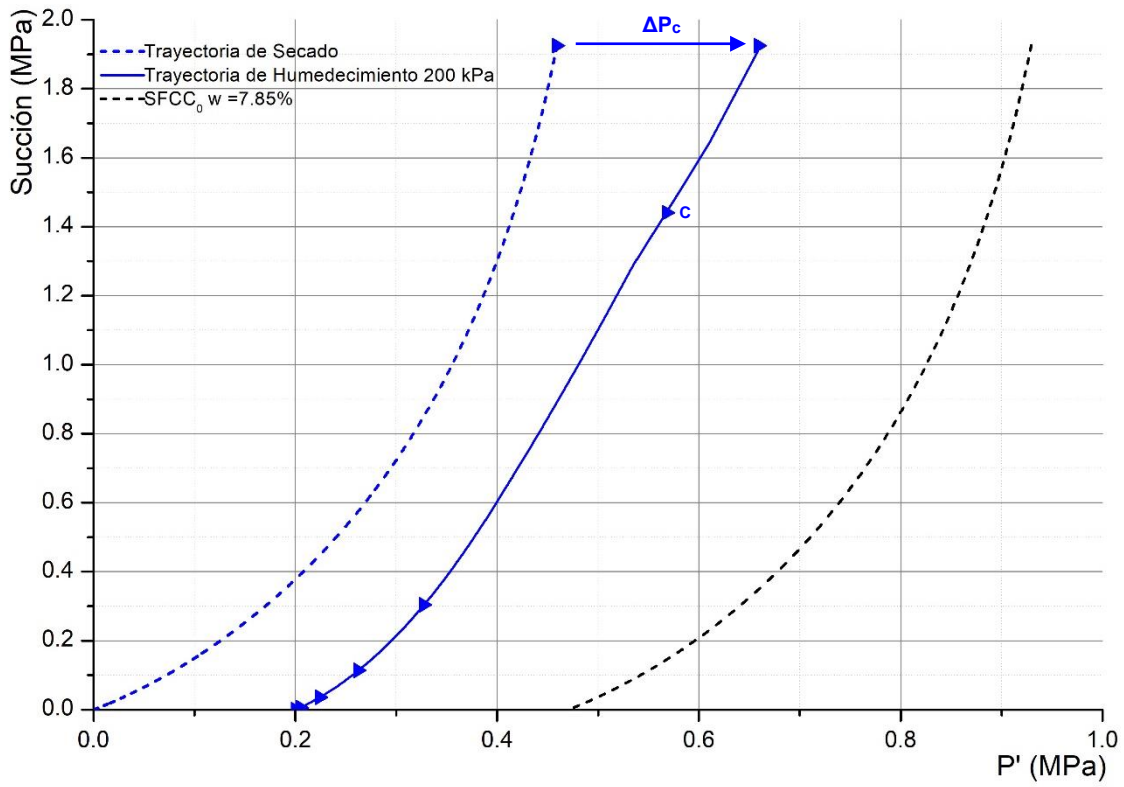


Figura 4-36.- Grafica P' vs S, muestra a 200 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

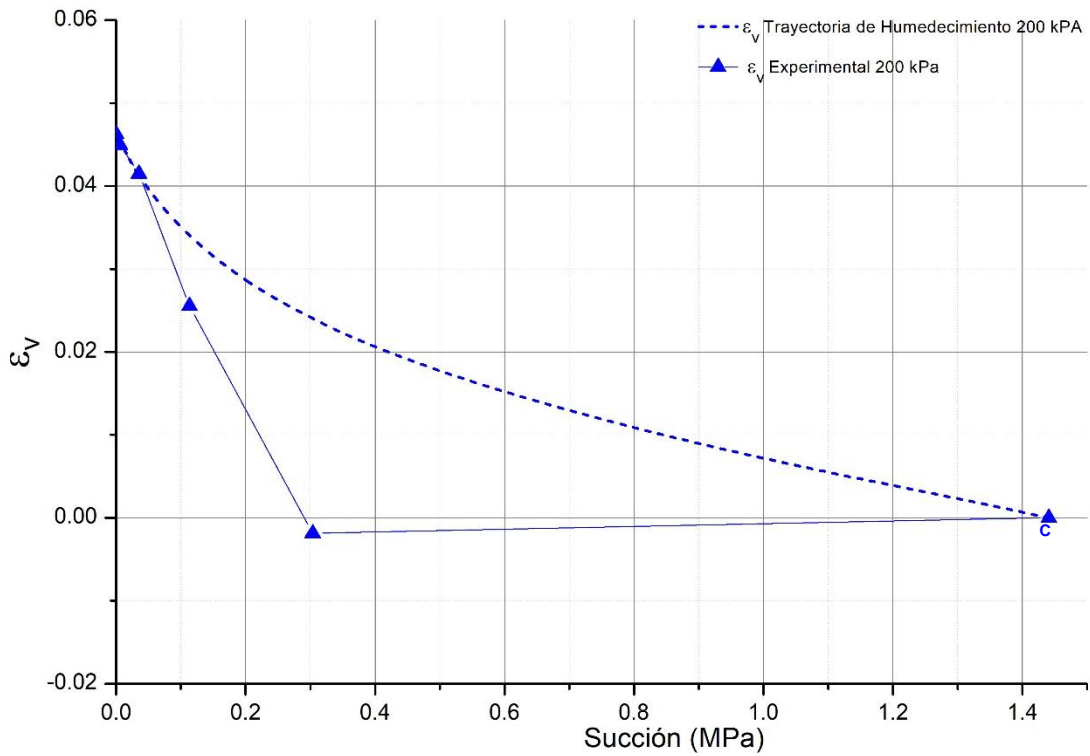
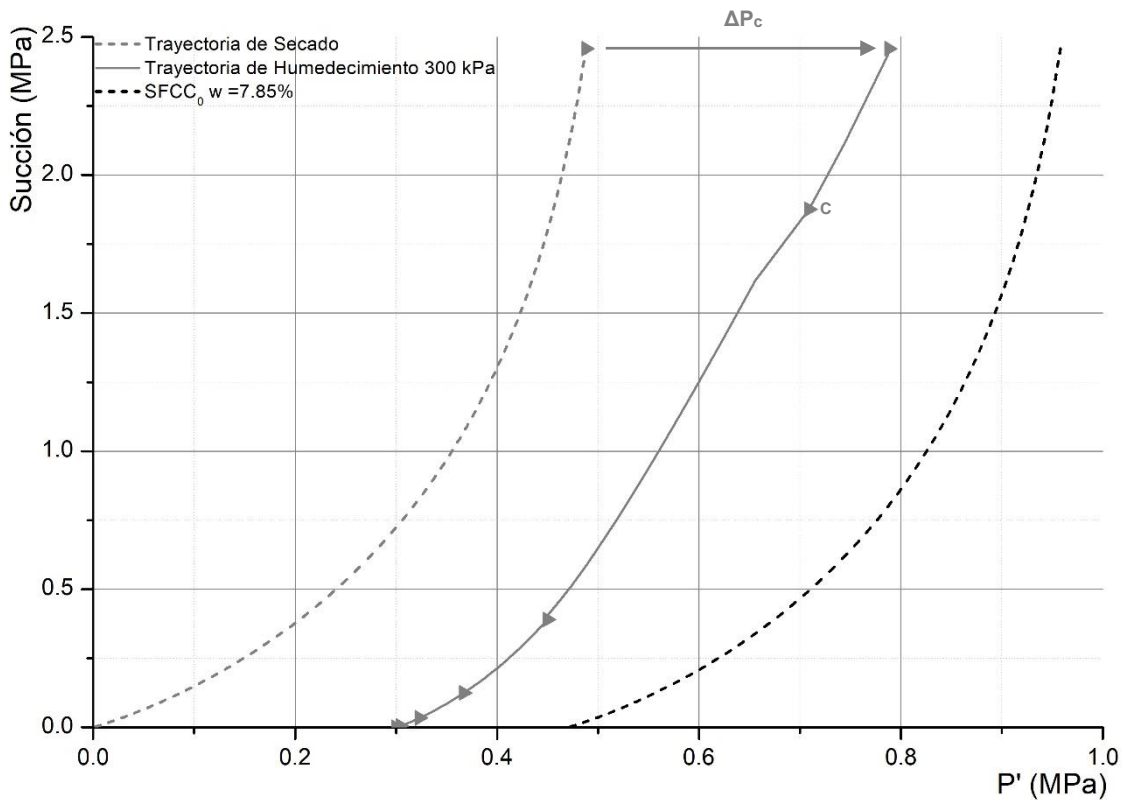


Figura 4-37.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 300 kPa se presentan dentro de la tabla 4-15 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-38 en el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-39 se generan expansiones.

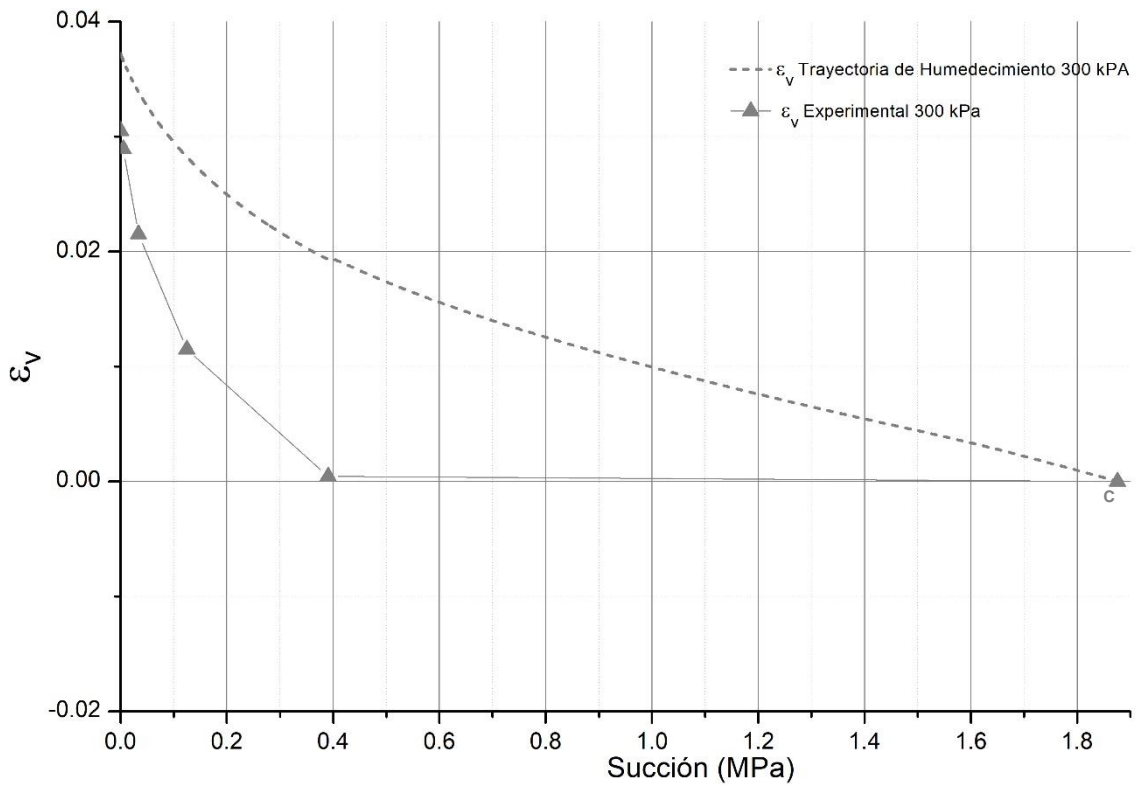
**Tabla 4-15.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.30 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>19.85%</b>
$s_0 =$	<b>2.458 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>16.1573</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-38.- Grafica P' vs S, muestra a 300 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**





**Figura 4-39.-** Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye a carga de 500 kPa se presentan dentro de la tabla 4-16 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-40 y 4-41 en el cual se muestra que el incremento de carga sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$  generando una nueva SFCC, por lo que en figura 4-42 se genera el colapso inminente después del colapso, y se añaden los incrementos de humedad los cuales se enumeran del 1 al 5.

**Tabla 4-16.-** Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.50 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>23.94%</b>
$s_0 =$	<b>1.917 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.0292</b>
$K =$	<b>0.0917</b>
$\lambda_{cex} =$	<b>0.3474</b>

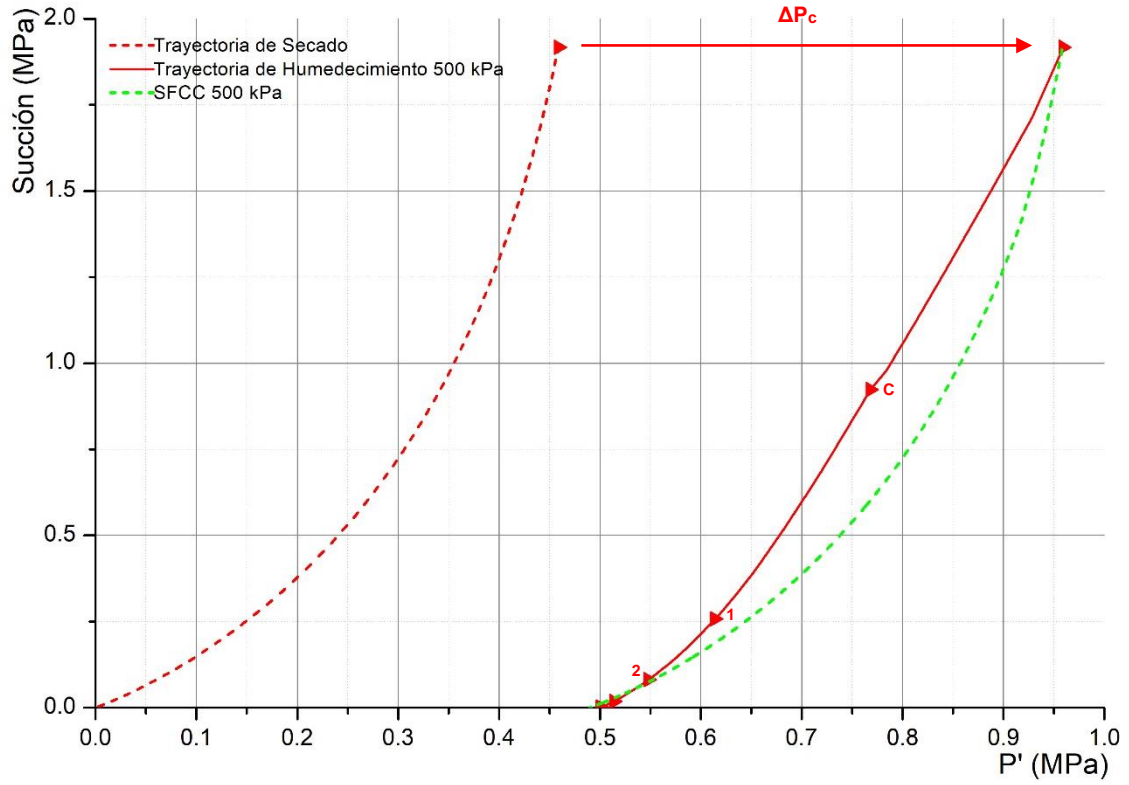


Figura 4-40.- Grafica  $P'$  vs  $S$ , muestra cargada a 500 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

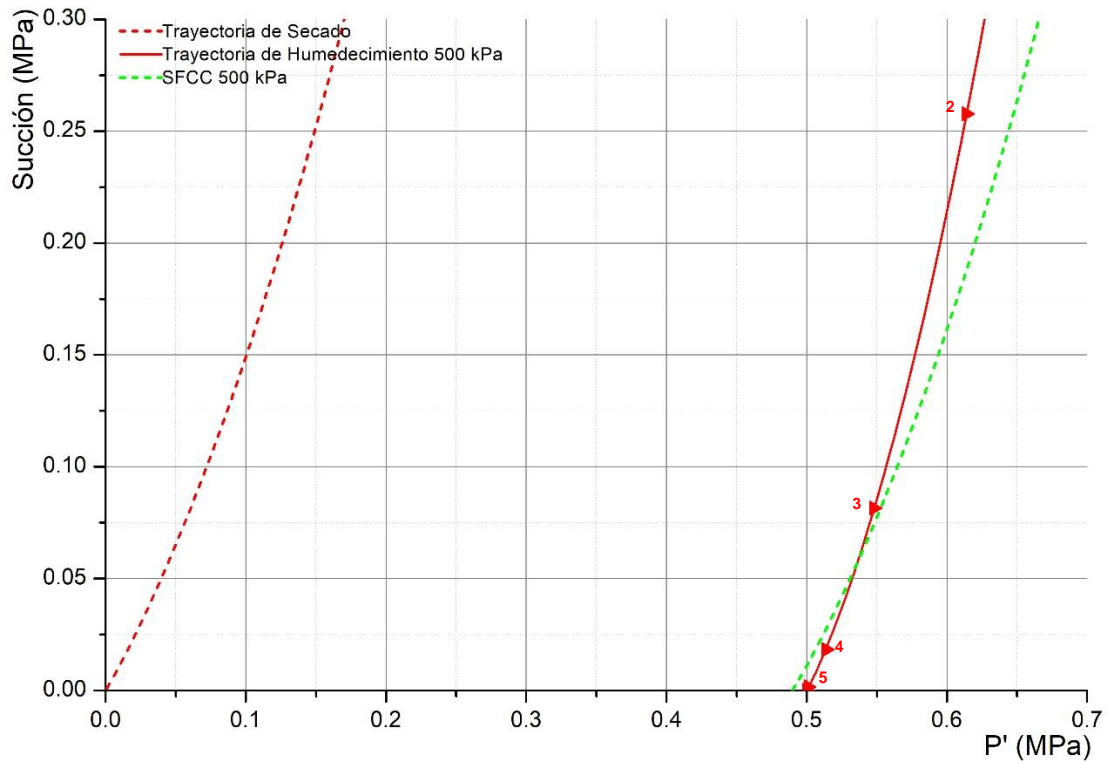
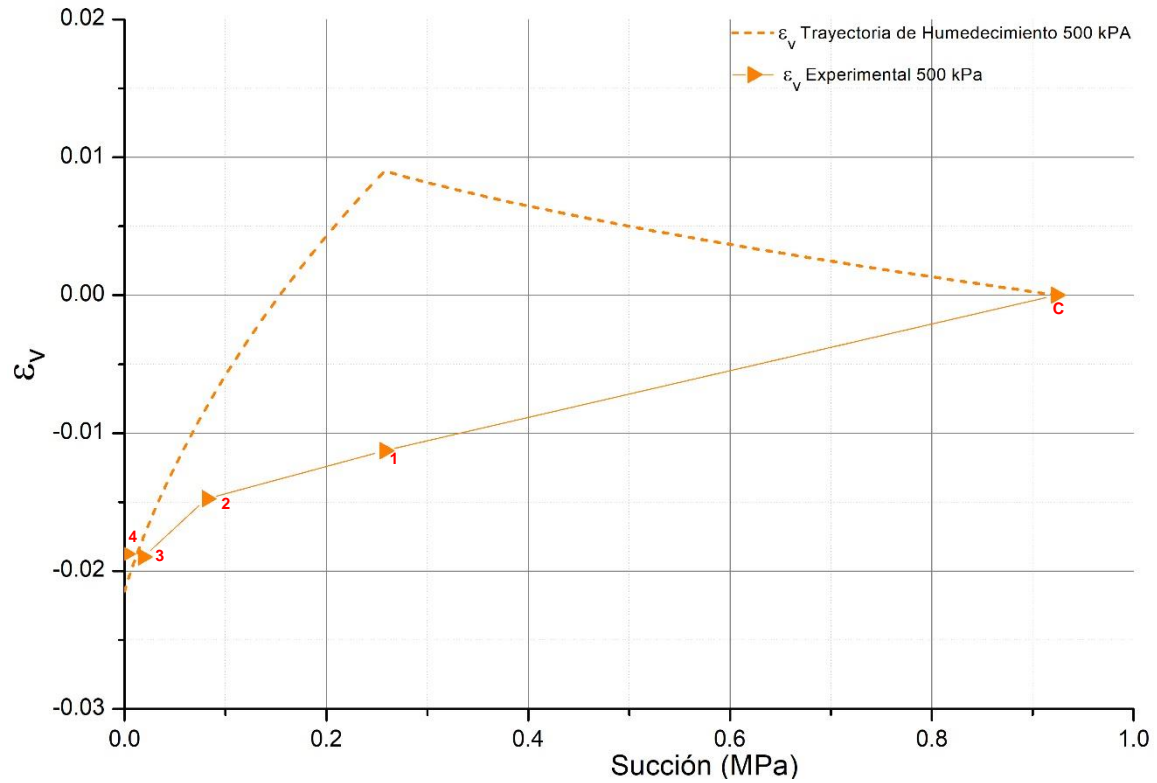


Figura 4-41.- Acercamiento figura 4-40

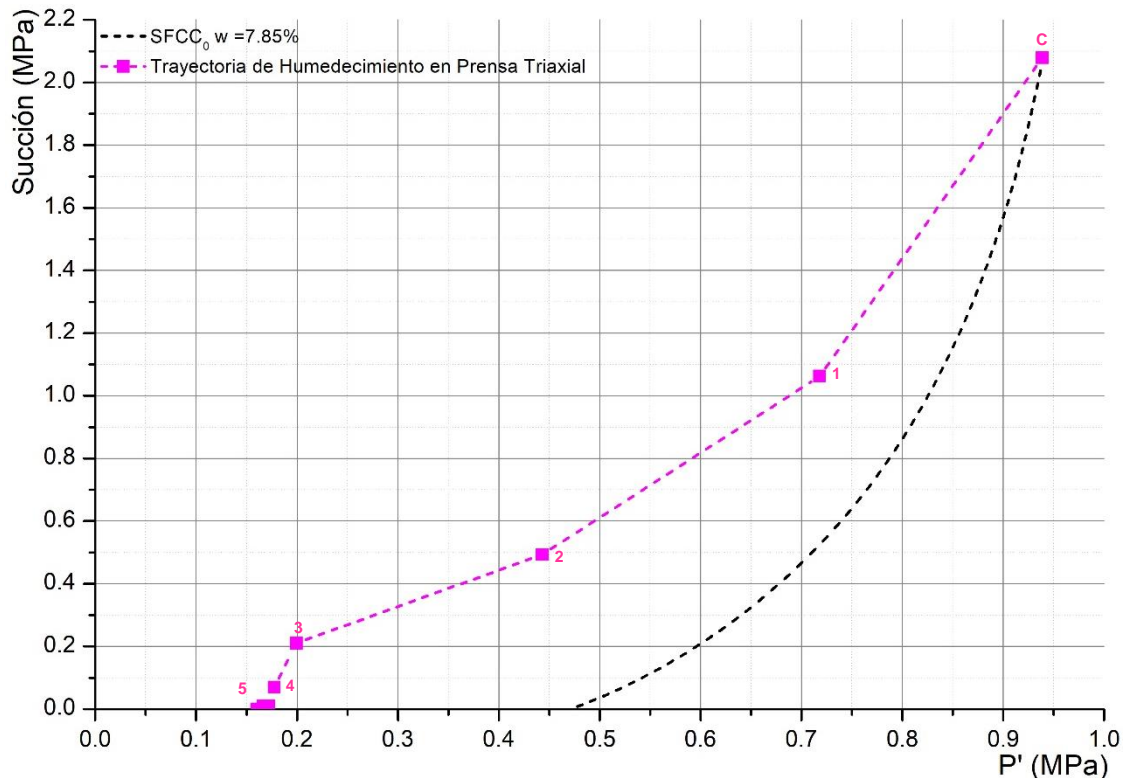


**Figura 4-42.- Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante el ensaye en prensa triaxial se presentan dentro de la tabla 4-17 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-43 en el cual se muestran incrementos de humedecimiento enumerados del 1 al 5 los cuales no sobrepasan la superficie de  $SFFC_0$ .

**Tabla 4-17.- Parámetros para muestra en ensaye de Prensa Triaxial en humedecimiento.**

$Gw_0 =$	<b>22.58%</b>
$s_0 =$	<b>2.078 MPa</b>



**Figura 4-43.- Grafica P' vs S, muestra en ensaye de Prensa Triaxial con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**

Los resultados observados en este grupo de ensaye muestran un camino de humedecimiento más notorio que los secados al aire, manteniéndose las muestras cargadas de 50 a 300 kPa dentro de una expansión ocasionado a la alta succión a la que fue expuesta al horno, mientras que la muestra a 500 kPa colapsa de forma lenta y teóricamente hasta el tercer humedecimiento se desarrolla el colapso como se demuestra en el acercamiento, en dichas simulaciones se considerando que la trayectoria de humedecimiento corta la SFCC.

#### 4.6.4 . Resultados con CRAS, $\chi_{0s0} w=23.77\%$ promedio = 5.839 MPa.

Los ensayos realizados se interpretan en el modelo mediante el endurecimiento por succión generado por la CRAS dentro de las siguientes figuras en el plano  $s - p'$ , generando una trayectoria de humedecimiento, donde mientras el incremento de carga no sobrepase la superficie de colapso bajo carga inicial (SFCC<sub>0</sub>) se generarán expansiones, y pueden ser traducidas a las figuras que conforman el plano  $\varepsilon_v - s$ . Dentro de las figuras se enumeran las etapas de la muestra donde "C" deriva de la consolidación por el incremento " $\Delta P_c$ ",

posteriormente “1”, “2” y “3” simbolizan el final de cada incremento de humedad dentro de la muestra, los resultados completos se desglosan en ANEXO E.

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 50 kPa se presentan dentro de la tabla 4-18 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-44, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-45 se generan expansiones.

