



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# SIMULACIÓN EN MATLAB DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS INCLUYENDO EL ACOPLAMIENTO HIDROMECAÁNICO

Trabajo realizado por:

**Pablo Enrique Castillo Hernández**

Dirigido por:

**Antonio Lloret Morancho**

**Enrique Romero Morales**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica**

Barcelona, Octubre de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

**SIMULACIÓN EN MATLAB DEL COMPORTAMIENTO DE  
SUELOS NO SATURADOS INCLUYENDO EL  
ACOPLAMIENTO HIDROMECAÁNICO**

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

**PRESENTADO POR: PABLO ENRIQUE CASTILLO HERNÁNDEZ**

**DIRECTORES: ANTONIO LLORET MORANCHO**

**ENRIQUE ROMERO MORALES**

**BARCELONA, 2018**

## RESUMEN

El comportamiento de los suelos no saturados está condicionado principalmente por los aspectos mecánico (colapso, expansión, retracción y resistencia al corte) e hidráulico (curva de retención de agua), lo que hace necesario implementar modelos constitutivos que acoplen las componentes hidráulica y mecánica para simular correctamente el comportamiento de los suelos no saturados. El presente estudio desarrolla un programa en MATLAB que ofrece una herramienta alternativa y sencilla para reproducir el comportamiento de los suelos no saturados acoplando la parte mecánica usando el modelo Barcelona Basic Model (BBM) e hidráulica utilizando el modelo de Van Genuchten modificado.

En la primera fase del estudio se desarrolla un programa para modelar el comportamiento de los suelos saturados a través de un esquema explícito del modelo Cam Clay Modificado (MCCM) con el cual se simula un ejemplo sencillo de un ensayo teórico de laboratorio.

Posteriormente se desarrolla un programa para simular el comportamiento de los suelos no saturados mediante un esquema explícito del modelo Barcelona Basic Model (BBM) el cual permite representar los comportamientos fundamentales de los suelos no saturados como el colapso, retracción, hinchamiento y resistencia al corte; el funcionamiento del programa fue verificado siguiendo ejemplos expuestos en la literatura.

En la parte principal del estudio se desarrolla un programa en MATLAB mediante un esquema explícito en el cual se acoplan los modelos BBM y de Van Genuchten modificado a través de un proceso iterativo en el que se aplican incrementos en la tensión media neta y se mantiene constante un valor inicial de succión. Luego se calculan las deformaciones producidas por el incremento de tensión, además del índice de poros y el grado de saturación. Después se halla la succión asociada para el grado de saturación usando el modelo de Van Genuchten, el valor encontrado de succión se corrige hasta encontrar un valor que sea consistente con los valores hallados del índice de poros, grado de saturación y que además cumpla con la tolerancia establecida para la diferencia entre la succión inicial y calculada al final del incremento.

Una vez desarrollado el programa acoplado BBM-Van Genuchten se interpretan los ensayos de laboratorio a humedad y succión constante realizados en la arcilla roja de Barcelona; se ajustan los parámetros del modelo Van Genuchten original y corregido. Además, se incorpora una ley de scanning para reproducir el comportamiento del suelo durante ciclos de secado-humedecimiento.

En la parte final se muestra la simulación de los ensayos de laboratorio realizada mediante el programa acoplado y se comparan los valores obtenidos con los datos experimentales obtenidos en las mediciones de laboratorio.

## SUMMARY

The behavior of unsaturated soils is mainly conditioned by the mechanical (collapse, expansion, retraction and shear strength) and hydraulic (water retention curve) aspects, which makes it necessary to implement constitutive models that couple the hydraulic and mechanical components to correctly simulate the behavior of unsaturated soils. This study develops a MATLAB program that offers an alternative and simple tool to reproduce the behavior of unsaturated soils by coupling the mechanical part using the Barcelona Basic Model (BBM) and hydraulic part using the Van Genuchten model.

In the first phase of the study, a program is developed to model the behavior of saturated soils through an explicit scheme of the Modified Cam Clay model (MCCM) with which a simple example of a theoretical laboratory test is simulated.

Subsequently, a program is developed to simulate the behavior of unsaturated soils using an explicit scheme of the Barcelona Basic Model (BBM) which allows to represent the fundamental behaviors of unsaturated soils such as collapse, retraction, swelling and shear resistance; the operation of the program was verified following examples presented in the literature.

In the main part of the study, a MATLAB program is developed using an explicit scheme in which the BBM and Van Genuchten models are coupled through an iterative process in which increases in net mean stresses are applied and an initial suction value is maintained constant. The strains caused by the increase in stress are then calculated, along with the void ratio and the degree of saturation. Then the associated suction for the degree of saturation is found using the Van Genuchten model, the found value of suction is corrected to find a value that is consistent with the found values of the void ratio, degree of saturation and that also satisfies the tolerance established for the difference between the initial and calculated suction at the end of the increase.

Once the BBM-Van Genuchten coupled program has been developed, the laboratory water constant and constant suction tests carried out on the red clay of Barcelona are interpreted; the parameters of the original and corrected Van Genuchten model are adjusted. In addition, a scanning law is incorporated to reproduce the behavior of the soil during drying-wetting cycles.

The final part shows the simulation of the laboratory tests carried out using the coupled program and compares the values calculated with the experimental data obtained in the laboratory measurements.

## AGRADECIMIENTOS

Primero que todo a Dios por permitirme hacer realidad este sueño, toda la gloria es para Él.

Agradecimiento especial a mis padres Luz Amparo y Delio Miguel quienes con su grandísimo esfuerzo y sacrificio me han apoyado para poder alcanzar la meta, a mis hermanos Tatiana, Alexander, Walter y Estefania quienes me han brindado su apoyo y su cariño en la distancia haciendo que nunca me sintiera sólo, a mis primas Marivel y Yuly por su constante atención y cuidado, a mi abuela Rosario por sus constantes consejos y oraciones, a mi abuelo Antonio, a mi madrina Luz Estella, a mis padrinos Carlos y Enrique, a mis “primas” Camila y Valeria, y a toda mi familia porque de una u otra forma han contribuido a llevar a cabo con éxito esta labor.

A mis compañeros y amigos durante estos dos años especialmente Andrés, Juan Pablo, Camilo, Alex, Euler, Jesús, Santiago, David y a mis demás compañeros de máster, a Joaquín y Edward Morales por el apoyo y acogida en mi llegada y durante toda mi estancia en la ciudad, a las demás personas que conocí durante mi estancia en Barcelona Karen, Laura, Jason, Padre Carlos, Daniela, Martha, Clara, Pilar y Elías.

A mis tutores Antonio Lloret y Enrique Romero por la paciencia, el apoyo permanente durante la realización de este estudio, por compartir amable y generosamente sus conocimientos y velar siempre por un aprendizaje concienzudo.

A mis amigos en Colombia especialmente a Danilo por sus grandiosos aportes en la solución de los problemas del código; a Hernando, José Luis, Jorge, Cristian, Diego, Leonardo, Camilo, Mónica, Viviana, Camila, Diana, Jhaisury, Rogerio y Victor.

A mis profesores durante toda mi vida como estudiante ya que sin sus enseñanzas no hubiera sido posible avanzar en el conocimiento.

Al Instituto Colombiano de Estudios en el Exterior ICETEX ya que sin su apoyo hubiera sido imposible cumplir este sueño.

A Diana por su compañía, cariño, paciencia, apoyo, generosidad, comprensión, por tener siempre una sonrisa y por estar siempre ahí cuando más se necesitaba.

A todos: ¡Infinitas Gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	3
<b>2. SUELOS NO SATURADOS, ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....</b>	<b>4</b>
2.1 SUELOS COMPACTADOS.....	4
2.1.1 Influencia de la compactación sobre la permeabilidad.....	5
2.1.2 Influencia de la compactación sobre la fábrica del suelo .....	5
2.1.3 Influencia de la compactación sobre el comportamiento tensión-deformación .....	10
2.1.4 Cambios de volumen en suelos compactados.....	11
2.1.5 Succión en suelos compactados.....	15
2.2 SUELOS NO SATURADOS .....	17
2.2.1 Ecuación de tensiones efectivas en suelos no saturados.....	17
2.2.2 Superficies de estado para suelos no saturados .....	21
2.2.3 Modelos de estado crítico en suelos no saturados .....	31
2.3 CURVA DE RETENCIÓN.....	35
<b>3. PROGRAMA DE MATLAB PARA MODELOS CAM CLAY MODIFICADO Y BARCELONA BASIC MODEL .....</b>	<b>40</b>
3.1 PROGRAMACIÓN EN LENGUAJE MATLAB.....	40
3.2 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO CAM CLAY MODIFICADO.....	40
3.2.1 Verificación del funcionamiento del programa del MCCM.....	45
3.3 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO BÁSICO DE BARCELONA (BBM) ..	46
3.3.1 Verificación del funcionamiento del programa para el modelo BBM .....	51
3.4 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO BÁSICO DE BARCELONA (BBM) PARA TRAYECTORIAS DE HUMEDAD CONSTANTE .....	53
3.4.1 Definición paso a paso del programa BBM para humedad constante .....	53
<b>4. INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE MEDIANTE LOS MODELOS DE VAN GENUCHTEN Y VAN GENUCHTEN MODIFICADO (FEBEX).....</b>	<b>60</b>
4.1 AJUSTE DE DATOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO 1 A HUMEDAD CONSTANTE CON MODELO VAN GENUCHTEN .....	61
4.2 AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 1 CON MODELO FEBEX .....	64
4.3 AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 2 CON MODELO VAN GENUCHTEN.....	66

4.4	AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 2 CON MODELO FEBEX .....	68
4.5	INTERPRETACIÓN CICLO SECADO-HUMEDECIMIENTO EN LOS ENSAYOS A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE .....	69
4.6	CÁLCULO DE LA LEY DE SCANNING.....	73
<b>5.</b>	<b>MODELACIÓN DE LOS ENSAYOS 1 Y 2 A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE</b>	<b>74</b>
5.1	MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 1 A HUMEDAD CONSTANTE.....	75
5.2	MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 2 A HUMEDAD CONSTANTE.....	78
5.3	MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 1 A SUCCIÓN CONSTANTE .....	82
5.4	MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 2 A SUCCIÓN CONSTANTE .....	85
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>89</b>
6.1	LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	90
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Curvas de compactación de la arcilla roja de Barcelona para diferentes niveles de energía (Barrera, 2002). .....	4
Figura 2.	Variación de la permeabilidad de un suelo compactado, adaptado de (Bjerrum & Huder, 1957).....	5
Figura 3.	Arreglo de las partículas del suelo dependiendo del contenido de agua (Lambe, 1958).6	
Figura 4.	Fotografía tomada con microscopio del arreglo geométrico de las partículas del suelo. (Diamond, 1970) .....	7
Figura 5.	Distribución de tamaño de poro según el contenido de agua y la energía de compactación, adaptado de (Huang, 1981). .....	8
Figura 6.	Clasificación de los tipos de poros (Collins & McGown, 1974). .....	9
Figura 7.	Configuraciones de fábrica del suelo (Alonso, et al., 1987). .....	10
Figura 8.	Comportamiento tenso-deformacional del suelo compactado en función de su contenido de agua (Ahmed, et al., 1974). .....	10
Figura 9.	Meniscos entre dos partículas de suelo (Carman, 1953). .....	11
Figura 10.	Agua y aire libres además de agua atrapada y aire ocluido en la masa suelo. ....	11
Figura 11.	Esquema de un suelo muy seco. ....	12
Figura 12.	Esquema de un suelo seco. ....	12
Figura 13.	Esquema de un suelo con contenido óptimo de agua. ....	13
Figura 14.	Esquema de un suelo húmedo.....	13
Figura 15.	Esquema de un suelo muy húmedo.....	14
Figura 16.	Variación cualitativa de la succión en el plano de compactación.....	15

Figura 17. Contornos de igual succión total en el plano de compactación (Barrera, 2002). .....	16
Figura 18. Resultados de los ensayos edométricos realizados por (Jennings & Burland, 1962). ..	18
Figura 19. Cambios de volumen en un plano tensión-índice de poros (Bishop & Blight, 1963). .	19
Figura 20. Cambio en la succión en función del contenido de agua en valores próximos al óptimo (Bishop & Blight, 1963). .....	20
Figura 21. Variación de la succión con la carga en un ensayo de compresión isotrópica a contenido de agua constante (Bishop & Blight, 1963). .....	21
Figura 22. Plano de interacción intergranular (Matyas & Radhakrishna, 1968). .....	22
Figura 23. Superficies de estado para suelos no saturados (Matyas & Radhakrishna, 1968). .....	24
Figura 24. Superficies de estado en base a puntos experimentales (Matyas & Radhakrishna, 1968). .....	24
Figura 25. Superficie de estado para el índice de poros y humedad según (Fredlund, 1979). .....	27
Figura 26. Evolución del hinchamiento con el tiempo (Lloret & Alonso, 1980). .....	28
Figura 27. Variación en el tiempo de las permeabilidades del suelo al aire y al agua (Lloret & Alonso, 1980). .....	28
Figura 28. Evolución en el tiempo del asentamiento en un ensayo de colapso (Lloret & Alonso, 1980). .....	29
Figura 29. Superficies de estado para el índice de poros y el grado de saturación (Lloret, 1982). 29	
Figura 30. Ensayos mínimos sugeridos para hallar la superficie de estado (Lloret, 1982). .....	30
Figura 31. Superficies de estado para la arcilla arenosa Piñolen (Lloret & Alonso, 1985). .....	31
Figura 32. Superficies de fluencia en el plano ( $p-s$ ) para un modelo elastoplástico de suelos no saturados (Alonso, et al., 1987) .....	32
Figura 33. Acoplamiento entre las superficies LC y SI (Alonso, et al., 1987). .....	32
Figura 34. Variación de las superficies de fluencia según la energía de compactación (Alonso, et al., 1987). .....	33
Figura 35. Superficies de fluencia para representar el fenómeno de hinchamiento (Alonso, et al., 1987). .....	33
Figura 36. Superficie de fluencia en los planos $p-q$ y $p-s$ (Alonso, et al., 1987). .....	34
Figura 37. Curva de retención de agua de un limo en el plano $pF-w$ (Jennings & Burland, 1962). .....	36
Figura 38. Aspecto típico de una curva de retención de agua (Ng & Menzies, 2007). .....	37
Figura 39. Curva de retención de agua dependiendo del tipo de suelo (Fredlund & Xing, 1994). 37	
Figura 40. Fenómeno de histéresis en la curva de retención. .....	38
Figura 41. Variación de la curva de retención de agua con el índice de poros (Romero, et al., 2011). .....	39
Figura 42. Diagrama de flujo del modelo MCCM. .....	44
Figura 43. Trayectoria tensional ensayo drenado. .....	45
Figura 44. Grafica de tensión desviadora vs deformación vertical, a la izquierda la solución realizada en la asignatura Mecánica de Suelos y a la derecha la solución con el script del MCCM. .....	45
Figura 45. Diagrama de flujo del modelo BBM. .....	50
Figura 46. Trayectorias tensionales isotropas. .....	51



Figura 47. Cambio en el volumen específico con la tensión media neta, a la izquierda el calculado con el programa desarrollado y a la derecha la gráfica original mostrada en (Alonso, et al., 1990).....	51
Figura 48. Trayectoria tensional con desviador. ....	52
Figura 49. Variación de la deformación de corte para la trayectoria con tensión desviadora, a la izquierda se muestra el cálculo realizado con el programa y a la izquierda la gráfica original mostrada en (Alonso, et al., 1990) .....	52
Figura 50. Diagrama de flujo del programa BBM con humedad constante.....	58
Figura 51. Diagrama de flujo ciclo while.....	59
Figura 52. Curvas de compactación del suelo (Mora, 2016). ....	60
Figura 53. Datos ensayo de compresión para succión inicial de 0.50 MPa. ....	61
Figura 54. Ajuste de datos ensayo de compresión para el modelo de Van Genuchten.....	62
Figura 55. Ajuste de la curva de retención de agua mediante modelo Van Genuchten.....	63
Figura 56. Ajuste de los datos del ensayo de compresión para el modelo FEBEX. ....	65
Figura 57. Ajuste de la curva de retención de agua con modelo FEBEX. ....	65
Figura 58. Datos ensayo de compresión para succión inicial de 0.10 MPa. ....	66
Figura 59. Ajuste de datos ensayo de compresión para el modelo Van Genuchten. ....	67
Figura 60. Ajuste de la curva de retención de agua para el modelo van Genuchten.....	67
Figura 61. Ajuste de datos del ensayo de compresión para el modelo FEBEX. ....	68
Figura 62. Ajuste de la curva de retención de agua para el modelo FEBEX. ....	69
Figura 63. Ensayos de compresión a humedad y succión constante. ....	69
Figura 64. Curvas de retención y zona de scanning.....	70
Figura 65. Curva de retención y curva e-log p. ....	71
Figura 66. Ajuste del ciclo secado-humedecimiento con la ley de scanning.....	72
Figura 67. Trayectoria tensional del ensayo de compresión 1 a succión constante. ....	75
Figura 68. Gráfica índice de poros vs succión del ensayo 1 a humedad constante.....	75
Figura 69. Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 1 a humedad constante. ....	76
Figura 70. Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 1 a humedad constante. ....	76
Figura 71. Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 1 a humedad constante. ....	77
Figura 72. Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 1 a humedad constante.....	77
Figura 73. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 1 a humedad constante. ....	78
Figura 74. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante.....	78
Figura 75. Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 2 a humedad constante. ....	79
Figura 76. Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 2 a humedad constante. ....	79
Figura 77. Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 2 a humedad constante. ....	80
Figura 78. Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante. ....	80

Figura 79. Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante.....81

Figura 80. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 2 a humedad constante. .81

Figura 81. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante. ....82

Figura 82. Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 1 a succión constante. ....82

Figura 83. Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 1 a succión constante. ....83

Figura 84. Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 1 a succión constante. 83

Figura 85. Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante...84

Figura 86. Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante.....84

Figura 87. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 1 a succión constante. ...85

Figura 88. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante. ....85

Figura 89. Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 2 a succión constante. ....86

Figura 90. Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 2 a succión constante. ....86

Figura 91. Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 2 a succión constante. 87

Figura 92. Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante...87

Figura 93. Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante.....88

Figura 94. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 2 a succión constante. ...88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Posibles combinaciones para definir el estado de tensiones en un suelo no saturado (Fredlund & Morgenstern, 1976). ....25

Tabla 2. Correspondencia de cada término en las ecuaciones(13) y (14). ....26

Tabla 3. Parámetros del modelo Cam Clay Modificado, cargados desde MS Excel. ....40

Tabla 4. Trayectoria tensional para el MCCM. ....41

Tabla 5. Variables tensionales de estado y de historia del MCCM. ....41

Tabla 6. Vectores de deformaciones y vectores auxiliares para el cálculo de las deformaciones. .41

Tabla 7. Lista de parámetros del modelo BBM, cargados desde MS Excel. ....46

Tabla 8. Trayectoria tensional (p, q, s) descrita para los ejemplos. ....46

Tabla 9. Vectores de las variables básicas del modelo BBM. ....47

Tabla 10. Vectores auxiliares para graficar las superficies de fluencia inicial y final. ....47

Tabla 11. Vectores de deformación y de incrementos de deformación. ....48

Tabla 12. Parámetros modelo BBM y curva de retención del tipo Van Genuchten. ....54

Tabla 13. Trayectoria tensional (p, q). ....54

Tabla 14. Variables tensionales para una trayectoria de humedad constante. ....55

Tabla 15. Propiedades del suelo usado en los ensayos de compresión (Mora, 2016). ....60

Tabla 16. Ajuste de datos medidos en laboratorio mediante el modelo Van Genuchten. ....61

Tabla 17. Parámetros del modelo Van Genuchten para el ensayo de 0.50 MPa. ....62

Tabla 18. Procedimiento de ajuste de los datos de la curva de retención con modelo FEBEX. ....64

Tabla 19. Parámetros ajustados del modelo FEBEX para el ensayo de 0.50 MPa. ....64



Tabla 20. Parámetros del modelo Van Genuchten para el ensayo de 0.10 MPa.....	66
Tabla 21. Parámetros del modelo FEBEX para el ensayo de 0.10 MPa. ....	68
Tabla 22. Ajuste por mínimos cuadrados para la ley de scanning .....	73
Tabla 23. Parámetros para la ley de scanning. ....	73
Tabla 24. Parámetros del modelo BBM para la modelación del ensayo.....	74

## 1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los suelos compactados es de vital importancia dentro de la ingeniería de terreno dado que diferentes e importantes obras como carreteras, aeropuertos, vías férreas y canales se erigen sobre suelos compactados o se componen de ellos como el caso de las presas de tierra. Tomando esto como punto de partida se hace de vital importancia contar con una buena comprensión y un robusto conocimiento de los aspectos fundamentales que gobiernan el comportamiento de los suelos compactados para poder así optimizar y garantizar un proceso integral en el proceso de la ingeniería desde la concepción del proyecto, pasando por el diseño, construcción y finalizando con un servicio satisfactorio, eficiente y seguro como objetivo último del ingeniero.

El estudio de los suelos compactados inicia en 1933 con el ingeniero Ralph Proctor con su prueba de laboratorio para determinar el contenido de agua en el que un suelo adquiere una densidad y resistencia máximas con la menor cantidad de espacios vacíos en el suelo, siguieron este camino (Bjerrum & Huder, 1957) estudiando el efecto de la compactación del suelo sobre la permeabilidad al agua, (Lambe, 1958), (Seed & Chan, 1959) y (Kell, 1964) con sus estudios sobre la estructura adquirida por el suelo dependiendo de la energía y contenido de agua empleadas en el proceso de compactación. Posteriormente (Diamond, 1970) y (Ahmed, et al., 1974) nutrieron aún más el proceso del conocimiento mediante métodos de observación directa a través de microscopio, más adelante con (García Bengochea, et al., 1979) y (Huang, 1981) mediante la estimación cuantitativa mediante métodos probabilísticos de la distribución de tamaño de poros en los suelos compactados.