Tabla 4-18.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.05 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>63.73%</b>
$s_0 =$	<b>8.443 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.9592</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

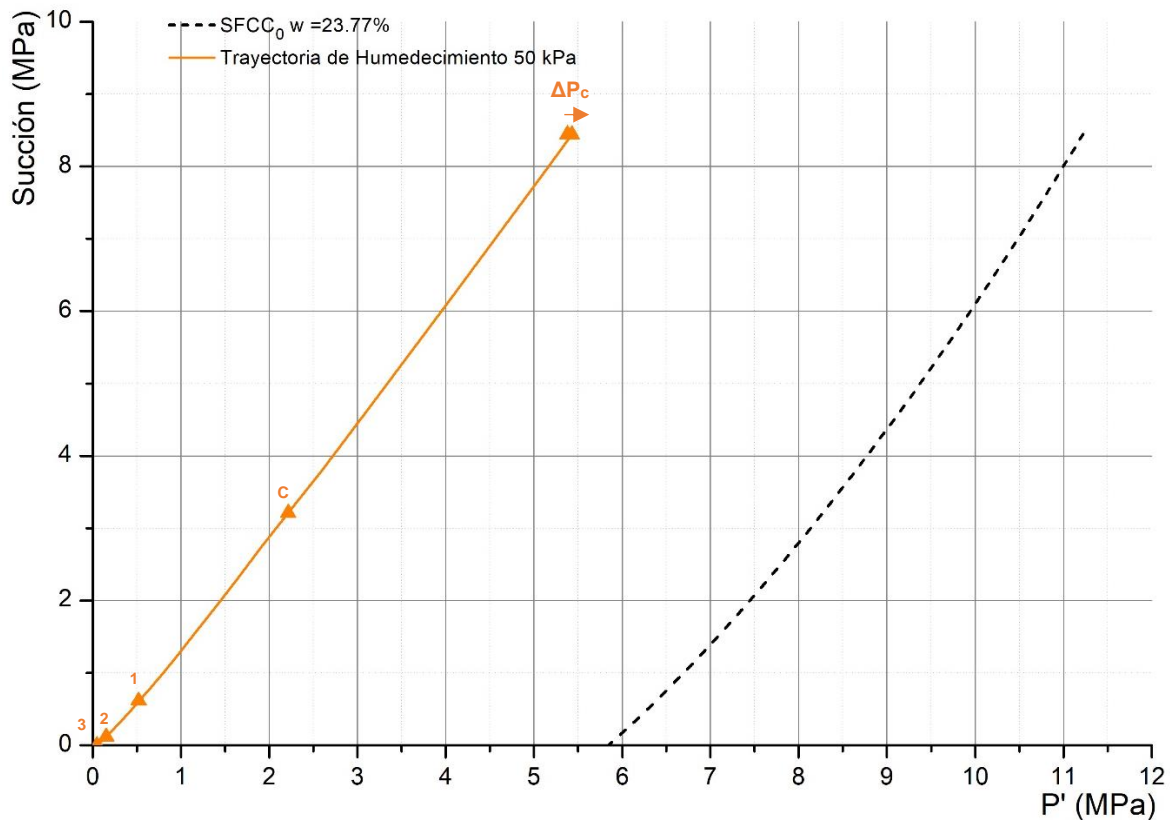
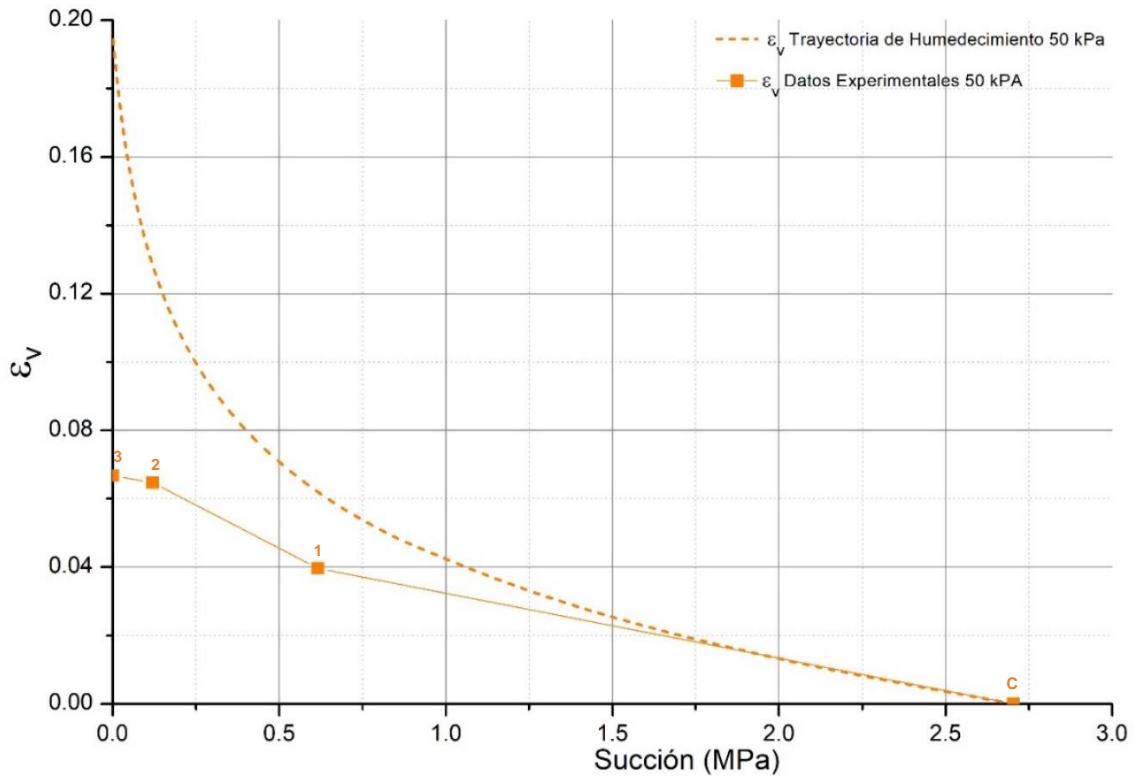


Figura 4-44.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 50 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

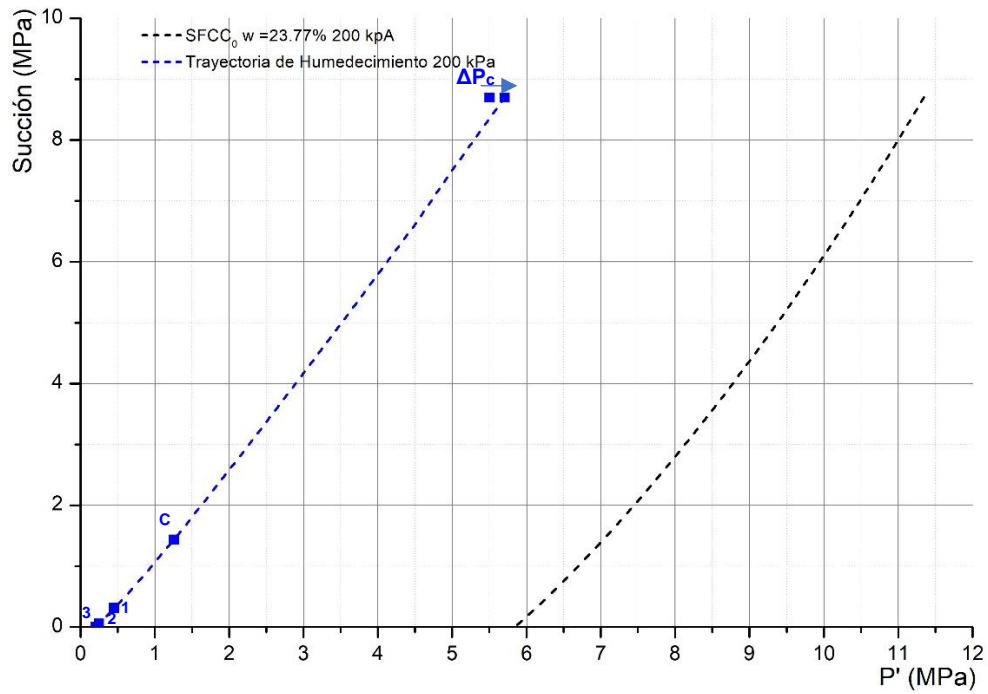


**Figura 4-45.-** Deformación Volumétrica en muestra cargada a 50 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

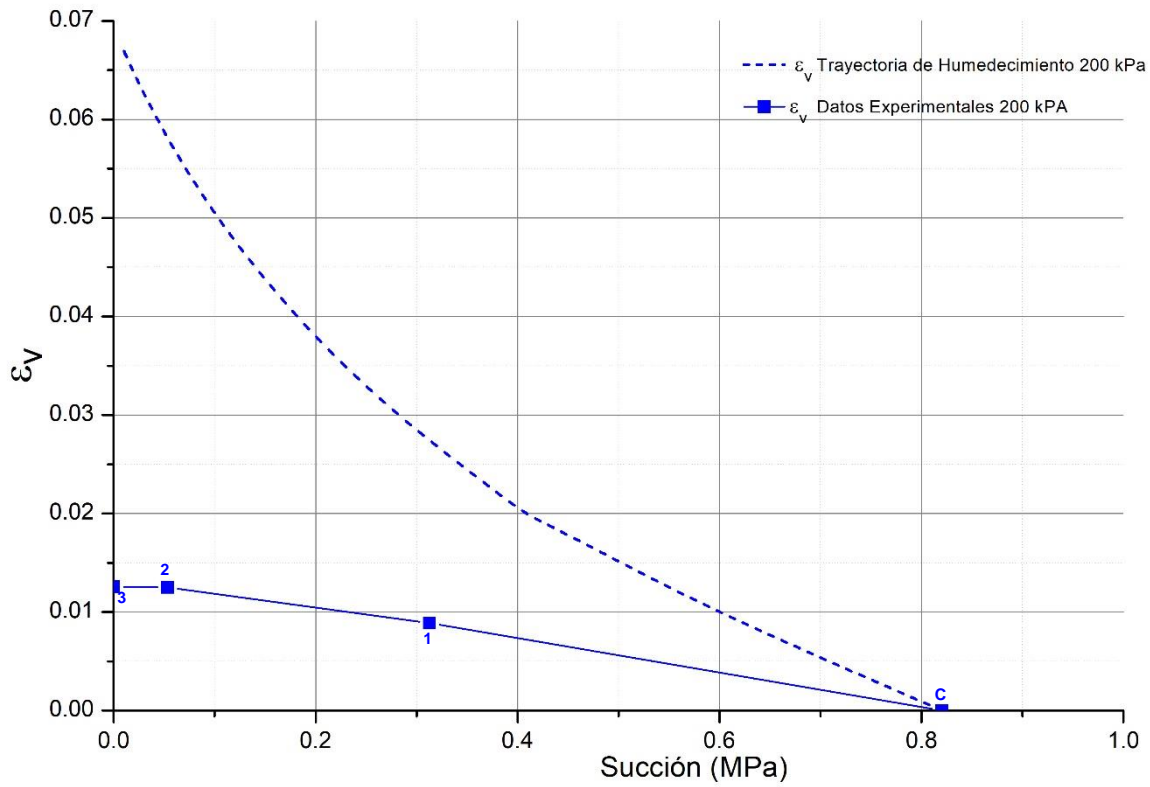
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-19 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-46, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-47 se generan expansiones.

**Tabla 4-19.-** Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	0.20 MPa
$Gw_0 =$	63.30%
$s_0 =$	8.695 MPa
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	6.3415
$K =$	0.0917



**Figura 4-46.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 200 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**

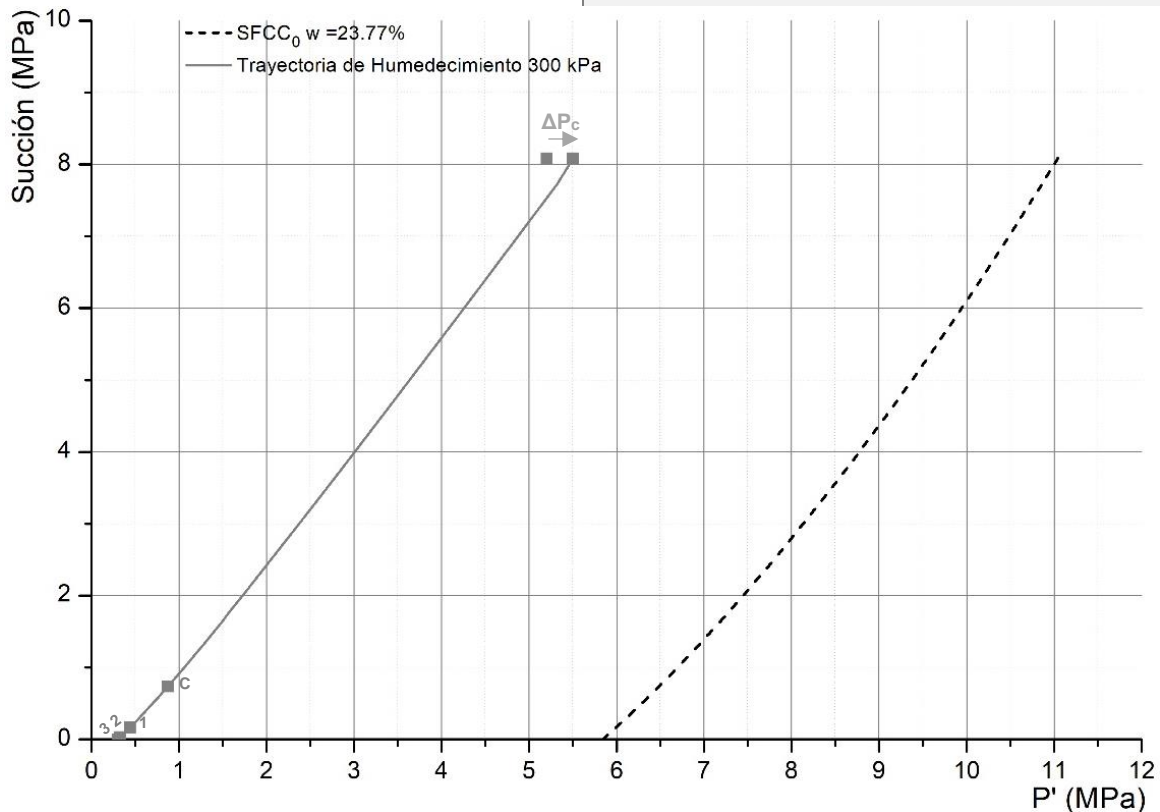


**Figura 4-47.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 300 kPa se presentan dentro de la tabla 4-20 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-48, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFCC_0$ , por lo que en figura 4-49 se generan expansiones.

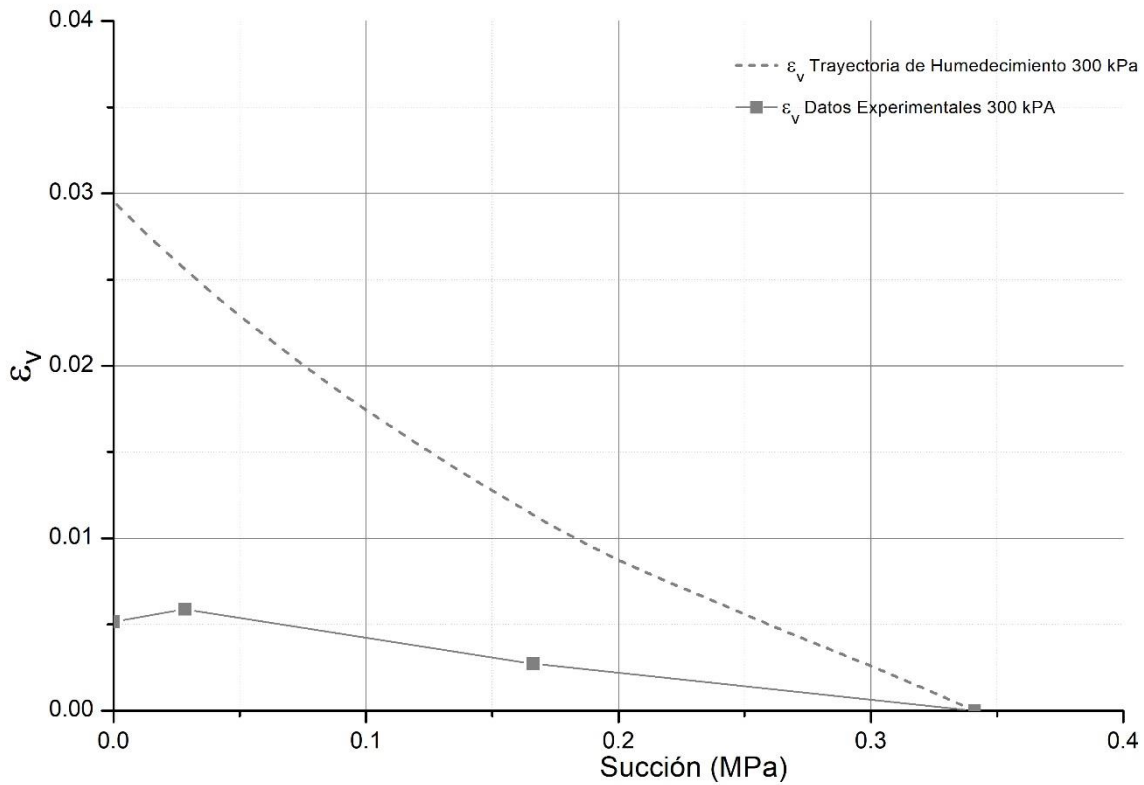
**Tabla 4-20.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.30 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>64.35%</b>
$s_0 =$	<b>8.084 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>6.0084</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-48.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 300 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**





**Figura 4-49.-** Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 400 kPa se presentan dentro de la tabla 4-21 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-50, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-51 se generan expansiones.

**Tabla 4-21.-** Parámetros para muestra cargada a 400 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.40 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>56.82%</b>
$s_0 =$	<b>13.262 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.1382</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

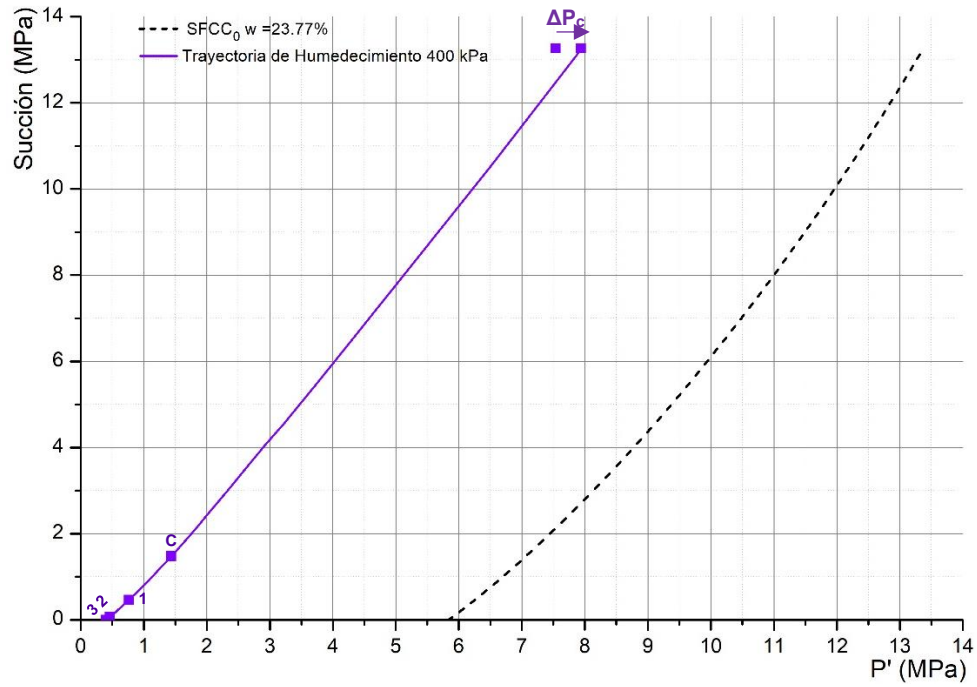


Figura 4-50.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 400 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

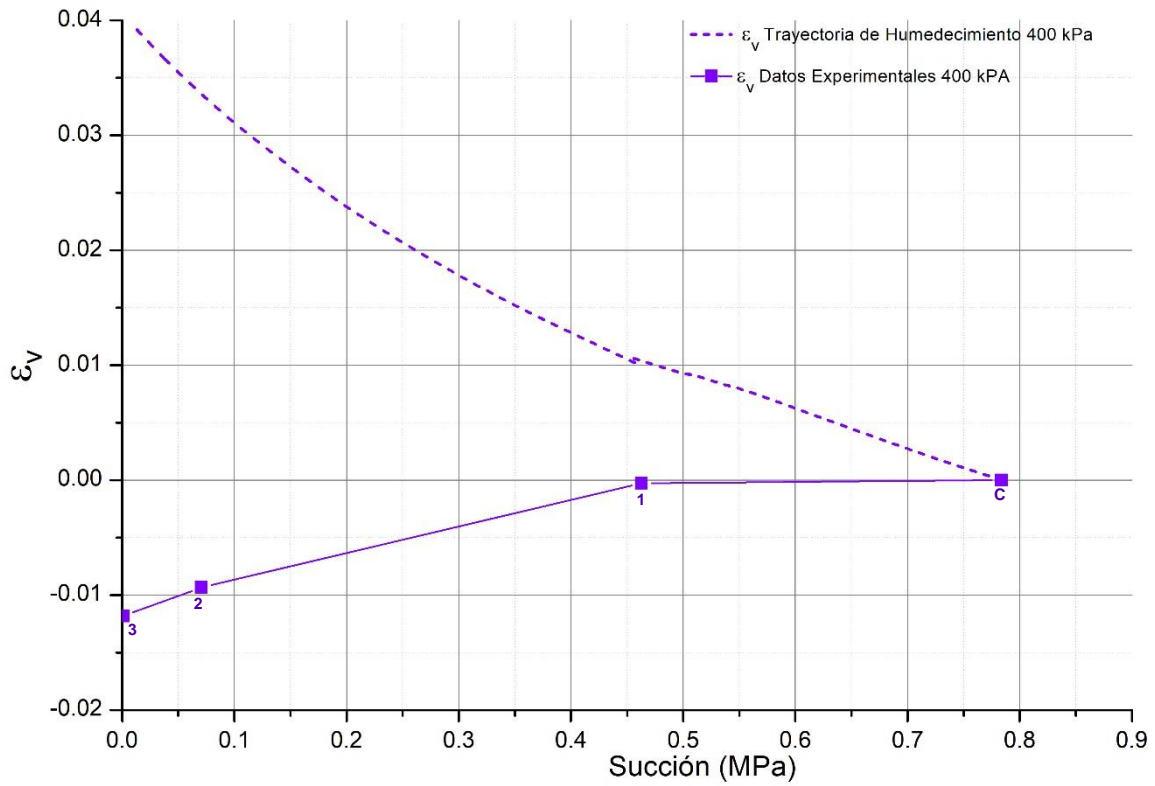
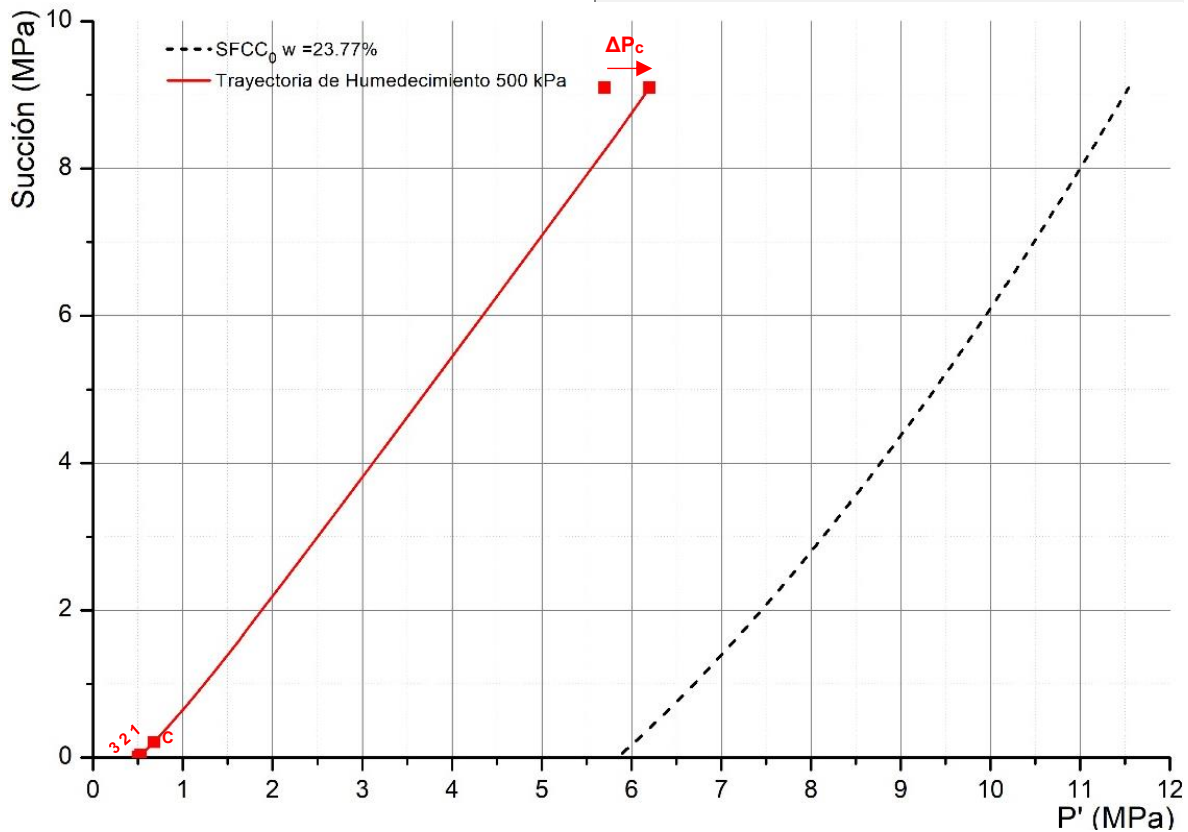


Figura 4-51.- Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

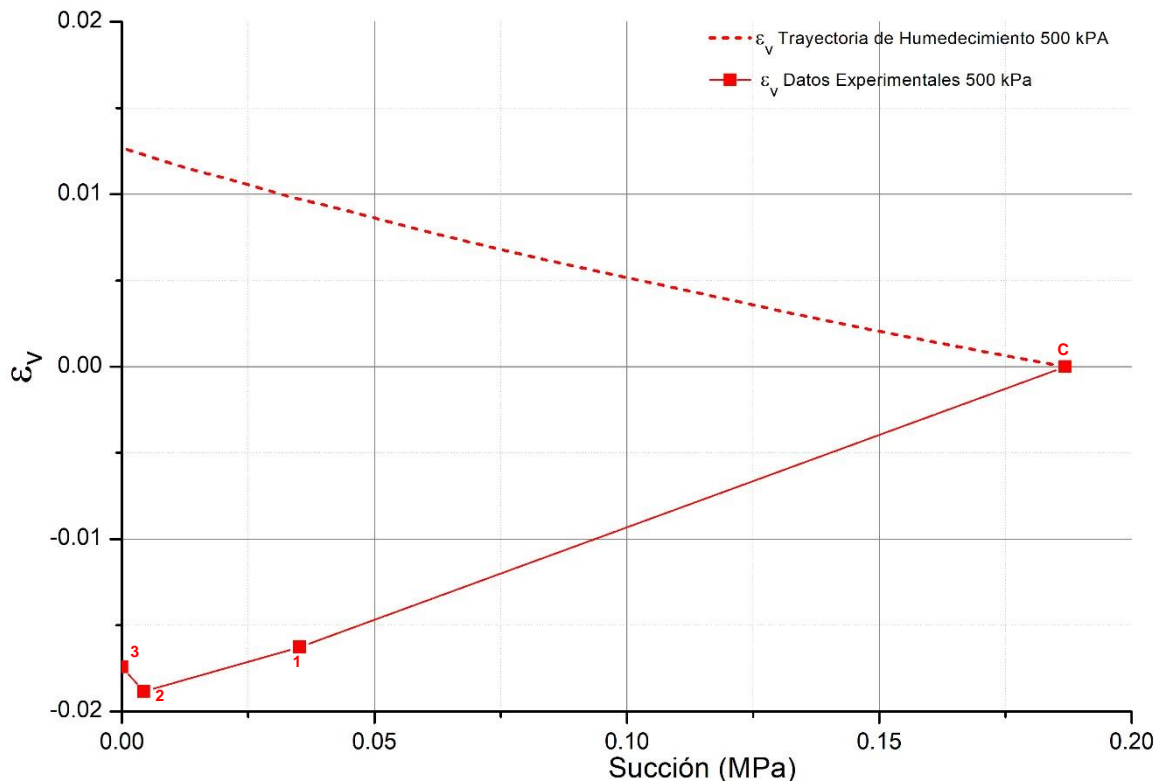
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 400 kPa se presentan dentro de la tabla 4-22 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-52, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFCC_0$ , por lo que en figura 4-53 se generan expansiones.

**Tabla 4-22.- Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.50 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>62.64%</b>
$s_0 =$	<b>9.098 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>5.4011</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-52.- Grafica P' vs S, muestra cargada a 500 kPa con  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**



Los resultados mostrados en esta sección donde la SFCC<sub>0</sub> generada por la CRAS forma dentro del modelo expansiones las cuales no son representativas como se observa en la sección 4.6.2 y 4.6.2, esto puede corresponder a los altos valores de succión dentro de la CRAS forjando un endurecimiento debido a la succión por valores altos.

4.6.5 . Resultados con CRAS,  $\chi_{0S_0 w=7.85\% \text{ promedio}} = 20.994 \text{ MPa}$ .

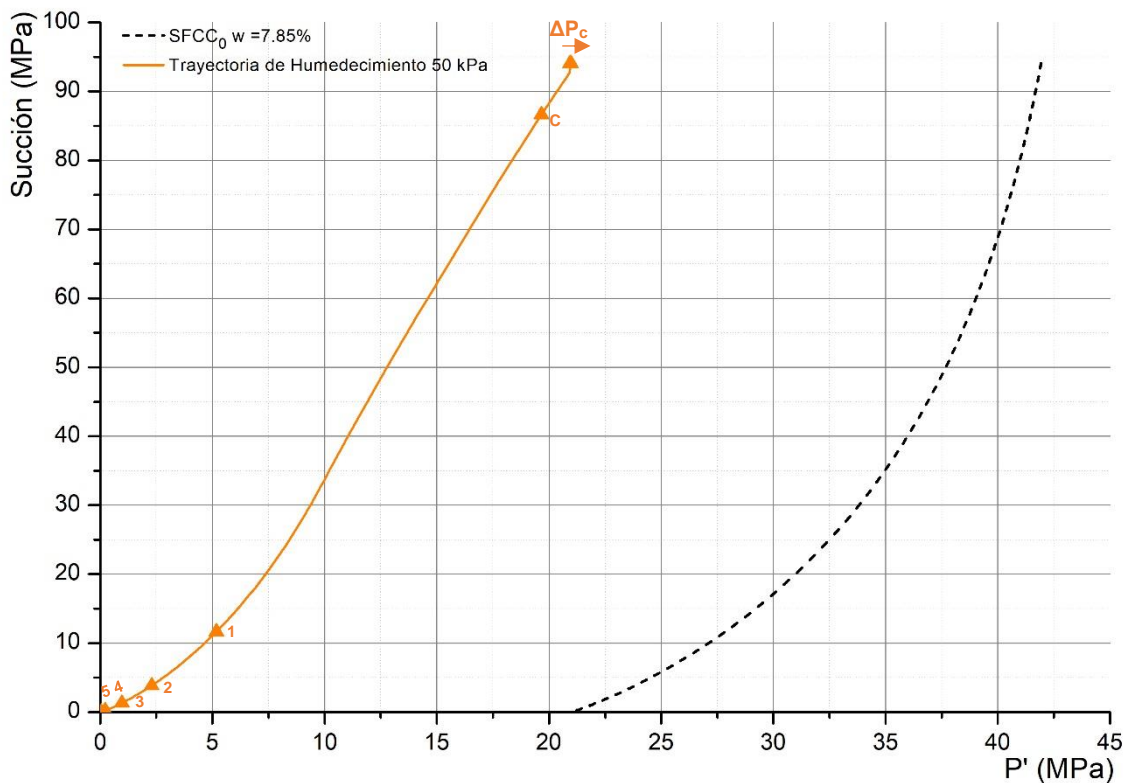
Los ensayos realizados se interpretan en el modelo mediante el endurecimiento por succión generado por la CRAS dentro de las siguientes figuras en el plano  $s - p'$ , generando una trayectoria de humedecimiento, donde mientras el incremento de carga no sobrepase la superficie de colapso bajo carga inicial (SFCC<sub>0</sub>) se generarán expansiones, y pueden ser traducidas a las figuras que conforman el plano  $\epsilon_v - s$ . Dentro de las figuras se enumeran las etapas de la muestra donde “C” deriva de la consolidación por el incremento “ $\Delta P_c$ ”, posteriormente “1”, “2”, “3”, “4” y “5” que simbolizan el final de cada incremento de

humedad dentro de la muestra, los resultados completos se desglosan en ANEXO E.

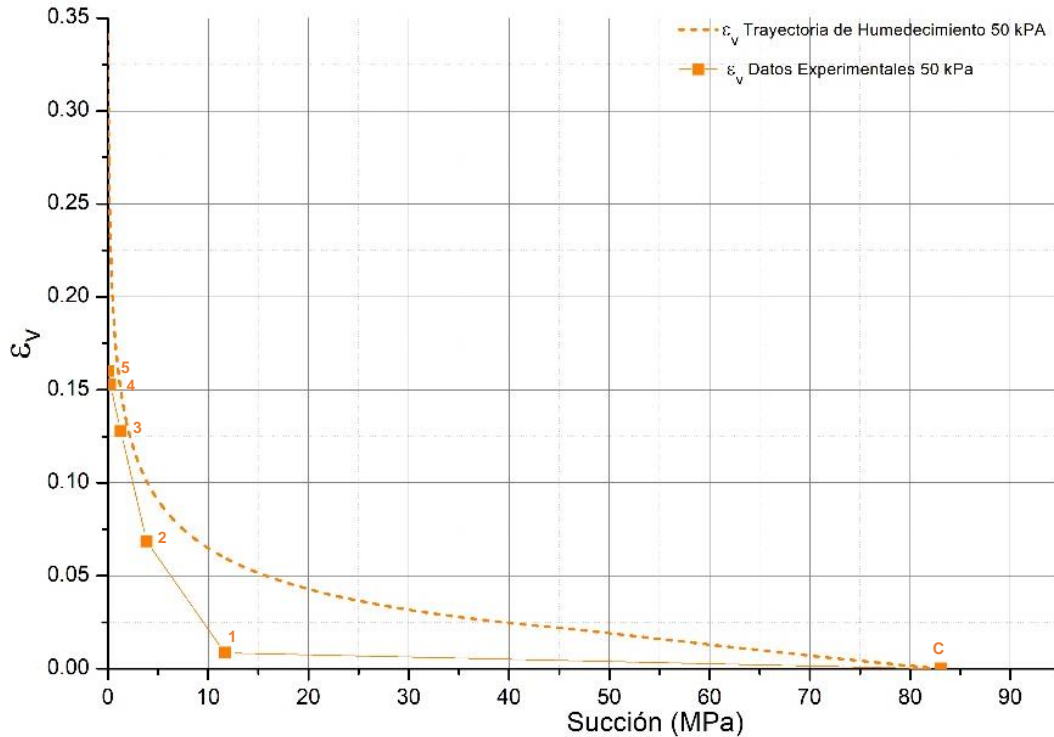
Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 50 kPa se presentan dentro de la tabla 4-23 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-53, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-54 se generan expansiones.

**Tabla 4-23.- Parámetros para muestra cargada a 50 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.05 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>22.26%</b>
$s_0 =$	<b>94.048 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.4091</b>
$K =$	<b>0.0917</b>



**Figura 4-53.- Grafica  $P'$  vs  $S$ , muestra cargada a 50 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-54.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-24 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-55, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-56 se generan expansiones.

**Tabla 4-24.- Parámetros para muestra cargada a 200 kPa en humedecimiento.**

$P_c =$	<b>0.20 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>23.87%</b>
$s_0 =$	<b>85.421 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.8278</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

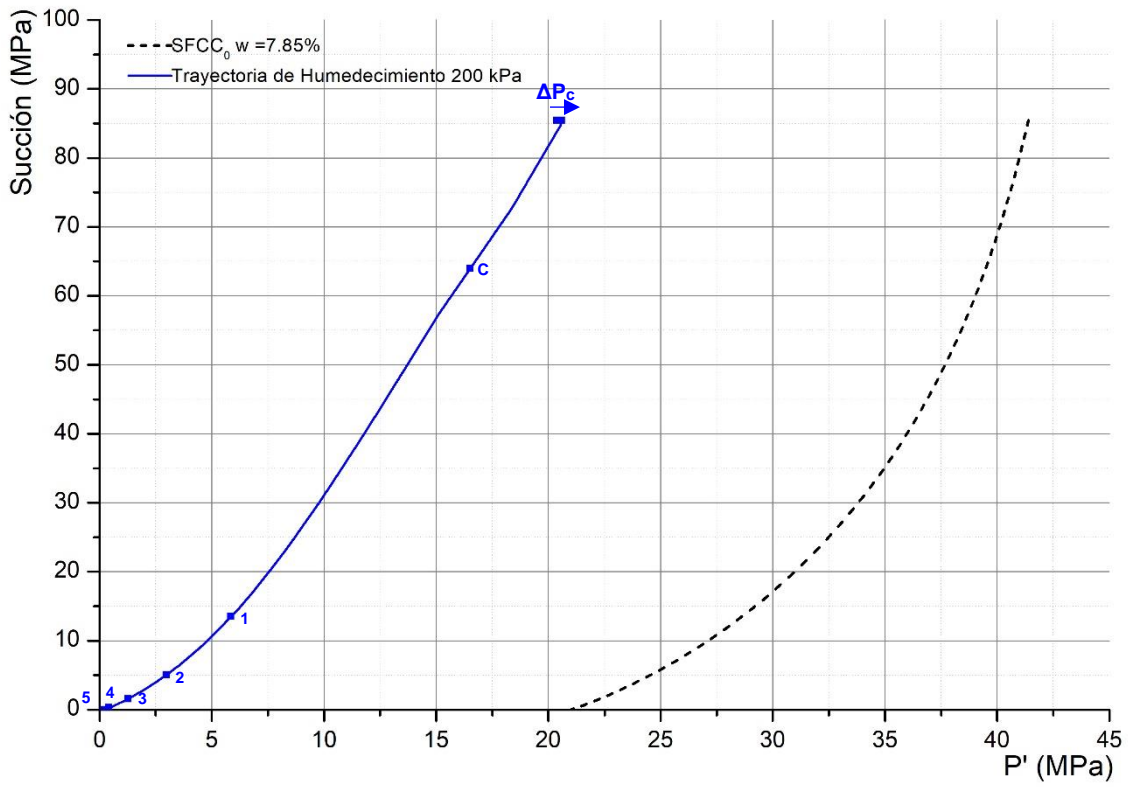


Figura 4-55.- Grafica  $P'$  vs  $S$ , muestra cargada a 200 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

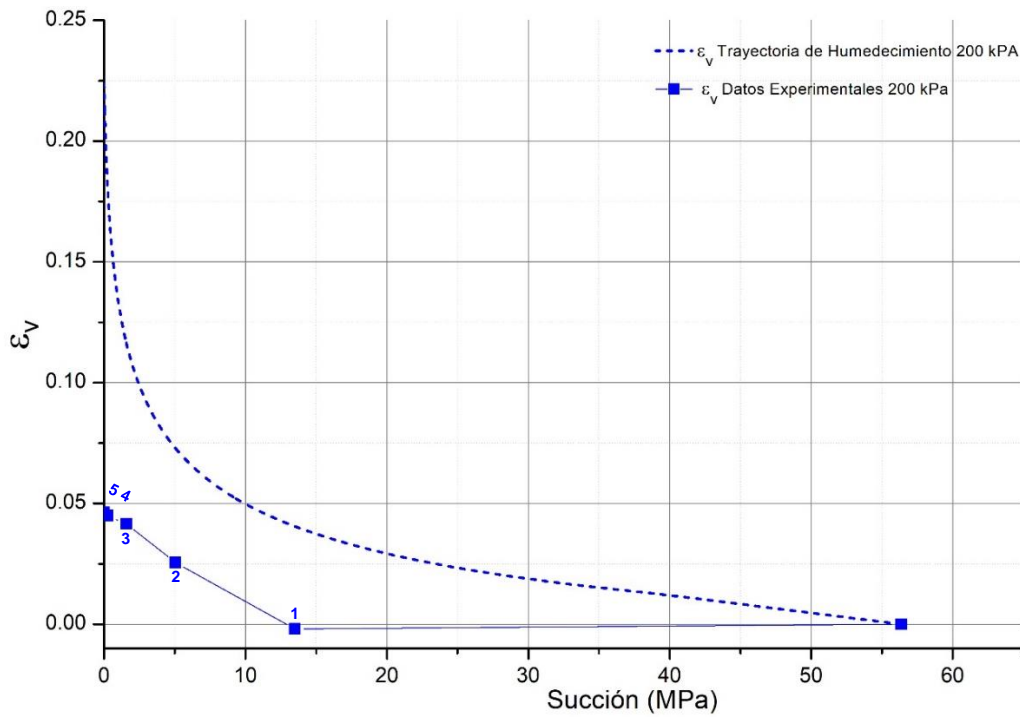


Figura 4-56.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-25 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-57, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de SFCC<sub>0</sub>, por lo que en figura 4-58 se generan expansiones.

Tabla 4-25.- Parámetros para muestra cargada a 300 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	0.30 MPa
$Gw_0 =$	19.85%
$s_0 =$	109.068 MPa
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	16.1573
$K =$	0.0917

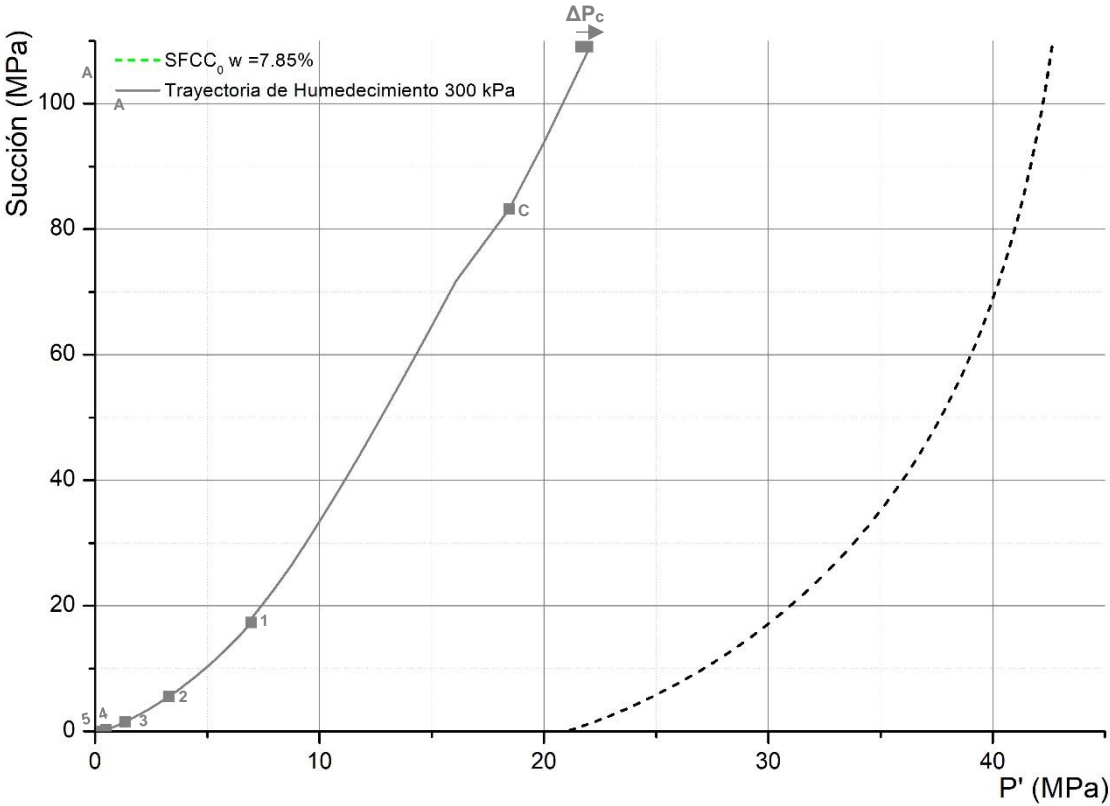
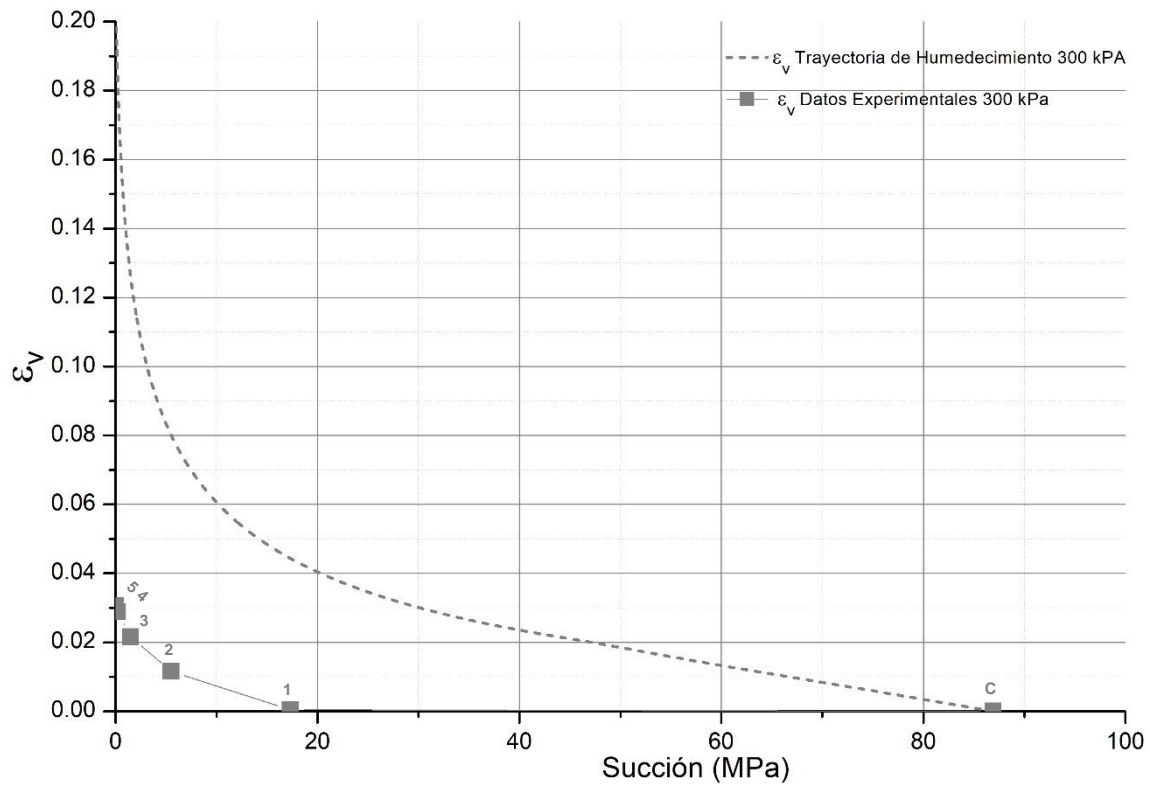


Figura 4-57.- Grafica P' vs S, muestra a 300 kPa con W<sub>0</sub> = 7.85% (Humedecimiento).





**Figura 4-58.-** Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los parámetros necesarios para generar el modelo durante una carga de 200 kPa se presentan dentro de la tabla 4-25 para el desarrollo elemental del modelo generado en figura 4-59, el cual se muestra que el incremento de carga no sobrepasa la superficie de  $SFFC_0$ , por lo que en figura 4-60 se generan expansiones.

**Tabla 4-26.-** Parámetros para muestra cargada a 500 kPa en humedecimiento.

$P_c =$	<b>0.50 MPa</b>
$Gw_0 =$	<b>23.94%</b>
$s_0 =$	<b>85.087 MPa</b>
$B$ (parámetro de escaneo en histéresis) =	<b>14.0292</b>
$K =$	<b>0.0917</b>

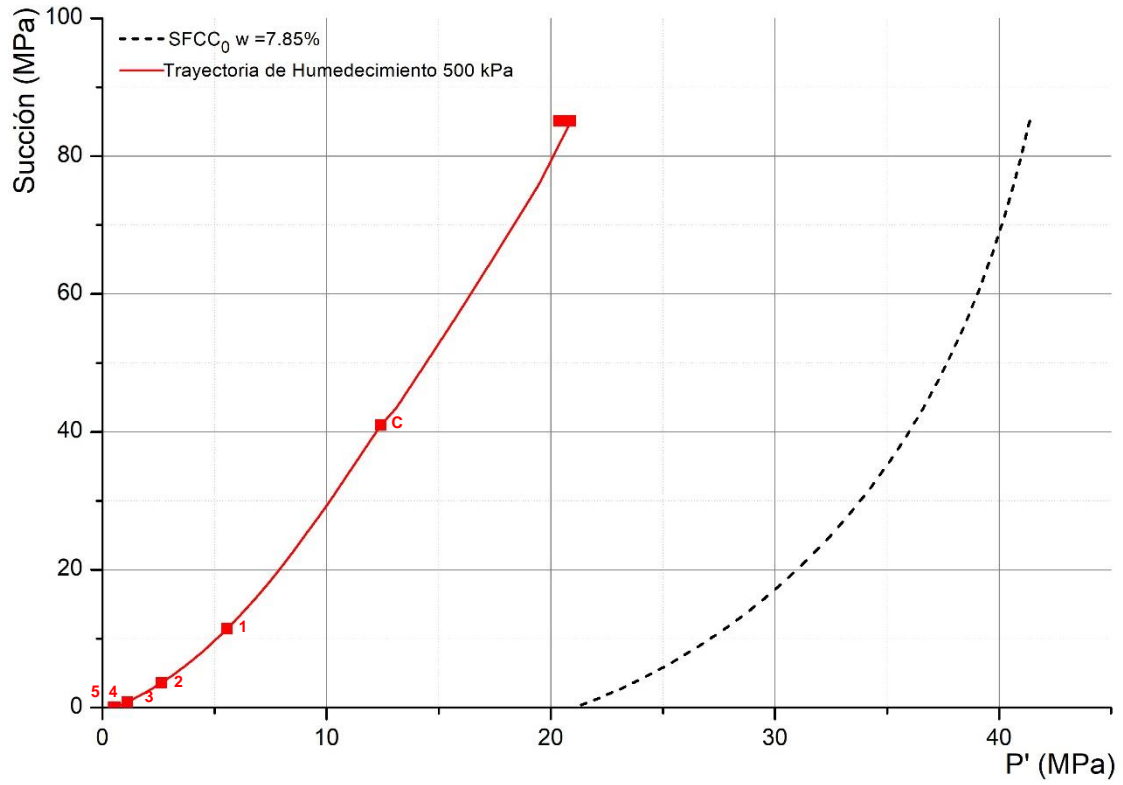


Figura 4-59.- Grafica P' vs S, muestra a 500 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

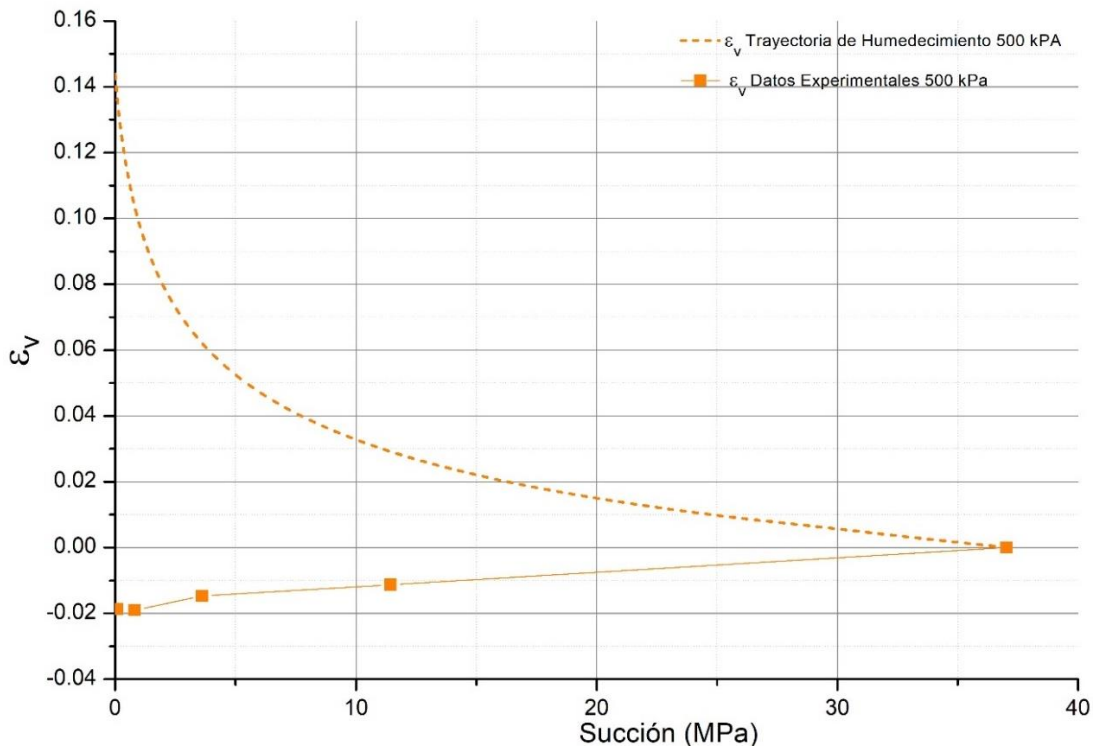


Figura 4-60.- Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con  $w_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Tanto en esta sección como en la anterior se observa que la SFCC<sub>0</sub> creada por la CRAS forma dentro del modelo puramente expansiones, la creación del modelo se consideró que la trayectoria de humedecimiento corta la SFCC, y no incorporan los ensayos experimentales obtenidos como en secciones 4.6.2, 4.6.3, causado a los altos valores de succión dentro de la CRAS generando un endurecimiento por succión elevadas, el modelo se

#### 4.6.6 . Comparación con resultados utilizando el Modelo Básico de Barcelona con material de esta tesis.

Los datos experimentales son trasladados a el Modelo Básico de Barcelona y se añade la superficie de expansión del Modelo Expansivo de Barcelona, es necesario la utilización de la curva de secado de succión y la tabla de factores necesarios para la utilización del Modelo (Tabla 4-27).