Posteriormente surge la mecánica de suelos no saturados con la revisión de la ecuación de tensión efectiva de Terzaghi para suelos localizados principalmente en zonas áridas y semiáridas que no cumplen con la condición de estar completamente saturados y en los cuales no era posible aplicar la ecuación de tensiones efectivas para suelos saturados, dada esta necesidad autores como (Aitchison & Donald, 1956), (Jennings, 1957), (Croney, et al., 1958), (Bishop, 1959), (Aitchison, 1960) y (Aitchison & Bishop, 1960) plantearon diferentes expresiones matemáticas análogas al principio de tensión efectiva de Terzaghi encontrando que era bastante complejo encontrar una expresión similar al principio de tensiones efectivas, tiempo después diferentes autores como (Jennings & Burland, 1962) y (Bishop & Blight, 1963) estudiaron las limitaciones de la ecuación de tensiones efectiva propuesta por (Bishop, 1959) encontrando que era insuficiente para describir comportamientos propios de suelos parcialmente saturados como el colapso y el hinchamiento.

Para solucionar el problema (Matyas & Radhakrishna, 1968) proponen usar elementos conocidos como superficies de estado que permiten describir el estado tensional del suelo, la principal limitación de este tipo de solución es la falta de unicidad en la superficie causada por fenómenos de histéresis durante los ciclos de secado-humedecimiento. Mas adelante (Fredlund & Morgenstern, 1976) proponen una serie de expresiones elásticas basadas en elasticidad para intentar describir el comportamiento del suelo ante acciones externas de secado-humedecimiento o de carga y descarga.

En la década de los ochenta el conocimiento en los suelos no saturados avanza considerablemente con trabajos como los de (Lloret & Alonso, 1980) y (Lloret, 1982) en los que se modela el fenómeno de consolidación unidimensional en suelos no saturados incluyendo de alguna forma los fenómenos de colapso e hinchamiento, y se proponen expresiones matemáticas para superficies de estado en suelos no saturados. A finales de la década aparecen las bases del primer modelo elastoplástico para suelos no saturados con el trabajo de (Alonso, et al., 1987), y finalmente un modelo elastoplástico con las investigaciones de (Josa, 1988) y (Alonso, et al., 1990) cuyo modelo reproduce de manera razonable las principales características de los suelos no saturados moderado o poco expansivos.

Poco después (Gens & Alonso, 1992) formulan las bases de un modelo elastoplástico para suelos expansivos y así completar un conjunto de modelos que permiten reproducir los aspectos básicos de los suelos no saturados, en investigaciones posteriores se ha tratado de mejorar diferentes aspectos y limitaciones de los modelos originales tratando de incluir una mayor cantidad de información y tener en cuenta más variables como por ejemplo el grado de saturación (Gallipoli, 2000), (Gallipoli, et al., 2003), la microestructura (Alonso, et al., 1999), temperatura, (Sanchez, et al., 2005), histéresis en la curva de retención (Vaunat, et al., 2000); todo ello en aras de reproducir mejor el comportamiento de los suelos no saturados y tener la posibilidad de hacer predicciones y diseños acertadas.

## 1.1 OBJETIVOS

Visto el interés geotécnico que se comentó anteriormente, es bueno señalar que el comportamiento del suelo no saturado está muy condicionado por los aspectos hidráulicos (curva de retención de agua) y mecánicos (colapso, expansión y resistencia al corte). Tradicionalmente, los modelos constitutivos más de ámbito mecánico se han implementado en elementos finitos (BBM en Code Bright y Plaxis). Sin embargo, los aspectos hidráulicos acoplados no han sido tenidos en cuenta habitualmente. Esta tesina nace de la necesidad de tener una herramienta sencilla para tratar de simular el comportamiento de suelos no saturados teniendo en cuenta los aspectos mecánicos e hidráulicos y así interpretar ensayos de laboratorio acoplados. Para tal fin se ha utilizado un programa de Matlab en el cual se han implementado diferentes modelos hidro-mecánicos avanzados para entender mejor el comportamiento de ensayos de laboratorio.

El objetivo principal de este TFM es el de modelar ensayos de compresión para trayectorias de humedad y succión constante usando para ello el Modelo Básico de Barcelona (BBM) para la parte mecánica y los modelos de Van Genuchten original y corregido para la parte hidráulica. Como objetivos específicos se pueden mencionar:

- Estudiar el funcionamiento del modelo BBM a lo largo de diferentes trayectorias tensionales incluidas trayectorias con tensión desviadora.
- Desarrollar un script en el programa MATLAB que reproduzca satisfactoriamente las características del modelo BBM.
- Desarrollar un script en el programa MATLAB que acople el modelo BBM con el modelo de Van Genuchten mediante un esquema explícito para trayectorias tensionales isotrópicas y triaxiales.

- Realizar un ajuste de parámetros del modelo Van Genuchten para los ensayos de compresión a humedad constante realizados por (Mora, 2016) en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad.
- Desarrollar la formulación del modelo BBM para tensiones generalizadas.

## 1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento consta en total de 6 capítulos contenido se detalla a continuación.

En el Capítulo 1 se expone un resumen, los objetivos y alcance del estudio y estructura del documento.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica del estado del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y de los suelos compactados, haciendo un recorrido por la influencia de la energía y contenido de humedad de compactación en las propiedades del suelo como permeabilidad, resistencia, comportamiento tensión-deformación, fábrica, cambio de volumen y succión. En cuanto a suelos parcialmente saturados se empieza con la ecuación de tensiones efectivas para suelos no saturados propuesta por (Bishop, 1959) y las posteriores modificaciones propuestas para corregir sus limitaciones, después se realiza un recorrido por las superficies de estado y finalmente se comentan los modelos elastoplásticos para suelos no saturados.

En el Capítulo 3 se desarrolla y se explican paso a paso scripts en el programa MATLAB para los modelos Cam Clay Modificado y Barcelona Basic Model (BBM), se presentan diagramas de flujo y tablas detalladas con las variables y vectores utilizados en el funcionamiento del programa, los scripts se resumen de manera general mediante diagramas de flujo, finalmente se presenta una verificación del programa BBM comparando los resultados obtenidos con los resultados del artículo original de (Alonso, et al., 1990).

Posteriormente se realiza y explica paso a paso el funcionamiento del programa desarrollado para acoplar el modelo BBM con una curva de retención de agua tipo Van Genuchten para modelar ensayos con contenido de agua constante, se presentan tablas detalladas con las variables y vectores utilizados, para finalizar se presenta un resumen del programa mediante dos diagramas de flujo correspondientes a un diagrama general y un diagrama específico para el ciclo iterativo.

En el Capítulo 4 se realiza el ajuste de parámetros de los modelos de Van Genuchten y FEBEX mediante el método de mínimos cuadrados para los ensayos de compresión en el limo arcilloso de Barcelona para trayectorias de humedad y succión constantes desarrollados por (Mora, 2016) en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad.

En el Capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos en la modelación de los dos ensayos de compresión para humedad y succión constante se presentan los análisis de los resultados obtenidos.

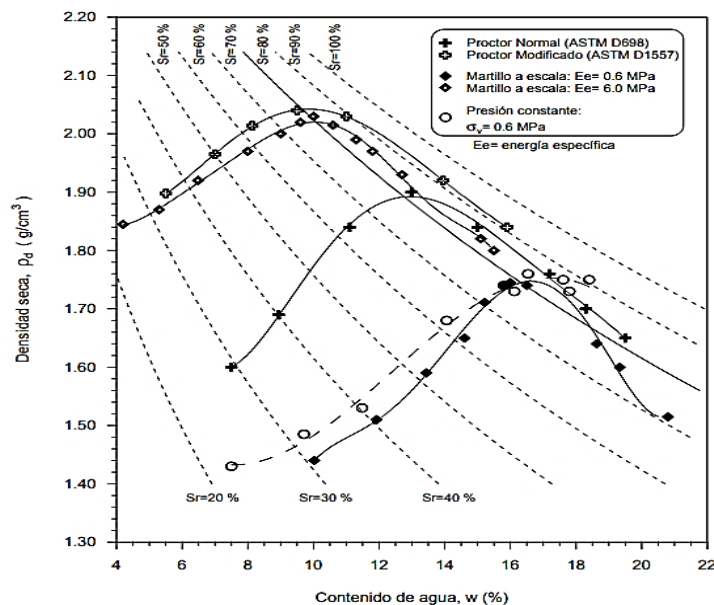
En el Capítulo 6 se comentan las conclusiones y las líneas de investigación futuras.

## 2. SUELOS NO SATURADOS, ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 SUELOS COMPACTADOS

El estudio de los suelos compactados inició a partir de 1933 cuando (Proctor, 1933) de la Oficina de Abastecimiento de Agua y Suministros de Los Ángeles en los Estados Unidos, diseñó una prueba de laboratorio para hallar el contenido de agua óptimo con la menor cantidad de poros posible en el suelo. Proctor realizó pruebas a más de 200 suelos diferentes a diferentes contenidos de humedad; con base a estos ensayos demostró que existía un contenido de agua para el que la cantidad de poros era mínima.

Si se representan los datos obtenidos en el ensayo de Proctor en un plano contenido de agua-densidad seca ( $w$ - $\rho_d$ ) se obtiene una curva llamada curva de compactación, tradicionalmente esta curva se divide en dos ramas, la rama seca correspondiente a la zona de contenidos de agua menores al óptimo y la rama húmeda para el sector de la curva con valores mayores al contenido de agua óptimo, si se incrementa la energía de compactación en un ensayo conocido como Proctor Modificado la curva se desplaza a la izquierda hacia menores contenidos de agua, por lo tanto el contenido de agua óptimo disminuye su valor; en la Figura 1 se muestra una curva de compactación típica para los ensayos de Proctor y Proctor Modificado.



**Figura 1. Curvas de compactación de la arcilla roja de Barcelona para diferentes niveles de energía (Barrera, 2002).**

Posteriormente al estudio realizado por Proctor, un gran número de investigadores han estudiado el comportamiento de los suelos compactados, dentro de los hallazgos encontrados se destaca principalmente el efecto del posicionamiento de las partículas del suelo unas respecto a las otras en lo que se conoce como “fábrica” del suelo y la cual se adquiere durante el proceso de compactación y depende del contenido de agua, del método de compactación y de la energía empleada.



### 2.1.1 Influencia de la compactación sobre la permeabilidad

En 1957 (Bjerrum & Huder, 1957) investigaron sobre la permeabilidad de una arcilla compactada y posteriormente saturada en una célula triaxial, encontrando que la permeabilidad de un suelo compactado, con una humedad 5% menor a la humedad óptima, era menor que la permeabilidad del suelo saturado, además notaron que esta diferencia disminuía a medida que se aumentaba el contenido de agua; también observaron que la permeabilidad de la arcilla compactada disminuía hasta un mínimo localizado alrededor del contenido de agua óptimo, y para humedades superiores a este la diferencia entre la permeabilidad saturada y no saturada era considerablemente menor que la observada para contenidos de agua bajos, esta situación se muestra en la Figura 2.

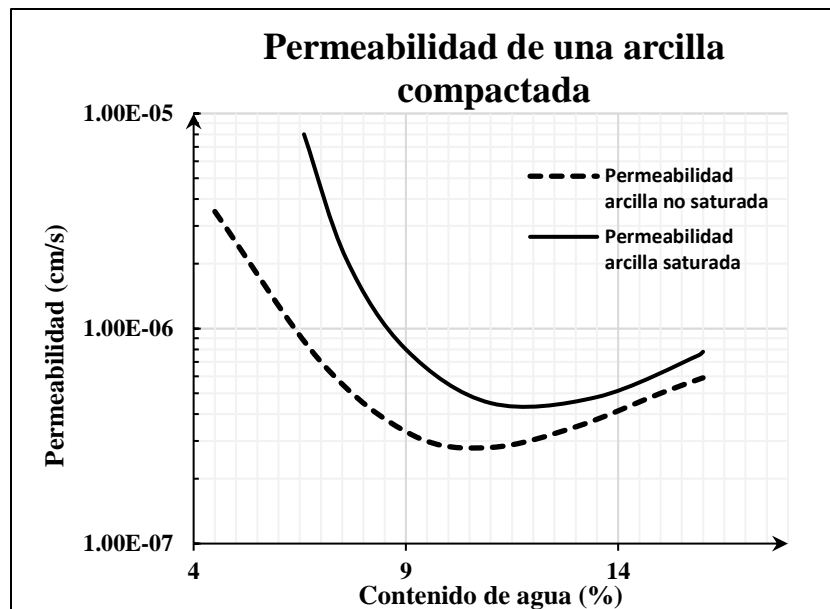


Figura 2. Variación de la permeabilidad de un suelo compactado, adaptado de (Bjerrum & Huder, 1957).

Vale la pena resaltar que en la Figura 2 se observa que la permeabilidad disminuye rápidamente para contenidos de agua inferiores al óptimo alcanzando un valor mínimo en los alrededores del contenido de agua óptimo y al aumentar la humedad la permeabilidad, empieza de nuevo a aumentar su valor.

### 2.1.2 Influencia de la compactación sobre la fábrica del suelo

Dentro de la serie de estudios que señalan la influencia de la fábrica en el comportamiento del suelo y de su dependencia del método de compactación se encuentran los trabajos realizados en arcillas por (Lambe, 1958) en el cual acuña un concepto al que llama “deficiencia de agua”, la cual define como la diferencia entre la cantidad de agua que requiere una partícula para desarrollar completamente la capa doble y la cantidad de agua que contiene la partícula.

Partiendo del concepto de deficiencia de agua (Lambe, 1958) propone 3 diferentes zonas (A, B y C) en el plano  $w-\rho_d$ , dependiendo del arreglo geométrico de las partículas y que se diferencian a continuación.

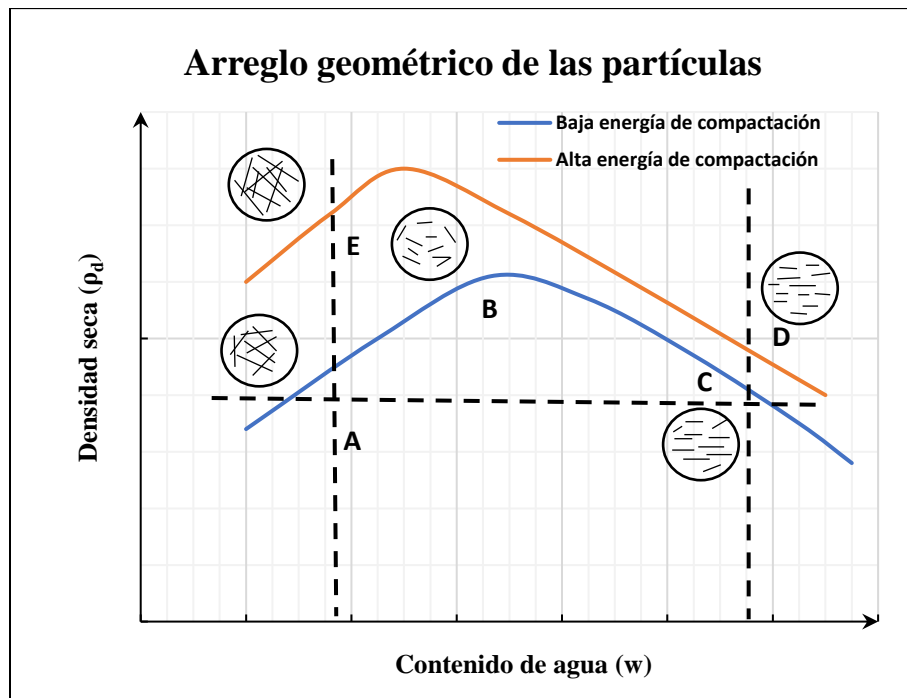


La zona A con contenido de agua insuficiente para desarrollar la capa doble, reduciendo así las fuerzas de repulsión entre partículas, por lo que estas van a tomar una orientación al azar dando como resultado una estructura floculada teniendo como consecuencia una baja densidad.

La zona B con mayor contenido de agua que permite a las partículas organizarse de manera más organizada, permitiendo adquirir una mayor densidad.

La zona C con un mayor contenido de agua donde disminuyen las fuerzas de atracción entre partículas, dando como resultado una estructura más ordenada que en la zona B y por lo tanto una menor densidad.

Las zonas D y E corresponden a zonas homólogas de las zonas A y C, pero han sido compactadas a mayor energía, por lo que cuentan con mayor densidad ya que las partículas están más próximas entre si a causa de la mayor energía que les ha sido aplicada, las diferentes zonas propuestas se muestran en la Figura 3.



**Figura 3. Arreglo de las partículas del suelo dependiendo del contenido de agua (Lambe, 1958).**

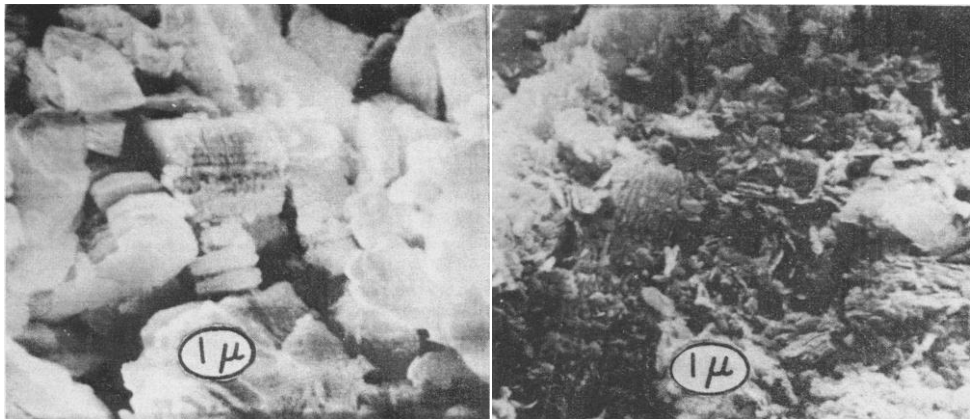
Posterior al trabajo de Lambe (Seed & Chan, 1959) estudiaron el efecto de la fábrica en el comportamiento del suelo en aspectos como la resistencia al corte y los cambios de volumen de una Caolinita; dentro del estudio sugerían la posibilidad de relacionar la retracción del suelo con la orientación de las partículas. En el mismo estudio registraron que los suelos compactados en la rama seca sufrían menores retracciones que los compactados por la rama húmeda; los mismos autores mencionan que las deformaciones de corte provocadas por los métodos de impacto y amasado son las causantes de que las partículas del suelo adquieran una estructura floculada o una estructura dispersa.

En otros ensayos realizados por (Seed & Chan, 1959) midieron las presiones de hinchamiento experimentadas encontrando que los suelos compactados por la rama seca presentaban menores presiones de hinchamiento que las presentadas por los suelos compactados en la rama húmeda.

Ya en los años sesenta surgen estudios como los hechos por (Kell, 1964) en los que se realiza un proceso de compactación por los métodos de impacto, amasado y compactación estática de una Caolinita, y posteriormente se hace uso del microscopio para observar la orientación de las partículas del suelo, dentro de los resultados confirma lo expuesto por (Lambe, 1958) encontrando que los suelos compactados en la rama seca adquieren una estructura tipo “castillo de naipes” y los suelos compactados en la rama húmeda presentan un arreglo de partículas del tipo disperso.

Dentro de otros resultados (Kell, 1964) sugiere que el proceso de retracción tiene un efecto muy pequeño sobre la fábrica del suelo, también encontró que las fábricas resultantes de los procesos de amasado e impacto eran bastante similares.

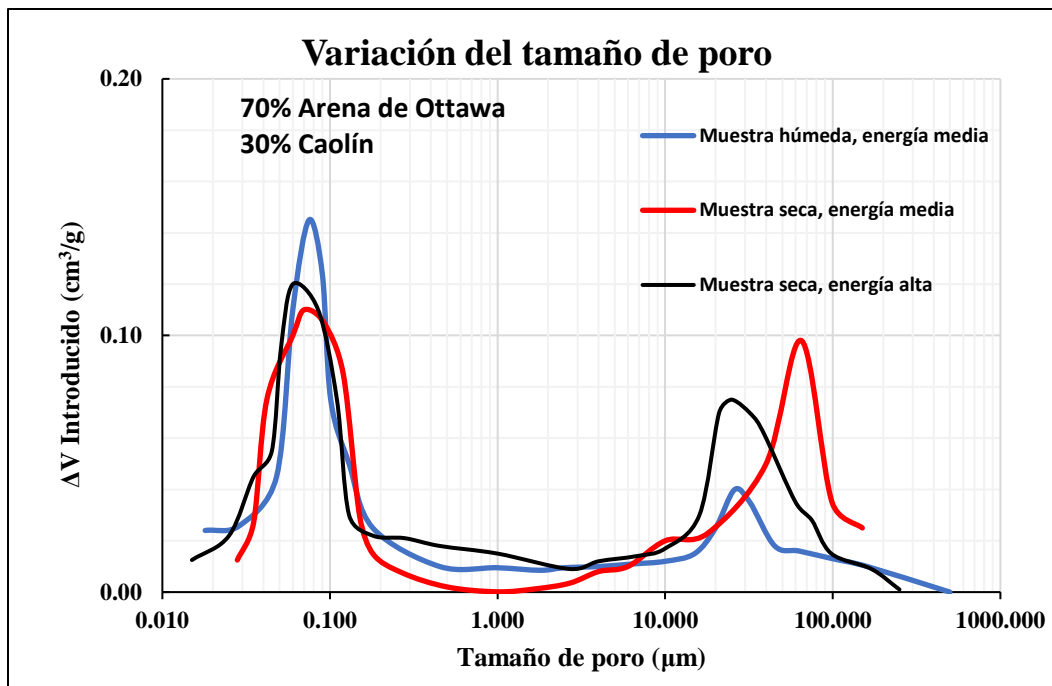
Ya entrada la década de los setenta (Diamond, 1970) realiza un estudio de porosimetría en arcillas usando la técnica de intrusión de mercurio, encontrando que los suelos compactados muestran una doble porosidad, y observando además que en los suelos compactados en la rama seca presentan una mayor cantidad de poros relativamente “grandes” dado que tienen una estructura floculada, por otro lado los suelos compactados por la rama húmeda mostraron una cantidad menor de poros “grandes” ya que tienen una configuración geométrica más ordenada, esta situación se muestra en la Figura 4, donde a la izquierda se ve el suelo compactado por la rama húmeda y a la derecha el suelo compactado por la rama seca.



**Figura 4. Fotografía tomada con microscopio del arreglo geométrico de las partículas del suelo. (Diamond, 1970)**

Posteriormente en estudios como el realizado por (Ahmed, et al., 1974) en el que se compacta una arcilla tipo Grundita y se mide el volumen de poros mediante intrusión de mercurio, se encuentra que para este tipo de suelo el método de compactación influía muy poco en la cantidad de poros medida, después de la compactación y recalando que el factor que influye más fuertemente en la fábrica del suelo es el contenido de agua en el suelo.

Ya a finales de los años setenta y principios de los ochenta estudios como los de (García Bengoechea, et al., 1979) y posteriormente (Huang, 1981) realiza un estudio de porosimetría y mediante funciones de densidad probabilística calcula la distribución de tamaño de poro para mezclas caolín y arena de Ottawa en diferentes proporciones, dentro de los resultados se destaca la confirmación de que el contenido de agua es el factor determinante principal sobre la fábrica del suelo, ya que las muestras compactadas en la rama húmeda registraban menor cantidad de macroporos que las muestras compactadas en la rama seca, también encontró que el aumento en la energía de compactación prácticamente solo influía en la cantidad de macroporos ya que la cantidad de microporos sufrían variaciones muy pequeñas; ambas situaciones se aprecian en la Figura 5.

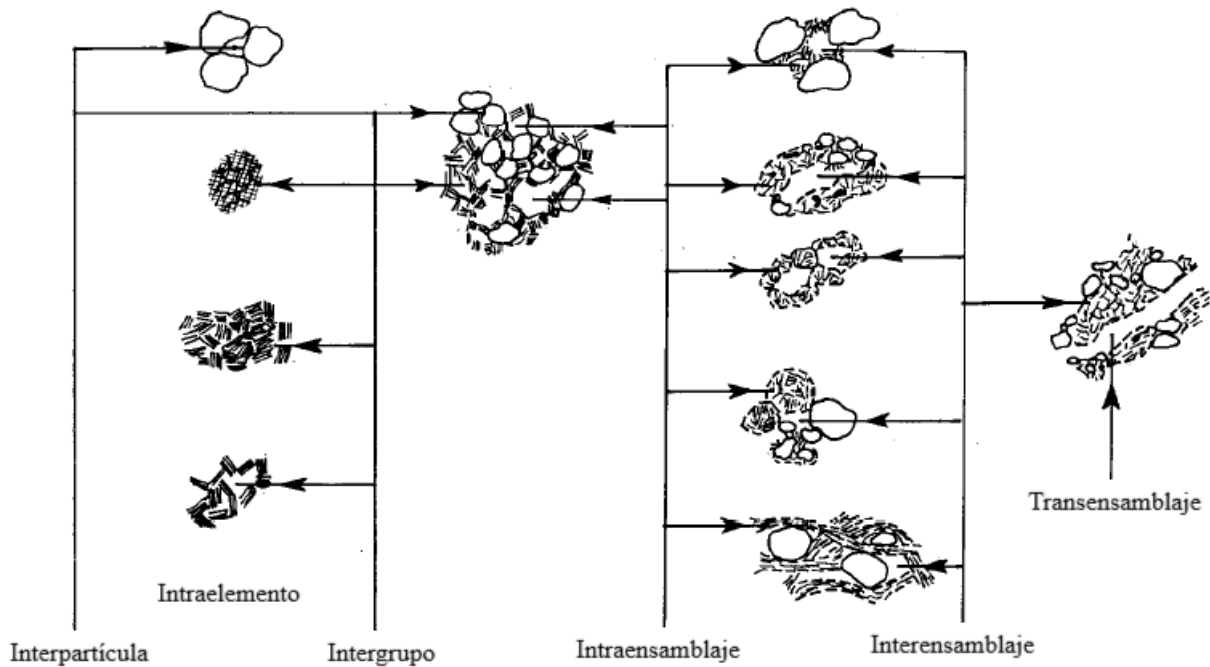


**Figura 5. Distribución de tamaño de poro según el contenido de agua y la energía de compactación, adaptado de (Huang, 1981).**

Como se observa en la los suelos compactados en la rama seca presentan una distribución bimodal de tamaño de poros independientemente del nivel de energía aplicado. Estos conceptos de fábrica expuestos anteriormente se complementan con los estudios de (Collins & McGown, 1974), (Alonso, et al., 1987) y (Mendoza & Alberro, 1992), donde se divide la fábrica del suelo en tres elementos básicos que son:

1. Arreglos elementales de partículas referidos a nivel de interacción entre partículas individuales de arcilla, limo o arena; o también a la interacción entre grupos pequeños de partículas.
2. Ensamblajes de partículas definidos como unidades con uno o más arreglos elementales de partículas y con fronteras físicas claramente definidas y una función mecánica específica. Dentro de los tipos de ensamblajes se encuentran los conectores, los agregados, los lazos y las matrices de partículas.

3. Espacios vacíos existentes entre los arreglos elementales y los ensamblajes de partículas. Dentro de los tipos de espacios vacíos se encuentran los poros intra-elementales entre partículas individuales o entre arreglos elementales de partículas, los poros intra-ensamblajes localizados entre agregados o ensamblajes de partículas o entre pequeños conjuntos de agregados y ensamblajes contenidos dentro de un ensamblaje de mayor tamaño, los poros inter-ensamblajes compuestos especialmente por espacios vacíos entre ensamblajes o arreglos de partículas de mayor tamaño y finalmente los poros trans-ensamblajes compuestos por los espacios vacíos entre mayores masas de agregados de partículas. Los tipos diferentes tipos de poros se muestran en la Figura 6.



**Figura 6. Clasificación de los tipos de poros (Collins & McGown, 1974).**

Con base a los 3 elementos básicos de la fábrica del suelo se pueden realizar diferentes configuraciones de fábrica del suelo; la primera con una matriz compuesta por partículas de arcilla o paquetes de partículas de arcilla y espacios vacíos rodeando partículas elementales de arena o limo, la segunda con partículas elementales de arcilla o paquetes de partículas con espacios vacíos entre ellas y la tercera con agregados rodeados de una poca cantidad de partículas de arcilla, limo o arena y espacios vacíos, en este tipo de configuración predomina el contacto entre agregados. Las estructuras descritas se muestran en la Figura 7

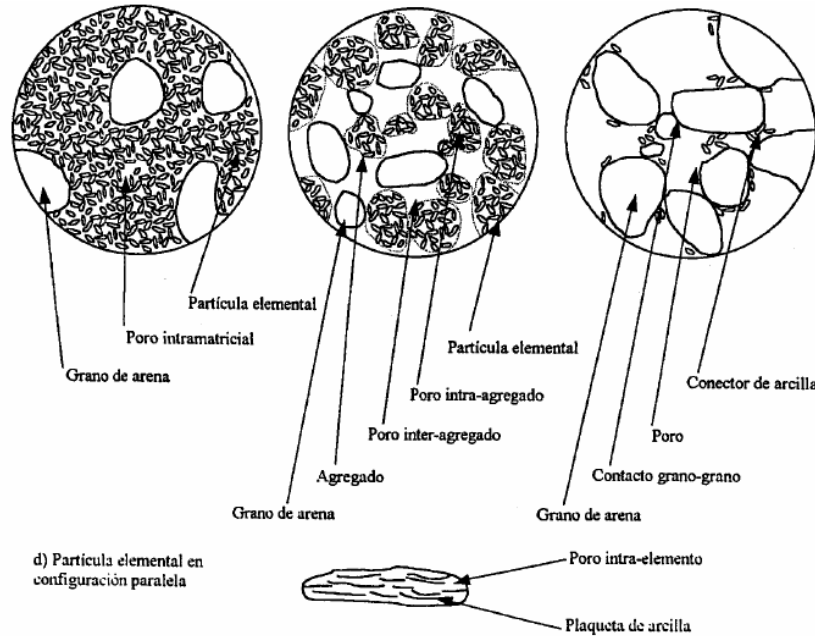


Figura 7. Configuraciones de fábrica del suelo (Alonso, et al., 1987).

### 2.1.3 Influencia de la compactación sobre el comportamiento tensión-deformación

Se destacan los ensayos de compresión simple en los que (Ahmed, et al., 1974) encontró que los suelos compactados en la rama seca presentaban una mayor resistencia pero tenían una rotura del tipo frágil a niveles bajos de deformación (entre el 2 y 4% aproximadamente) y los suelos compactados por la rama húmeda exhibían una menor resistencia pero tenían una rotura tipo dúctil para deformaciones del 5 al 7%; en la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos.

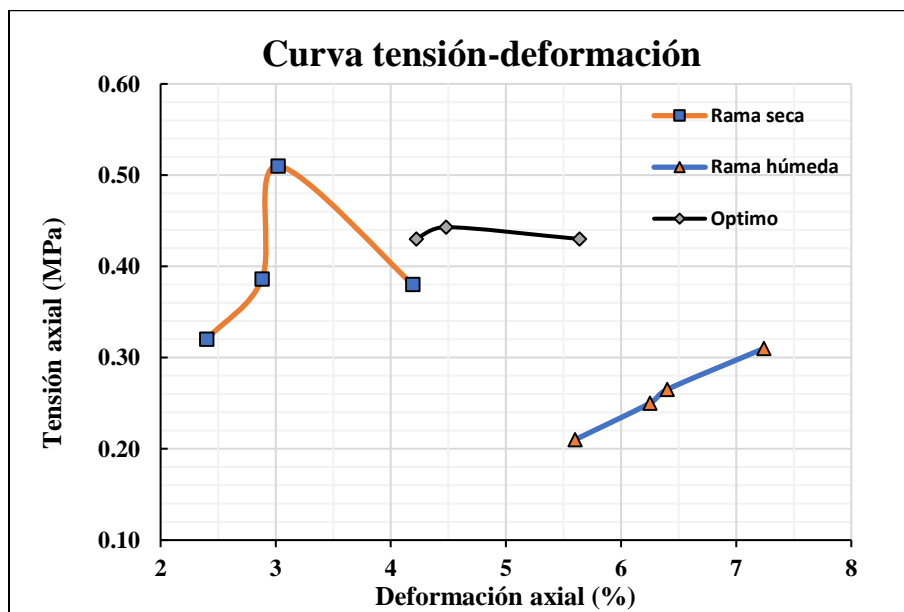
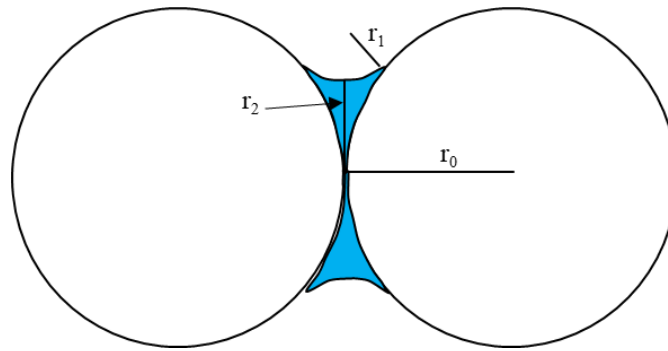


Figura 8. Comportamiento tenso-deformacional del suelo compactado en función de su contenido de agua (Ahmed, et al., 1974).

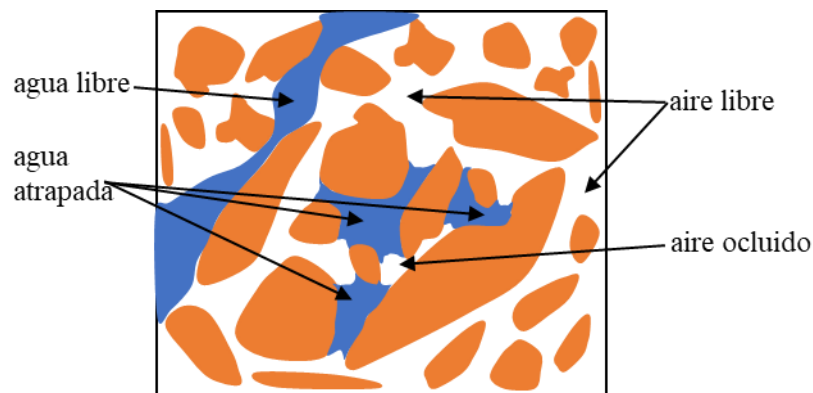
### 2.1.4 Cambios de volumen en suelos compactados

En los años sesenta se estudió el proceso de consolidación en suelos compactados por parte de investigadores como (Blight, 1961), (Barden, 1965), (Larmour, 1966), (Hill, 1967) y (Madedor, 1967), dentro de los cuales se destaca el adelantado por (Barden, 1965) en el cual estudia el proceso de consolidación en una arcilla compactada tratando de predecir los asentamientos producidos en presas de tierra y terraplenes, dentro del estudio Barden señala que hay una transición entre el agua adsorbida a las placas de arcilla y el agua libre que fluye bajo gradientes hidráulicos. Primero se debe tener en cuenta que (Carman, 1953) señala que el agua adsorbida en las partículas de suelo se redistribuye de tal manera que la curvatura del menisco aire-agua sea la misma, la presencia de meniscos y las fuerzas de tensión superficial hacen que se produzcan diferencias de presión entre el agua y el aire del poro ocasionando que aparezca presión negativa o succión en el agua del poro, esta situación se muestra en la Figura 9.



**Figura 9. Meniscos entre dos partículas de suelo (Carman, 1953).**

La aparición de la succión hace que el agua quede atrapada dentro de las cavidades del esqueleto sólido del suelo a la que Carman denomina agua “muerta” ya que no tiene posibilidad de fluir libremente, dentro del suelo también se encuentra el agua “viva” la cual tiene la posibilidad de fluir bajo gradientes de presión. La cantidad de agua “viva” o libre y de agua “muerta” dependen del grado de saturación. De manera similar existe aire libre dentro del suelo y también existe aire atrapado dentro de las cavidades, esto ocurre cuando el contenido de agua aumenta y el agua cierra los cuellos entre poros por lo que el aire deja de ser continuo quedando ocluido dentro del suelo, esta situación se ilustra en la Figura 10.

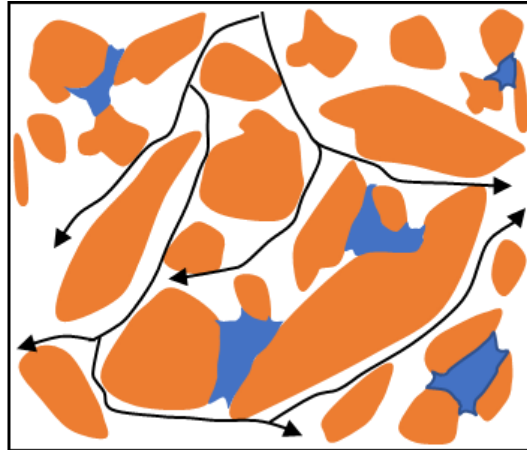


**Figura 10. Agua y aire libres además de agua atrapada y aire ocluido en la masa suelo.**

Dentro del estudio del proceso de consolidación de la arcilla compactada (Barden, 1965) clasifica el proceso en 5 zonas dependiendo de la cantidad y el estado -libre o atrapado- del agua y del aire presentes en el suelo.

**1. Suelo extremadamente seco ( $S_r < 0.5$ )**

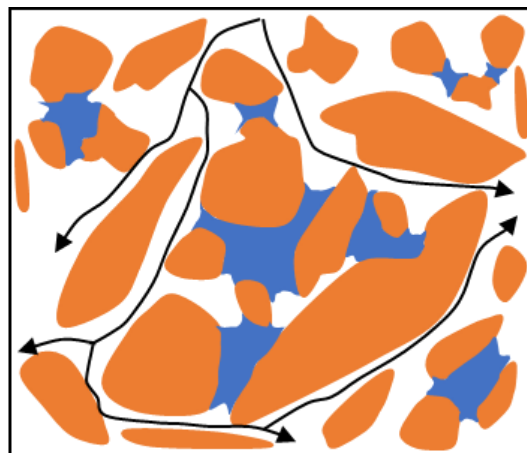
En este estado el agua está muy adherida a las partículas del suelo por lo que se encuentra atrapada en el esqueleto sólido por lo que solamente el aire puede fluir libremente dentro del suelo, como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.**Esquema de un suelo muy seco.

**2. Suelo seco ( $0.5 < S_r < 0.9$ )**

En este estado el agua no fluye aún de manera apreciable y por lo general las presiones se mantienen inferiores a cero  $u_w < 0$ , por otra parte, el flujo de aire dentro del suelo se conserva como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.**Esquema de un suelo seco.



### 3. Suelo con contenido de agua óptimo

Estado intermedio en el que el agua empieza a circular libremente por las cavidades, por su parte el flujo de aire se conserva aunque ya no con tanta facilidad ya que parte de las cavidades se encuentran ocupadas por el agua, lo que obliga a que tanto el aire y el agua circulen de manera independiente a través del suelo como se muestra en la Figura 13.

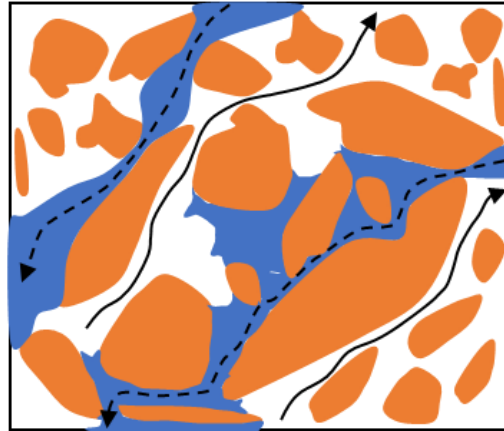


Figura 13. Esquema de un suelo con contenido óptimo de agua.

### 4. Suelo húmedo ( $0.90 < S_r$ )

En este estado el flujo de agua hace que se obstruyan los cuellos localizados entre poros haciendo que el aire pierda continuidad ocasionando una caída abrupta de la permeabilidad del suelo al aire por lo que el aire ya no puede fluir libremente a través del suelo, esta situación se muestra en la Figura 14.

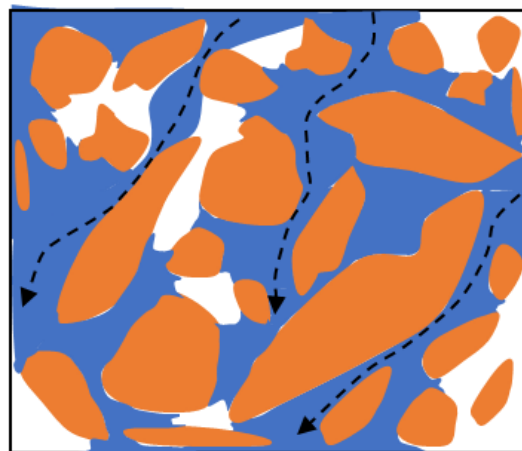
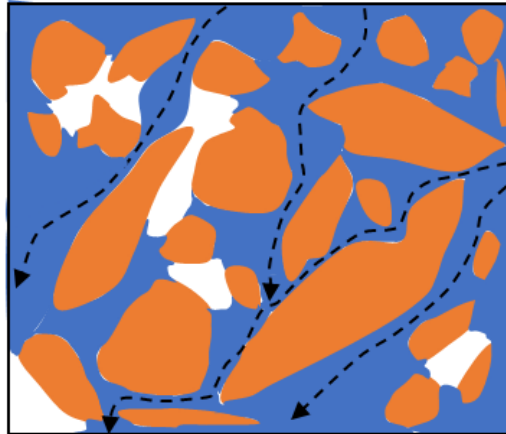


Figura 14. Esquema de un suelo húmedo.



### 5. Suelo muy húmedo ( $0.95 < S_r$ )

En este estado circula agua principalmente y el poco aire existente se encuentra atrapado en el esqueleto sólido del suelo entorpeciendo el tránsito libre de agua disminuyendo la permeabilidad del suelo al agua respecto al suelo saturado, esto se muestra en la Figura 15.



**Figura 15. Esquema de un suelo muy húmedo.**

Posteriormente un estudio realizado por (Barden, 1974) sobre la consolidación en una arcilla compactada poco expansiva señala que la transición del estado seco del suelo a un estado húmedo no ocurre de manera gradual si no que es principalmente de manera repentina, también sugiere que el principal problema del suelo seco es el colapso por humedecimiento cuyos ingredientes principales son subrayados por (Barden, et al., 1973).

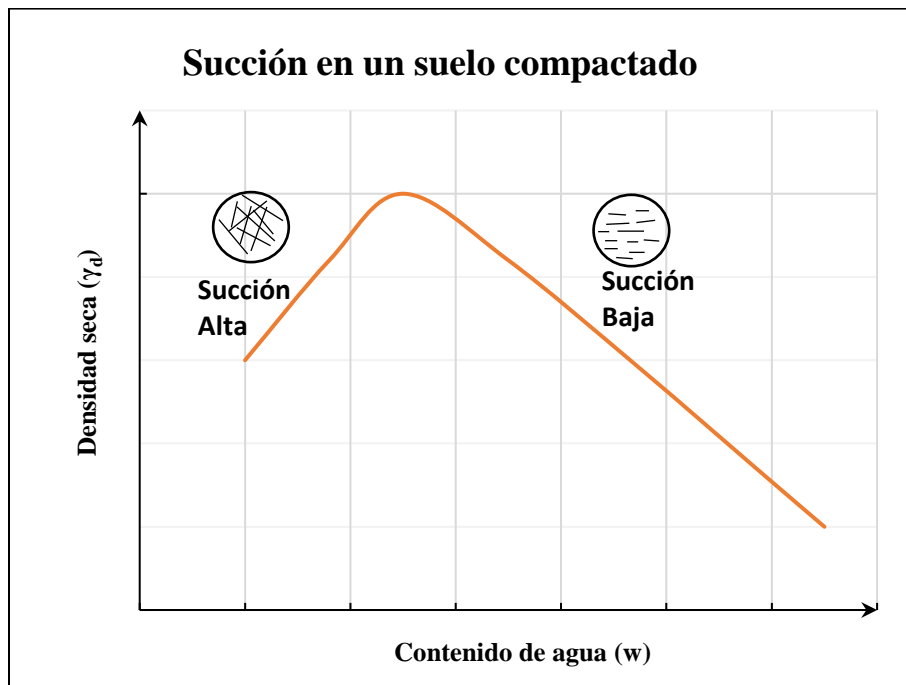
El estudio realizado por (Barden, et al., 1973) en arena eólica de Sudáfrica, loess de Europa y arcilla de América compactados, donde mediante observación con microscopio de la estructura y de los contactos intergranulares del suelo sugiere que las 3 causas principales del colapso en un suelo compactado son la existencia de un tejido potencialmente inestable como el de una arcilla compactada en la rama seca de la curva de compactación, un esfuerzo o energía de compactación alta y por último la existencia de un alto valor de la succión haciendo que fija temporalmente la estructura del suelo. Una vez entra agua el valor de la succión cae y la estructura inestable colapsa.