**Tabla 4-27.- Parámetros Generales para la construcción de la Superficie de Fluencia Carga-Colapso del BBM.**

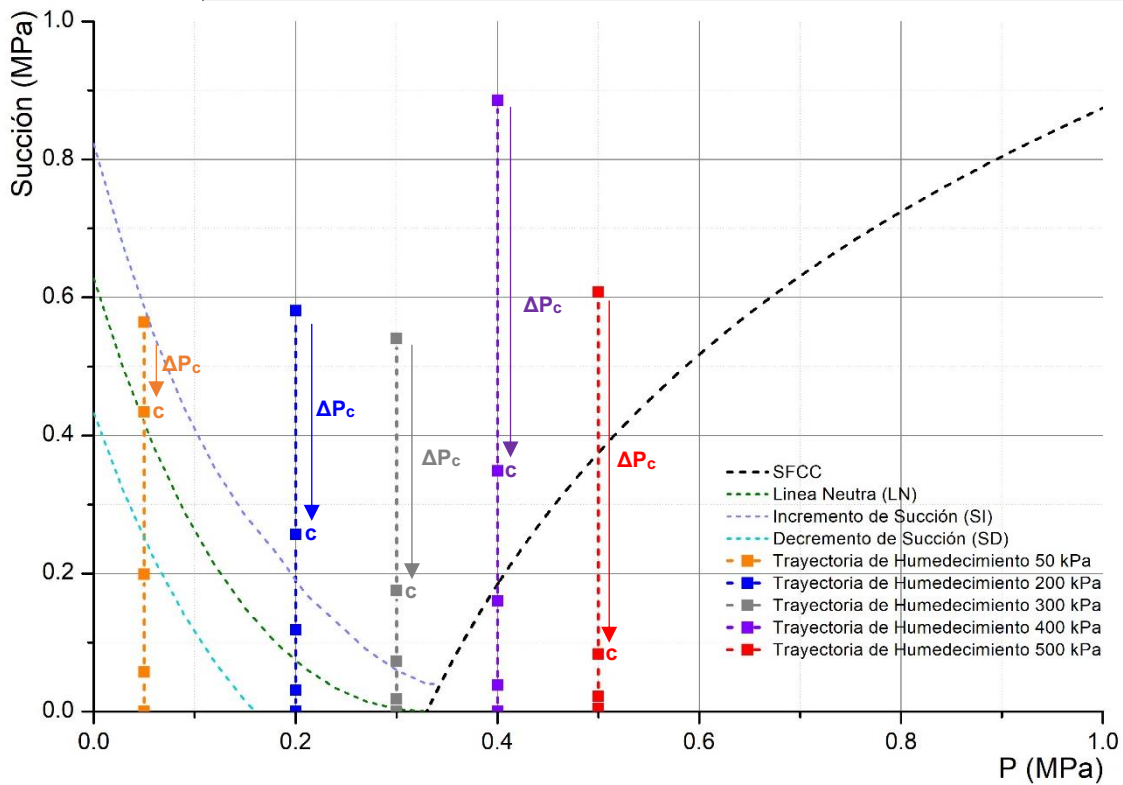
$\lambda(0) =$	<b>0.0917</b>
$\kappa =$	<b>0.9073</b>
$\lambda(s)_{w=23.77\%} =$	<b>0.2332</b>
$\lambda(s)_{w=7.85\%} =$	<b>0.1548</b>
$P^*=Pe$ (Triple odómetro $w = 23.77$ ) =	<b>0.33 MPa</b>
$P^*=Pe$ (Triple odómetro $w = 7.85$ ) =	<b>0.425 MPA</b>
$P_c =$	<b>0.1 MPa</b>
$r_{w=23.77\%} =$	<b>0.2571</b>
$r_{w=7.85\%} =$	<b>0.1659</b>
$\beta_{w=23.77\%} =$	<b>0.9989</b>
$\beta_{w=7.85\%} =$	<b>0.5000 MPa</b>

Las pendientes  $\lambda(s)$  para cada grupo de muestra se obtuvieron mediante los dos últimos puntos generados por la carga (Figura 4-12), y posteriormente mediante el artículo de Alonso (1990) es posible obtener el valor “r” y por medio de mínimos cuadrados obtener “ $\beta$ ”, dichos valores en conjunto de la tabla 4-28, es posible generar el modelo en el plano s – p (Figura 4-61), en donde presentan un estado inicial de succión al instante de incrementar la carga y en punto “C” el final de la consolidación por carga, generando una reducción de succión y posteriormente se generan los incrementos de humedad.

**Tabla 4-28.- Parámetros para muestra dentro del Modelo (humedecimiento).**

Carga =	50 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa	500 kPa
---------	--------	---------	---------	---------	---------

$Gw_{0(w=23.77\%)} =$	63.73%	63.30%	64.35%	56.82%	62.64%
$S_{0(w=23.77\%)} =$	0.564 MPa	0.581 MPa	0.534 MPa	0.886 MPa	0.607 MPa



**Figura 4-61.- Grafica P vs S de muestra ensayadas en  $W_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).**

Obtenido el modelo de Barcelona es posible generar las deformaciones volumétricas como lo marca Alonso (1990 y 1999) generado por el incremento de humedad y el decremento de succión se genera la respuesta para cada carga en figura 4-62 a 4-66.

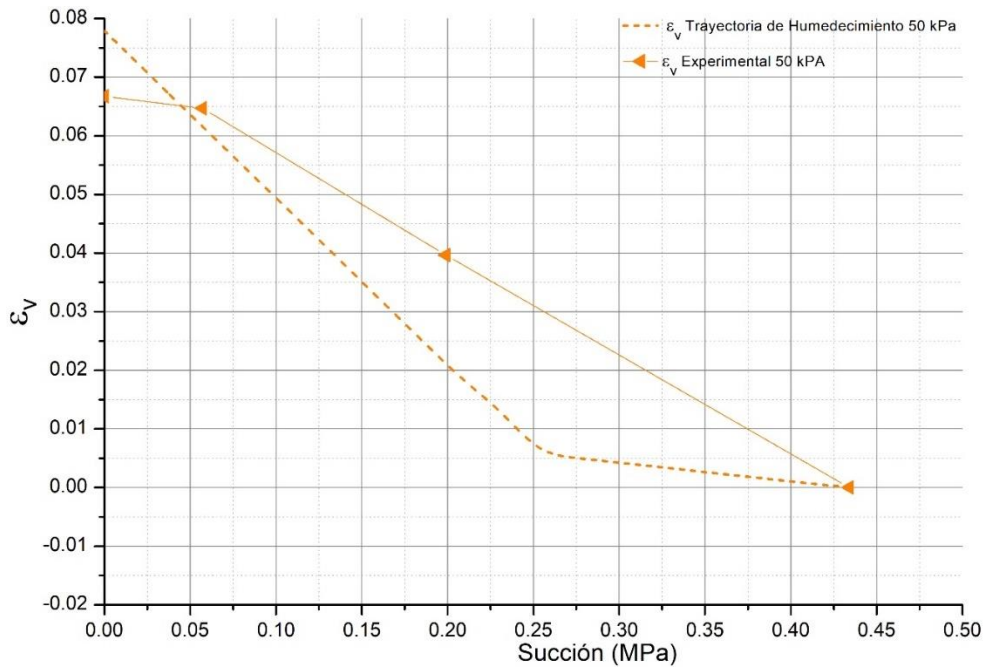


Figura 4-62.- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

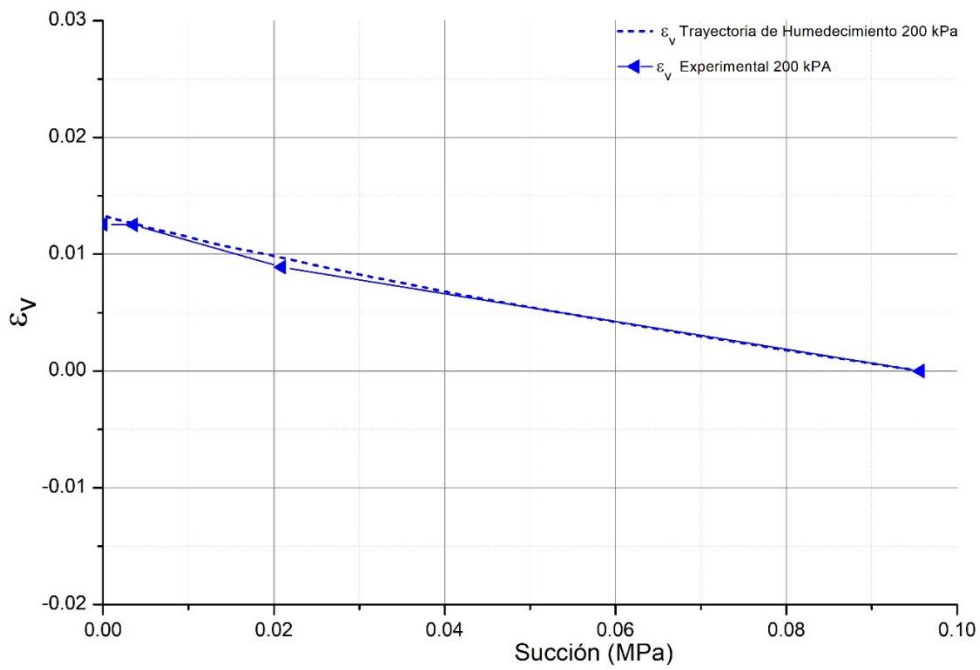


Figura 4-63.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

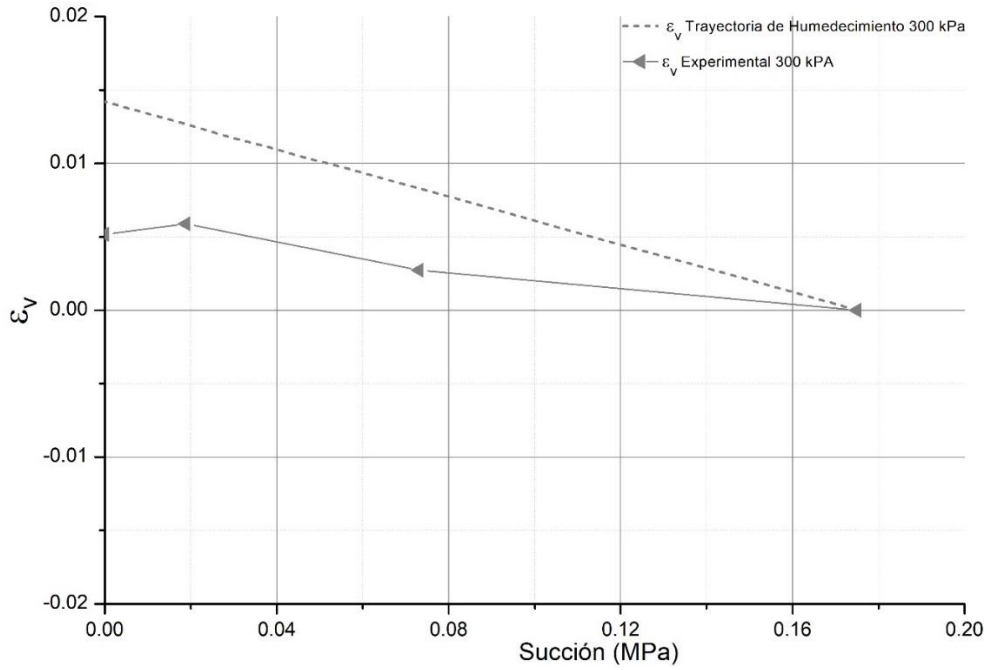


Figura 4-64 Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

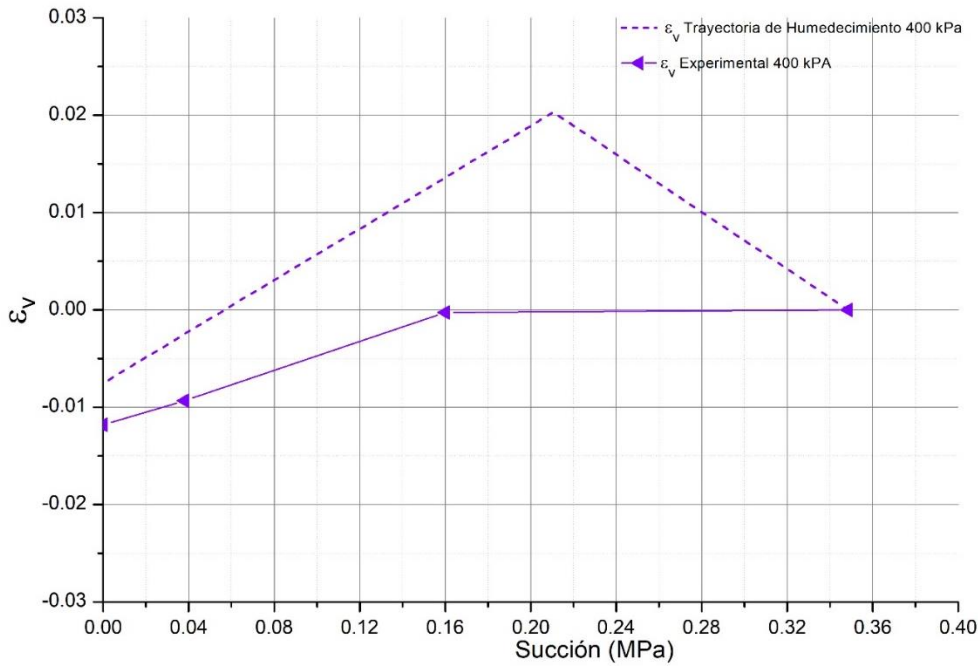
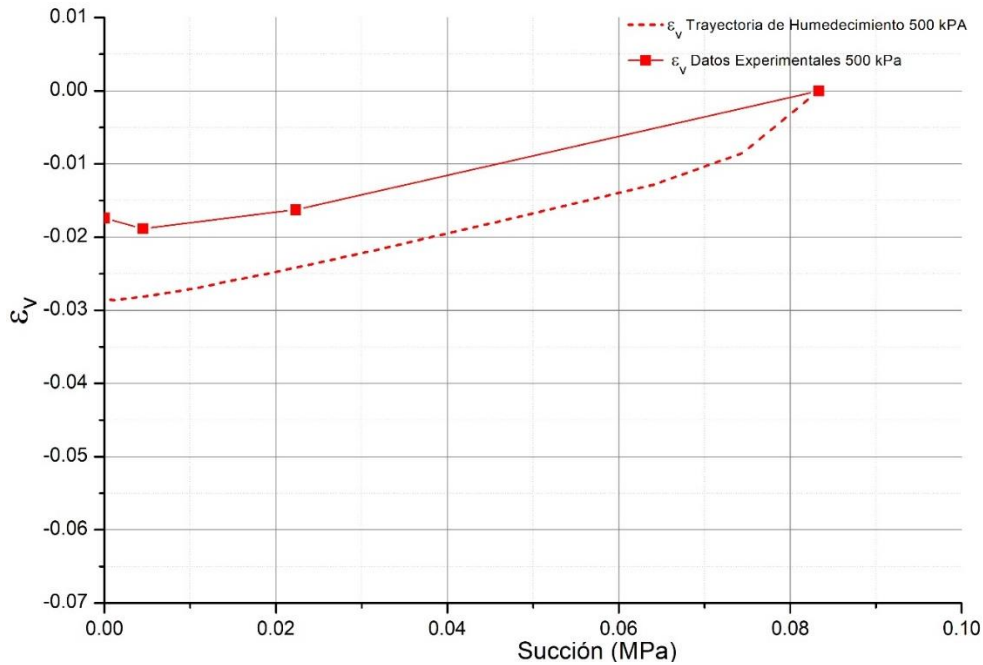


Figura 4-65.- Deformación Volumétrica en muestra a 400 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).



**Figura 4-66.-** Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con  $w_0 = 23.77\%$  (Humedecimiento).

Por medio de los valores de tabla 4-27 en conjunto de los valores en tabla 4-29, es posible modelar el grupo de muestras secadas al horno, generando el plano  $s - p$  (Figura 4-67), donde se presenta un estado inicial de succión al instante del incremento de carga y en punto “C” el final de la consolidación por carga, generando una reducción de succión y posteriormente se generan los incrementos de humedad.

**Tabla 4-29.-** Parámetros para muestra dentro del Modelo (humedecimiento).

Carga =	50 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	Prensa Tria.
$Gw_{0(w=23.77\%)} =$	22.26%	23.87%	19.85%	23.94%	22.58%
$s_{0(w=23.77\%)} =$	2.119 MPa	1.925 MPa	2.457 MPa	1.917 MPa	2.078 MPa

Obtenido el modelo de Barcelona es posible generar las deformaciones volumétricas como lo marca Alonso (1990 y 1999) generado por el incremento de humedad y el decremento de succión se genera la respuesta para cada carga en figura 4-68 a 4-71.

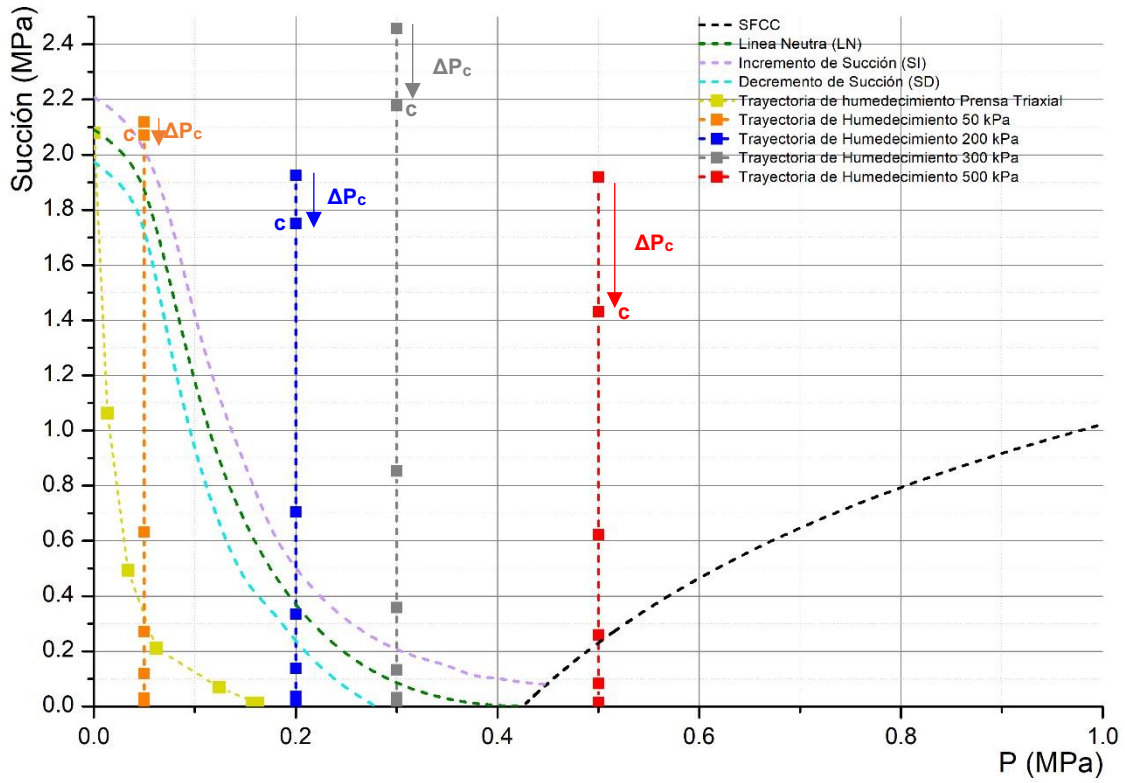


Figura 4-67.- Gráfica P vs S de muestra ensayadas en  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

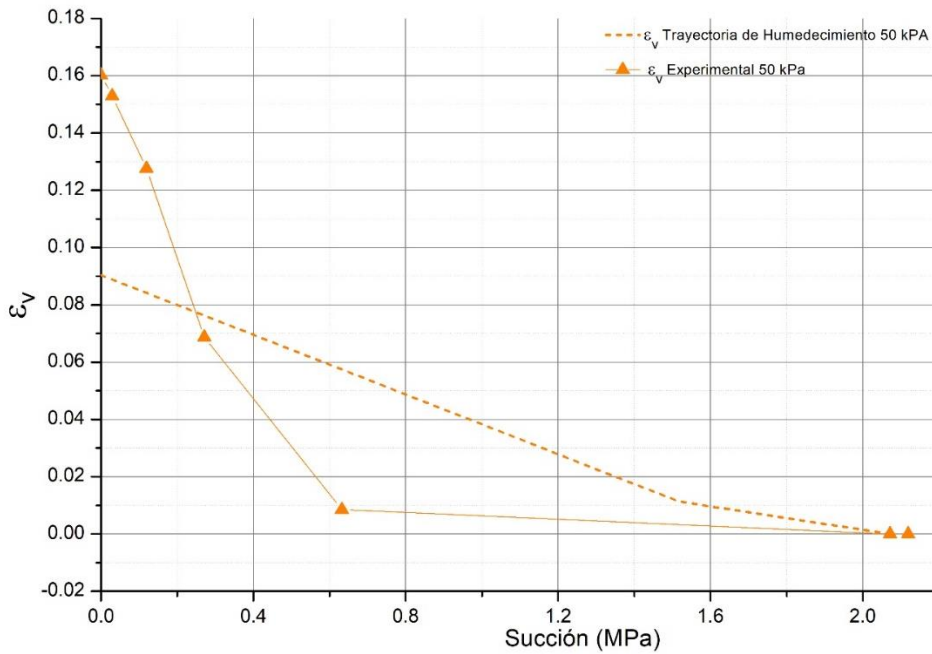
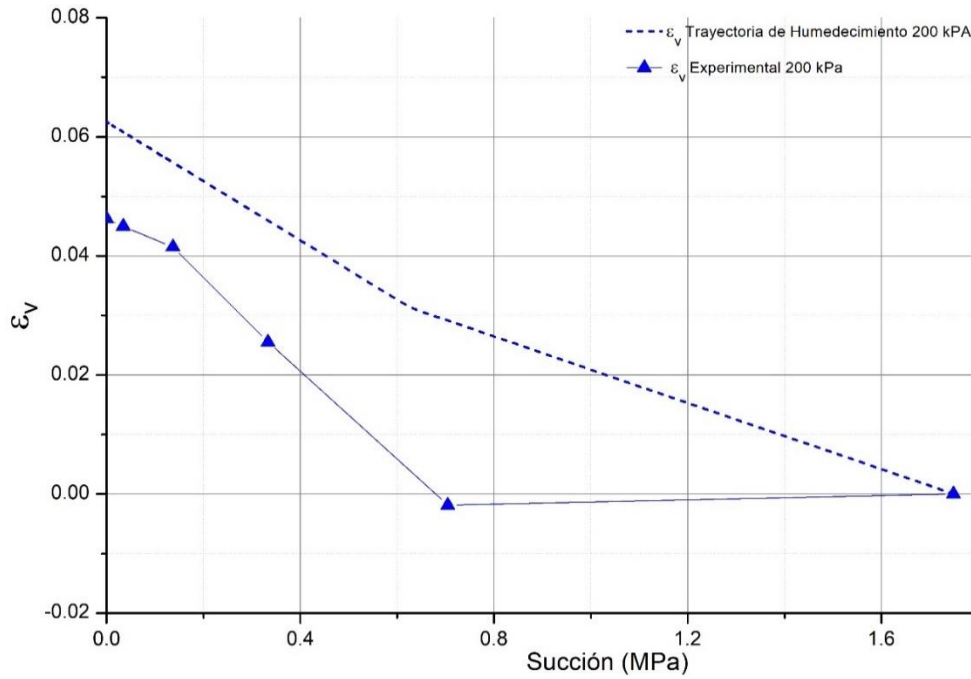
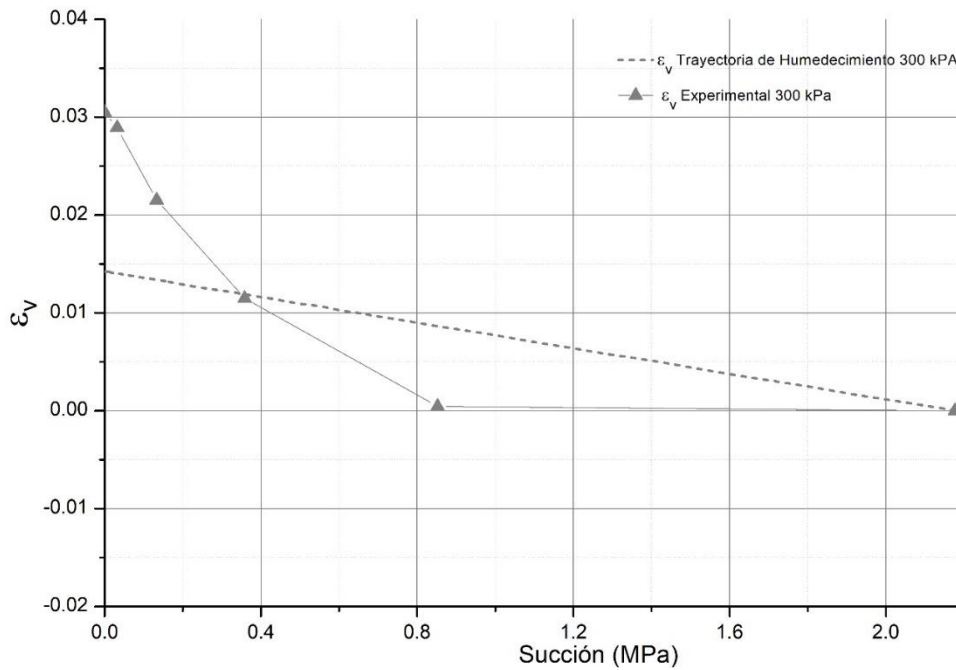


Figura 4-68 .- Deformación Volumétrica en muestra a 50 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

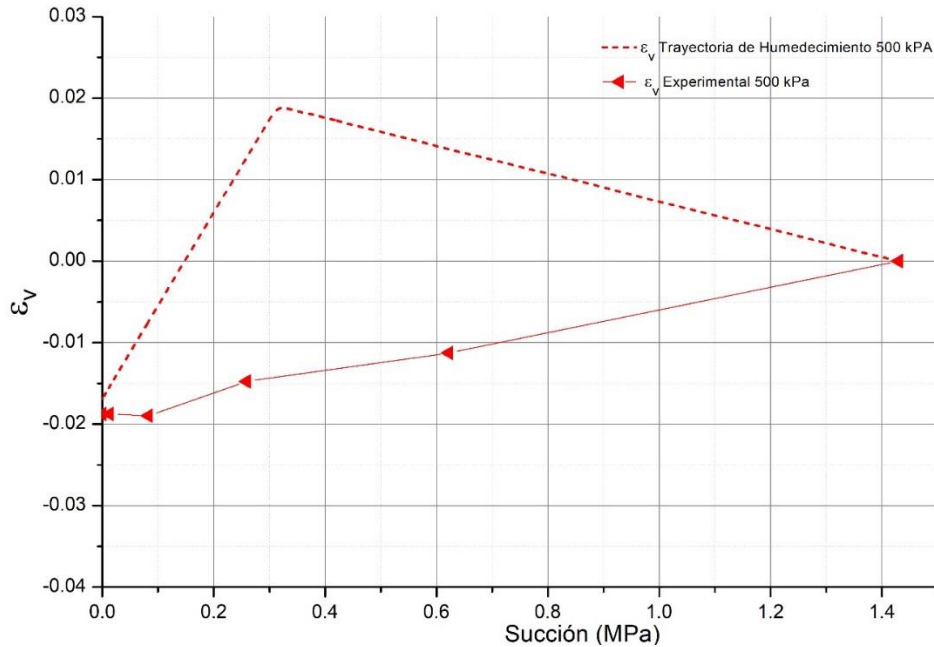




**Figura 4-69.- Deformación Volumétrica en muestra a 200 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-70.- Deformación Volumétrica en muestra a 300 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).**



**Figura 4-71** Deformación Volumétrica en muestra a 500 kPa con  $W_0 = 7.85\%$  (Humedecimiento).

Los resultados expuestos para el modelo básico de Barcelona (BBM) y el Modelo Expansivo de Barcelona (BexM) exponen una concavidad de la SFCC lo cual es resultado de los parámetros “ $r$ ” y “ $\beta$ ” dentro de la formulación para obtener la superficie propuesta por Alonso (1990). El modelo propone que al ser humedecida la muestra se generan decrementos de succión por lo que la deformación volumétrica tiende a ser lineal y dentro del plano  $s - p$  se observa el colapso, las superficies de línea neutra que delimita la superficie de expansión dentro del modelo es resultado del decremento de la succión la curva característica como se propone por (Alonso et al., 1999).

## **5. CONCLUSIONES**

En este trabajo se desarrolla un modelo elastoplástico formulado en términos de esfuerzos. Se utiliza la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop 1959 haciendo el parámetro  $\chi$  igual al grado de saturación. De tal manera que se involucra la curva característica y la trayectoria de secado-humedecimiento. De tal manera que se cumplió con el objetivo de la investigación.

El modelo confirma que no es necesario considerar una superficie de fluencia adicional a la Superficie de colapso por carga como propone el BEXM. Además, se obtienen valores próximos al comportamiento real del material estudiado simulando expansión y colapso dependiendo de las cargas aplicadas.

Es posible obtener los parámetros del modelo mediante una serie de ensayos convencionales, dentro de los cuales las curvas de retención son las que requieren mayor cuidado y experiencia.

Se puede modelar el comportamiento de los suelos expansivos mediante las diferencias de succión y la carga aplicada.

## **6. RECOMENDACIONES**

La determinación de los parámetros del modelo se puede resumir en los siguientes procedimientos de laboratorio:

- Curva de Retención Agua – Suelo.
- Medición de volumen de muestras por intrusión de mercurio
- Curvas de compresibilidad  $p - e$  ( $S = 0$  y  $S \neq 0$ ).
- Consolidación de Expansión – Colapso.

Respecto a la parte experimental, se debe mencionar que se pudo arrastrar un error representativo por el método de labrado en cuanto a muestras completamente secas las cuales adquirieron humedad por el método de labrado, adicionalmente la evaporación de la humedad dentro de la cazuela de consolidación debido a los orificios de hidratación lo cual dejo expuesto el sello anteriormente puesto.

Indistintamente se debe mencionar que se debe inspeccionar cuando muestras sufren un alto valor de succión lo cual ocasiona que no rebase la SFCC lo que conlleva a incertidumbres dentro de la CRAS, lo cual se deberá revisar dentro de otro trabajo de investigación.

## REFERENCIAS

Aitchison, G. D. 1965. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas. Available from: <https://trid.trb.org/view/1194569>

Alonso, E. E., A. Gens, and A. Josa. 1990. A constitutive model for partially saturated soils G". *Géotechnique*. 40:405–430. doi:10.1680/geot.1990.40.3.405.

Alonso, E. E., J. Vaunat, and A. Gens. 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Eng. Geol.* 54:173–183. doi:10.1016/S0013-7952(99)00079-4.

Alonso, E., A. Gens, and D. Hight. 1987. Special problem soils. General report. Proc. 9th Eur. Conf. soil.

Araiza, A. 2012. Deformación Volumétrica en suelos no saturados. 194.

Araiza, A., and A. Olivia. 2012. Deformación volumétrica en suelos no saturados. Available from: <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/2061>

ASTM-D-2216. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. D-422, D-4318, D-2487.

ASTM-D-5298-94. 1995. Standard test method for measurement of soil potential.

ASTM, A. S. for T. and M. 1990. D 2435 Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils. *Astm D 2435-65T*. 04:196–205. doi:10.1520/D2435-96.

ASTM, A. S. for T. and M. 2003. D 5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential ( Suction ) Using Filter Paper. *ASTM Int.* 4–11. doi:10.1520/D5298-10.

ASTM, A. S. for T. and M. 2006a. D 2487 - 06 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM Stand.*

ASTM, A. S. for T. and M. 2006b. ASTM D 1557. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137:1–2. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373.

ASTM International. 2014. ASTM D2974-14: Standard Test Methods for Moisture , Ash , and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. 4. doi:10.1520/D2974-07A.2.

ASTM Standard D4546. 2014. Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils.

Baltodano-Goulding, R. 2006. Tensile strength, shear strength, and effective stress for unsaturated sand.

Bishop, A. 1959. The effective stress principle. *Tek. Ukebl.* A

Bolzon, G., B. A. Schrefler, and O. C. Zienkiewicz. 1996. Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*. 46:279–289.

- Bulut, R. 2008. Indirect Measurement of Suction.
- Burland, J. B., and J. E. B. Jennings. 1962. Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. *Géotechnique*. 12:125–144.
- Chávez, H. A. 2015. Modelo Constitutivo para suelos no saturados. 222.
- Concyteq. 2002. Uso actual y potencial del suelo en los municipios conurbados de Querétaro.
- Crespo Villalaz, C. 2007. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa.
- Crespo Villaluz, C. 2007. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa.
- Croney, D., and J. Coleman. 1958. Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. *WPM Black - Water Its Conduct. Soils*. 40:226–252.
- Croney, D., and J. Coleman. 1961. Pore pressure and suction in soil.
- Díaz-Rodríguez, J. 2014. *Mecánica de suelos: naturaleza y propiedades*.
- Elarabi, H. 1997. Damage mechanism of expansive soils Paper 47. 371–378.
- Fityus, S., and O. Buzzi. 2009. The place of expansive clays in the framework of unsaturated soil mechanics. *Appl. Clay Sci*. 43:150–155.
- Franco, A. M. 2005. Estudios de expansión de suelos basado en su mineralogía.
- Fredlund, D. G., and N. R. Morgenstern. 1977. Stress State Variables for Saturated and Unsaturated Soils. *J. Geotech. Div*. 103:447–466.
- Fredlund, D. G., and H. Rahardjo. 1993. Introduction to Unsaturated Soil Mechanics. *Unsaturated Soil Mech*. 1–19.
- Fredlund, D., and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils.
- Fredlund, D., H. Rahardjo, and M. Fredlund. 2012. Unsaturated soil mechanics in engineering practice.
- Galaviz-González, R. 2013. Predicción de asentamientos de cimentaciones superficiales mediante análisis de interacción suelo expansivo-estructura de cimentación.
- Gromko, G. J. Review of Expansive Soils.
- Hoffmann, C. 2005. Caracterización hidromecánica de mezclas de pellets de bentonita. Estudio experimental y constitutivo.
- Hoffmann, C., E. E. Alonso, and E. Romero. 2007. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures. *Phys. Chem. Earth*. 32:832–849..
- Houslby, G. 1997. The work input to an unsaturated granular material.

Juarez Badillo, E. 1975. Constitutive relationships for soils. Symp. Recent Dev. Anal. Soil Behav. 1:27.

Lambe, T. W., and R. V Whitman. 1969. Soil Mechanics. Soil Mech. Found. Eng. 365:576.

Loret, B., and N. Khalili. 2000. A three-phase model for unsaturated soils. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 24:893–927.

Lu, N., and W. J. Likos. 2004. Unsaturated soil mechanics.

Lu, N., and W. J. Likos. 2006. Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 132:131–142.

Nuth, M., and L. Laloui. 2007. Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 32:771–801.

Oberg, A., ... G. S.-O. U. S., and undefined 1995. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils.

Pousada Presa, E. (UPM), and V. (UPM) Escario. Mabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada.

Rojas, E., and O. Chávez. 2013. Volumetric behavior of unsaturated soils. Can. Geotech. J. 222:209–222.

Rojas González, E. 2008. Equivalent Stress Equation for Unsaturated Soils. II: Solid-Porous Model. 336–346.

Rojas González, E. 2013. La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados. Ciencia@UAQ. 2:1–16.

Sharma, R. S., and S. Singhal. 1994. Preliminary Observation on Volumetric Behavior of Unsaturated Collapsible Loess. 21.

Sheng, D. 2011. Constitutive modelling of unsaturated soils: Discussion of fundamental principles. Unsaturated soils. 1:91–112.

Sheng, D., A. Gens, D. G. Fredlund, and S. W. Sloan. 2008. Unsaturated soils: From constitutive modelling to numerical algorithms. Comput. Geotech. 35:810–824.

Sun, D., D. Sheng, and Y. Xu. 2007. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities. Can. Geotech. J. 44:673–686.

Tamagnini, R. 2004. An extended Cam-clay model for unsaturated soils with hydraulic hysteresis. Géotechnique. 54:223–228.

Terzaghi, K., and O. Fröhlich. 1936. Theorie der Setzung von Tonschichten: eine Einführung in die analytische Tonmechanik.

Vanapalli, S. K., D. G. Fredlund, and D. E. Pufahl. 1996. The relationship between

the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till. *Geotech. Test. J.* 19:259–268.

Wheeler, S. J., R. S. Sharma, and M. S. R. Buisson. 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress–strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*. 53:41–54.

Wheeler, S. J., R. S. Sharman, and S. R. Buisson. 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress - strain behaviour in unsaturated soils. 14.

Zazueta Rodríguez, R. Modelo Constitutivo para suelos expansivos a partir de la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop.pdf.

Zepeda Garrido, J. A. 2004. *Mecánica de Suelos no Saturados*. Soc. Mex. Mecánica Suelos, AC, Univ. Autónoma Querétaro. 34–37.

Zepeda Garrido, J. G., and S. Me. de M. de suelos AC. 2004. *Mécanica de suelos no saturados*.

Zhou, A. N., D. Sheng, S. W. Sloan, and A. Gens. 2012. Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress-saturation space. II: Constitutive relationships and validations. *Comput. Geotech.* 43:111–123.

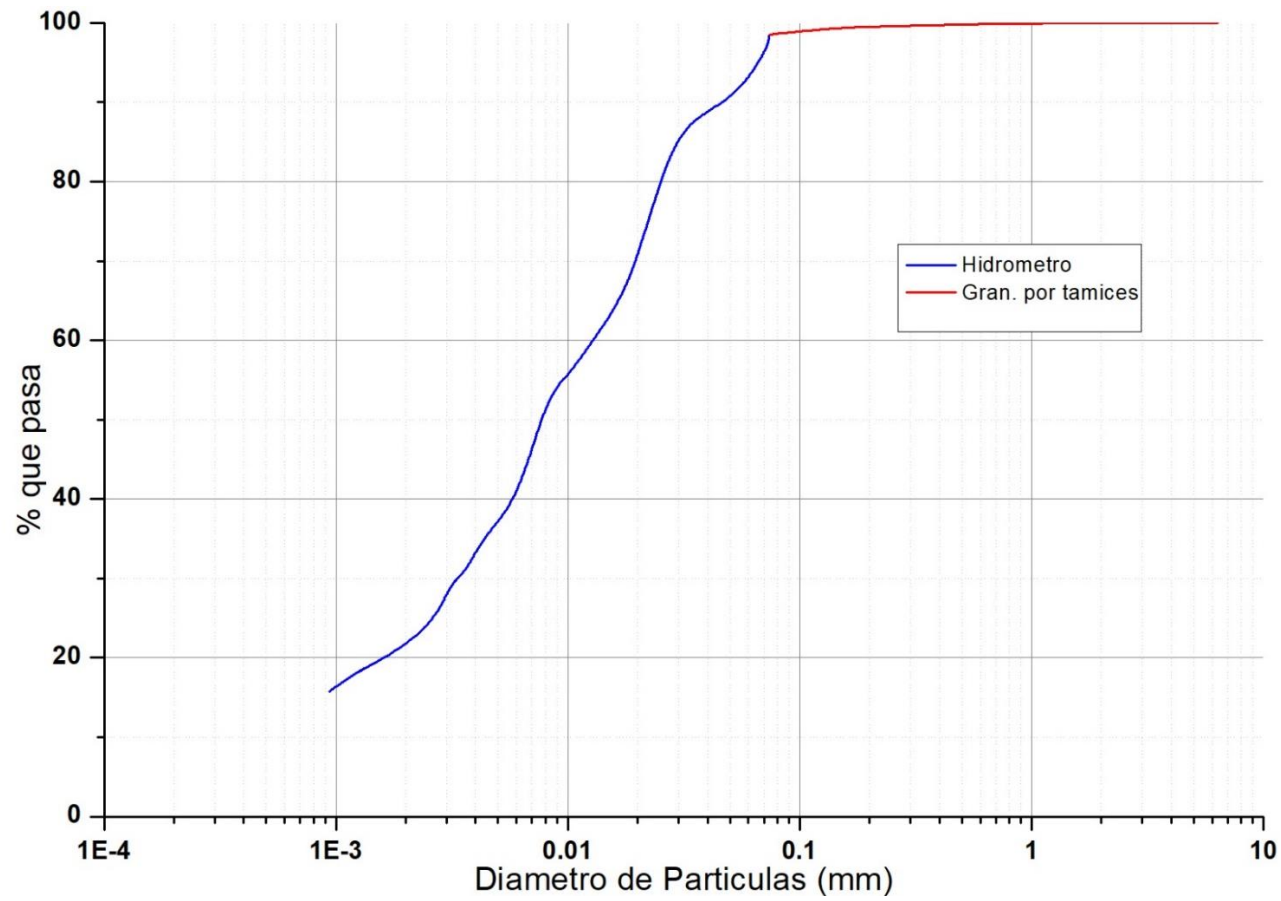
Zur, A., G. W.-I. J. of R. M. and Mining, and undefined 1975. A study of collapse phenomena of an undisturbed loess: Conference. Session four. 5F, 11R. PROC. EIGHTH INT. CONF. ON SOIL MECH. FOUND. ENGG. Pergamon.



## ANEXOS

### ANEXO A (Propiedades índice y Proctor Modificada)

#### ANEXO A-1 (Granulometría por tamices eh hidrómetro).



ANEXO A-2 (Datos de Limites de Atterberg).

Limite Liquido					Limite Plastico			
# Capsula	W <sub>Suelo seco</sub> gr.	W <sub>Agua</sub> gr.	N° de Golpes	W (%)	# Capsula	W <sub>Suelo seco</sub> gr	W <sub>agua</sub> gr	W (%)
1v'	8.837	5.706	91	64.56942				
2v	10.894	7.5	57	68.84524	45v	0.2345	0.0701	0.298934
3v	11.609	8.467	32	72.93479	4v	0.1788	0.0416	0.232662
5v	9.294	7.358	9	79.16936	21	0.1542	0.0267	0.173152

ANEXO A-3 (Datos de prueba Proctor Modificada de suelo de Jurica).

Proctor Modificada									
Muestra	W <sub>M+S</sub> kg	W <sub>suelo</sub> Kg	W <sub>sueloseco</sub> Kg	W <sub>agua</sub> kg	γ <sub>m</sub> kg/m <sup>3</sup>	W %	γ <sub>d</sub> kg/m <sup>3</sup>	Sw %	e Unid.
C <sub>10</sub>	3.662	1.638	1.377	0.261	1735.471	18.93%	1459.269	61.76%	0.809125
C <sub>7</sub>	3.752	1.728	1.410	0.318	1831.159	22.52%	1494.554	77.58%	0.766414
C <sub>6</sub>	3.854	1.830	1.456	0.374	1939.669	25.72%	1542.875	95.48%	0.711092
C <sub>9</sub>	3.819	1.795	1.390	0.405	1901.860	29.12%	1472.909	97.03%	0.792371
C <sub>8</sub>	3.788	1.764	1.340	0.424	1868.985	31.63%	1419.854	97.18%	0.859345

**ANEXO B (Datos de Curvas de Retención Agua – Suelo de Jurica).**

Succiones seco a humedo (humedecimiento)											
#Frasco	W <sub>frasco</sub>	W <sub>SueloSeco</sub>	W <sub>S inicio succ.</sub>	W <sub>S final succ.</sub>	W(%) real	W <sub>papel seco 1</sub>	W <sub>papel seco 2</sub>	W <sub>papel seco 3</sub>	W <sub>papel humedo 3</sub>	W <sub>papel humedo 2</sub>	W <sub>papel humedo 1</sub>
	grs	grs	grs	grs	%	grs	grs	grs	grs	grs	grs
1	212.82	73.8391	114.4691	73.8991	54.90%	0.1902	0.1864	0.1861	0.275	0.4562	0.4846
2	212.12	71.3345	106.1045	71.4945	48.41%	0.1868	0.1837	0.1825	0.2615	0.4042	0.4358
3	214.43	74.6021	104.7321	73.8021	41.91%	0.1865	0.1903	0.1888	0.2614	0.2709	0.2828
4	213.71	73.3798	97.0998	73.3798	32.32%	0.1896	0.2045	0.2055	0.2554	0.2576	0.2391
5	214.02	74.443	94.793	74.443	27.34%	0.1911	0.1866	0.206	0.2487	0.227	0.3222
6	213.98	67.4166	82.1166	67.4166	21.80%	0.194	0.1901	0.2002	0.2299	0.2203	0.2231
7	213.29	76.6743	88.2543	76.6743	15.10%	0.195	0.1921	0.1964	0.2126	0.2102	0.2116
8	219.11	78.088	86.038	78.088	10.18%	0.1935	0.1931	0.2012	0.2111	0.2045	0.2053
9	213.94	74.2112	78.2212	74.2112	5.40%	0.1966	0.1975	0.1981	0.2034	0.2032	0.2053
10	212.9	76.0169	76.1769	75.9969	0.24%	0.1958	0.1866	0.1938	0.1934	0.1869	0.1955

W <sub>water papel 2</sub>	W(%) <sub>papel 2</sub>	suc. Matrica	Succión	e	S <sub>w</sub>
grs	%		kPa	adim.	%
0.2698	144.74%	0.457976395	2.870624551	1.511002639	96.14%
0.2205	120.03%	0.791559064	6.188124798	1.409779116	91.28%
0.0806	42.35%	2.027609564	106.5637669	1.360430614	78.37%
0.0531	25.97%	3.304266504	2014.960346	1.228338092	69.47%
0.0404	21.65%	3.640419078	4369.372573	1.290380884	55.93%
0.0302	15.89%	4.089451341	12287.15513	1.375983606	41.84%
0.0181	9.42%	4.593012493	39175.31466	1.263671396	31.55%
0.0114	5.90%	4.867103573	73638.26937	1.185073024	22.68%
0.0057	2.89%	5.102174684	126524.5157	1.130624095	12.62%
0.0003	0.16%	5.314475884	206288.9115	1.037995772	0.54%

Succiones humedo a seco (secado)											
#Frasco	W <sub>frasco</sub>	W <sub>SueloSeco</sub>	W <sub>S inicio succ.</sub>	W <sub>S final succ.</sub>	W(%) real	W <sub>papel seco 1</sub>	W <sub>papel seco 2</sub>	W <sub>papel seco 3</sub>	W <sub>papel humedo 3</sub>	W <sub>papel humedo 2</sub>	W <sub>papel humedo 1</sub>
	grs	grs	grs	grs	%	grs	grs	grs	grs	grs	grs
					0.24%						
I	215.95	123.98	82.08	0.43	0.53%	0.187	0.1768	0.1875	0.1884	0.1771	0.1884
II	215.44	129.127	86.847	4.18	5.06%	0.188	0.1865	0.189	0.1913	0.1882	0.1904
V	215.96	110.053	77.883	8.57	12.36%	0.19	0.1902	0.1949	0.2062	0.2001	0.1998
IV	213.04	116.082	87.542	12.2	16.19%	0.1935	0.1909	0.1893	0.202	0.203	0.2063
III	215.27	118.09	95.71	18.24	23.54%	0.1912	0.1933	0.1907	0.2166	0.2165	0.2163
VI	215.56	118.24	101.04	25.09	33.03%	0.1892	0.1982	0.1801	0.2282	0.2365	0.2405
VII	216.38	113.629	101.929	28.97	39.71%	0.2123	0.207	0.2148	0.2579	0.2542	0.2721
VIII	216.25	105.467	99.537	32.38	48.22%	0.1938	0.192	0.1905	0.2398	0.257	0.3203
IX	215.13	108.411	104.891	35.81	51.84%	0.2033	0.2132	0.1915	0.262	0.4583	0.4753
X	216.39	106.979	106.979	40.22	60.25%	0.1952	0.1937	0.1952	0.2896	0.493	0.5048

W <sub>water papel 2</sub>	W(%) <sub>papel 2</sub>	suc. Matrica	Succión	e	S <sub>w</sub>
grs	%		kPa	adim.	%
			206288.9115		
0.0003	0.17%	5.313781674	205959.4267	1.609830313	98.80%
0.0017	0.91%	5.255991957	180298.435	1.489030299	91.91%
0.0099	5.21%	4.921526814	83469.30817	1.581325624	80.49%
0.0121	6.34%	4.833238869	68114.38951	1.459756992	71.81%
0.0232	12.00%	4.3920388	24662.59663	1.395262127	62.51%
0.0383	19.32%	3.821667003	6632.343379	1.153344741	53.89%
0.0472	22.80%	3.550729469	3554.098571	1.154431463	37.03%
0.065	33.85%	2.689760417	489.508702	1.141375422	28.60%
0.2451	114.96%	0.860006567	7.244469137	1.08205346	12.34%
0.2993	154.52%	0.32601652	2.118441718	1.022725326	1.36%

ANEXO B-1 (Obtención de Curvas de Retención Agua – Suelo de Jurica por método de Sheng).

Succiones seco a humedo (humedecimiento) Metodo Sheng					
S <sub>we</sub> %	Succión kPa	θ %	Minimos Cuadrados		Parametros del modelo
			Yest-Y	Error Cuad.	
97.29%	2.870624551	96.70%	-0.00596239	3.55501E-05	Aw = 56196431.8
92.34%	6.188124798	95.58%	0.032355187	0.001046858	Mw = 0.386919594
79.21%	106.5637669	87.31%	0.080941604	0.006551543	Nw = 22.28310201
70.16%	2014.960346	65.67%	-0.04489554	0.002015609	
56.37%	4369.372573	56.80%	0.004328695	1.87376E-05	
42.03%	12287.15513	43.23%	0.012024827	0.000144596	
31.56%	39175.31466	27.26%	-0.043046618	0.001853011	
22.54%	73638.26937	19.28%	-0.032587159	0.001061923	
12.30%	126524.5157	13.36%	0.010644361	0.000113302	
0.00%	206288.9115	8.98%	0.089804727	0.008064889	
				0.021772349	

Succiones humedo a seco (secado) Metodo Sheng					
S <sub>we</sub> %	Succión kPa	θ %	Minimos Cuadrados		Parametros del modelo
			Yest-Y	Error Cuad.	
100.00%	2.118441718	99.32%	-0.68%	4.68345E-05	Ad = 56196431.8
92.98%	7.244469137	98.73%	5.75%	0.003300558	Md = 0.505339063
81.37%	489.508702	89.82%	8.45%	0.007142907	Nd = 38.75193717
72.53%	3554.098571	74.71%	0.021737302	0.00047251	
63.07%	6632.343379	67.09%	0.040284752	0.001622861	
54.30%	24662.59663	46.24%	-0.080576829	0.006492625	
37.14%	68114.38951	27.80%	-0.093427719	0.008728739	
28.56%	83469.30817	24.26%	-0.042966868	0.001846152	
12.01%	180298.435	12.59%	0.00579517	3.3584E-05	
0.84%	205959.4267	10.94%	0.101048662	0.010210832	
				0.051832129	

## ANEXO C (Resultados de ensayos de consolidación experimental y cálculos teóricos).

### C.1.1 Consolidación Isotrópica.

Etapa	Presion kPa	$\Delta H$ mm	$H_x$ mm	$w_x$ %	$Hw_x$ mm	e
Inicio	1	0	20.1	6.00%	1.67	0.911
H.I. 1	1	1.535	21.635	15.33%	4.26	1.0570
H.I. 2	1	1.865	23.5	26.99%	7.49	1.2343
H.I. 3	1	1.745	25.245	37.10%	10.30	1.4002
H.I. 4	1	0.75	25.995	46.43%	12.89	1.4715
H.I. 5	1	0.305	26.3	55.76%	15.48	1.5005
Carga	100	-3.875	22.425	0.42	11.66217	1.132094
	300	-3.06	19.365	0.32	8.88546	0.84116
	600	-4.13	15.235	26.17%	7.266107	0.448493
Descarga	300	0.638	15.873	26.17%	7.266107	0.509152
	100	1.447	17.32	29.00%	8.052448	0.646728
	1	1.68	19	26.17%	7.27	0.8065

### C.1.2 Ensaye Triaxial.

Etapa	Tiempo Minutos	Presion Mpa	$\Delta H$ mm	$H_x$ mm	$w_x$ %	$Hw_x$ mm	e	$Sw_x$ %	S real Mpa	$\chi S$ MPa	$p'$ MPa
0	0.055	0.0001	0	19.8	8.30%	2.2015	0.97045	22.58%	0.0468	0.0106	0.0212
1	25.003	0.0135	0	19.8	12.66%	3.3585	0.97045	34.44%	0.0239	0.0082	0.0030
2	125.651	0.0339	0	19.8	17.78%	4.7160	0.97045	48.36%	0.0111	0.0054	-0.0231
3	239.904	0.0621	0	19.8	22.89%	6.0734	0.97045	62.28%	0.0047	0.0029	-0.0562
4	1252.304	0.1242	0	19.8	28.01%	7.4309	0.97045	76.20%	0.0016	0.0012	0.1254
5	1968.003	0.1627	0	19.8	33.13%	8.7883	0.97045	90.12%	0.0002	0.0002	0.1629
6	2593.504	0.1570	0	19.8	33.13%	8.7883	0.97045	90.12%	0.0002	0.0002	0.1572
7	2668.002	0.1600	0	19.8	38.25%	10.1458	0.97045	100.00%	0.0000	0.0000	0.1600

**ANEXO D (Calculo de trayectoria de humedecimiento y Superficie de Fluencia Carga Bajo Colapso).**

Los parámetros del ajuste de histéresis por medio del método Sheng son expuestos en la sección 4.3 y el parámetro de escaneo (B) se muestra a continuación en cada ensaye, y el esfuerzo efectivo que se calcula representa la trayectoria de Humedecimiento y la SFCC solo se presenta en los ensayes que ha rebasado la SFCC<sub>0</sub>.