Finalmente, dentro de (Barden, 1974) se acota que el colapso es independiente de la trayectoria tensional recorrida en concordancia con los resultados hallados por (Matyas & Radhakrishna, 1968), también señala que es poco probable que ocurra colapso por compresión en seco y por último recomienda el estado a contenido de agua óptimo del suelo como la división entre los procesos de consolidación en seco y húmedo.

### 2.1.5 Succión en suelos compactados

Como se ha visto antes el espacio ocupado por agua o aire dentro de los poros depende del contenido de agua que posea el suelo transitando entre un suelo extremadamente seco hasta un suelo extremadamente húmedo. Para un suelo seco predominan los espacios vacíos ocupados por aire y el agua atrapada en el esqueleto del suelo forma meniscos como los observados en la Figura 9, estos meniscos surgen de la necesidad del agua de equilibrar la presión superior de aire que le empuja produciendo fuerzas de tensión superficial que actúan “halando” las partículas del suelo entre sí proporcionando una resistencia adicional al suelo.

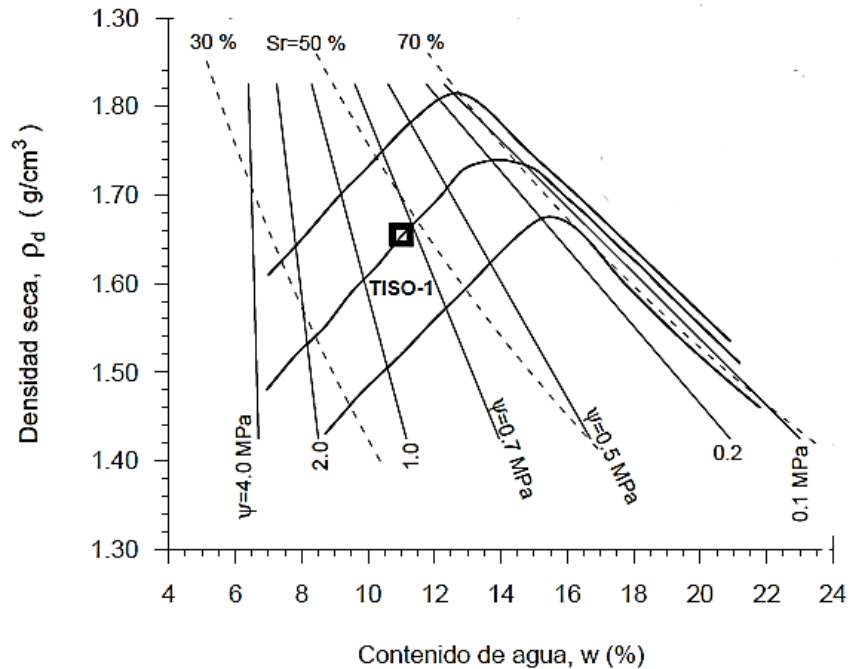
Por otra parte, se encontraría un suelo húmedo donde predominan los espacios vacíos ocupados por agua disminuyendo así la cantidad de meniscos y por ende la influencia de las fuerzas de tensión superficial que proporciona una resistencia adicional al suelo. Partiendo de esta base entonces es evidente que un suelo compactado por la rama húmeda tendrá succiones menores que un suelo compactado por la rama seca aun cuando posean por ejemplo una misma densidad seca, por lo tanto, la variación cualitativa de la succión en el plano de compactación sería como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Variación cualitativa de la succión en el plano de compactación.**

Hay que aclarar primero que el potencial del agua ( $\Psi$ ) que controla el flujo de agua dentro del suelo se divide en tres componentes: el potencial gravitacional ( $z$ ) producto de la elevación del punto analizado respecto a una referencia el nivel del mar, por ejemplo-, el potencial capilar o matricial originado por las fuerzas de tensión superficial y por último el potencial osmótico ocasionado por la concentración de solutos en el agua. Autores como (Fredlund, 1979) y (Alonso, et al., 1987) sugieren que para el estudio de suelos no saturados es suficiente solo tener en cuenta las componentes gravitacional y capilar y despreciar la componente osmótica.

Diferentes autores como (Gens, 1995), (Romero, 1999), (Romero, et al., 1999) y (Barrera, 2002) han estudiado la variación de la succión en el plano de compactación mediante diferentes técnicas como medidas psicrométricas, traslación de ejes y equilibrio de vapor para trazar isólinas de succión en el plano de compactación como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17. Contornos de igual succión total en el plano de compactación (Barrera, 2002).**

Se observa que para suelos compactados en la rama seca la succión varía muy poco a medida que cambia la densidad seca dado que los poros en su mayoría están ocupados por aire, caso contrario ocurre en los suelos compactados en la rama húmeda donde un pequeño cambio en la densidad ocasiona un cambio considerable en el valor de la succión.

## 2.2 SUELOS NO SATURADOS

### 2.2.1 Ecuación de tensiones efectivas en suelos no saturados

A finales de la década de los cincuenta y principios de los sesenta diferentes investigadores como (Aitchison & Donald, 1956), (Jennings, 1957), (Croney, et al., 1958), (Bishop, 1959), (Aitchison, 1960) y (Aitchison & Bishop, 1960) se cuestionaron sobre si el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi permitía representar adecuadamente el comportamiento de los suelos parcialmente saturados dado que no todos los suelos se encuentran completamente saturados como es el caso de las zonas semiáridas donde se encuentran en un estado parcialmente saturado y donde los suelos exhibían problemas adicionales respecto a los suelos saturados como el colapso y el hinchamiento, por lo cual se planteó modificar el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, algunas de las modificaciones propuestas se muestran a continuación:

La expresión propuesta por (Aitchison & Donald, 1956)

$$\sigma' = \sigma + p'' \quad (1)$$

Donde  $\sigma'$  es la tensión efectiva,  $\sigma$  la tensión total y  $p''$  es la succión.

La expresión propuesta de (Aitchison & Bishop, 1960)

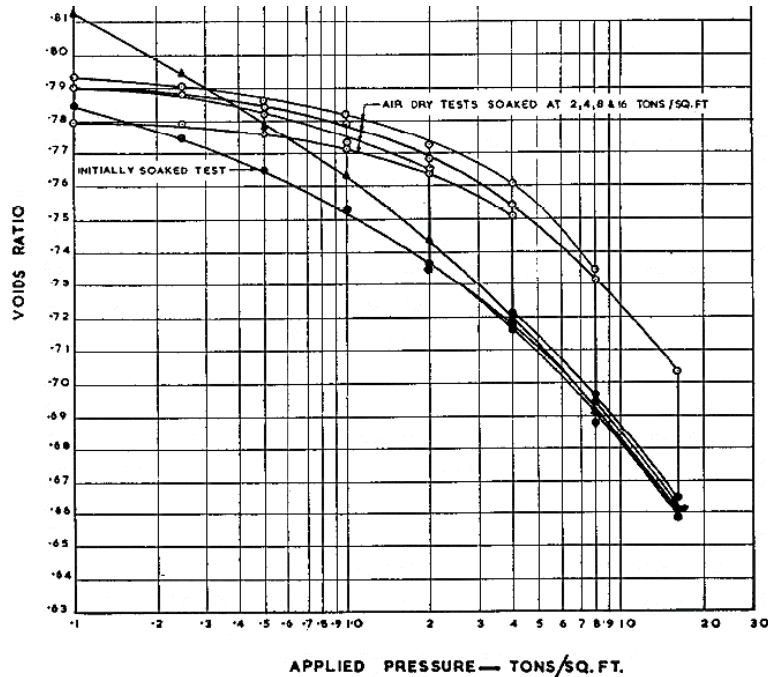
$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma + \chi(u_a - u_w) - u_a \\ \sigma' &= \sigma + \chi p'' - u_a \\ \sigma' &= \sigma - [\chi u_w + (1 - \chi)u_a] \\ \sigma' &= \sigma - u^* \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $u_a$  es la presión de poros en la fase gaseosa,  $u_w$  la presión de poros en la fase líquida y  $\chi$  es un parámetro idéntico al propuesto por Bishop, Aitchison, Croney y Jennings, la variable  $u^*$  se puede considerar como una presión de poros equivalente a la presión del agua intersticial de la ecuación de tensión efectiva, se puede observar que si  $\chi = 1$  la expresión 2 se convierte en la ecuación de tensión efectiva clásica.

La validez de la ecuación (2) fue estudiada por (Bishop & Donald, 1961) mediante ensayos en un equipo triaxial realizados en el limo Braehead encontrando que un cambio en el término  $(u_a - u_w)$  influye fuertemente en el valor de la tensión efectiva.

Por su parte (Jennings & Burland, 1962) estudiaron las limitaciones del principio de tensiones efectivas en los suelos no saturados mediante ensayos edométricos realizados en limos arenosos parcialmente saturados, dentro de los hallazgos encontraron que los suelos parcialmente saturados son menos compresibles que los suelos saturados, también observaron que sí los suelos parcialmente saturados se remojaban bajo condiciones de carga constante sufrían un asentamiento adicional conocido como colapso y que esto ocurría principalmente en suelos con un grado de saturación  $S_r < 50\%$  -lo que correspondería a un suelo muy seco según la descripción de (Barden, 1965) -, los resultados de los ensayos se muestran en la Figura 18.

Dentro de otros hallazgos está el hecho de que durante los ensayos de remojo a volumen constante encontraron que para conservar el volumen constante se debe reducir la carga aplicada durante el remojo lo cual va en contra del principio de tensión efectiva, ya que según este para mantener constante el volumen bastaría con aumentar la tensión aplicada en la misma cantidad que lo hace la presión de poros  $p''$  para así mantener constante la tensión efectiva  $\sigma'$  en la ecuación (1).



**Figura 18.** Resultados de los ensayos edométricos realizados por (Jennings & Burland, 1962).

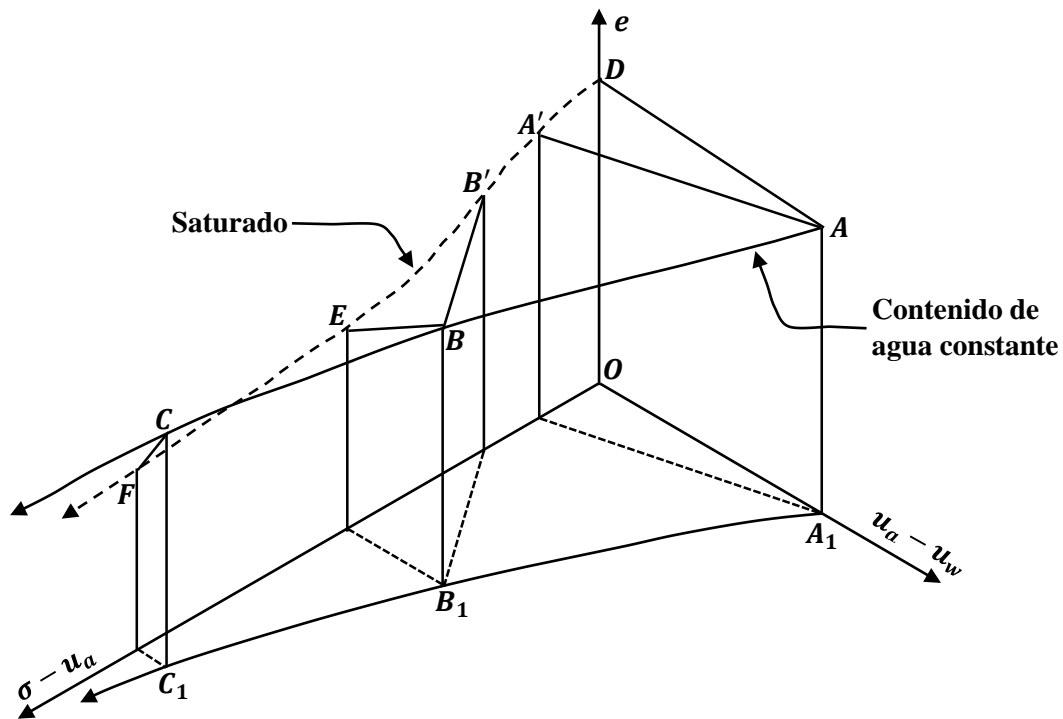
Observando la Figura 18 se nota que si un suelo parcialmente saturado es sometido a remojo a carga constante hasta su saturación y después es sometido a un aumento de carga el cambio de volumen que sufre sigue la trayectoria descrita por la curva de consolidación virgen para suelos saturados. Para finalizar (Jennings & Burland, 1962) subrayan que el principio de tensiones efectivas no siempre es válido en suelos parcialmente saturados y que además no existe una única relación entre el índice de poros y el esfuerzo efectivo proporcionado por la ecuación (2).

Poco después (Bishop & Blight, 1963) realizaron pruebas de laboratorio para comprobar los efectos de la tensión efectiva en el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, dentro de las observaciones realizadas se encuentra que el término  $u_a - u_w$  es el que dificulta enormemente la aplicación del principio de tensión efectiva a suelos parcialmente saturados ya que señalan que un cambio en su valor no necesariamente provoca un cambio de valor en  $u$  debido a que las fuerzas de tensión superficial solo actúan en una parte y no en la totalidad de la superficie de las partículas sólidas del suelo.

Además de la presencia de fuerzas de tensión superficial que hacen que muestras con trayectorias similares sean diferentes en estructura y se comporten de manera diferente especialmente en relación a cambios de volumen.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente (Bishop & Blight, 1963) sugieren una función más general que la propuesta por (Aitchison, 1960) como se muestra en la ecuación (3) y con la que sería posible representar los cambios de volumen en un espacio como el mostrado en la Figura 19. (Jennings & Burland, 1962)

$$\sigma' = \sigma - u_a + f(u_a - u_w) \quad (3)$$



**Figura 19.** Cambios de volumen en un plano tensión-índice de poros (Bishop & Blight, 1963).

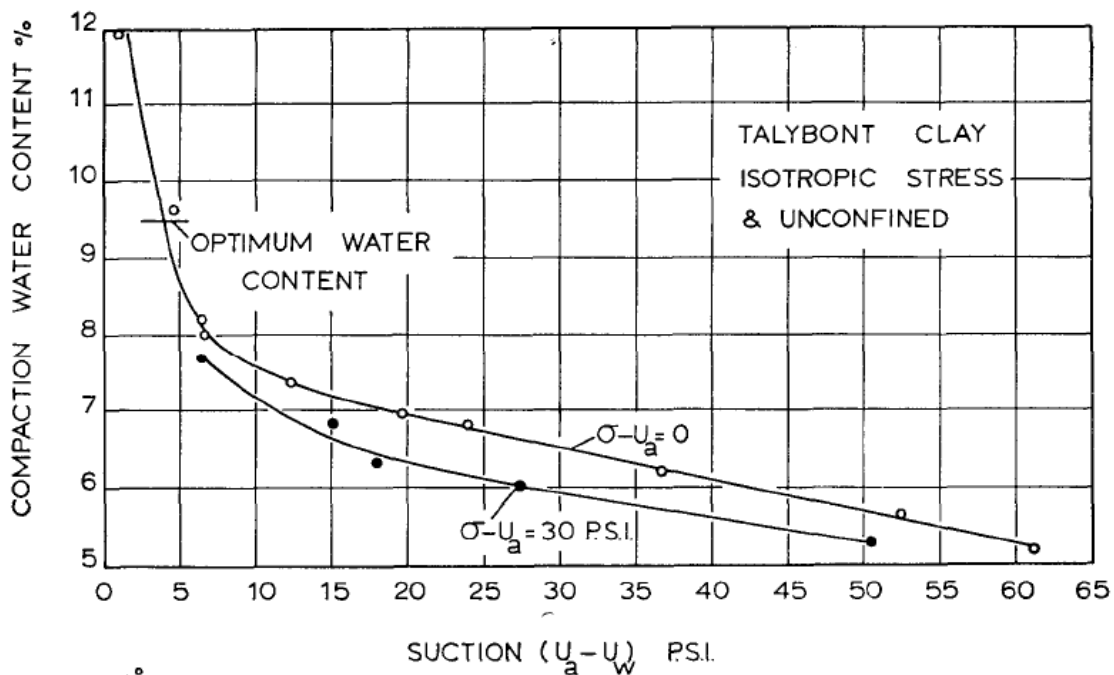
Previamente (Chaudhary, 1955) y (Matyas, 1963) habían sugerido usar una superficie de ese tipo, donde se observa que para un suelo cargado a contenido de agua constante tanto  $u_a - u_w$  como el índice de poros  $e$ , en los test no drenados eventualmente se llega a saturación, también se destaca que para la mayoría de los casos en los que se satura a volumen constante-tramo  $AA'$ - el valor de  $u_a - u_w$  es mayor al valor de  $\sigma - u_a$ .

Como se observa en la Figura 19 al someter al suelo a saturación bajo una carga constante -tramo  $AD$ - se presenta un aumento en el índice de poros o hinchamiento, este comportamiento se mantiene hasta cierto valor de carga  $\sigma - u_a$  y una vez superado ese valor el comportamiento del suelo a saturación bajo carga constante se invierte y se empieza a producir una reducción en el

índice de poros  $e$  o colapso, (Chaudhary, 1955) relaciona este valor límite con la energía de compactación, el contenido de agua y el contenido de arcilla.

Así mismo (Bishop & Blight, 1963) sugieren que las líneas de consolidación saturada y parcialmente saturada convergen a una misma línea coincidiendo con lo hallado por (Jennings & Burland, 1962). Además, sugieren que la ecuación de tensión efectiva se puede usar con menor dificultad en términos de resistencia al corte, pero señalan que el valor de la variable  $\chi$  es muy sensible a las mediciones del laboratorio conduciendo a valores erróneos, la manera detallada de medir correctamente los datos de laboratorio se sugiere en (Bishop, 1960), (Bishop, et al., 1960), (Blight, 1961) y (Bishop & Henkel, 1962).

Dentro de su investigación (Bishop & Blight, 1963) observaron que en los suelos arcillosos se presentan succiones elevadas en contenidos de agua menores o cercanos al óptimo y que estos valores persistían incluso cuando el suelo estaba bastante comprimido como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20. Cambio en la succión en función del contenido de agua en valores próximos al óptimo (Bishop & Blight, 1963).**

En los ensayos también se observa que la aplicación de tensiones de corte conduce a cambios de succión adicionales, aunque en la primera fase de corte el grado de saturación aumenta y la succión disminuye, pero una vez el suelo rompe la succión aumenta en la zona de falla.

Especial atención merece en el presente estudio el ensayo de compresión isotrópica a contenido de agua constante realizado en la Selset Clay cuyas propiedades son contenido de arcilla 20%, límite líquido 33%, Índice de plasticidad 17% y contenido óptimo de agua 11.2%, los resultados del ensayo se muestran en la Figura 21.

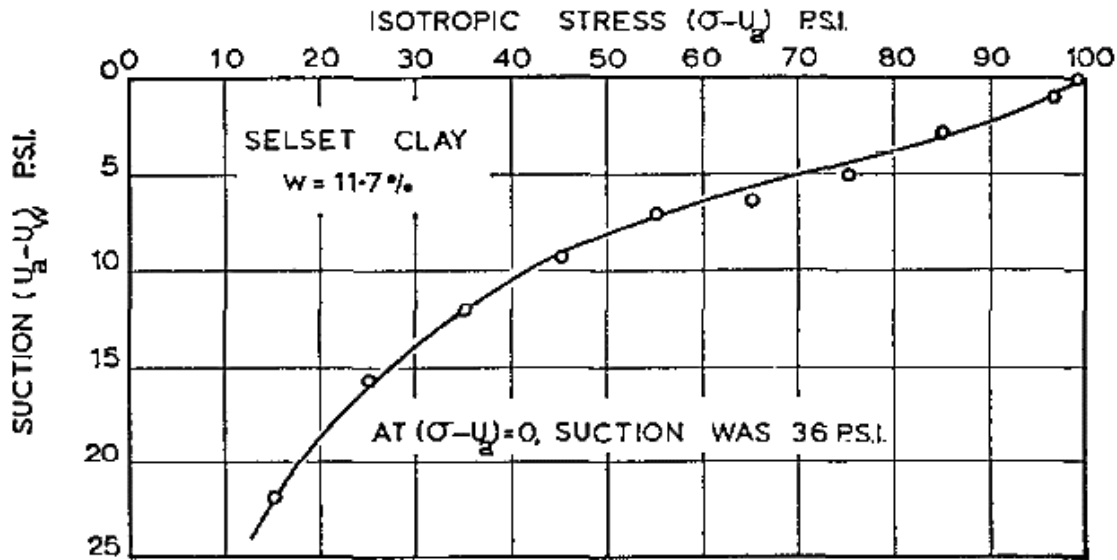


Figura 21. Variación de la succión con la carga en un ensayo de compresión isotrópica a contenido de agua constante (Bishop & Blight, 1963).

### 2.2.2 Superficies de estado para suelos no saturados

A finales de los años sesenta (Matyas & Radhakrishna, 1968) realizan un estudio en el que analizan las falencias de la ecuación propuesta por Bishop para los cambios de tensión en los suelos no saturados como lo son el hecho de que el factor  $\chi$  sea más significativo ante los cambios de volumen que para la resistencia al corte y sugieren analizar con mayor detenimiento el comportamiento del suelo para cambios de volumen y establecer unas relaciones básicas más robustas que la ecuación de Bishop.

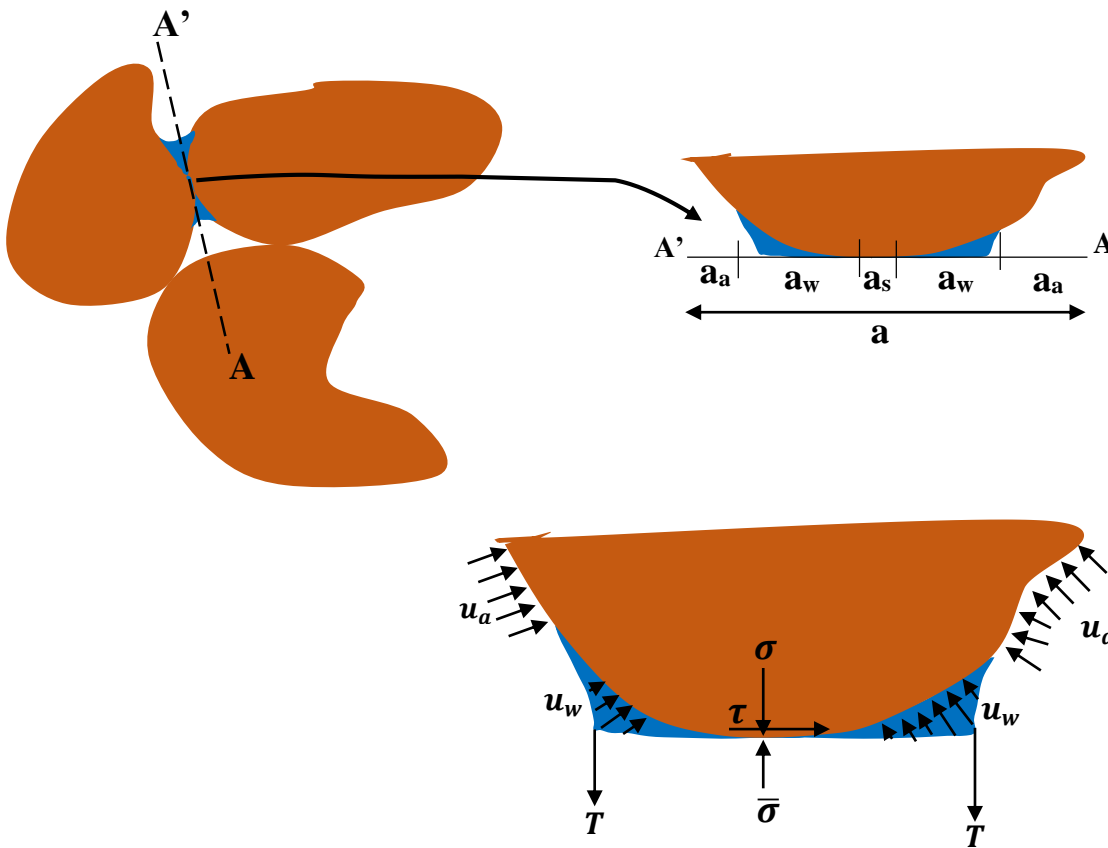
Para ello (Matyas & Radhakrishna, 1968) proponen cuatro variables de estado para los suelos no saturados las cuales son  $\sigma_{ij}$ ,  $e$ ,  $S_r$  y  $\lambda$ , donde  $\sigma_{ij}$  es el tensor de tensiones,  $e$  el índice de poros,  $S_r$  el grado de saturación y  $\lambda$  la atribuyen a una variable -la cual sospechaban que probablemente no es un escalar- correspondiente a proporcionar el estado de la estructura o fábrica del suelo ya que esta sufre cambios al deformarse el suelo provocando reordenamiento de partículas lo que cambia la succión influyendo así en la relación tensión-deformación, por lo que sugieren considerar efectos independientes del suelo ante cambios de succión y tensión.



La revisión a la ecuación de tensiones efectivas de Bishop realizada por (Matyas & Radhakrishna, 1968) se presenta a continuación, partiendo de descomponer el tensor de tensiones y el tensor desviador como se muestra en la ecuación (4).

$$\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (4)$$

Donde  $p = \frac{tr(\sigma_{ij})}{3}$ ,  $\delta_{ij}$  es el delta de Kronecker y  $\sigma'_{ij}$  es el tensor desviador.



**Figura 22. Plano de interacción intergranular (Matyas & Radhakrishna, 1968).**

Luego se plantea la ecuación de tensión intergranular en el plano A-A':

$$\sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + A_w u_w \delta_{ij} + A_a u_a \delta_{ij} - \delta_{ij} \int T dx \quad (5)$$

Donde  $A_w$  y  $A_a$  son la relación de área del área de contacto agua-suelo  $a_w$  y aire-suelo  $a_a$  respecto al área total  $a$ ,  $\bar{\sigma}_{ij}$  es la tensión transmitida en los contactos,  $T$  es la fuerza de tensión superficial por unidad de longitud y  $x$  es el perímetro del menisco aire-agua.

El signo negativo en el término de la tensión superficial indica que trata de halar las partículas del suelo, reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (4), operando y realizando algunas simplificaciones se llega a la ecuación (6).

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left[ p - u_a + A_w(u_a - u_w) + \int T dx \right] \delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (6)$$

La ecuación (6) indica que la tensión intergranular es función de dos factores externos ( $p - u_a$ ) y ( $\sigma'_{ij}$ ) y dos factores internos ( $u_a - u_w$ ) y  $\int T dx$ . Dentro de las mejoras dentro de la ecuación (6) es que distingue que el término ( $u_a - u_w$ ) actúa de forma uniforme sobre la superficie mojada de las partículas y el término de la tensión superficial actúa de manera puntual en los contactos entre partículas, esto lleva a que los cambios en el menisco pueden causar cambios en la redistribución de tensiones entre partículas cosa que el principio de tensiones efectivas no tiene en cuenta.

La dificultad para aplicar la ecuación (6) radica en que el término  $\int T dx$  no se puede hallar directamente, aunque se puede considerando su interacción con la relación entre área del menisco aire-agua así  $\int T dx = A_t(u_a - u_w)$  donde  $A_t$  es la relación entre el área del menisco y el área total, la cual es función del grado de saturación, el tamaño de grano y la estructura.

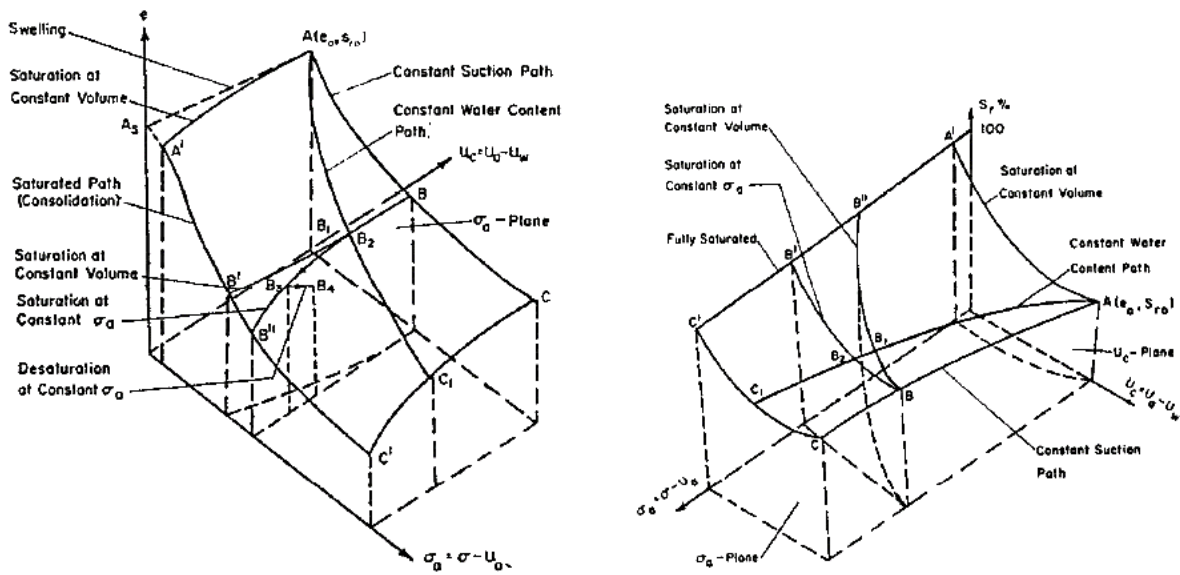
Finalmente (Matyas & Radhakrishna, 1968) sugieren que tanto el índice de poros y el grado de saturación se pueden expresar mediante funciones del tipo:

$$e = f(p, q, s, e_0, S_{r0}) \quad (7)$$

$$S_r = g(p, q, s, e_0, S_{r0}) \quad (8)$$

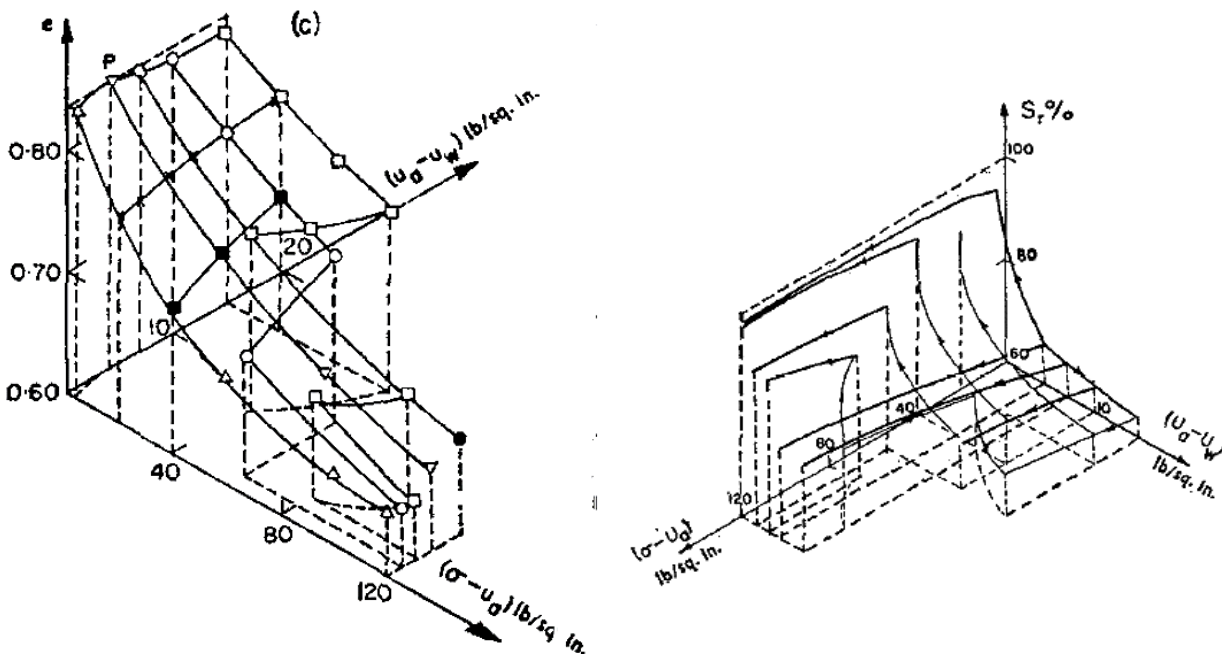
Donde  $p$  es la tensión media neta,  $q$  la tensión desviadora,  $s$  la succión,  $e_0$  el índice de poros inicial y  $S_{r0}$  el grado de saturación inicial.

Las funciones  $f$  y  $g$  pueden o no ser únicas dependiendo de las trayectorias tensionales y de succión seguidas, dentro del estudio (Matyas & Radhakrishna) proponen dos posibles superficies de estado en los espacios  $\sigma - u_a, u_a - u_w, e$  y  $\sigma - u_a, u_a - u_w, S_r$  como las que se muestran en la Figura 23.



**Figura 23.** Superficies de estado para suelos no saturados (Matyas & Radhakrishna, 1968).

Para comprobar estas superficies (Matyas & Radhakrishna) realizaron ensayos triaxiales de compresión isotrópica y ensayos edométricos en una mezcla de material de roca de Potter (80%) y Caolín (20%) los resultados de los ensayos confirmaron la forma de las superficies tal y como se muestra en la Figura 24.



**Figura 24.** Superficies de estado en base a puntos experimentales (Matyas & Radhakrishna, 1968).

Comparando la Figura 23 y la Figura 24 se observa la gran similitud entre la forma teórica y la forma trazada mediante puntos experimentales obtenidos en los ensayos, dentro de las limitaciones encontradas se encuentra que todas las muestras sufrieron un proceso de carga, descarga o saturación y en ningún caso se realizaron trayectorias de secado y tampoco se permitió que el suelo sufriera procesos de hinchamiento todo ello atribuido al proceso de histéresis presente en el suelo ante procesos de secado-humedecimiento que hace que el grado de saturación sea dependiente de la trayectoria de secado-humedecimiento algo también sugerido por (Barden, et al., 1969). Por último, cabe resaltar que estos ensayos demuestran que el componente de tensión neta y el componente de succión tiene efectos separados e independientes dentro del comportamiento del suelo confirmando también lo observado por (Aitchison & Woodburn, 1969) en sus ensayos de laboratorio.

Ya en la década de los setenta (Fredlund & Morgenstern, 1976) proponen relaciones para el cambio de volumen en suelos no saturados mediante dos ecuaciones, una para describir la deformación de la estructura del suelo y otra para describir el cambio de volumen del agua dentro del elemento de suelo. A si mismo sugieren tres posibles combinaciones de variables para definir el estado de tensiones del elemento, estas combinaciones se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Posibles combinaciones para definir el estado de tensiones en un suelo no saturado (Fredlund & Morgenstern, 1976).**

<b>Combinación</b>	
<b>1</b>	$(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$
<b>2</b>	$(\sigma - u_w), (u_a - u_w)$
<b>3</b>	$(\sigma - u_a), (\sigma - u_w)$

(Fredlund & Morgenstern, 1976) definen las variables de deformación para describir los cambios en cada fase del suelo mediante la continuidad de un fluido multifase, asumiendo las partículas del suelo como incompresibles. El cambio de volumen para un elemento de suelo tendría la forma mostrada a continuación:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_w}{V} + \frac{\Delta V_a}{V} \quad (9)$$

Donde  $V$  es el volumen total del elemento de suelo,  $V_w$  es el volumen de agua y  $V_a$  es el volumen de aire en el elemento.

Posteriormente plantean las variables de estado de deformación volumétrica para el aire y el agua en el elemento, además de la deformación volumétrica.

$$\theta_a = \frac{\Delta V_a}{V} \quad (10)$$

$$\theta_w = \frac{\Delta V_w}{V} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_z + \varepsilon_y + \varepsilon_x \quad (12)$$

Donde  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  son las deformaciones en las direcciones x, y, z respectivamente.

Luego asumiendo el suelo como un material elástico e isótropo y tomando como variables de estado la combinación  $(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$  (Fredlund & Morgenstern, 1976) plantean las relaciones constitutivas para cada fase del suelo (partículas sólidas, agua y aire), las relaciones para la fase sólida son las mismas ecuaciones planteadas por (Biot, 1941) y (Coleman, 1962). Ahora expresando la deformación volumétrica en forma incremental para la el esqueleto sólido y el agua en las ecuaciones (13) y (14) respectivamente.

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial (\sigma - u_a)} \right]_1 * d(\sigma - u_a) + \left[ \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial (u_a - u_w)} \right]_2 * d(u_a - u_w) \quad (13)$$

$$\theta_w = \left[ \frac{1}{v} \frac{\partial v_w}{\partial (\sigma - u_a)} \right]_3 * d(\sigma - u_a) + \left[ \frac{1}{v} \frac{\partial v_w}{\partial (u_a - u_w)} \right]_4 * d(u_a - u_w) \quad (14)$$

Donde  $v$  es una unidad de volumen y  $v_w$  es el volumen de agua en el elemento, la correspondencia de los términos 1,2,3 y 4 se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Correspondencia de cada término en las ecuaciones(13) y (14).**

<b>Término</b>	<b>Significado</b>
<b>1</b>	Compresibilidad de la estructura de suelo cuando $d(u_a - u_w) = 0$
<b>2</b>	Compresibilidad de la estructura de suelo cuando $d(\sigma - u_a) = 0$
<b>3</b>	Pendiente de la línea $v_w - (\sigma - u_w)$ cuando $d(u_a - u_w) = 0$
<b>4</b>	Pendiente de la línea $v_w - (u_a - u_w)$ cuando $d(\sigma - u_w) = 0$

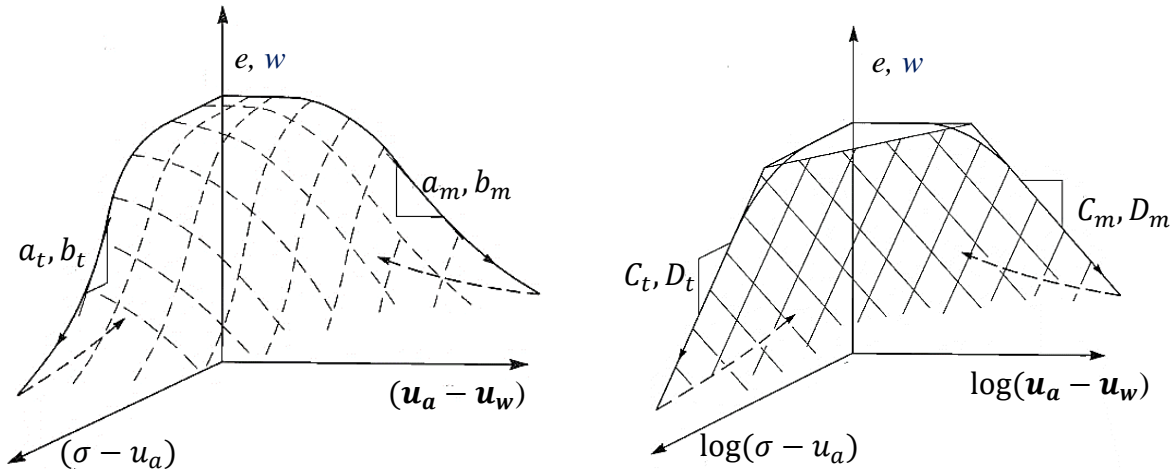
El cambio de volumen en la fase gaseosa se obtiene mediante la resta entre el cambio de volumen del suelo y el cambio de volumen del agua en el elemento.

(Fredlund & Morgenstern, 1976) realizaron ensayos en la Regina clay y caolín compactado usando un edómetro modificado y un equipo triaxial; la metodología básica fue aplicar pequeños incrementos en las variables tensionales con el objetivo de probar la singularidad de una superficie de estado, calcular la compresibilidad en dos direcciones y predecirla en la tercera dirección y compararla con las medidas de laboratorio.

Dentro de los resultados se encontraron que para la Regina clay la ecuación (13) tiene un buen ajuste del cambio de volumen, pero no es así para el caso del caolín, también se encontró una fuerte influencia por no linealidad y por histéresis dentro del cambio de volumen; por otra parte la predicción del cambio de volumen en la fase agua fue bastante pobre los autores señalan que la dificultad para medir cambios de volumen en el agua por largos periodos de tiempo es la responsable de la mala correlación presentada entre los datos medidos y calculados.

Mas adelante (Fredlund, 1979) realiza un enfoque del suelo no saturado como un medio de cuatro fases: sólida, agua, aire y “piel contráctil” esta última correspondiente a la interfase aire-agua. Dentro de las novedades propone una extensión del diagrama de Mohr agregando un eje adicional correspondiente a  $(u_a - u_w)$ , así como también ecuaciones extendidas para la presión de tierras y algunos enfoques sobre los métodos de equilibrio límite.

Sin embargo, el desarrollo expuesto más extensamente es el realizado respecto al cambio de volumen en el suelo, para el cual propone superficies como las que se muestran en la Figura 25 para relacionar las variables implicadas ( $e$  o  $w$ ,  $(u_a - u_w)$ ,  $(\sigma - u_a)$ ).



**Figura 25. Superficie de estado para el índice de poros y humedad según (Fredlund, 1979).**

Los cambios en el índice de poros o en la humedad según el caso, son expresados de una manera similar a la ecuación de consolidación para suelos saturados, pero con dos índices de compresibilidad ( $C_t$  y  $C_m$ ) correspondientes a los cambios en la tensión  $(\sigma - u_a)$  y succión  $(u_a - u_w)$  respectivamente esto es para el caso del índice de poros y los coeficientes  $(D_t$  y  $D_m)$  cumplen un papel análogo para el caso de la humedad.

Las ecuaciones para hallar los cambios en el índice de poros o la humedad se muestran en las ecuaciones (15) y (16) respectivamente:

$$e = e_0 - C_t \log \frac{(\sigma - u_a)_f}{(\sigma - u_a)_0} - C_m \log \frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_0} \quad (15)$$

Donde  $(\sigma - u_a)_0$  y  $(\sigma - u_a)_f$  son las tensiones al inicio y al final del incremento y  $(u_a - u_w)_f$  y  $(u_a - u_w)_0$  son las succiones al inicio y al final del incremento.

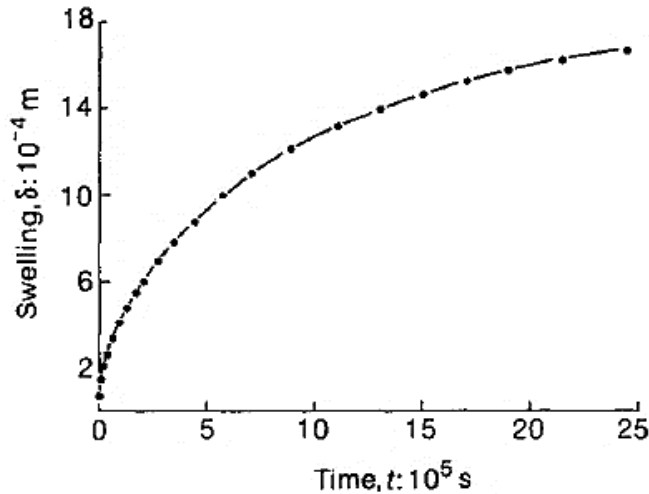
$$w = w_0 - D_t \log \frac{(\sigma - u_a)_f}{(\sigma - u_a)_0} - D_m \log \frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_0} \quad (16)$$

Como se puede observar que los cambios en el índice de poros o la humedad reciben dos contribuciones, en este caso la contribución correspondiente a los cambios de tensión tiene mayor valor que la contribución debida a los cambios de succión. Aunque el desarrollo de estas ecuaciones representa un avance en el campo de la mecánica de suelos no saturados, no es suficiente para representar los fenómenos de colapso e hinchamiento.

Años después a inicios de la década de los ochenta (Lloret & Alonso, 1980) presentan un modelo de consolidación unidimensional tratando de incluir los fenómenos de colapso e hinchamiento en un depósito eólico de cuarzo tamaño limo con cemento calcáreo y pequeña fracción de arcilla.