D.1.1 Muestra cargada a 50 kPa Trayectoria de humedecimiento.

Parámetro de escaneo B = 5.9592.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
1.0062	-	63.73%	0.1611	0.5639	-1.71E-05	-0.0299	0.5639	0.4094
1.0026	-	64.00%	0.1571	0.5533	-1.73E-05	-0.0314	0.5318	0.3903
0.9864	-	65.00%	0.1433	0.5158	-1.82E-05	-0.0376	0.4054	0.3135
0.9726	-	66.00%	0.1304	0.4800	-1.92E-05	-0.0453	0.3175	0.2596
0.9609	-	67.00%	0.1184	0.4461	-2.02E-05	-0.0546	0.2544	0.2204
0.9520	0	67.37%	0.1143	0.4340	-2.06E-05	-0.0586	0.2146	0.1945
0.9617	0.005	68.00%	0.1074	0.4139	-2.13E-05	-0.0661	0.1824	0.1740
0.9713	0.0099	69.00%	0.0971	0.3833	-2.24E-05	-0.0803	0.1539	0.1562
0.9800	0.0144	70.00%	0.0876	0.3543	-2.37E-05	-0.0980	0.1311	0.1418
0.9879	0.0184	71.00%	0.0788	0.3268	-2.50E-05	-0.1202	0.1124	0.1298
0.9953	0.0222	72.00%	0.0707	0.3009	-2.64E-05	-0.1481	0.0969	0.1198
1.0002	0.0247	73.00%	0.0632	0.2763	-2.80E-05	-0.1833	0.0869	0.1135
1.0056	0.0275	74.00%	0.0564	0.2530	-2.96E-05	-0.2284	0.0770	0.1070
1.0121	0.0308	75.00%	0.0500	0.2311	-3.14E-05	-0.2862	0.0664	0.0998
1.0181	0.0339	76.00%	0.0443	0.2105	-3.33E-05	-0.3611	0.0573	0.0936

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
1.0222	0.036	76.58%	0.0411	0.1990	-3.45E-05	-0.4151	0.0516	0.0895
1.0254	0.0376	77.00%	0.0390	0.1910	-3.54E-05	-0.4591	0.0475	0.0865
1.0304	0.0402	78.00%	0.0342	0.1728	-3.77E-05	-0.5885	0.0411	0.0820
1.0352	0.0427	79.00%	0.0298	0.1556	-4.03E-05	-0.7610	0.0354	0.0780
1.0398	0.045	80.00%	0.0259	0.1396	-4.30E-05	-0.9940	0.0304	0.0744
1.0440	0.0472	81.00%	0.0223	0.1246	-4.61E-05	-1.3128	0.0261	0.0711
1.0478	0.0491	82.00%	0.0191	0.1106	-4.95E-05	-1.7551	0.0224	0.0684
1.0511	0.0508	83.00%	0.0162	0.0976	-5.34E-05	-2.3788	0.0193	0.0660
1.0547	0.0527	84.00%	0.0136	0.0856	-5.77E-05	-3.2745	0.0162	0.0636
1.0580	0.0544	85.00%	0.0114	0.0744	-6.25E-05	-4.5871	0.0135	0.0615
1.0611	0.0559	86.00%	0.0094	0.0642	-6.81E-05	-6.5557	0.0112	0.0596
1.0655	0.0581	86.74%	0.0080	0.0572	-7.27E-05	-8.6646	0.0080	0.0570
1.0661	0.0585	87.00%	0.0076	0.0548	-	-	0.0076	0.0566
1.0683	0.0596	88.00%	0.0061	0.0462	-	-	0.0061	0.0554
1.0702	0.0606	89.00%	0.0048	0.0385	-	-	0.0048	0.0543
1.0720	0.0615	90.00%	0.0037	0.0315	-	-	0.0037	0.0533
1.0734	0.0622	91.00%	0.0028	0.0253	-	-	0.0028	0.0525
1.0747	0.0629	92.00%	0.0020	0.0198	-	-	0.0020	0.0519
1.0757	0.0634	93.00%	0.0014	0.0151	-	-	0.0014	0.0513
1.0766	0.0638	94.00%	0.0009	0.0110	-	-	0.0009	0.0509
1.0772	0.0642	95.00%	0.0006	0.0076	-	-	0.0006	0.0505
1.0783	0.0647	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0500



D.1.2 Muestra cargada a 200 kPa.

Parámetro de escaneo B = 6.3415.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$d_{s_{ew}}/d_s$	$d_{s_{ew}}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= P <sub>c</sub> + A*B MPa
1.0472	-	63.30%	0.1674	0.5808	-1.67E-05	-0.0446	0.5808	0.5676
1.0278	-	64.00%	0.1571	0.5533	-1.73E-05	-0.0508	0.4980	0.5187
1.0151	-	65.00%	0.1433	0.5158	-1.82E-05	-0.0614	0.4439	0.4886
0.9907	-	66.00%	0.1304	0.4800	-1.92E-05	-0.0745	0.3550	0.4343
0.9704	-	67.00%	0.1184	0.4461	-2.02E-05	-0.0906	0.2882	0.3931
0.9535	-	68.00%	0.1074	0.4139	-2.13E-05	-0.1107	0.2370	0.3612
0.9394	-	69.00%	0.0971	0.3833	-2.24E-05	-0.1358	0.1971	0.3360
0.9273	-	70.00%	0.0876	0.3543	-2.37E-05	-0.1673	0.1653	0.3157
0.9171	-	71.00%	0.0788	0.3268	-2.50E-05	-0.2070	0.1397	0.2992
0.9082	-	72.00%	0.0707	0.3009	-2.64E-05	-0.2576	0.1188	0.2855
0.9045	-	73.00%	0.0632	0.2763	-2.80E-05	-0.3222	0.1094	0.2799
0.8982	0	73.83%	0.0575	0.2569	-2.93E-05	-0.3897	0.0957	0.2707
0.9002	0.001	74.00%	0.0564	0.2530	-2.96E-05	-0.4055	0.0869	0.2643
0.9028	0.0024	75.00%	0.0500	0.2311	-3.14E-05	-0.5137	0.0746	0.2560
0.9052	0.0037	76.00%	0.0443	0.2105	-3.33E-05	-0.6554	0.0641	0.2487
0.9073	0.0048	77.00%	0.0390	0.1910	-3.54E-05	-0.8428	0.0551	0.2424
0.9092	0.0058	78.00%	0.0342	0.1728	-3.77E-05	-1.0932	0.0473	0.2369
0.9110	0.0067	79.00%	0.0298	0.1556	-4.03E-05	-1.4313	0.0406	0.2320
0.9125	0.0076	80.00%	0.0259	0.1396	-4.30E-05	-1.8937	0.0347	0.2278
0.9139	0.0083	81.00%	0.0223	0.1246	-4.61E-05	-2.5347	0.0296	0.2240

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9166	0.0097	81.42%	0.0209	0.1186	-4.75E-05	-2.8738	0.0209	0.2170
0.9171	0.01	82.00%	0.0191	0.1106	-	-	0.0191	0.2156
0.9180	0.0104	83.00%	0.0162	0.0976	-	-	0.0162	0.2134
0.9188	0.0108	84.00%	0.0136	0.0856	-	-	0.0136	0.2114
0.9195	0.0112	85.00%	0.0114	0.0744	-	-	0.0114	0.2097
0.9201	0.0116	86.00%	0.0094	0.0642	-	-	0.0094	0.2080
0.9207	0.0119	87.00%	0.0076	0.0548	-	-	0.0076	0.2066
0.9212	0.0121	88.00%	0.0061	0.0462	-	-	0.0061	0.2054
0.9217	0.0124	89.00%	0.0048	0.0385	-	-	0.0048	0.2043
0.9221	0.0126	90.00%	0.0037	0.0315	-	-	0.0037	0.2033
0.9221	0.0126	90.12%	0.0036	0.0307	-	-	0.0036	0.2032
0.9224	0.0128	91.00%	0.0028	0.0253	-	-	0.0028	0.2025
0.9227	0.0129	92.00%	0.0020	0.0198	-	-	0.0020	0.2019
0.9229	0.013	93.00%	0.0014	0.0151	-	-	0.0014	0.2013
0.9231	0.0131	94.00%	0.0009	0.0110	-	-	0.0009	0.2009
0.9232	0.0132	95.00%	0.0006	0.0076	-	-	0.0006	0.2005
0.9235	0.0133	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.2000

### D.1.3 Muestra cargada a 300 kPa.

Parámetro de escaneo B = 6.0084.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9819	-	64.35%	0.1522	0.5400	-1.76E-05	-0.0293	0.5400	0.6475
0.9764	-	65.00%	0.1433	0.5158	-1.82E-05	-0.0401	0.5158	0.6352
0.9405	-	66.00%	0.1304	0.4800	-1.92E-05	-0.0482	0.3926	0.5591
0.9138	-	67.00%	0.1184	0.4461	-2.02E-05	-0.0583	0.3085	0.5067
0.8929	-	68.00%	0.1074	0.4139	-2.13E-05	-0.0706	0.2473	0.4682
0.8762	-	69.00%	0.0971	0.3833	-2.24E-05	-0.0859	0.2016	0.4391
0.8628	-	70.00%	0.0876	0.3543	-2.37E-05	-0.1050	0.1666	0.4166
0.8518	-	71.00%	0.0788	0.3268	-2.50E-05	-0.1289	0.1392	0.3988
0.8427	-	72.00%	0.0707	0.3009	-2.64E-05	-0.1590	0.1173	0.3845
0.8393	-	73.00%	0.0632	0.2763	-2.80E-05	-0.1971	0.1084	0.3791
0.8324	-	74.00%	0.0564	0.2530	-2.96E-05	-0.2459	0.0927	0.3686
0.8259	-	75.00%	0.0500	0.2311	-3.14E-05	-0.3086	0.0786	0.3589
0.8204	-	76.00%	0.0443	0.2105	-3.33E-05	-0.3899	0.0668	0.3508
0.8156	-	77.00%	0.0390	0.1910	-3.54E-05	-0.4964	0.0570	0.3439
0.8117	0	77.88%	0.0347	0.1749	-3.75E-05	-0.6180	0.0492	0.3383
0.8123	0.0003	78.00%	0.0342	0.1728	-3.77E-05	-0.6373	0.0458	0.3357
0.8133	0.0009	79.00%	0.0298	0.1556	-4.03E-05	-0.8255	0.0392	0.3310
0.8143	0.0014	80.00%	0.0259	0.1396	-4.30E-05	-1.0800	0.0335	0.3268
0.8151	0.0019	81.00%	0.0223	0.1246	-4.61E-05	-1.4288	0.0286	0.3231
0.8159	0.0023	82.00%	0.0191	0.1106	-4.95E-05	-1.9136	0.0242	0.3199
0.8166	0.0027	83.00%	0.0162	0.0976	-5.34E-05	-2.5986	0.0205	0.3170
0.8172	0.003	84.00%	0.0136	0.0856	-5.77E-05	-3.5842	0.0172	0.3144
0.8177	0.0033	85.00%	0.0114	0.0744	-6.25E-05	-5.0316	0.0143	0.3121

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.8179	0.0034	85.12%	0.0111	0.0731	-6.32E-05	-5.2480	0.0132	0.3113
0.8187	0.0039	86.00%	0.0094	0.0642	-	-	0.0094	0.3080
0.8191	0.0041	87.00%	0.0076	0.0548	-	-	0.0076	0.3066
0.8194	0.0042	88.00%	0.0061	0.0462	-	-	0.0061	0.3054
0.8196	0.0044	89.00%	0.0048	0.0385	-	-	0.0048	0.3043
0.8199	0.0045	90.00%	0.0037	0.0315	-	-	0.0037	0.3033
0.8201	0.0046	91.00%	0.0028	0.0253	-	-	0.0028	0.3025
0.8202	0.0047	92.00%	0.0020	0.0198	-	-	0.0020	0.3019
0.8203	0.0047	92.19%	0.0019	0.0189	-	-	0.0019	0.3017
0.8204	0.0048	93.00%	0.0014	0.0151	-	-	0.0014	0.3013
0.8205	0.0048	94.00%	0.0009	0.0110	-	-	0.0009	0.3009
0.8206	0.0049	95.00%	0.0006	0.0076	-	-	0.0006	0.3005
0.8207	0.005	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.3000

D.1.4 Muestra cargada a 400 kPa.

Parámetro de escaneo B = 5.1382.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'	$\Delta p_0$	SFCC
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa		Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = $P_c + A * B$ MPa		Mpa
0.9735	-	56.82%	0.1522	0.5400	-1.21E-05	-0.0037	0.8858	0.9033	0.0100	0.9033
0.9721	-	57.00%	0.1433	0.5158	-1.23E-05	-0.0038	0.8762	0.8994	0.0100	0.8994
0.9386	-	58.00%	0.1304	0.4800	-1.29E-05	-0.0044	0.7010	0.8066	0.0101	0.8774
0.9058	-	59.00%	0.1184	0.4461	-1.35E-05	-0.0051	0.5467	0.7225	0.0103	0.8559
0.8814	-	60.00%	0.1074	0.4139	-1.42E-05	-0.0059	0.4394	0.6637	0.0103	0.8348
0.8626	-	61.00%	0.0971	0.3833	-1.49E-05	-0.0069	0.3620	0.6208	0.0103	0.8140
0.8478	-	62.00%	0.0876	0.3543	-1.57E-05	-0.0081	0.3040	0.5885	0.0103	0.7936
0.8388	-	62.17%	0.0788	0.3268	-1.58E-05	-0.0083	0.2723	0.5693	0.0103	0.7903
0.8296	-	63.00%	0.0707	0.3009	-1.65E-05	-0.0095	0.2383	0.5502	0.0103	0.7738
0.8213	-	64.00%	0.0632	0.2763	-1.73E-05	-0.0112	0.2083	0.5333	0.0101	0.7543
0.8142	-	65.00%	0.0564	0.2530	-1.82E-05	-0.0131	0.1831	0.5190	0.0100	0.7353
0.8079	-	66.00%	0.0500	0.2311	-1.92E-05	-0.0155	0.1618	0.5068	0.0099	0.7167
0.8040	-	67.00%	0.0443	0.2105	-2.02E-05	-0.0184	0.1479	0.4991	0.0097	0.6986
0.7992	-	68.00%	0.0390	0.1910	-2.13E-05	-0.0218	0.1323	0.4899	0.0096	0.6810
0.7943	-	69.00%	0.0347	0.1749	-2.24E-05	-0.0260	0.1170	0.4807	0.0094	0.6639
0.7899	-	70.00%	0.0342	0.1728	-2.37E-05	-0.0311	0.1036	0.4726	0.0093	0.6473
0.7882	0	70.21%	0.0298	0.1556	-2.39E-05	-0.0323	0.0987	0.4693	0.0093	0.6439
0.7891	0.0005	71.00%	0.0259	0.1396	-2.50E-05	-0.0374	0.0894	0.4635	0.0091	0.6312
0.7901	0.0011	72.00%	0.0223	0.1246	-2.64E-05	-0.0451	0.0794	0.4572	0.0089	0.6155
0.7910	0.0016	73.00%	0.0191	0.1106	-2.80E-05	-0.0546	0.0704	0.4514	0.0087	0.6004
0.7919	0.0021	74.00%	0.0162	0.0976	-2.96E-05	-0.0665	0.0623	0.4461	0.0085	0.5858
0.7926	0.0025	75.00%	0.0136	0.0856	-3.14E-05	-0.0815	0.0552	0.4414	0.0084	0.5717
0.7933	0.0029	76.00%	0.0114	0.0744	-3.33E-05	-0.1004	0.0493	0.4374	0.0082	0.5582
0.7940	0.0032	77.00%	0.0111	0.0731	-3.54E-05	-0.1245	0.0432	0.4332	0.0081	0.5452
0.7914	0.0018	78.00%	0.0094	0.0642	-3.77E-05	-0.1556	0.0377	0.4294	0.0079	0.5327

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa	$\Delta p_0$	SFCC Mpa
0.7879	-0.0002	78.74%	0.0076	0.0548	-3.96E-05	-0.1844	0.0309	0.4243	0.0079	0.5238
0.7874	-0.0005	79.00%	0.0061	0.0462	-	-	0.0298	0.4236	0.0078	0.5208
0.7854	-0.0016	80.00%	0.0048	0.0385	-	-	0.0259	0.4207	0.0077	0.5094
0.7835	-0.0026	81.00%	0.0037	0.0315	-	-	0.0223	0.4181	0.0076	0.4985
0.7818	-0.0036	82.00%	0.0028	0.0253	-	-	0.0191	0.4156	0.0075	0.4882
0.7803	-0.0044	83.00%	0.0020	0.0198	-	-	0.0162	0.4134	0.0074	0.4784
0.7789	-0.0052	84.00%	0.0019	0.0189	-	-	0.0136	0.4114	0.0073	0.4692
0.7776	-0.0059	85.00%	0.0014	0.0151	-	-	0.0114	0.4097	0.0072	0.4605
0.7765	-0.0065	86.00%	0.0009	0.0110	-	-	0.0094	0.4080	0.0071	0.4523
0.7755	-0.0071	87.00%	0.0006	0.0076	-	-	0.0076	0.4066	0.0070	0.4447
0.7746	-0.0076	88.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0061	0.4054	0.0070	0.4377
0.7738	-0.0081	89.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0048	0.4043	0.0069	0.4311
0.7738	-0.0081	89.06%	0.0000	0.0000	-	-	0.0047	0.4042	0.0069	0.4308
0.7731	-0.0084	90.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0037	0.4033	0.0068	0.4252
0.7726	-0.0087	91.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0028	0.4025	0.0068	0.4198
0.7721	-0.009	92.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0020	0.4019	0.0067	0.4150
0.7717	-0.0092	93.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0014	0.4013	0.0067	0.4107
0.7714	-0.0094	94.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0009	0.4009	0.0066	0.4069
0.7711	-0.0095	95.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0006	0.4005	0.0066	0.4038
0.7707	-0.0098	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.4000	0.0065	0.3965

D.1.5 Muestra cargada a 500 kPa.

Parámetro de escaneo B = 5.4011.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succión	Succión	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'	$\Delta p_0$	SFCC
unid.	%	%	T. H.	T. S.	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa	P' = $P_c + A * B$		Mpa
		(A)	MPa	Mpa			(B)	MPa		
1.0054	-	62.64%	0.1777	0.6077	-1.62E-05	-0.0124	0.6077	0.8807	0.1100	0.8807
0.9900	-	63.00%	0.1720	0.5929	-1.65E-05	-0.0132	0.5651	0.8560	0.1107	0.8742
0.9252	-	64.00%	0.1571	0.5533	-1.73E-05	-0.0155	0.3993	0.7556	0.1155	0.8597
0.8837	-	65.00%	0.1433	0.5158	-1.82E-05	-0.0184	0.2990	0.6943	0.1180	0.8432
0.8558	-	66.00%	0.1304	0.4800	-1.92E-05	-0.0219	0.2340	0.6545	0.1188	0.8256
0.8361	-	67.00%	0.1184	0.4461	-2.02E-05	-0.0260	0.1895	0.6269	0.1186	0.8075
0.8216	-	68.00%	0.1074	0.4139	-2.13E-05	-0.0311	0.1573	0.6069	0.1178	0.7892
0.8103	-	69.00%	0.0971	0.3833	-2.24E-05	-0.0373	0.1329	0.5917	0.1165	0.7709
0.8021	-	70.00%	0.0876	0.3543	-2.37E-05	-0.0449	0.1154	0.5808	0.1148	0.7528
0.7975	-	71.00%	0.0788	0.3268	-2.50E-05	-0.0543	0.1050	0.5745	0.1127	0.7347
0.7902	-	72.00%	0.0707	0.3009	-2.64E-05	-0.0660	0.0902	0.5649	0.1110	0.7176
0.7841	-	73.00%	0.0632	0.2763	-2.80E-05	-0.0805	0.0779	0.5569	0.1092	0.7009
0.7788	-	74.00%	0.0564	0.2530	-2.96E-05	-0.0988	0.0676	0.5500	0.1073	0.6846
0.7742	-	75.00%	0.0500	0.2311	-3.14E-05	-0.1218	0.0587	0.5440	0.1055	0.6688
0.7701	-	76.00%	0.0443	0.2105	-3.33E-05	-0.1513	0.0510	0.5388	0.1036	0.6536
0.7665	-	77.00%	0.0390	0.1910	-3.54E-05	-0.1891	0.0443	0.5341	0.1018	0.6389
0.7633	-	78.00%	0.0342	0.1728	-3.77E-05	-0.2382	0.0384	0.5300	0.0999	0.6247
0.7604	-	79.00%	0.0298	0.1556	-4.03E-05	-0.3026	0.0332	0.5262	0.0982	0.6111
0.7577	-	80.00%	0.0259	0.1396	-4.30E-05	-0.3879	0.0286	0.5229	0.0964	0.5981
0.7553	-	81.00%	0.0223	0.1246	-4.61E-05	-0.5023	0.0245	0.5198	0.0947	0.5856
0.7532	-	82.00%	0.0191	0.1106	-4.95E-05	-0.6580	0.0209	0.5171	0.0931	0.5738
0.7513	-	83.00%	0.0162	0.0976	-5.34E-05	-0.8728	0.0177	0.5147	0.0916	0.5626
0.7495	-	84.00%	0.0136	0.0856	-5.77E-05	-1.1745	0.0148	0.5125	0.0901	0.5519

$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa	$\Delta p_0$	SFCC Mpa
0	84.19%	0.0132	0.0833	-5.86E-05	-1.2467	0.0142	0.5119	0.0898	0.5499
-0.0154	85.00%	0.0114	0.0744	-6.25E-05	-1.6064	0.0122	0.5104	0.0918	0.5451
-0.0159	86.00%	0.0094	0.0642	-6.81E-05	-2.2380	0.0101	0.5086	0.0904	0.5355
-0.0163	87.00%	0.0076	0.0548	-7.45E-05	-3.1854	0.0082	0.5071	0.0890	0.5267
-0.0166	88.00%	0.0061	0.0462	-8.20E-05	-4.6477	0.0066	0.5058	0.0877	0.5184
-0.0169	89.00%	0.0048	0.0385	-9.08E-05	-6.9826	0.0052	0.5046	0.0865	0.5108
-0.0172	90.00%	0.0037	0.0315	-1.01E-04	-10.8630	0.0040	0.5036	0.0854	0.5038
-0.0174	91.00%	0.0028	0.0253	-1.14E-04	-17.6310	0.0031	0.5028	0.0845	0.4975
-0.0176	91.53%	0.0023	0.0223	-1.22E-04	-23.2983	0.0023	0.5021	0.0840	0.4944
-0.0177	92.00%	0.0020	0.0198	-	-	0.0020	0.5019	0.0836	0.4918
-0.0179	93.00%	0.0014	0.0151	-	-	0.0014	0.5013	0.0828	0.4868
-0.018	94.00%	0.0009	0.0110	-	-	0.0009	0.5009	0.0821	0.4824
-0.0181	95.00%	0.0006	0.0076	-	-	0.0006	0.5005	0.0815	0.4787
-0.0181	96.14%	0.0003	0.0045	-	-	0.0003	0.5003	0.0810	0.4753
-0.0182	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.5000	0.0801	0.4701



D.2.1 Muestra cargada a 50 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.4091.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = P <sub>c</sub> + A*B MPa
0.9166	0	22.26%	1.2995	2.1192	-1.76E-06	-0.0020	2.1192	0.5216
0.9018	0.0000	22.63%	1.2611	2.0717	-1.81E-06	-0.0023	1.9526	0.4919
0.9093	0.0040	23.00%	1.2248	2.0265	-1.86E-06	-0.0026	1.7359	0.4493
0.9093	0.0040	24.00%	1.1324	1.9100	-2.00E-06	-0.0037	1.4114	0.3887
0.9093	0.0040	25.00%	1.0481	1.8015	-2.15E-06	-0.0053	1.2000	0.3500
0.9093	0.0040	26.00%	0.9709	1.7003	-2.31E-06	-0.0074	1.0533	0.3239
0.9093	0.0040	27.00%	0.9002	1.6058	-2.46E-06	-0.0103	0.9446	0.3050
0.9215	0.0103	28.00%	0.8352	1.5173	-2.63E-06	-0.0143	0.8589	0.2905
0.9304	0.0150	29.00%	0.7754	1.4344	-2.80E-06	-0.0198	0.7901	0.2791
0.9370	0.0185	30.00%	0.7202	1.3565	-2.99E-06	-0.0273	0.7309	0.2693
0.9422	0.0212	31.00%	0.6693	1.2833	-3.17E-06	-0.0375	0.6784	0.2603
0.9464	0.0235	32.00%	0.6223	1.2144	-3.37E-06	-0.0514	0.6300	0.2516
0.9499	0.0253	33.00%	0.5787	1.1494	-3.57E-06	-0.0703	0.5853	0.2431
0.9530	0.0269	34.00%	0.5384	1.0881	-3.79E-06	-0.0958	0.5439	0.2349
0.9560	0.0285	35.00%	0.5009	1.0303	-4.01E-06	-0.1304	0.5056	0.2270
0.9590	0.0301	36.00%	0.4662	0.9756	-4.24E-06	-0.1772	0.4701	0.2192
0.9620	0.0317	37.00%	0.4338	0.9238	-4.48E-06	-0.2405	0.4372	0.2118
0.9650	0.0333	38.00%	0.4038	0.8748	-4.73E-06	-0.3259	0.4066	0.2045
0.9681	0.0349	39.00%	0.3758	0.8284	-4.99E-06	-0.4415	0.3781	0.1975
0.9712	0.0365	40.00%	0.3497	0.7844	-5.26E-06	-0.5976	0.3517	0.1907
0.9743	0.0381	41.00%	0.3254	0.7427	-5.54E-06	-0.8086	0.3271	0.1841
0.9774	0.0398	42.00%	0.3027	0.7030	-5.84E-06	-1.0941	0.3042	0.1778
0.9805	0.0414	43.00%	0.2816	0.6654	-6.14E-06	-1.4804	0.2830	0.1717

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.9837	0.0431	43.93%	0.2632	0.6321	-6.44E-06	-1.9618	0.2632	0.1656
0.9900	0.0464	45.00%	0.2434	0.5957	-	-	0.2434	0.1595
1.0031	0.0533	50.00%	0.1678	0.4490	-	-	0.1678	0.1339
1.0194	0.0618	55.00%	0.1138	0.3342	-	-	0.1138	0.1126
1.0324	0.0687	58.35%	0.0867	0.2715	-	-	0.0867	0.1006
1.0388	0.0721	60.00%	0.0754	0.2443	-	-	0.0754	0.0953
1.0514	0.0787	65.00%	0.0483	0.1740	-	-	0.0483	0.0814
1.0693	0.0881	70.04%	0.0294	0.1192	-	-	0.0294	0.0706
1.0800	0.0937	75.00%	0.0169	0.0780	-	-	0.0169	0.0627
1.0915	0.0998	80.00%	0.0087	0.0471	-	-	0.0087	0.0570
1.0989	0.1037	83.91%	0.0047	0.0292	-	-	0.0047	0.0539
1.1020	0.1053	85.00%	0.0038	0.0251	-	-	0.0038	0.0533
1.1068	0.1078	90.00%	0.0012	0.0106	-	-	0.0012	0.0511
1.1105	0.1097	95.00%	0.0002	0.0026	-	-	0.0002	0.0502
1.1122	0.1106	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0500

D.2.2 Muestra cargada a 200 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.8278.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succión	Succión	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	%	T. H.	T. S.	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa	P' = Pc + A*B
		(A)	MPa	Mpa			(B)	MPa
0.9261	-	23.87%	1.1440	1.9248	-1.99E-06	-0.0044	1.9248	0.6594
0.9255	-	24.00%	1.1324	1.9100	-2.00E-06	-0.0047	1.9100	0.6584
0.8948	-	25.00%	1.0481	1.8015	-2.15E-06	-0.0066	1.6387	0.6097
0.8671	0.0000	25.51%	1.0079	1.7490	-2.23E-06	-0.0079	1.4410	0.5676
0.8718	0.0025	26.00%	0.9709	1.7003	-2.31E-06	-0.0094	1.2884	0.5350
0.8763	0.0049	27.00%	0.9002	1.6058	-2.46E-06	-0.0132	1.1327	0.5058
0.8803	0.0071	28.00%	0.8352	1.5173	-2.63E-06	-0.0184	1.0053	0.4815
0.8838	0.0090	29.00%	0.7754	1.4344	-2.80E-06	-0.0257	0.8997	0.4609
0.8870	0.0107	30.00%	0.7202	1.3565	-2.99E-06	-0.0356	0.8109	0.4433
0.8899	0.0122	31.00%	0.6693	1.2833	-3.17E-06	-0.0493	0.7354	0.4280
0.8925	0.0136	32.00%	0.6223	1.2144	-3.37E-06	-0.0680	0.6702	0.4145
0.8949	0.0149	33.00%	0.5787	1.1494	-3.57E-06	-0.0937	0.6135	0.4025
0.8971	0.0161	34.00%	0.5384	1.0881	-3.79E-06	-0.1287	0.5635	0.3916
0.8993	0.0172	35.00%	0.5009	1.0303	-4.01E-06	-0.1764	0.5190	0.3817
0.9013	0.0183	36.00%	0.4662	0.9756	-4.24E-06	-0.2414	0.4791	0.3725
0.9032	0.0193	37.00%	0.4338	0.9238	-4.48E-06	-0.3300	0.4431	0.3639
0.9050	0.0203	38.00%	0.4038	0.8748	-4.73E-06	-0.4505	0.4104	0.3559
0.9067	0.0212	39.00%	0.3758	0.8284	-4.99E-06	-0.6147	0.3813	0.3487
0.9084	0.0221	40.00%	0.3497	0.7844	-5.26E-06	-0.8381	0.3544	0.3417
0.9101	0.0230	41.00%	0.3254	0.7427	-5.54E-06	-1.1423	0.3287	0.3348

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9120	0.0240	41.96%	0.3037	0.7047	-5.82E-06	-1.5360	0.3037	0.3274
0.9167	0.0266	45.00%	0.2434	0.5957	-	-	0.2434	0.3095
0.9240	0.0305	50.00%	0.1678	0.4490	-	-	0.1678	0.2839
0.9306	0.0340	55.00%	0.1138	0.3342	-	-	0.1138	0.2626
0.9307	0.0340	55.04%	0.1135	0.3334	-	-	0.1135	0.2625
0.9365	0.0372	60.00%	0.0754	0.2443	-	-	0.0754	0.2453
0.9415	0.0398	65.00%	0.0483	0.1740	-	-	0.0483	0.2314
0.9443	0.0413	68.25%	0.0353	0.1370	-	-	0.0353	0.2241
0.9456	0.0420	70.00%	0.0295	0.1195	-	-	0.0295	0.2207
0.9488	0.0438	75.00%	0.0169	0.0780	-	-	0.0169	0.2127
0.9512	0.0450	80.00%	0.0087	0.0471	-	-	0.0087	0.2070
0.9521	0.0455	82.62%	0.0058	0.0345	-	-	0.0058	0.2048
0.9528	0.0459	85.00%	0.0038	0.0251	-	-	0.0038	0.2033
0.9537	0.0464	90.00%	0.0012	0.0106	-	-	0.0012	0.2011
0.9541	0.0466	95.00%	0.0002	0.0026	-	-	0.0002	0.2002
0.9542	0.0466	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.2000

D.2.3 Muestra cargada a 300 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 16.1573.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = $P_c + A * B$ MPa
0.9112	-	19.85%	1.5815	2.4576	-1.46E-06	-0.0018	2.4576	0.7878
0.9102	-	20.00%	1.5617	2.4344	-1.47E-06	-0.0019	2.4344	0.7869
0.8666	-	21.00%	1.4381	2.2876	-1.60E-06	-0.0029	2.1156	0.7443
0.8303	0.0000	21.81%	1.3469	2.1773	-1.70E-06	-0.0040	1.8758	0.7091
0.8362	0.0033	22.00%	1.3263	2.1521	-1.73E-06	-0.0043	1.6171	0.6558
0.8400	0.0053	23.00%	1.2248	2.0265	-1.86E-06	-0.0064	1.4120	0.6248
0.8432	0.0071	24.00%	1.1324	1.9100	-2.00E-06	-0.0093	1.2469	0.5993
0.8460	0.0086	25.00%	1.0481	1.8015	-2.15E-06	-0.0136	1.1120	0.5780
0.8484	0.0099	26.00%	0.9709	1.7003	-2.31E-06	-0.0197	1.0000	0.5600
0.8506	0.0111	27.00%	0.9002	1.6058	-2.46E-06	-0.0284	0.9057	0.5445
0.8526	0.0122	28.00%	0.8352	1.5173	-2.63E-06	-0.0407	0.8249	0.5310
0.8544	0.0132	29.00%	0.7754	1.4344	-2.80E-06	-0.0581	0.7550	0.5189
0.8560	0.0141	30.00%	0.7202	1.3565	-2.99E-06	-0.0827	0.6936	0.5081
0.8576	0.0149	31.00%	0.6693	1.2833	-3.17E-06	-0.1171	0.6391	0.4981
0.8591	0.0157	32.00%	0.6223	1.2144	-3.37E-06	-0.1655	0.5903	0.4889
0.8605	0.0165	33.00%	0.5787	1.1494	-3.57E-06	-0.2332	0.5463	0.4803
0.8618	0.0172	34.00%	0.5384	1.0881	-3.79E-06	-0.3279	0.5064	0.4722
0.8631	0.0180	35.00%	0.5009	1.0303	-4.01E-06	-0.4601	0.4698	0.4644
0.8643	0.0186	36.00%	0.4662	0.9756	-4.24E-06	-0.6444	0.4372	0.4574
0.8656	0.0193	37.00%	0.4338	0.9238	-4.48E-06	-0.9014	0.4062	0.4503
0.8658	0.0194	38.00%	0.4038	0.8748	-4.73E-06	-1.2595	0.3920	0.4490

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.8656	0.0193	38.47%	0.3904	0.8527	-4.85E-06	-1.4733	0.3904	0.4502
0.8674	0.0203	40.00%	0.3497	0.7844	-	-	0.3497	0.4399
0.8732	0.0234	45.00%	0.2434	0.5957	-	-	0.2434	0.4095
0.8783	0.0263	50.00%	0.1678	0.4490	-	-	0.1678	0.3839
0.8819	0.0282	53.84%	0.1248	0.3585	-	-	0.1248	0.3672
0.8829	0.0288	55.00%	0.1138	0.3342	-	-	0.1138	0.3626
0.8869	0.0310	60.00%	0.0754	0.2443	-	-	0.0754	0.3453
0.8903	0.0328	65.00%	0.0483	0.1740	-	-	0.0483	0.3314
0.8923	0.0339	68.64%	0.0340	0.1329	-	-	0.0340	0.3233
0.8930	0.0342	70.00%	0.0295	0.1195	-	-	0.0295	0.3207
0.8950	0.0354	75.00%	0.0169	0.0780	-	-	0.0169	0.3127
0.8965	0.0362	80.00%	0.0087	0.0471	-	-	0.0087	0.3070
0.8973	0.0366	83.29%	0.0052	0.0317	-	-	0.0052	0.3043
0.8975	0.0368	85.00%	0.0038	0.0251	-	-	0.0038	0.3033
0.8981	0.0371	90.00%	0.0012	0.0106	-	-	0.0012	0.3011
0.8984	0.0372	95.00%	0.0002	0.0026	-	-	0.0002	0.3002
0.8984	0.0372	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.3000

D.2.4 Muestra cargada a 500 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.0292.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'	$\Delta p_0$	SFCC
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = P <sub>c</sub> + A*B MPa		Mpa
0.9302	-	23.94%	1.1381	1.9172	-2.00E-06	-0.0030	1.9172	0.9589	0.0297	0.9586
0.9298	-	24.00%	1.1324	1.9100	-2.00E-06	-0.0031	1.9100	0.9584	0.0297	0.9580
0.9041	-	25.00%	1.0481	1.8015	-2.15E-06	-0.0043	1.7124	0.9281	0.0302	0.9506
0.8640	-	26.00%	0.9709	1.7003	-2.31E-06	-0.0060	1.4651	0.8809	0.0314	0.9435
0.8309	-	27.00%	0.9002	1.6058	-2.46E-06	-0.0083	1.2678	0.8423	0.0323	0.9359
0.8035	-	28.00%	0.8352	1.5173	-2.63E-06	-0.0114	1.1087	0.8104	0.0331	0.9280
0.7805	-	29.00%	0.7754	1.4344	-2.80E-06	-0.0157	0.9788	0.7838	0.0338	0.9197
0.7669	0.0000	29.06%	0.7721	1.4298	-2.81E-06	-0.0160	0.9232	0.7683	0.0343	0.9198
0.7687	0.0010	30.00%	0.7202	1.3565	-2.99E-06	-0.0215	0.8325	0.7497	0.0340	0.9109
0.7702	0.0019	31.00%	0.6693	1.2833	-3.17E-06	-0.0293	0.7526	0.7333	0.0335	0.9014
0.7716	0.0027	32.00%	0.6223	1.2144	-3.37E-06	-0.0399	0.6840	0.7189	0.0331	0.8917
0.7729	0.0034	33.00%	0.5787	1.1494	-3.57E-06	-0.0542	0.6244	0.7060	0.0327	0.8820
0.7741	0.0040	34.00%	0.5384	1.0881	-3.79E-06	-0.0733	0.5721	0.6945	0.0323	0.8723
0.7752	0.0046	35.00%	0.5009	1.0303	-4.01E-06	-0.0992	0.5258	0.6840	0.0320	0.8625
0.7762	0.0052	36.00%	0.4662	0.9756	-4.24E-06	-0.1339	0.4844	0.6744	0.0316	0.8528
0.7771	0.0058	37.00%	0.4338	0.9238	-4.48E-06	-0.1804	0.4472	0.6655	0.0312	0.8430
0.7780	0.0063	38.00%	0.4038	0.8748	-4.73E-06	-0.2430	0.4137	0.6572	0.0308	0.8332
0.7788	0.0067	39.00%	0.3758	0.8284	-4.99E-06	-0.3269	0.3855	0.6504	0.0304	0.8235
0.7796	0.0072	40.00%	0.3497	0.7844	-5.26E-06	-0.4396	0.3568	0.6427	0.0300	0.8138
0.7804	0.0076	41.00%	0.3254	0.7427	-5.54E-06	-0.5910	0.3305	0.6355	0.0297	0.8042
0.7812	0.0081	42.00%	0.3027	0.7030	-5.84E-06	-0.7943	0.3064	0.6287	0.0293	0.7946
0.7819	0.0085	43.00%	0.2816	0.6654	-6.14E-06	-1.0678	0.2842	0.6222	0.0289	0.7851
0.7826	0.0089	44.00%	0.2618	0.6296	-6.46E-06	-1.4357	0.2637	0.6160	0.0286	0.7756

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= P <sub>c</sub> + A*B MPa	$\Delta p_0$	SFCC Mpa
0.7829	0.0090	44.22%	0.2577	0.6222	-6.53E-06	-1.5305	0.2577	0.6140	0.0285	0.7736
0.7809	0.0079	45.00%	0.2434	0.5957	-	-	0.2434	0.6095	0.0283	0.7664
0.7693	0.0014	50.00%	0.1678	0.4490	-	-	0.1678	0.5839	0.0271	0.7216
0.7595	-0.0042	55.00%	0.1138	0.3342	-	-	0.1138	0.5626	0.0259	0.6797
0.7526	-0.0081	59.09%	0.0815	0.2591	-	-	0.0815	0.5482	0.0250	0.6481
0.7513	-0.0089	60.00%	0.0754	0.2443	-	-	0.0754	0.5453	0.0248	0.6414
0.7446	-0.0127	65.00%	0.0483	0.1740	-	-	0.0483	0.5314	0.0237	0.6068
0.7393	-0.0156	70.00%	0.0295	0.1195	-	-	0.0295	0.5207	0.0228	0.5764
0.7358	-0.0176	74.34%	0.0183	0.0828	-	-	0.0183	0.5136	0.0220	0.5536
0.7353	-0.0179	75.00%	0.0169	0.0780	-	-	0.0169	0.5127	0.0219	0.5504
0.7325	-0.0195	80.00%	0.0087	0.0471	-	-	0.0087	0.5070	0.0212	0.5288
0.7306	-0.0206	85.00%	0.0038	0.0251	-	-	0.0038	0.5033	0.0206	0.5119
0.7297	-0.0211	88.94%	0.0016	0.0131	-	-	0.0016	0.5015	0.0202	0.5019
0.7296	-0.0212	90.00%	0.0012	0.0106	-	-	0.0012	0.5011	0.0201	0.4997
0.7291	-0.0214	95.00%	0.0002	0.0026	-	-	0.0002	0.5002	0.0199	0.4923
0.7290	-0.0215	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.5000	0.0198	0.4898



## ANEXO E (Resultados de ensayos de Prensa Triaxial y cálculos teóricos).

### E.1. Ensaye Triaxial.

Etapa	Tiempo Minutos	Presion Mpa	$\Delta H$ mm	$H_x$ mm	$w_x$ %	$Hw_x$ mm	e	$Sw_x$ %	S real Mpa	$\chi S$ MPa	$p'$ MPa
0	0.055	0.0001	0	19.8	8.30%	2.2015	0.97045	22.58%	0.0468	0.0106	0.0212
1	25.003	0.0135	0	19.8	12.66%	3.3585	0.97045	34.44%	0.0239	0.0082	0.0030
2	125.651	0.0339	0	19.8	17.78%	4.7160	0.97045	48.36%	0.0111	0.0054	-0.0231
3	239.904	0.0621	0	19.8	22.89%	6.0734	0.97045	62.28%	0.0047	0.0029	-0.0562
4	1252.304	0.1242	0	19.8	28.01%	7.4309	0.97045	76.20%	0.0016	0.0012	0.1254
5	1968.003	0.1627	0	19.8	33.13%	8.7883	0.97045	90.12%	0.0002	0.0002	0.1629
6	2593.504	0.1570	0	19.8	33.13%	8.7883	0.97045	90.12%	0.0002	0.0002	0.1572
7	2668.002	0.1600	0	19.8	38.25%	10.1458	0.97045	100.00%	0.0000	0.0000	0.1600

E.1.1 Muestra cargada a 50 kPa Trayectoria de humedecimiento.

Parámetro de escaneo B = 5.9592.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa		Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = P <sub>c</sub> + A*B MPa
1.0062	-	63.73%	2.4116	8.4429	-1.71E-05	-0.0299	8.4429	5.4305
1.0028	-	64.00%	2.3525	8.2846	-1.73E-05	-0.0314	7.9618	5.1456
0.9872	-	65.00%	2.1451	7.7216	-1.82E-05	-0.0376	6.0700	3.9955
0.9735	-	66.00%	1.9523	7.1867	-1.92E-05	-0.0453	4.7542	3.1877
0.9614	-	67.00%	1.7734	6.6786	-2.02E-05	-0.0546	3.8088	2.6019
0.9518	0	67.37%	1.7105	6.4972	-2.06E-05	-0.0586	3.2123	2.2141
0.9649	0.0067	68.00%	1.6074	6.1962	-2.13E-05	-0.0661	2.7306	1.9068
0.9784	0.0136	69.00%	1.4536	5.7385	-2.24E-05	-0.0803	2.3041	1.6398
0.9911	0.0202	70.00%	1.3112	5.3045	-2.37E-05	-0.0980	1.9624	1.4237
1.0034	0.0264	71.00%	1.1797	4.8934	-2.50E-05	-0.1202	1.6832	1.2451
1.0153	0.0325	72.00%	1.0583	4.5043	-2.64E-05	-0.1481	1.4512	1.0948
1.0238	0.0369	73.00%	0.9465	4.1363	-2.80E-05	-0.1833	1.3017	1.0002
1.0334	0.0418	74.00%	0.8437	3.7886	-2.96E-05	-0.2284	1.1527	0.9030
1.0455	0.048	75.00%	0.7493	3.4605	-3.14E-05	-0.2862	0.9942	0.7956
1.0575	0.0542	76.00%	0.6628	3.1512	-3.33E-05	-0.3611	0.8582	0.7023

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	% (A)	T. H. MPa	T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa (B)	P' = Pc + A*B MPa
1.0663	0.0587	76.58%	0.6158	2.9791	-3.45E-05	-0.4151	0.7727	0.6418
1.0734	0.0623	77.00%	0.5838	2.8602	-3.54E-05	-0.4591	0.7105	0.5971
1.0853	0.0684	78.00%	0.5119	2.5866	-3.77E-05	-0.5885	0.6147	0.5295
1.0974	0.0746	79.00%	0.4464	2.3300	-4.03E-05	-0.7610	0.5303	0.4689
1.1099	0.081	80.00%	0.3871	2.0897	-4.30E-05	-0.9940	0.4559	0.4147
1.1226	0.0875	81.00%	0.3336	1.8652	-4.61E-05	-1.3128	0.3902	0.3661
1.1349	0.0938	82.00%	0.2855	1.6559	-4.95E-05	-1.7551	0.3356	0.3252
1.1469	0.1	83.00%	0.2424	1.4613	-5.34E-05	-2.3788	0.2891	0.2900
1.1609	0.1072	84.00%	0.2040	1.2809	-5.77E-05	-3.2745	0.2428	0.2539
1.1754	0.1146	85.00%	0.1700	1.1142	-6.25E-05	-4.5871	0.2022	0.2219
1.1902	0.1221	86.00%	0.1401	0.9608	-6.81E-05	-6.5557	0.1669	0.1936
1.2151	0.1349	86.74%	0.1204	0.8556	-7.27E-05	-8.6646	0.1204	0.1544
1.2190	0.1369	87.00%	0.1139	0.8203	-	-	0.1139	0.1491
1.2342	0.1447	88.00%	0.0912	0.6923	-	-	0.0912	0.1303
1.2495	0.1526	89.00%	0.0718	0.5762	-	-	0.0718	0.1139
1.2648	0.1604	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.0998
1.2798	0.168	91.00%	0.0415	0.3789	-	-	0.0415	0.0878
1.2941	0.1754	92.00%	0.0302	0.2969	-	-	0.0302	0.0777
1.3073	0.1822	93.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.0211	0.0696
1.3191	0.1882	94.00%	0.0139	0.1644	-	-	0.0139	0.0631
1.3290	0.1933	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.0581
1.3475	0.2028	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0500

E.1.2 Muestra cargada a 200 kPa.

Parámetro de escaneo B = 6.3415.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
1.0472	-	63.30%	2.5065	8.6950	-1.67E-05	-0.0446	8.6950	5.7040
1.0327	-	64.00%	2.3525	8.2846	-1.73E-05	-0.0508	7.4561	4.9719
1.0227	-	65.00%	2.1451	7.7216	-1.82E-05	-0.0614	6.6466	4.5203
1.0023	-	66.00%	1.9523	7.1867	-1.92E-05	-0.0745	5.3155	3.7082
0.9839	-	67.00%	1.7734	6.6786	-2.02E-05	-0.0906	4.3153	3.0912
0.9672	-	68.00%	1.6074	6.1962	-2.13E-05	-0.1107	3.5487	2.6131
0.9520	-	69.00%	1.4536	5.7385	-2.24E-05	-0.1358	2.9503	2.2357
0.9380	-	70.00%	1.3112	5.3045	-2.37E-05	-0.1673	2.4752	1.9326
0.9250	-	71.00%	1.1797	4.8934	-2.50E-05	-0.2070	2.0920	1.6853
0.9129	-	72.00%	1.0583	4.5043	-2.64E-05	-0.2576	1.7784	1.4805
0.9075	-	73.00%	0.9465	4.1363	-2.80E-05	-0.3222	1.6385	1.3961
0.8979	0	73.83%	0.8607	3.8467	-2.93E-05	-0.3897	1.4329	1.2579
0.9044	0.0034	74.00%	0.8437	3.7886	-2.96E-05	-0.4055	1.3011	1.1628
0.9139	0.0084	75.00%	0.7493	3.4605	-3.14E-05	-0.5137	1.1170	1.0377
0.9232	0.0133	76.00%	0.6628	3.1512	-3.33E-05	-0.6554	0.9599	0.9295
0.9323	0.0181	77.00%	0.5838	2.8602	-3.54E-05	-0.8428	0.8250	0.8352
0.9412	0.0228	78.00%	0.5119	2.5866	-3.77E-05	-1.0932	0.7085	0.7526
0.9500	0.0275	79.00%	0.4464	2.3300	-4.03E-05	-1.4313	0.6074	0.6798
0.9587	0.0321	80.00%	0.3871	2.0897	-4.30E-05	-1.8937	0.5194	0.6155
0.9673	0.0366	81.00%	0.3336	1.8652	-4.61E-05	-2.5347	0.4427	0.5586

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.9857	0.0463	81.42%	0.3129	1.7759	-4.75E-05	-2.8738	0.3129	0.4547
0.9899	0.0485	82.00%	0.2855	1.6559	-	-	0.2855	0.4341
0.9971	0.0523	83.00%	0.2424	1.4613	-	-	0.2424	0.4012
1.0042	0.056	84.00%	0.2040	1.2809	-	-	0.2040	0.3714
1.0111	0.0597	85.00%	0.1700	1.1142	-	-	0.1700	0.3445
1.0179	0.0632	86.00%	0.1401	0.9608	-	-	0.1401	0.3205
1.0243	0.0666	87.00%	0.1139	0.8203	-	-	0.1139	0.2991
1.0305	0.0699	88.00%	0.0912	0.6923	-	-	0.0912	0.2803
1.0362	0.0729	89.00%	0.0718	0.5762	-	-	0.0718	0.2639
1.0414	0.0756	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.2498
1.0420	0.0759	90.12%	0.0535	0.4603	-	-	0.0535	0.2482
1.0461	0.0781	91.00%	0.0415	0.3789	-	-	0.0415	0.2378
1.0503	0.0803	92.00%	0.0302	0.2969	-	-	0.0302	0.2277
1.0538	0.0821	93.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.0211	0.2196
1.0567	0.0837	94.00%	0.0139	0.1644	-	-	0.0139	0.2131
1.0590	0.0849	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.2081
1.0629	0.0869	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.2000

### E.1.3 Muestra cargada a 300 kPa.

Parámetro de escaneo B = 6.0084.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A * B MPa
0.9819	-	64.35%	2.2783	8.0845	-1.76E-05	-0.0293	8.0845	5.5024
0.9785	-	65.00%	2.1451	7.7216	-1.82E-05	-0.0401	7.7216	5.3191
0.9543	-	66.00%	1.9523	7.1867	-1.92E-05	-0.0482	5.8773	4.1790
0.9340	-	67.00%	1.7734	6.6786	-2.02E-05	-0.0583	4.6190	3.3948
0.9161	-	68.00%	1.6074	6.1962	-2.13E-05	-0.0706	3.7029	2.8180
0.9003	-	69.00%	1.4536	5.7385	-2.24E-05	-0.0859	3.0181	2.3825
0.8862	-	70.00%	1.3112	5.3045	-2.37E-05	-0.1050	2.4939	2.0457
0.8735	-	71.00%	1.1797	4.8934	-2.50E-05	-0.1289	2.0836	1.7794
0.8619	-	72.00%	1.0583	4.5043	-2.64E-05	-0.1590	1.7562	1.5644
0.8573	-	73.00%	0.9465	4.1363	-2.80E-05	-0.1971	1.6233	1.4850
0.8473	-	74.00%	0.8437	3.7886	-2.96E-05	-0.2459	1.3873	1.3266
0.8372	-	75.00%	0.7493	3.4605	-3.14E-05	-0.3086	1.1763	1.1822
0.8279	-	76.00%	0.6628	3.1512	-3.33E-05	-0.3899	1.0007	1.0606
0.8191	-	77.00%	0.5838	2.8602	-3.54E-05	-0.4964	0.8531	0.9569
0.8113	0	77.88%	0.5202	2.6188	-3.75E-05	-0.6180	0.7361	0.8733
0.8147	0.0018	78.00%	0.5119	2.5866	-3.77E-05	-0.6373	0.6859	0.8350
0.8213	0.0055	79.00%	0.4464	2.3300	-4.03E-05	-0.8255	0.5876	0.7642
0.8278	0.0091	80.00%	0.3871	2.0897	-4.30E-05	-1.0800	0.5021	0.7017
0.8340	0.0125	81.00%	0.3336	1.8652	-4.61E-05	-1.4288	0.4277	0.6465
0.8401	0.0159	82.00%	0.2855	1.6559	-4.95E-05	-1.9136	0.3629	0.5975
0.8459	0.0191	83.00%	0.2424	1.4613	-5.34E-05	-2.5986	0.3062	0.5542
0.8515	0.0222	84.00%	0.2040	1.2809	-5.77E-05	-3.5842	0.2569	0.5158
0.8568	0.0251	85.00%	0.1700	1.1142	-6.25E-05	-5.0316	0.2139	0.4818

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.8590	0.0263	85.12%	0.1662	1.0951	-6.32E-05	-5.2480	0.1983	0.4688
0.8676	0.0311	86.00%	0.1401	0.9608	-	-	0.1401	0.4205
0.8718	0.0334	87.00%	0.1139	0.8203	-	-	0.1139	0.3991
0.8756	0.0355	88.00%	0.0912	0.6923	-	-	0.0912	0.3803
0.8792	0.0374	89.00%	0.0718	0.5762	-	-	0.0718	0.3639
0.8824	0.0392	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.3498
0.8852	0.0408	91.00%	0.0415	0.3789	-	-	0.0415	0.3378
0.8877	0.0421	92.00%	0.0302	0.2969	-	-	0.0302	0.3277
0.8881	0.0424	92.19%	0.0283	0.2828	-	-	0.0283	0.3261
0.8897	0.0433	93.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.0211	0.3196
0.8914	0.0442	94.00%	0.0139	0.1644	-	-	0.0139	0.3131
0.8927	0.0449	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.3081
0.8949	0.0461	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.3000

E.1.4 Muestra cargada a 400 kPa.