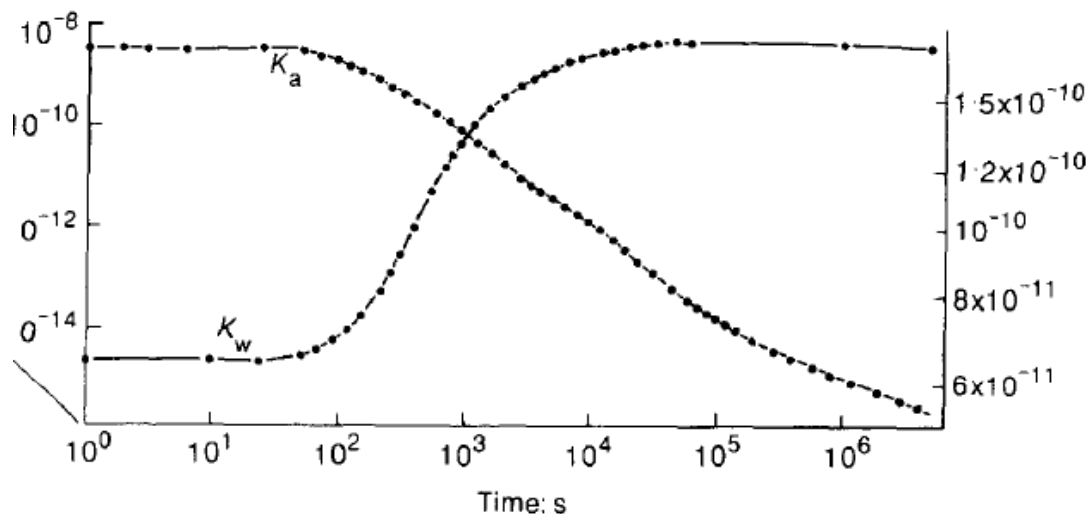
Lo hacen planteando la ecuación de conservación de masa para el aire y el agua y continuando el enfoque de superficies de estado de (Matyas & Radhakrishna, 1968), el método de solución empleado son los elementos finitos y para la discretización temporal diferencias finitas, realizan la modelación de tres ensayos el primero de consolidación en un suelo saturado, el segundo de hinchamiento libre y el tercero de colapso.

Dentro de los resultados se destaca la evolución en el tiempo del hinchamiento provocado por infiltración y la cual se muestra en la Figura 26.



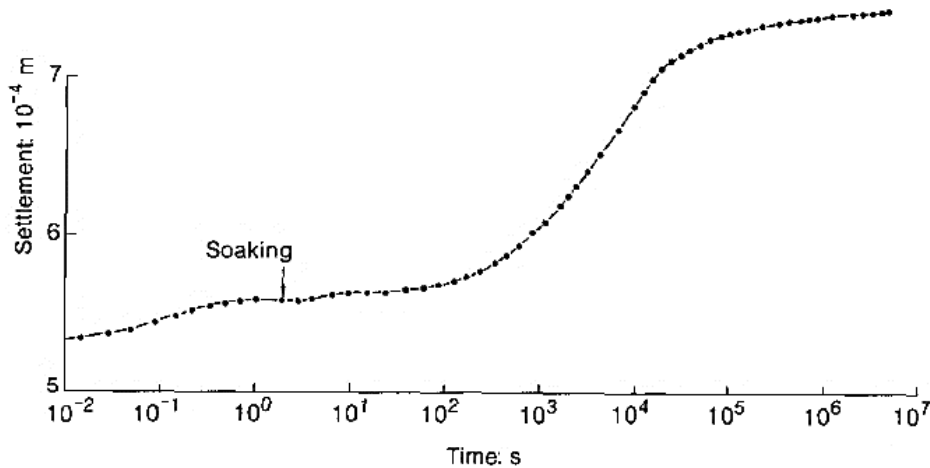
**Figura 26.** Evolución del hinchamiento con el tiempo (Lloret & Alonso, 1980).

También se encuentra la evolución de las permeabilidades del suelo al aire y al agua durante el ensayo de colapso, donde se observa el rápido aumento presentado en la permeabilidad al agua a medida que el suelo se satura, esta situación se muestra en la Figura 27



**Figura 27.** Variación en el tiempo de las permeabilidades del suelo al aire y al agua (Lloret & Alonso, 1980).

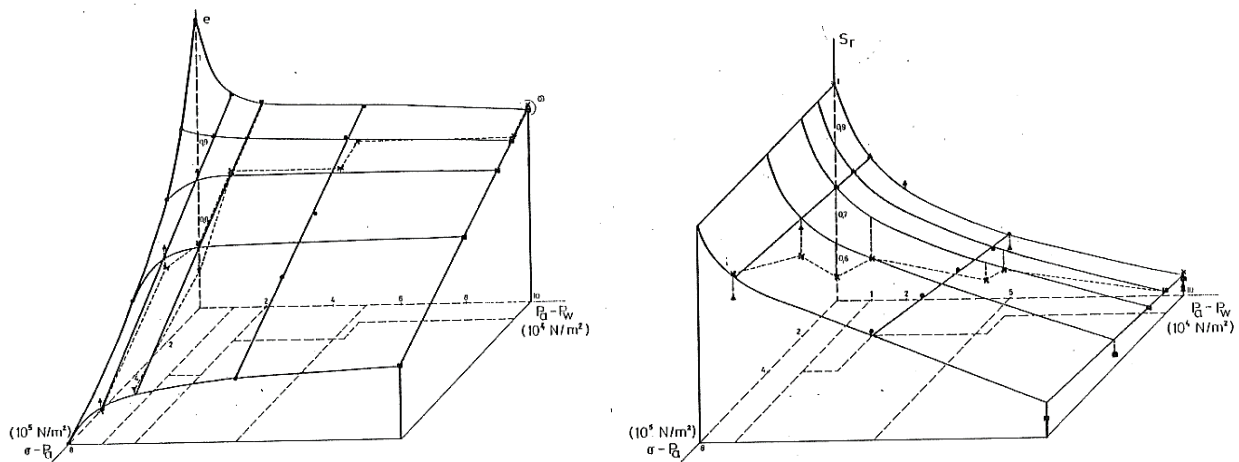
Finalmente en la Figura 28 se muestra la evolución en el tiempo del asentamiento por humedecimiento de una muestra de suelo bajo una carga externa aplicada, donde se observa el asentamiento adicional debido a colapso de la muestra posterior al humedecimiento, dentro de las observaciones hechas por los autores se destaca el papel que cumple la permeabilidad al agua para controlar la tasa de deformación del suelo no saturado.



**Figura 28.** Evolución en el tiempo del asentamiento en un ensayo de colapso (Lloret & Alonso, 1980).

Posteriormente (Lloret, 1982) mediante ecuaciones de continuidad y solucionándolas mediante elementos finitos plantea expresiones matemáticas de las superficies de estado halladas por medio de ensayos de edométricos y comparando con los datos aportados por el estudio de (Matyas & Radhakrishna, 1968). La expresión matemática para las superficies de estado son paraboloides hiperbólicos.

El aspecto de las superficies de estado encontradas se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.** Superficies de estado para el índice de poros y el grado de saturación (Lloret, 1982).



El ajuste de las superficies de estado se realizó para cuatro diferentes expresiones matemáticas y al final se elige la que cuente con mejores ajustes a los datos medidos en laboratorio y la comparación con de (Matyas & Radhakrishna, 1968), las expresiones matemáticas para la superficie del índice de poros son:

$$e = e_0 + a(\sigma - u_a) + b(u_a - u_w) + c(\sigma - u_a)(u_a - u_w) \quad (17)$$

$$e = e_0 + a(\sigma - u_a) + b * \log(u_a - u_w) + c(\sigma - u_a) * \log(u_a - u_w) \quad (18)$$

$$e = e_0 + a * \log(\sigma - u_a) + b * \log(u_a - u_w) + c * \log(\sigma - u_a) * \log(u_a - u_w) \quad (19)$$

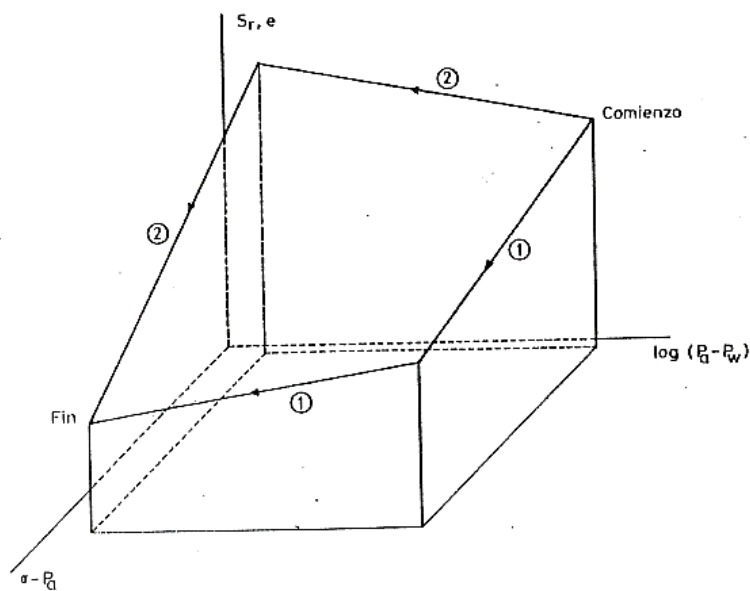
$$e = e_0 + a * \log(\sigma - u_a) + b(u_a - u_w) + c * \log(\sigma - u_a) * (u_a - u_w) \quad (20)$$

Expresiones análogas fueron usadas para el ajuste de la superficie del grado de saturación; las expresiones que presentaron mejor ajuste fueron las expresiones “tipo” 2 (ecuación (18)) tanto para el índice de poros como para el grado de saturación cuya expresión se muestra a continuación.

$$S_r = S_{r0} + a(\sigma - u_a) + b * \log(u_a - u_w) + c(\sigma - u_a) * \log(u_a - u_w) \quad (21)$$

La limitación que tienen las expresiones (18) y (21) es que no son válidas para suelos saturados debido a la presencia del logaritmo.

El procedimiento sugerido por (Lloret, 1982) para hallar las superficies de estado se basa en la realización de mínimo dos ensayos de laboratorio, uno en el que se inicie con una succión alta y se aumenta la carga a succión constante y otro en el que se disminuya la succión a carga constante y luego manteniendo la succión constante se incrementa el valor de la carga, de modo que tengan coincidan los puntos inicial y final, la trayectoria de los ensayos se indica en la Figura 30, así mismo se sugiere realizar un ensayo edométrico saturado para completar la superficie.



**Figura 30.** Ensayos mínimos sugeridos para hallar la superficie de estado (Lloret, 1982).

Superficies de este tipo fueron halladas por (Lloret & Alonso, 1985) para la arena arcillosa de Piñolen usada en la construcción de la presa de Limonero en Malagá, España. El aspecto de de la superficie encontrada se muestra en la Figura 31.

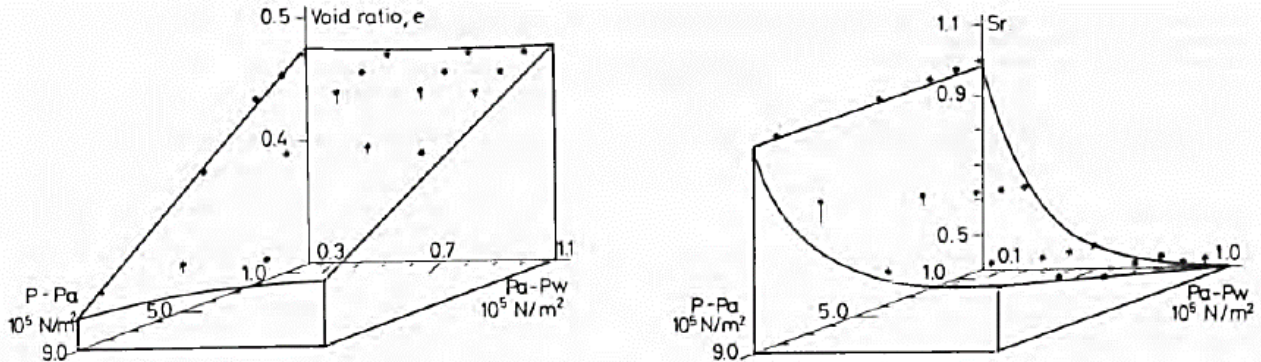


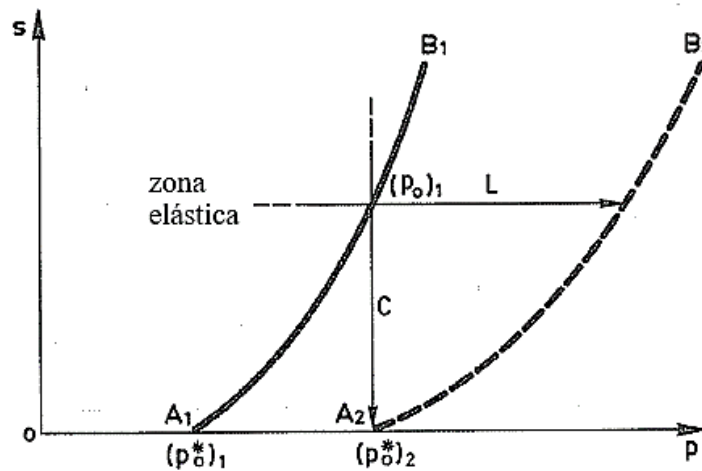
Figura 31. Superficies de estado para la arcilla arenosa Piñolen (Lloret & Alonso, 1985).

### 2.2.3 Modelos de estado crítico en suelos no saturados

A finales de la década de los ochenta (Alonso, et al., 1987) durante la Novena Conferencia Europea de Mecánica de Suelos y Fundaciones proponen las bases de un modelo elastoplástico para reproducir comportamientos como el colapso y el hinchamiento en suelos no saturados que tenga en cuenta los principales aspectos del comportamiento de los suelos no saturados los cuales se enlistan a continuación:

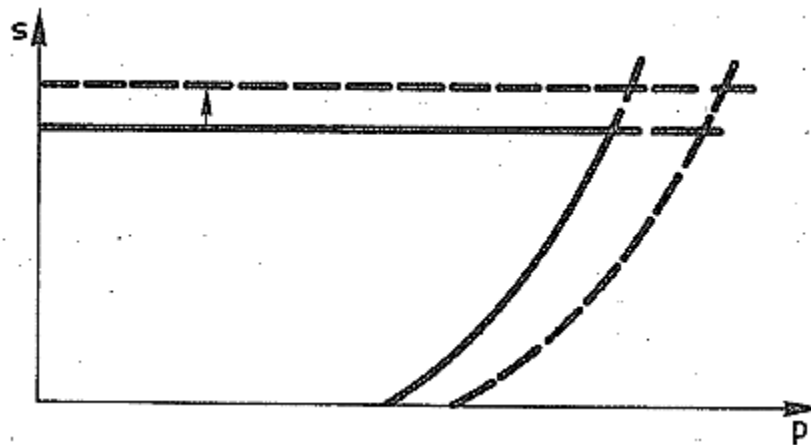
1. La succión incrementa la rigidez del suelo y la tensión de preconsolidación.
2. El valor del hinchamiento depende de la carga aplicada sobre el suelo.
3. Los suelos con estructura abierta experimentan colapso en un amplio rango de tensión aplicada.
4. La mayoría de las arcillas limosas de baja plasticidad puede hinchar o colapsar por saturación dependiendo de la carga aplicada, se puede establecer un valor crítico a partir del cual el comportamiento del suelo cambie de un fenómeno a otro.
5. El valor del colapso disminuye con el aumento de la tensión de confinamiento.
6. Para un suelo y carga dados cambios en la succión pueden inducir deformaciones irreversibles.
7. El hinchamiento se produce principalmente en el primer ciclo de mojado y en ciclos posteriores el comportamiento observado es casi elástico.

Para representar estos fenómenos sugieren usar un espacio bidimensional tensión media-succión ( $p-s$ ) para analizar los cambios volumétricos en el suelo, además de incorporar una superficie de fluencia (LC) para los cambios de tensión y una superficie de fluencia para los cambios de succión (SI) ubicada en el valor máximo de succión al que ha estado sometido el suelo; el plano y las superficies de fluencia propuestas se muestran en la Figura 32.



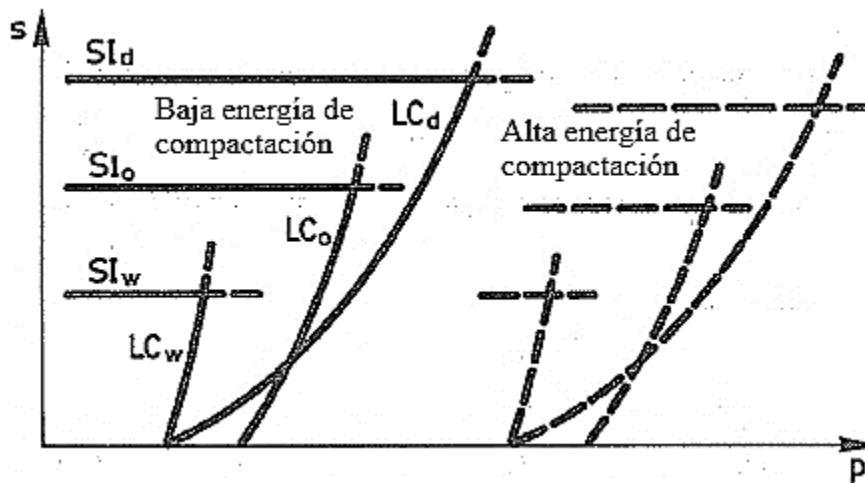
**Figura 32.** Superficies de fluencia en el plano  $(p-s)$  para un modelo elastoplástico de suelos no saturados (Alonso, et al., 1987) .

Las trayectorias C y L describen aumento en la tensión media  $p$  con succión constante y aumento en la succión  $s$  con tensión media constante respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 32 tanto los cambios en la succión como en la tensión media producen deformaciones irreversibles haciendo que la superficie de fluencia LC se traslade hacia la derecha en el eje de la tensión media produciendo un aumento en la presión de preconsolidación en estado saturado  $p_0^*$ , también es de notar que la trayectoria C representa un colapso en el suelo producto de las deformaciones irreversibles causadas por la disminución en el valor de la succión, las superficies LC y SI se encuentran acopladas según se muestra en la Figura 33.



**Figura 33.** Acoplamiento entre las superficies LC y SI (Alonso, et al., 1987).

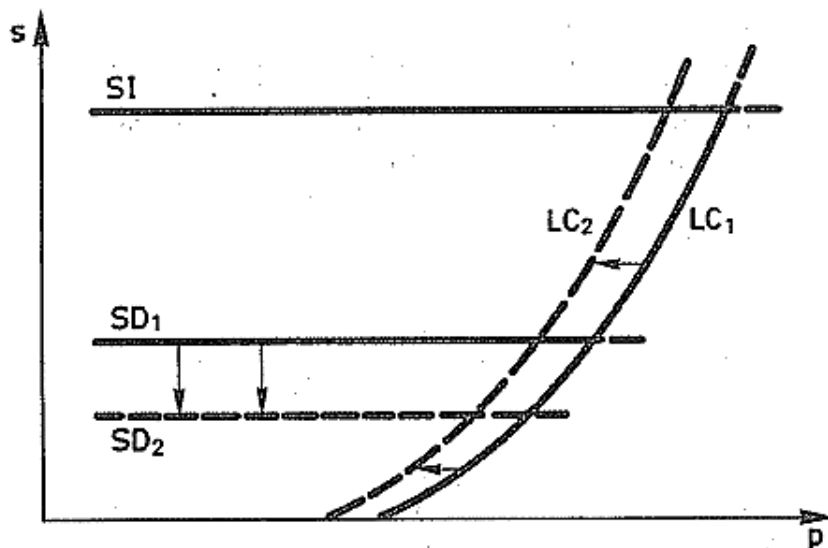
Entre tanto en la zona elástica se produce hinchamiento y colapso reversibles por cambios de succión y también retracciones y expansiones por cambios en la tensión media. La posición de las superficies LC y SI varían según la energía y la rama en la que se compacta el suelo, esta variación se ilustra en la Figura 34.



**Figura 34.** Variación de las superficies de fluencia según la energía de compactación (Alonso, et al., 1987).

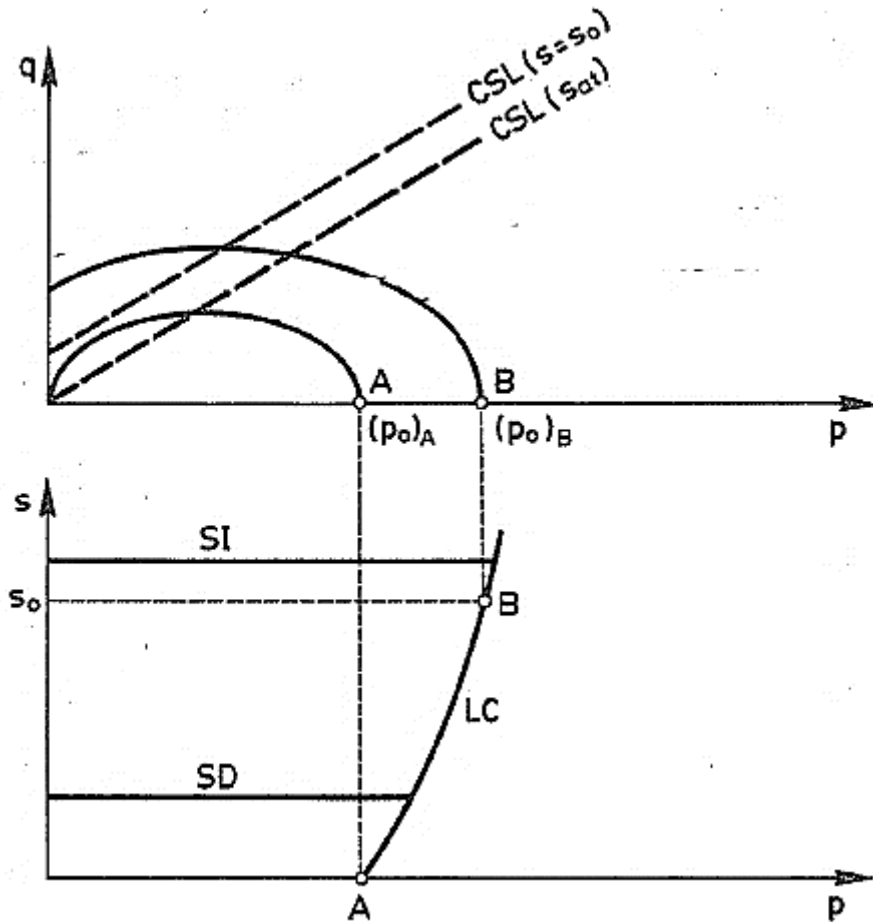
Como se observa en la Figura 34 en suelos compactados en la rama seca sufren grandes colapsos a causa del alto valor de succión con el que cuentan, contrastando con los pequeños valores de colapso producidos para los suelos compactados en la rama húmeda, los suelos compactados con un contenido de agua óptimo muestran un colapso de valor intermedio.

Para reproducir correctamente el hinchamiento se propone una superficie adicional SD, esta actúa disminuyendo el tamaño de la zona elástica a causa de las deformaciones irreversibles cuando el valor de la succión se encuentra por debajo de cierto valor de succión, esta situación se muestra en la Figura 35.



**Figura 35.** Superficies de fluencia para representar el fenómeno de hinchamiento (Alonso, et al., 1987).

Para tener en cuenta el efecto de las tensiones de corte se introduce la variable tensional  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  y se introduce el efecto de la succión mediante el aumento en el valor de la cohesión, en el plano  $p-q$  la superficie de fluencia del modelo tiene la forma elíptica del modelo Cam Clay modificado, el acoplamiento con la superficie en el plano  $p-s$  se muestra en la Figura 36, las líneas de estado crítico es asumida paralela a la línea de estado crítico para suelo saturado.



**Figura 36.** Superficie de fluencia en los planos  $p-q$  y  $p-s$  (Alonso, et al., 1987).

La formulación matemática completa del modelo elastoplástico para suelos no saturados fue finalmente presentada por (Josa, 1988) y (Alonso, et al., 1990) en un modelo conocido como Barcelona Basic Model, siendo este el primer modelo que reproduce razonablemente la mayoría de los comportamientos de los suelos no saturados, con excepción del comportamiento de los suelos expansivos. La presentación de este modelo marca el inicio del desarrollo de un gran número de investigaciones y el desarrollo de posteriores modelos elastoplásticos como los desarrollados por (Josa, et al., 1992) que permite predecir el colapso máximo que puede sufrir un suelo no saturado.

Posteriormente (Gens & Alonso, 1992) desarrollaron la teoría de un modelo elastoplástico para suelos expansivos incorporando el comportamiento de la macro y microestructura del suelo, para ello se asume que la parte microestructural del suelo permanece principalmente saturada y que su comportamiento es elástico.

También surgieron modelos posteriores como el propuesto por (Wheeler & Sivakumar, 1995), las leyes constitutivas generalizadas para suelos parcialmente saturados propuestas por (Bolzon, et al., 1996), modelos anisótropos como el de (Cui & Delage, 1996) y a finales de la década el modelo para materiales expansivos de (Alonso, et al., 1999) teniendo como base principal el estudio de (Gens & Alonso, 1992).

Entrada la década del 2000 aparecen modelos modificados destacándose la inclusión del grado de saturación por medio de la curva de retención de agua, este tipo de modificaciones se aprecia en los trabajos realizados por (Gallipoli, 2000), (Loret & Khalili, 2000), (Karube & Kawai, 2001), (Gallipoli, et al., 2003) siendo este último el más destacado ya que incorpora un modelo en base a dos variables constitutivas que hacen referencia al mecanismo de succión.

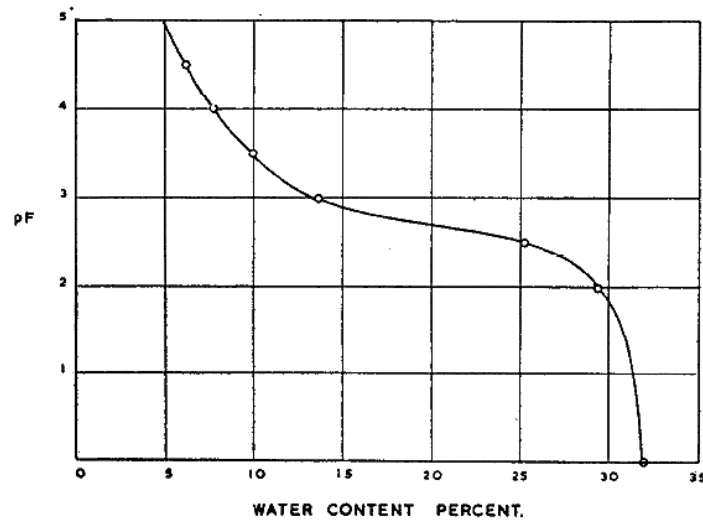
Dentro de las variables la primera es la tensión promedio en el esqueleto sólido que proporciona la información de la presión ejercida por el agua sobre los poros del suelo y la segunda denominada variable  $\xi$  relacionada al valor del efecto unión ejercido por el agua en los meniscos de contactos entre partículas.

También surgen modelos que incorporan la curva de retención de agua incluyendo el fenómeno de histéresis como los de (Romero & Vaunat, 2000) y (Vaunat, et al., 2000). Posteriormente en trabajos como los de (Romero, et al., 2001) se estudia la influencia de la temperatura en el comportamiento hidráulico una arcilla; poco después (Sanchez, et al., 2005) proponen un modelo del tipo doble estructura para suelos expansivos acoplado el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del suelo, también se encuentran modelos como el propuesto por (Della Vecchia, et al., 2013) con un acoplamiento multifase y multiescala que tiene en cuenta la variación que sufre la microfabrica del suelo a lo largo de diferentes trayectorias hidromecánicas.

### **2.3 CURVA DE RETENCIÓN**

La relación entre el grado de saturación o el contenido de agua y la succión se ha denominado curva de retención de agua o curva característica del suelo, en este estudio se usa la denominación curva de retención de agua.

La forma de curva de retención depende principalmente de la historia tensional del suelo y del tipo de suelo dado que las curvas de retención de agua para arenas, limos y arcillas pueden llegar a ser muy diferentes, en los inicios la curva de retención de agua se trazaba en el plano  $pF$ -contenido de agua ( $pF-w$ ), donde  $pF$  es un unidad de medida de la succión equivalente al logaritmo base 10 del valor absoluto de una columna de agua que equilibre la succión, una curva de retención en este plano tendrá la forma que se muestra en la Figura 37.



**Figura 37.** Curva de retención de agua de un limo en el plano  $pF-w$  (Jennings & Burland, 1962).

Con el tiempo el uso de la unidad  $pF$  cayó en desuso y se impusieron las unidades del sistema internacional como el Kilo y Mega Pascal, usualmente el rango de variación de la succión es de 0 a 1000 MPa valor al que se supone que el suelo ha perdido toda su agua y la humedad relativa tiende a cero.

El aspecto típico de la curva de retención es como se muestra en la Figura 38 donde se observan las diferentes zonas: una primera zona cerca de saturación donde la curva tiene una pendiente casi vertical hasta un valor de succión en el cual el aire empieza a replegarse en los poros a este valor se le conoce como valor de entrada de aire y da una idea general del máximo tamaño de poro del suelo (Ng & Menzies, 2007).

Una vez superado el valor de entrada de aire se inicia la zona de transición que se caracteriza por tener una menor pendiente que la zona inicial, en esta zona se localiza el punto de inflexión donde cambia la concavidad de la curva y finalmente se encuentra la zona residual con valores cercanos a grado de saturación cero y valores de succión bastante altos.

El aspecto de la curva de retención y su valor de entrada de aire están relacionado directamente con el tipo de suelo, ya que estos cambian bastante dependiendo del suelo como se muestra en la Figura 39, se observa que una arcilla cuenta con un valor de entrada mayor al de una arena por ejemplo. Además, en el caso de la arena la pendiente de la zona de transición es mucho menor que la pendiente que presenta la zona de transición en una arcilla, entre tanto los suelos limosos presentan patrones intermedios a los mencionados anteriormente.

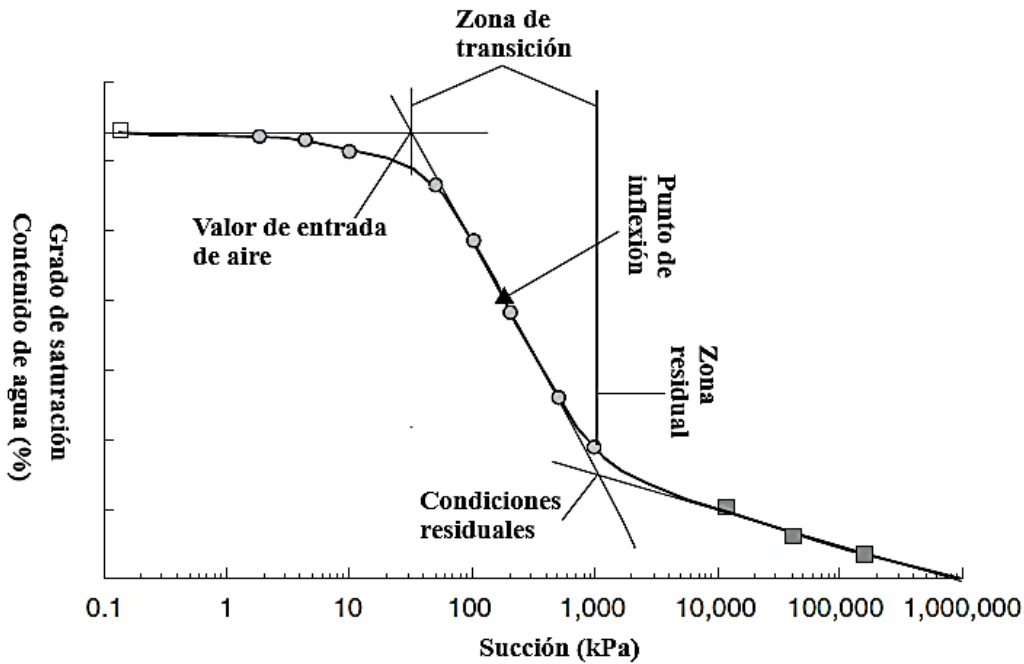


Figura 38. Aspecto típico de una curva de retención de agua (Ng & Menzies, 2007).

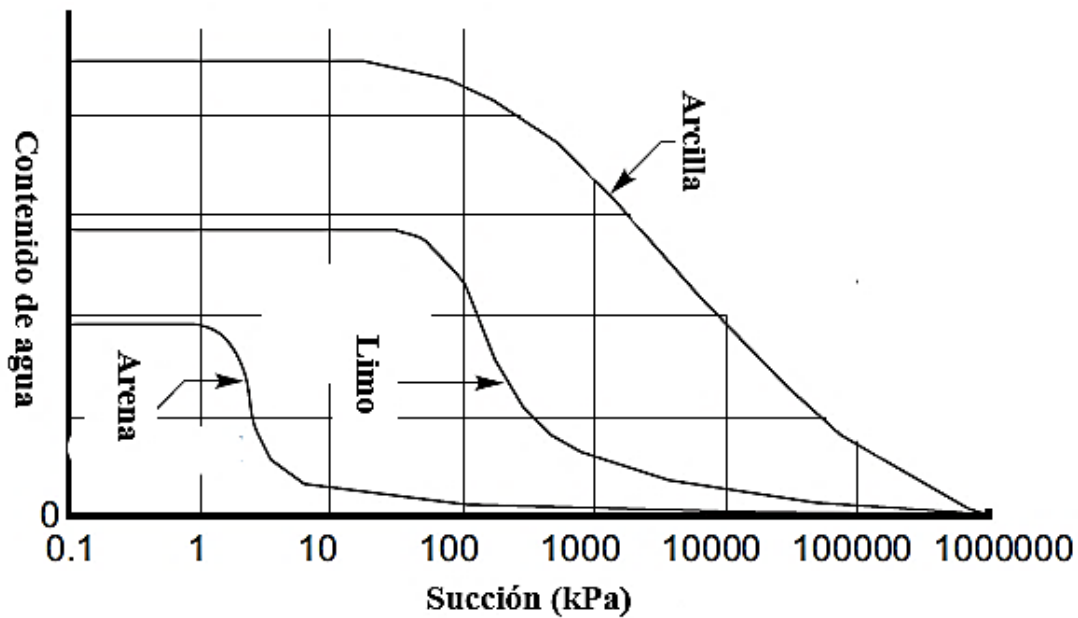
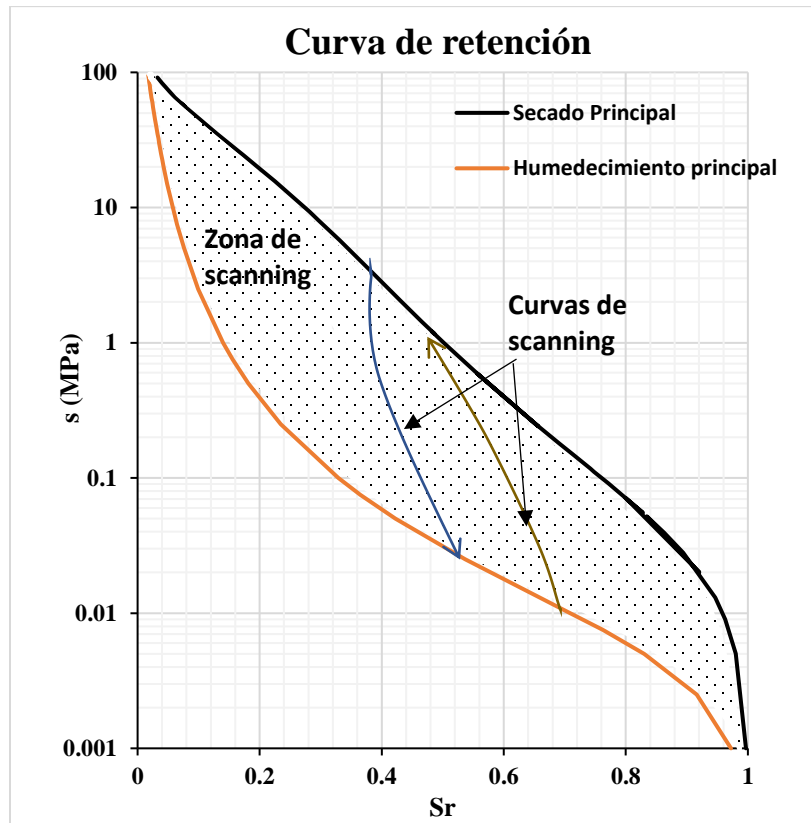


Figura 39. Curva de retención de agua dependiendo del tipo de suelo (Fredlund & Xing, 1994).

Numerosos autores como (Burdine, 1952), (Gardner, 1958), (Mualem, 1976), (van Genuchten, 1980) y (Fredlund & Xing, 1994) han propuesto expresiones matemáticas para ajustar el comportamiento de la curva de retención de agua, el modelo que ha adquirido mayor popularidad es el de Van Genuchten.



Dentro de las principales características de la curva de retención se encuentra la no unicidad de las trayectorias de secado y humedecimiento, la histéresis que esto ocasiona hace que el comportamiento del suelo se bastante complejo y altamente dependiente de la trayectoria seguida como se muestra en la Figura 40, cabe resaltar que así como existe el valor de entrada de aire en procesos de secado para procesos de humedecimiento existe un valor de entrada de agua.

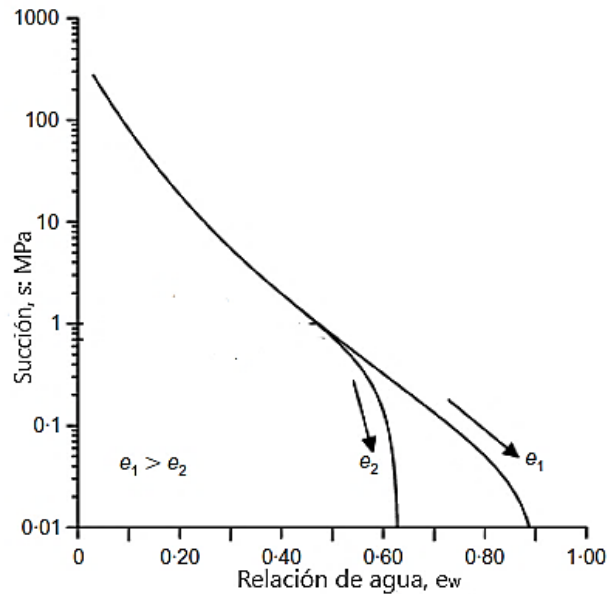


**Figura 40. Fenómeno de histéresis en la curva de retención.**

Las principales causas de la histéresis en la curva de retención según (Hillel, 2003) son la no uniformidad geométrica de los poros del suelo, el efecto del ángulo de contacto por el cual el ángulo de contacto y el radio de curvatura son mayores en el caso de un menisco que avanza que los de un menisco en retroceso, la encapsulación del aire en los poros aislados y fenómenos de hinchamiento, contracción o envejecimiento, que producen cambios en la estructura del suelo, dependiendo del historial de mojado y secado de la muestra.

Investigadores como (Kool & Parker, 1987) y (Parker & Lenhard, 1987) propusieron procedimientos y expresiones matemáticas detalladas para modelar las curvas de scanning en la curva de retención, posteriormente (Vaunat, et al., 2000) presentaron un modelo de curva de retención teniendo en cuenta la histéresis e introduciendo dependencia del índice de poros.

La influencia del índice de poros sobre la curva de retención se muestra en la Figura 41, donde se observa que un aumento en el índice de poros provoca un aumento en el valor del contenido de agua o variables asociadas a la cantidad de agua presente en el suelo como la relación de agua -  $e_w = e * S_r$ -al que el suelo alcanza un grado de saturación igual a uno, generalmente esta situación ocurre en la zona donde la succión es menor a 1 MPa donde dominan las fuerzas capilares.



**Figura 41. Variación de la curva de retención de agua con el índice de poros (Romero, et al., 2011).**

### 3. PROGRAMA DE MATLAB PARA MODELOS CAM CLAY MODIFICADO Y BARCELONA BASIC MODEL

En este capítulo se desarrollan varios scripts en el programa MATLAB, que recoge los principales aspectos de los modelos de Cam Clay Modificado (MCCM) y Barcelona Basic Model (BBM) y con ello desarrollar la modelación de los ensayos de laboratorio.

#### 3.1 PROGRAMACIÓN EN LENGUAJE MATLAB

Este programa surgió comercialmente en el año 1984 en los Estados Unidos, denominado MATLAB como una abreviación de “MATrix LABoratory”, fue creado con especial énfasis en facilitar las operaciones que requieren el manejo de matrices y vectores, también permite trabajar con escalares reales y complejos, entre otros.

Dada su versatilidad y sencillez en el manejo de matrices y vectores, se ha erigido como uno de los programas más usados en los campos de la ingeniería y la computación, cuenta además con su propio lenguaje -el cual se usa en el presente estudio- de programación en el que se pueden desarrollar scripts de manera más sencilla en comparación con otros lenguajes como C o C++; también se destaca su capacidad en la elaboración de gráficos en dos y tres dimensiones, por lo que lo convierte en una herramienta muy útil para el desarrollo del presente estudio.

#### 3.2 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO CAM CLAY MODIFICADO

Se desarrolla un programa del modelo Cam Clay Modificado (MCCM) para el ejemplo de un ensayo triaxial drenado. A continuación, se describen los pasos realizados en el programa:

1. El programa carga desde un archivo de MS Excel el listado de parámetros del MCCM que se muestran en la Tabla 3:

**Tabla 3. Parámetros del modelo Cam Clay Modificado, cargados desde MS Excel.**

Parámetro	Unidades	Símbolo	Valor
Tensión media máxima conocida por el suelo	kPa	$p_{0i}$	100
Pendiente de línea de estados críticos	-	M	0.02
Pendiente recta de compresión normal	-	$\lambda$	0.9
Pendiente recta de descarga elástica	-	$\kappa$	10
Índice de poros inicial	-	$e_0$	0.1
Módulo de corte	kPa	G	0.08

2. Después se carga la trayectoria tensional ( $p-q$ ) desde un archivo de MS Excel, como se muestra en la Tabla 4:

**Tabla 4. Trayectoria tensional para el MCCM.**

PUNTO	p (MPa)	q (MPa)
1	$p_1$	$q_1$
2	$p_2$	$q_2$
3	$p_3$	$q_3$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$n-1$	$p_{n-1}$	$q_{n-1}$
$n$	$p_n$	$q_n$

- Después de cargar los parámetros del modelo y la trayectoria tensional se extrae el número de puntos  $n$ , que determinará el tamaño de los vectores de la trayectoria y de otras variables fundamentales del modelo las cuales se muestran en la Tabla 5:

**Tabla 5. Variables tensionales de estado y de historia del MCCM.**

Variable de estado	Vector
Tensión media	$p$
Tensión desviadora	$q$
Variable de historia	Vector
Tensión de preconsolidación	$p_0$

- Se crean los vectores de deformación y los vectores auxiliares para el cálculo de las deformaciones

**Tabla 6 Vectores de deformaciones y vectores auxiliares para el cálculo de las deformaciones.**

Variable	Vector
Incremento de deformación volumétrica elástica	$d\varepsilon_v^e$
Incremento de deformación de corte elástica	$d\varepsilon_q^e$
Incremento de deformación volumétrica plástica	$d\varepsilon_v^p$
Incremento de deformación de corte plástica	$d\varepsilon_q^p$
Incremento total de deformación volumétrica	$d\varepsilon_v$
Incremento total de deformación de corte	$d\varepsilon_q$
Deformación volumétrica	$\varepsilon_v$
Deformación de corte	$\varepsilon_q$
Deformación radial	$\varepsilon_r$
Deformación vertical	$\varepsilon_z$
Incrementos plásticos de deformación	$d\varepsilon_q^p / d\varepsilon_v^p$
Relación de tensiones	$\eta$

5. Una vez cargados los parámetros del modelo, la trayectoria tensional y creados los vectores se inicia el cálculo en un ciclo “for” de las variables  $p_0$  y  $\eta$  en cada punto  $(p, q)$  de la trayectoria, dadas por las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$p_0 = \max\left(\frac{q^2}{M^2 * p} + p, p_0\right) \quad (22)$$

Relación de tensiones:

$$\eta = \frac{q}{p} \quad (23)$$

6. Después de calcular las variables  $p_0$  y  $\eta$ , se calculan en un ciclo “for” los incrementos de deformación volumétrica y de corte para cada punto  $(p, q)$  de la trayectoria, con las ecuaciones dadas a continuación:

Deformación volumétrica elástica:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1 + e_0} * \ln\left(\frac{p_{i+1}}{p_i}\right) \quad (24)$$

Deformación volumétrica plástica:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} * \ln\left(\frac{p_{0i+1}}{p_{0i}}\right) \quad (25)$$

Deformación elástica de corte:

$$d\varepsilon_q^e = \frac{q_{i+1} - q_i}{3 * G} \quad (26)$$

Deformación plástica de corte:

$$d\varepsilon_q^p = \frac{d\varepsilon_v^p * 2 * \left(\frac{\eta_{i+1} + \eta_i}{2}\right)}{M^2 - \left(\frac{\eta_{i+1} + \eta_i}{2}\right)^2} \quad (27)$$

Incremento de deformación volumétrica total

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p \quad (28)$$

Incremento de deformación total de corte

$$d\varepsilon_q = d\varepsilon_q^e + d\varepsilon_q^p \quad (29)$$

7. Se ejecuta un ciclo for para calcular los incrementos plásticos y los vectores de deformación volumétrica y de corte, como se muestra a continuación:

Deformación volumétrica acumulada:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{v(i-1)} + d\varepsilon_{v(i)} \quad (30)$$

Deformación de corte acumulada:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_{q(i-1)} + d\varepsilon_{q(i)} \quad (31)$$

Vector de incrementos plásticos:

$$\frac{d\varepsilon_q^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{d\varepsilon_{qi-1}^p}{d\varepsilon_{vi-1}^p} \quad (32)$$

8. Se ejecuta un ciclo for para calcular la deformación vertical y radial para cada punto  $n$  de la trayectoria, como se muestra a continuación:

Deformación vertical:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_q + \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (33)$$

Deformación radial:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_z}{2} \quad (34)$$

9. Se realizan los gráficos correspondientes dependiendo de la trayectoria tensional y del tipo de ensayo.

Los pasos de cálculo para el modelo MCCM se resumen en la Figura 42.