Parámetro de escaneo B = 5.1382.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succion	Succion	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	%	T. H.	T. S.	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa	P' = Pc + A*B
		(A)	MPa	Mpa			(B)	MPa
0.9735	-	56.82%	2.2783	8.0845	-1.21E-05	-0.0037	13.2617	7.9359
0.9726	-	57.00%	2.1451	7.7216	-1.23E-05	-0.0038	13.1180	7.8772
0.9495	-	58.00%	1.9523	7.1867	-1.29E-05	-0.0044	10.4955	6.4874
0.9245	-	59.00%	1.7734	6.6786	-1.35E-05	-0.0051	8.1843	5.2288
0.9036	-	60.00%	1.6074	6.1962	-1.42E-05	-0.0059	6.5793	4.3476
0.8859	-	61.00%	1.4536	5.7385	-1.49E-05	-0.0069	5.4194	3.7058
0.8707	-	62.00%	1.3112	5.3045	-1.57E-05	-0.0081	4.5507	3.2215
0.8607	-	62.17%	1.1797	4.8934	-1.58E-05	-0.0083	4.0772	2.9347
0.8498	-	63.00%	1.0583	4.5043	-1.65E-05	-0.0095	3.5683	2.6480
0.8393	-	64.00%	0.9465	4.1363	-1.73E-05	-0.0112	3.1179	2.3954
0.8297	-	65.00%	0.8437	3.7886	-1.82E-05	-0.0131	2.7416	2.1820
0.8207	-	66.00%	0.7493	3.4605	-1.92E-05	-0.0155	2.4218	1.9984
0.8147	-	67.00%	0.6628	3.1512	-2.02E-05	-0.0184	2.2151	1.8841
0.8071	-	68.00%	0.5838	2.8602	-2.13E-05	-0.0218	1.9801	1.7465
0.7990	-	69.00%	0.5202	2.6188	-2.24E-05	-0.0260	1.7519	1.6088
0.7912	-	70.00%	0.5119	2.5866	-2.37E-05	-0.0311	1.5518	1.4862
0.7879	0	70.21%	0.4464	2.3300	-2.39E-05	-0.0323	1.4782	1.4378
0.7834	-0.0025	71.00%	0.3871	2.0897	-2.50E-05	-0.0374	1.3391	1.3507
0.7782	-0.0054	72.00%	0.3336	1.8652	-2.64E-05	-0.0451	1.1892	1.2562
0.7732	-0.0083	73.00%	0.2855	1.6559	-2.80E-05	-0.0546	1.0545	1.1698
0.7682	-0.011	74.00%	0.2424	1.4613	-2.96E-05	-0.0665	0.9332	1.0906
0.7635	-0.0137	75.00%	0.2040	1.2809	-3.14E-05	-0.0815	0.8267	1.0200
0.7593	-0.016	76.00%	0.1700	1.1142	-3.33E-05	-0.1004	0.7374	0.9604
0.7546	-0.0186	77.00%	0.1662	1.0951	-3.54E-05	-0.1245	0.6462	0.8975
0.7500	-0.0212	78.00%	0.1401	0.9608	-3.77E-05	-0.1556	0.5641	0.8400



e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.7436	-0.0248	78.74%	0.1139	0.8203	-3.96E-05	-0.1844	0.4629	0.7645
0.7425	-0.0254	79.00%	0.0912	0.6923	-	-	0.4464	0.7527
0.7385	-0.0276	80.00%	0.0718	0.5762	-	-	0.3871	0.7097
0.7347	-0.0298	81.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.3336	0.6702
0.7309	-0.0319	82.00%	0.0415	0.3789	-	-	0.2855	0.6341
0.7274	-0.0339	83.00%	0.0302	0.2969	-	-	0.2424	0.6012
0.7240	-0.0358	84.00%	0.0283	0.2828	-	-	0.2040	0.5714
0.7208	-0.0376	85.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.1700	0.5445
0.7178	-0.0392	86.00%	0.0139	0.1644	-	-	0.1401	0.5205
0.7151	-0.0408	87.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.1139	0.4991
0.7125	-0.0422	88.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0912	0.4803
0.7103	-0.0434	89.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0718	0.4639
0.7101	-0.0435	89.06%	0.0000	0.0000	-	-	0.0707	0.4630
0.7083	-0.0446	90.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0553	0.4498
0.7065	-0.0455	91.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0415	0.4378
0.7050	-0.0464	92.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0302	0.4277
0.7038	-0.0471	93.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0211	0.4196
0.7028	-0.0476	94.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0139	0.4131
0.7020	-0.0481	95.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0086	0.4081
0.7007	-0.0488	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.4000

E.1.5 Muestra cargada a 500 kPa.

Parámetro de escaneo B = 5.4011.

e	$\epsilon_v$	$S_{we}$	Succión	Succión	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$	Succión	P'
unid.	%	%	T. H.	T. S.	$ds_{ew}/d_s$	Escaneo	E. S. Mpa	P' = $P_c + A * B$
		(A)	MPa	Mpa			(B)	MPa
1.0054	-	62.64%	2.6601	9.0983	-1.62E-05	-0.0124	9.0983	6.1990
0.9972	-	63.00%	2.5754	8.8766	-1.65E-05	-0.0132	8.4612	5.8306
0.9586	-	64.00%	2.3525	8.2846	-1.73E-05	-0.0155	5.9789	4.3265
0.9288	-	65.00%	2.1451	7.7216	-1.82E-05	-0.0184	4.4761	3.4095
0.9054	-	66.00%	1.9523	7.1867	-1.92E-05	-0.0219	3.5039	2.8126
0.8866	-	67.00%	1.7734	6.6786	-2.02E-05	-0.0260	2.8368	2.4006
0.8710	-	68.00%	1.6074	6.1962	-2.13E-05	-0.0311	2.3545	2.1011
0.8579	-	69.00%	1.4536	5.7385	-2.24E-05	-0.0373	1.9898	1.8730
0.8475	-	70.00%	1.3112	5.3045	-2.37E-05	-0.0449	1.7274	1.7092
0.8412	-	71.00%	1.1797	4.8934	-2.50E-05	-0.0543	1.5718	1.6160
0.8309	-	72.00%	1.0583	4.5043	-2.64E-05	-0.0660	1.3497	1.4718
0.8215	-	73.00%	0.9465	4.1363	-2.80E-05	-0.0805	1.1662	1.3513
0.8130	-	74.00%	0.8437	3.7886	-2.96E-05	-0.0988	1.0114	1.2484
0.8050	-	75.00%	0.7493	3.4605	-3.14E-05	-0.1218	0.8788	1.1591
0.7975	-	76.00%	0.6628	3.1512	-3.33E-05	-0.1513	0.7639	1.0805
0.7905	-	77.00%	0.5838	2.8602	-3.54E-05	-0.1891	0.6634	1.0108
0.7839	-	78.00%	0.5119	2.5866	-3.77E-05	-0.2382	0.5750	0.9485
0.7776	-	79.00%	0.4464	2.3300	-4.03E-05	-0.3026	0.4969	0.8926
0.7716	-	80.00%	0.3871	2.0897	-4.30E-05	-0.3879	0.4278	0.8423
0.7660	-	81.00%	0.3336	1.8652	-4.61E-05	-0.5023	0.3666	0.7969
0.7607	-	82.00%	0.2855	1.6559	-4.95E-05	-0.6580	0.3124	0.7562
0.7557	-	83.00%	0.2424	1.4613	-5.34E-05	-0.8728	0.2644	0.7195
0.7510	-	84.00%	0.2040	1.2809	-5.77E-05	-1.1745	0.2222	0.6866

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = P <sub>c</sub> + A*B MPa
0.7498	0	84.19%	0.1971	1.2474	-5.86E-05	-1.2467	0.2121	0.6786
0.6934	-0.0323	85.00%	0.1700	1.1142	-6.25E-05	-1.6064	0.1825	0.6551
0.6908	-0.0337	86.00%	0.1401	0.9608	-6.81E-05	-2.2380	0.1505	0.6294
0.6885	-0.035	87.00%	0.1139	0.8203	-7.45E-05	-3.1854	0.1226	0.6067
0.6864	-0.0362	88.00%	0.0912	0.6923	-8.20E-05	-4.6477	0.0985	0.5867
0.6845	-0.0373	89.00%	0.0718	0.5762	-9.08E-05	-6.9826	0.0779	0.5694
0.6829	-0.0383	90.00%	0.0553	0.4719	-1.01E-04	-10.8630	0.0605	0.5544
0.6814	-0.0391	91.00%	0.0415	0.3789	-1.14E-04	-17.6310	0.0459	0.5418
0.6803	-0.0397	91.53%	0.0352	0.3338	-1.22E-04	-23.2983	0.0352	0.5322
0.6798	-0.04	92.00%	0.0302	0.2969	-	-	0.0302	0.5277
0.6788	-0.0406	93.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.0211	0.5196
0.6780	-0.041	94.00%	0.0139	0.1644	-	-	0.0139	0.5131
0.6774	-0.0414	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.5081
0.6770	-0.0416	96.14%	0.0043	0.0670	-	-	0.0048	0.5046
0.6764	-0.042	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.5000

E.2.1 Muestra cargada a 50 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.4091.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.9166	0	22.26%	57.6709	94.0481	-1.76E-06	-0.0020	94.0481	20.9804
0.9013	0.0000	22.63%	55.9655	91.9409	-1.81E-06	-0.0023	86.6560	19.6618
0.9097	0.0044	23.00%	54.3562	89.9376	-1.86E-06	-0.0026	77.0395	17.7691
0.9097	0.0044	24.00%	50.2553	84.7641	-2.00E-06	-0.0037	62.6393	15.0834
0.9097	0.0044	25.00%	46.5123	79.9493	-2.15E-06	-0.0053	53.2577	13.3644
0.9097	0.0044	26.00%	43.0880	75.4593	-2.31E-06	-0.0074	46.7465	12.2041
0.9097	0.0044	27.00%	39.9485	71.2640	-2.46E-06	-0.0103	41.9201	11.3684
0.9235	0.0117	28.00%	37.0645	67.3374	-2.63E-06	-0.0143	38.1177	10.7230
0.9338	0.0171	29.00%	34.4104	63.6563	-2.80E-06	-0.0198	35.0637	10.2185
0.9416	0.0212	30.00%	31.9638	60.2003	-2.99E-06	-0.0273	32.4370	9.7811
0.9478	0.0244	31.00%	29.7052	56.9511	-3.17E-06	-0.0375	30.1074	9.3833
0.9529	0.0271	32.00%	27.6171	53.8927	-3.37E-06	-0.0514	27.9586	8.9967
0.9571	0.0293	33.00%	25.6843	51.0104	-3.57E-06	-0.0703	25.9739	8.6214
0.9609	0.0314	34.00%	23.8930	48.2911	-3.79E-06	-0.0958	24.1383	8.2570
0.9646	0.0333	35.00%	22.2312	45.7232	-4.01E-06	-0.1304	22.4388	7.9036
0.9683	0.0352	36.00%	20.6879	43.2958	-4.24E-06	-0.1772	20.8633	7.5608
0.9721	0.0372	37.00%	19.2534	40.9995	-4.48E-06	-0.2405	19.4015	7.2286
0.9760	0.0393	38.00%	17.9190	38.8253	-4.73E-06	-0.3259	18.0438	6.9066
0.9799	0.0413	39.00%	16.6767	36.7654	-4.99E-06	-0.4415	16.7817	6.5949
0.9839	0.0434	40.00%	15.5194	34.8123	-5.26E-06	-0.5976	15.6077	6.2931
0.9879	0.0456	41.00%	14.4406	32.9595	-5.54E-06	-0.8086	14.5147	6.0010
0.9921	0.0477	42.00%	13.4345	31.2007	-5.84E-06	-1.0941	13.4995	5.7198
0.9963	0.0500	43.00%	12.4956	29.5304	-6.14E-06	-1.4804	12.5576	5.4498

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
1.0006	0.0522	43.93%	11.6787	28.0521	-6.44E-06	-1.9618	11.6787	5.1804
1.0094	0.0568	45.00%	10.8007	26.4348	-	-	10.8007	4.9103
1.0284	0.0668	50.00%	7.4466	19.9249	-	-	7.4466	3.7733
1.0540	0.0803	55.00%	5.0525	14.8323	-	-	5.0525	2.8289
1.0767	0.0923	58.35%	3.8467	12.0510	-	-	3.8467	2.2946
1.0890	0.0987	60.00%	3.3478	10.8409	-	-	3.3478	2.0587
1.1155	0.1126	65.00%	2.1451	7.7216	-	-	2.1451	1.4443
1.1532	0.1325	70.00%	1.3112	5.3045	-	-	1.3112	0.9679
1.1615	0.1369	70.04%	1.3059	5.2881	-	-	1.3059	0.9647
1.1975	0.1558	75.00%	0.7493	3.4605	-	-	0.7493	0.6120
1.2505	0.1836	80.00%	0.3871	2.0897	-	-	0.3871	0.3597
1.3009	0.2102	83.91%	0.2073	1.2966	-	-	0.2073	0.2240
1.3294	0.2252	85.00%	0.1700	1.1142	-	-	0.1700	0.1945
1.3932	0.2587	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.0998
1.4807	0.3047	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.0581
1.5591	0.3460	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0500

E.2.2 Muestra cargada a 200 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.8278.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa
0.9261	-	23.87%	50.7713	85.4208	-1.99E-06	-0.0044	85.4208	20.8857
0.9255	-	24.00%	50.2553	84.7641	-2.00E-06	-0.0047	84.7641	20.5891
0.8950	-	25.00%	46.5123	79.9493	-2.15E-06	-0.0066	72.7231	20.5434
0.8665	0.0000	25.51%	44.7288	77.6215	-2.23E-06	-0.0079	63.9523	18.3808
0.8739	0.0039	26.00%	43.0880	75.4593	-2.31E-06	-0.0094	57.1787	16.5141
0.8811	0.0078	27.00%	39.9485	71.2640	-2.46E-06	-0.0132	50.2684	15.0665
0.8877	0.0113	28.00%	37.0645	67.3374	-2.63E-06	-0.0184	44.6146	13.7725
0.8938	0.0146	29.00%	34.4104	63.6563	-2.80E-06	-0.0257	39.9267	12.6921
0.8995	0.0176	30.00%	31.9638	60.2003	-2.99E-06	-0.0356	35.9877	11.7787
0.9048	0.0205	31.00%	29.7052	56.9511	-3.17E-06	-0.0493	32.6348	10.9963
0.9097	0.0231	32.00%	27.6171	53.8927	-3.37E-06	-0.0680	29.7453	10.3168
0.9145	0.0257	33.00%	25.6843	51.0104	-3.57E-06	-0.0937	27.2263	9.7185
0.9190	0.0281	34.00%	23.8930	48.2911	-3.79E-06	-0.1287	25.0072	9.1847
0.9234	0.0304	35.00%	22.2312	45.7232	-4.01E-06	-0.1764	23.0336	8.7024
0.9277	0.0327	36.00%	20.6879	43.2958	-4.24E-06	-0.2414	21.2636	8.2617
0.9319	0.0350	37.00%	19.2534	40.9995	-4.48E-06	-0.3300	19.6648	7.8549
0.9361	0.0372	38.00%	17.9190	38.8253	-4.73E-06	-0.4505	18.2116	7.4760
0.9400	0.0394	39.00%	16.6767	36.7654	-4.99E-06	-0.6147	16.9239	7.1204
0.9440	0.0415	40.00%	15.5194	34.8123	-5.26E-06	-0.8381	15.7265	6.8003
0.9483	0.0438	41.00%	14.4406	32.9595	-5.54E-06	-1.1423	14.5864	6.4906

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9530	0.0463	41.96%	13.4767	31.2753	-5.82E-06	-1.5360	13.4767	6.1804
0.9658	0.0532	45.00%	10.8007	26.4348	-	-	10.8007	5.3124
0.9887	0.0654	50.00%	7.4466	19.9249	-	-	7.4466	4.1347
1.0140	0.0790	55.00%	5.0525	14.8323	-	-	5.0525	3.1532
1.0142	0.0791	55.04%	5.0365	14.7965	-	-	5.0365	2.9789
1.0422	0.0941	60.00%	3.3478	10.8409	-	-	3.3478	2.3497
1.0738	0.1110	65.00%	2.1451	7.7216	-	-	2.1451	1.7056
1.0964	0.1231	68.25%	1.5684	6.0812	-	-	1.5684	1.2930
1.1093	0.1301	70.00%	1.3112	5.3045	-	-	1.3112	1.2030
1.1490	0.1513	75.00%	0.7493	3.4605	-	-	0.7493	0.8243
1.1922	0.1745	80.00%	0.3871	2.0897	-	-	0.3871	0.5527
1.2154	0.1869	82.62%	0.2580	1.5327	-	-	0.2580	0.4341
1.2358	0.1978	85.00%	0.1700	1.1142	-	-	0.1700	0.3714
1.2728	0.2177	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.2639
1.2943	0.2291	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.2131
1.2990	0.2317	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.2081

E.2.3 Muestra cargada a 300 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 16.1573.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succión T. H. MPa	Succión T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9112	-	19.85%	59.7769	96.6290	-1.46E-06	-0.0018	109.0682	21.9488
0.9103	-	20.00%	58.8610	95.5093	-1.47E-06	-0.0019	108.0371	21.9074
0.8668	-	21.00%	54.3562	89.9376	-1.60E-06	-0.0029	93.8898	20.0169
0.8294	0.0000	21.81%	50.2553	84.7641	-1.70E-06	-0.0040	83.2487	18.4548
0.8399	0.0057	22.00%	46.5123	79.9493	-1.73E-06	-0.0043	71.7671	16.0888
0.8468	0.0095	23.00%	43.0880	75.4593	-1.86E-06	-0.0064	62.6643	14.7128
0.8530	0.0129	24.00%	39.9485	71.2640	-2.00E-06	-0.0093	55.3389	13.5813
0.8587	0.0160	25.00%	37.0645	67.3374	-2.15E-06	-0.0136	49.3518	12.6379
0.8638	0.0188	26.00%	34.4104	63.6563	-2.31E-06	-0.0197	44.3817	11.8393
0.8686	0.0214	27.00%	31.9638	60.2003	-2.46E-06	-0.0284	40.1926	11.1520
0.8730	0.0239	28.00%	29.7052	56.9511	-2.63E-06	-0.0407	36.6101	10.5508
0.8772	0.0261	29.00%	27.6171	53.8927	-2.80E-06	-0.0581	33.5047	10.0164
0.8812	0.0283	30.00%	25.6843	51.0104	-2.99E-06	-0.0827	30.7799	9.5340
0.8850	0.0304	31.00%	23.8930	48.2911	-3.17E-06	-0.1171	28.3630	9.0925
0.8887	0.0325	32.00%	22.2312	45.7232	-3.37E-06	-0.1655	26.1992	8.6838
0.8924	0.0345	33.00%	20.6879	43.2958	-3.57E-06	-0.2332	24.2464	8.3013
0.8961	0.0365	34.00%	19.2534	40.9995	-3.79E-06	-0.3279	22.4721	7.9405
0.8997	0.0384	35.00%	17.9190	38.8253	-4.01E-06	-0.4601	20.8509	7.5978
0.9032	0.0403	36.00%	17.3245	37.8440	-4.24E-06	-0.6444	19.4045	7.2856
0.9068	0.0424	37.00%	16.6767	36.7654	-4.48E-06	-0.9014	18.0284	6.9705
0.9076	0.0427	38.00%	15.5194	34.8123	-4.73E-06	-1.2595	17.3972	6.9109



e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9069	0.0424	38.47%	14.4406	32.9595	-4.85E-06	-1.4733	17.3245	6.9647
0.9126	0.0455	40.00%	12.4956	29.5304	-	-	15.5194	6.5078
0.9322	0.0562	45.00%	8.6541	22.3372	-	-	10.8007	5.1603
0.9537	0.0680	50.00%	5.9146	16.7218	-	-	7.4466	4.0233
0.9717	0.0778	53.84%	4.6634	13.9543	-	-	5.5395	3.2823
0.9774	0.0809	55.00%	3.9604	12.3215	-	-	5.0525	3.0789
1.0036	0.0952	60.00%	2.5754	8.8766	-	-	3.3478	2.3087
1.0325	0.1110	65.00%	1.6074	6.1962	-	-	2.1451	1.6943
1.0553	0.1235	68.64%	1.1797	4.8934	-	-	1.5074	1.3347
1.0642	0.1284	70.00%	0.9465	4.1363	-	-	1.3112	1.2179
1.0985	0.1471	75.00%	0.5119	2.5866	-	-	0.7493	0.8620
1.1339	0.1665	80.00%	0.2424	1.4613	-	-	0.3871	0.6097
1.1564	0.1788	83.29%	0.1401	0.9608	-	-	0.2310	0.4924
1.1673	0.1847	85.00%	0.0912	0.6923	-	-	0.1700	0.4445
1.1932	0.1989	90.00%	0.0211	0.2255	-	-	0.0553	0.3498
1.2072	0.2065	95.00%	0.0008	0.0179	-	-	0.0086	0.3081
1.2101	0.2082	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.3046

E.2.4 Muestra cargada a 500 kPa secado al horno.

Parámetro de escaneo B = 14.0292.

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P' = Pc + A*B MPa
0.9302	-	23.94%	50.5086	85.0867	-2.00E-06	-0.0030	85.0867	20.8659
0.9298	-	24.00%	50.2553	84.7641	-2.00E-06	-0.0031	84.7641	20.8434
0.9070	-	25.00%	46.5123	79.9493	-2.15E-06	-0.0043	75.9947	19.4987
0.8694	-	26.00%	43.0880	75.4593	-2.31E-06	-0.0060	65.0207	17.4054
0.8364	-	27.00%	39.9485	71.2640	-2.46E-06	-0.0083	56.2663	15.6919
0.8075	-	28.00%	37.0645	67.3374	-2.63E-06	-0.0114	49.2033	14.2769
0.7819	-	29.00%	34.4104	63.6563	-2.80E-06	-0.0157	43.4373	13.0968
0.7663	0.0000	29.06%	34.2645	63.4520	-2.81E-06	-0.0160	40.9735	12.4058
0.7711	0.0027	30.00%	31.9638	60.2003	-2.99E-06	-0.0215	36.9459	11.5838
0.7757	0.0053	31.00%	29.7052	56.9511	-3.17E-06	-0.0293	33.4010	10.8543
0.7801	0.0078	32.00%	27.6171	53.8927	-3.37E-06	-0.0399	30.3552	10.2137
0.7842	0.0101	33.00%	25.6843	51.0104	-3.57E-06	-0.0542	27.7095	9.6441
0.7881	0.0124	34.00%	23.8930	48.2911	-3.79E-06	-0.0733	25.3883	9.1320
0.7919	0.0145	35.00%	22.2312	45.7232	-4.01E-06	-0.0992	23.3328	8.6665
0.7956	0.0166	36.00%	20.6879	43.2958	-4.24E-06	-0.1339	21.4975	8.2391
0.7992	0.0186	37.00%	19.2534	40.9995	-4.48E-06	-0.1804	19.8467	7.8433
0.8027	0.0206	38.00%	17.9190	38.8253	-4.73E-06	-0.2430	18.3604	7.4769
0.8058	0.0224	39.00%	16.6767	36.7654	-4.99E-06	-0.3269	17.1101	7.1730
0.8093	0.0244	40.00%	15.5194	34.8123	-5.26E-06	-0.4396	15.8349	6.8340
0.8129	0.0264	41.00%	14.4406	32.9595	-5.54E-06	-0.5910	14.6694	6.5145
0.8165	0.0284	42.00%	13.4345	31.2007	-5.84E-06	-0.7943	13.5996	6.2118
0.8200	0.0304	43.00%	12.4956	29.5304	-6.14E-06	-1.0678	12.6143	5.9241
0.8236	0.0325	44.00%	11.6192	27.9434	-6.46E-06	-1.4357	11.7040	5.6497

e unid.	$\epsilon_v$ %	$S_{we}$ % (A)	Succion T. H. MPa	Succion T. S. Mpa	$ds_{ew}/d_s$	$ds_{ew}/d_s$ Escaneo	Succión E. S. Mpa (B)	P' P'= Pc + A*B MPa	$\Delta p_0$	SFCC Mpa
0.8248	0.0332	44.22%	11.4379	27.6115	-6.53E-06	-1.5305	11.4379	5.5574	0.0271	12.7057
0.8276	0.0347	45.00%	10.8007	26.4348	-	-	10.8007	5.3603	0.0267	12.3924
0.8459	0.0451	50.00%	7.4466	19.9249	-	-	7.4466	4.2233	0.0247	10.4571
0.8657	0.0563	55.00%	5.0525	14.8323	-	-	5.0525	3.2789	0.0227	8.6505
0.8832	0.0662	59.09%	3.6168	11.4983	-	-	3.6168	2.6371	0.0213	7.2854
0.8873	0.0685	60.00%	3.3478	10.8409	-	-	3.3478	2.5087	0.0210	6.9955
0.9104	0.0816	65.00%	2.1451	7.7216	-	-	2.1451	1.8943	0.0194	5.5085
0.9349	0.0955	70.00%	1.3112	5.3045	-	-	1.3112	1.4179	0.0180	4.2012
0.9568	0.1078	74.34%	0.8106	3.6747	-	-	0.8106	1.1026	0.0169	3.2187
0.9601	0.1097	75.00%	0.7493	3.4605	-	-	0.7493	1.0620	0.0168	3.0821
0.9842	0.1234	80.00%	0.3871	2.0897	-	-	0.3871	0.8097	0.0157	2.1575
1.0051	0.1352	85.00%	0.1700	1.1142	-	-	0.1700	0.6445	0.0150	1.4320
1.0173	0.1421	88.94%	0.0728	0.5825	-	-	0.0728	0.5648	0.0145	1.0026
1.0198	0.1436	90.00%	0.0553	0.4719	-	-	0.0553	0.5498	0.0144	0.9091
1.0272	0.1477	95.00%	0.0086	0.1134	-	-	0.0086	0.5081	0.0141	0.5918
1.0287	0.1486	100.00%	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.5046	0.0140	0.4840