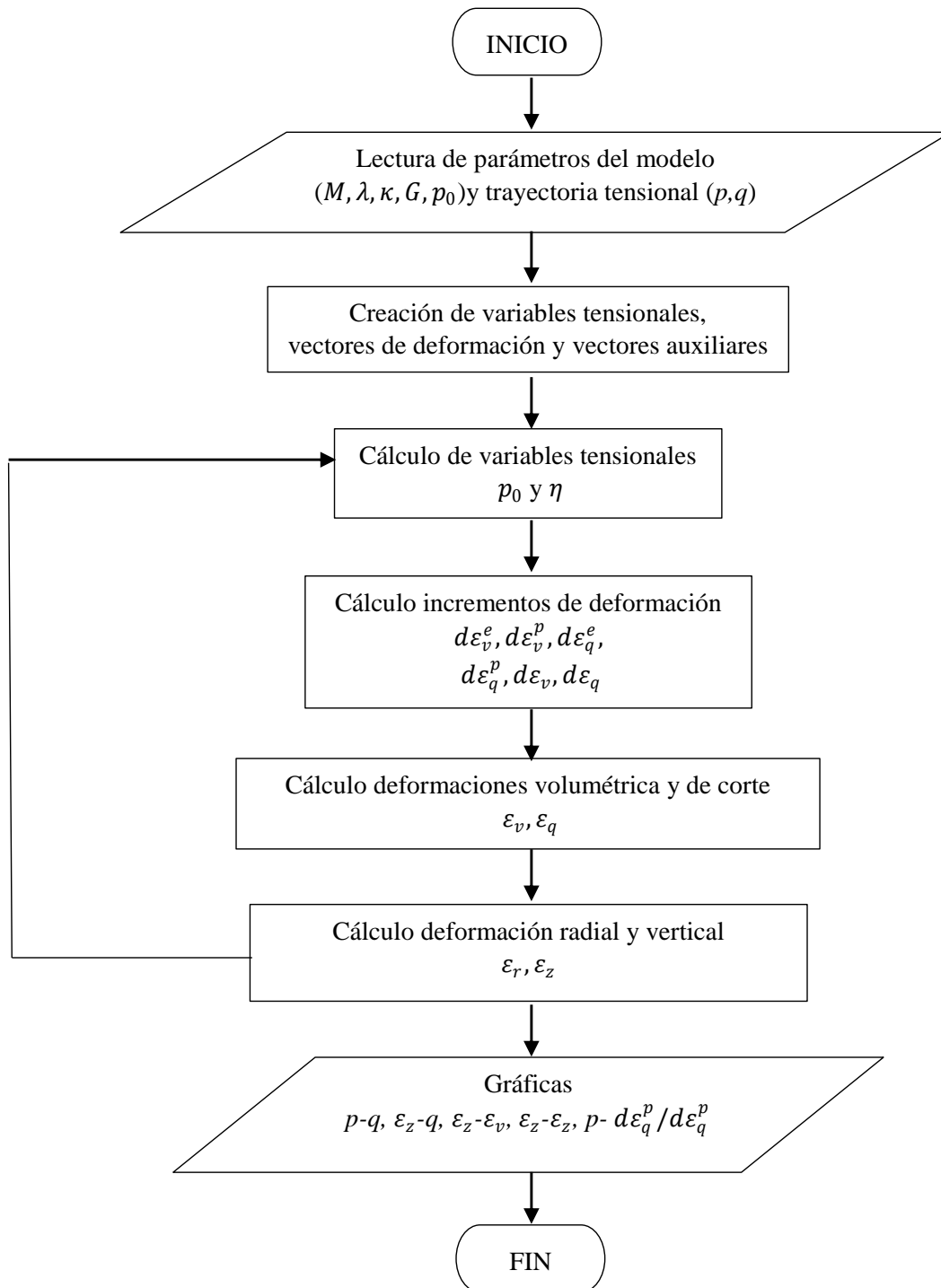


Figura 42. Diagrama de flujo del modelo MCCM.

### 3.2.1 Verificación del funcionamiento del programa del MCCM

La verificación del funcionamiento del programa se hizo mediante la comparación de los resultados obtenidos con el script y los resultados de un ejercicio desarrollado en la asignatura Mecánica de Suelos Avanzada impartida en el Máster dónde una muestra de arcilla con una tensión de preconsolidación saturada de 100 kPa se somete a aumentos de tensión desviadora manteniendo constante la tensión media, las superficies de fluencia inicial y final, la trayectoria de tensiones y la línea de estado crítico se muestran en la Figura 43.

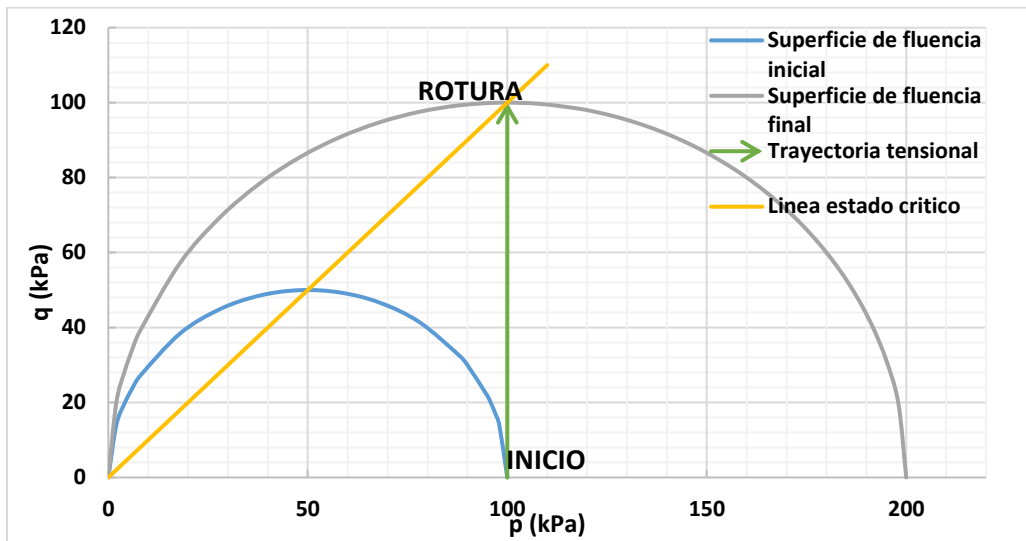


Figura 43. Trayectoria tensional ensayo drenado.

La verificación se muestra en la Figura 44, se puede ver que el programa funciona satisfactoriamente.

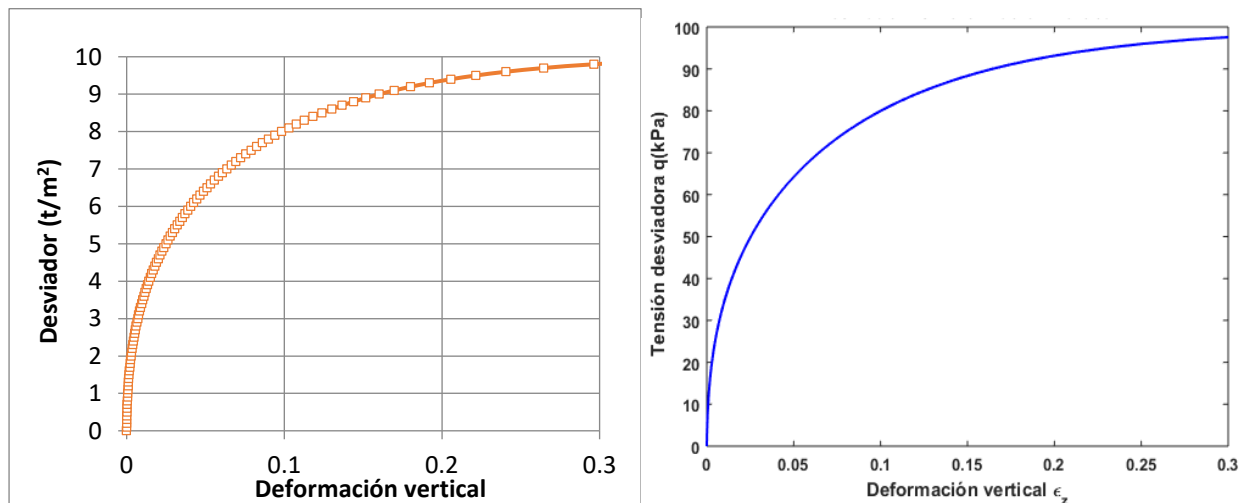


Figura 44. Grafica de tensión desviadora vs deformación vertical, a la izquierda la solución realizada en la asignatura Mecánica de Suelos y a la derecha la solución con el script del MCCM.



### 3.3 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO BÁSICO DE BARCELONA (BBM)

Se desarrolla un programa para el modelo básico de Barcelona, siguiendo los ejemplos propuestos por (Alonso, et al., 1990) en los cuales se muestra el funcionamiento del modelo a lo largo de diferentes trayectorias de carga-descarga y secado-humedecimiento. A continuación, se describen los principales pasos realizados en el programa:

1. El programa carga desde un archivo de MS Excel el listado de parámetros del modelo BBM que se muestra en la Tabla 7:

**Tabla 7. Lista de parámetros del modelo BBM, cargados desde MS Excel.**

Parámetro	Unidades	Símbolo	Valor
Parámetro de rigidez para cambios de tensión de media para estado virgen del suelo	-	$\lambda(0)$	0.2
Parámetro de rigidez elástica para cambios de tensión media	-	$\kappa$	0.02
Índice de poros inicial	-	$e_0$	0.9
Módulo de corte	MPa	G	10
Presión de referencia	MPa	$P^c$	0.1
Parámetro de rigidez para cambios de succión en estado virgen del suelo	-	$\lambda_s$	0.08
Parámetro de rigidez elástica para cambios de succión	-	$\kappa_s$	0.008
Parámetro que define la rigidez máxima del suelo	-	r	0.75
Parámetro que controla el aumento de la rigidez del suelo con la succión	MPa <sup>-1</sup>	$\beta$	12.5
Parámetro que controla el aumento de la cohesión del suelo con la succión	-	k	0.6
Parámetro de endurecimiento de la superficie de fluencia por aumentos de succión	MPa	$S_0$	0.300
Presión atmosférica	MPa	$P_{at}$	0.1

2. Después se carga la trayectoria tensional desde un archivo de MS Excel, la trayectoria viene dada en el orden ( $p$ ,  $q$ ,  $s$ ), un ejemplo se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8. Trayectoria tensional (p, q, s) descrita para los ejemplos.**

PUNTO	p (MPa)	q (MPa)	s (MPa)
1	$p_1$	$q_1$	$s_1$
2	$p_2$	$q_2$	$s_2$
3	$p_3$	$q_3$	$s_3$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
$n-1$	$p_{n-1}$	$q_{n-1}$	$s_{n-1}$
$n$	$p_n$	$q_n$	$s_n$

- Una vez cargados los parámetros y la trayectoria se extrae el número de puntos  $n$ , que determinará el tamaño de los vectores de la trayectoria y de otras variables fundamentales del modelo las cuales se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9. Vectores de las variables básicas del modelo BBM.**

<b>Variable</b>	<b>Vector</b>
Tensión media neta	$p$
Tensión desviadora	$q$
Succión	$s$
Presión de preconsolidación	$p_0$
Presión de preconsolidación para condiciones saturadas	$p_0^*$
Parámetro de rigidez para cambios de succión en estado virgen del suelo	$\lambda(s)$
Función de aumento de la tensión media inducido por succión	$p_s$
Índice de poros	$e$
Volumen específico	$v$

- Se crean los vectores auxiliares cuya función es la de almacenar los valores para graficar las superficies de fluencia inicial y al final del ensayo, además de otros vectores auxiliares los cuales se muestran en la Tabla 10

**Tabla 10. Vectores auxiliares para graficar las superficies de fluencia inicial y final.**

<b>Función</b>	<b>Vector</b>
Valores de succión para graficar las superficies de fluencia	$S$
Presión de preconsolidación en estado no saturado para graficar la superficie de fluencia inicial	$p_{0\_1}$
Presión de preconsolidación en estado no saturado para graficar la superficie de fluencia final	$p_{0\_2}$
Rigidez para cambios de succión en estado virgen del suelo para la superficie de fluencia inicial	$\lambda(s)_{\_1}$
Rigidez para cambios de succión en estado virgen del suelo para la superficie de fluencia final	$\lambda(s)_{\_2}$
Vector auxiliar para el cálculo del volumen específico	$v\_e_v$
Vector con las presiones de preconsolidación en estado no saturado	$p_{0sat}$
Vector con las presiones de preconsolidación corregidas en estado no saturado	$p_{0sat\_c}$

- En este paso se crean los vectores de deformaciones volumétricas y de corte tanto elásticas como plásticas, debidas a cambios en la tensión media y cambios de succión, los vectores creados se muestran en la Tabla 11

**Tabla 11. Vectores de deformación y de incrementos de deformación.**

Variable	Vector
Incremento de deformación volumétrica elástica por cambios en la tensión media	$d\varepsilon_{vp}^e$
Incremento de deformación volumétrica elástica por cambios de succión	$d\varepsilon_{vs}^e$
Incremento de deformación volumétrica elástica	$d\varepsilon_v^e$
Deformación volumétrica elástica total	$\varepsilon_v^e$
Incremento de deformación volumétrica plástica producida por cambios de tensión media	$d\varepsilon_{vp}^p$
Incremento de deformación volumétrica plástica por cambios de succión	$d\varepsilon_{vs}^p$
Incremento de deformación volumétrica plástica	$d\varepsilon_v^p$
Deformación volumétrica plástica	$\varepsilon_v^p$
Incremento de deformación volumétrica	$d\varepsilon_v$
Deformación volumétrica	$\varepsilon_v$
Incremento de deformación de corte elástica	$d\varepsilon_s^e$
Incremento de deformación de corte plástica	$d\varepsilon_s^p$
Incremento de deformación de corte	$d\varepsilon_s$
Deformación de corte	$\varepsilon_s$

6. Una vez cargados los parámetros del modelo se calcula el parámetro  $\alpha$  de flujo no asociado de (Ohmaki, 1982) dado por la Ecuación (35)

$$\alpha = \frac{M(M-9) * (M-3)}{9 * (6-M)} * \frac{1}{1 - \kappa/\lambda} \quad (35)$$

7. Se ejecuta un ciclo for en el cual se calculan las funciones  $\lambda(s)$  y  $p_0$  para la superficie de fluencia inicial y para la trayectoria, también se calcula la función  $p_s$  y los vectores  $p_0^*$  y  $S_0$  para cada uno de los  $n$  puntos de la trayectoria, dadas por las ecuaciones, que se muestran a continuación:

$$\lambda(s) = \lambda(0) * [(1-r) * e^{-\beta s} + r] \quad (36)$$

$$p_s = -k * s \quad (37)$$

$$p_0 = \max \left( p_c * \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}}, \frac{q^2}{M^2(p+p_s)} + p \right) \quad (38)$$

$$S_0 = \max(S_0, s) \quad (39)$$

$$p_0^* = \max \left( p_c * \left( \frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(s)-\kappa}{\lambda(0)-\kappa}} \cdot [1], p_{0(i)}^* * e^{\ln \left( \frac{s_0(i+1)+pat}{s_0(i)+pat} \right) * \frac{\lambda_s - \kappa_s}{\lambda(0) - \kappa}} \cdot [2] \right) \quad (40)$$

El término [2] de la expresión (40) es el resultado de igualar las deformaciones volumétricas plásticas producidas por cambios de succión (44) y las deformaciones volumétricas plásticas producidas por cambios de tensión media neta (42); esto es necesario para trayectorias como las que se muestran en la Figura 46, el procedimiento completo se muestra en el Apéndice A.

8. Se ejecuta un ciclo para el cálculo de los incrementos de deformaciones elásticas y plásticas, producidas por cambios en la tensión media  $p'$ , en la succión  $s$  y desviador  $q$  las cuales se muestran a continuación:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa dp}{v p} \quad (41)$$

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s) - \kappa dp_0}{v p_0} = \frac{\lambda(0) - \kappa dp_0^*}{v p_0^*} \quad (42)$$

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s ds}{v s + p_{at}} \quad (43)$$

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds_0}{s_0 + p_{at}} \quad (44)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G} dq \quad (45)$$

$$d\varepsilon_s^p = d\varepsilon_v^p \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s + p_0)} \quad (46)$$

$$d\varepsilon_v^e = d\varepsilon_{vs}^e + d\varepsilon_{vp}^e \quad (47)$$

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vs}^p + d\varepsilon_{vp}^p \quad (48)$$

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^e \quad (49)$$

$$d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^p + d\varepsilon_s^e \quad (50)$$

9. Se ejecuta un ciclo para calcular los vectores de deformación volumétrica y de corte, como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{v(i-1)} + d\varepsilon_{v(i)} \quad (51)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s(i-1)} + d\varepsilon_{s(i)} \quad (52)$$

10. Se ejecuta un ciclo para el cálculo del índice de poros  $e$ , como se muestra a continuación:

$$v_\varepsilon = \varepsilon_v * (1 + e_0) \quad (53)$$

$$e = e_0 - v_{\varepsilon_v} * e_0 \quad (54)$$

11. Se ejecuta un ciclo for en el cual se calculan las funciones  $\lambda(s)$  y  $p_0$  para la superficie de fluencia final.

12. Se realizan las diferentes gráficas para cada ejemplo.

Los pasos de cálculo se resumen en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 45

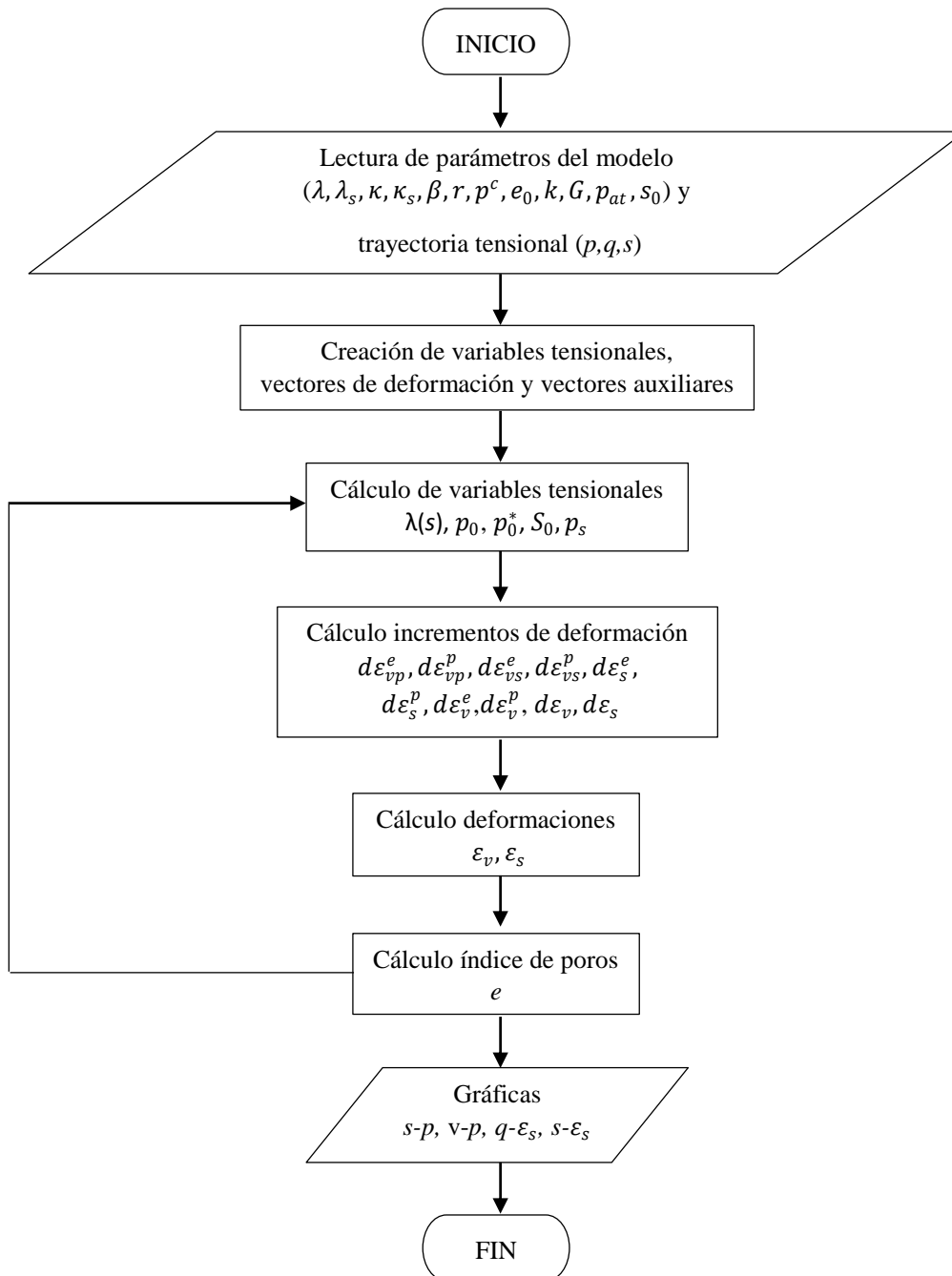


Figura 45. Diagrama de flujo del modelo BBM.

### 3.3.1 Verificación del funcionamiento del programa para el modelo BBM

El funcionamiento del programa se verificó comparando los resultados obtenidos con los presentados en el documento original de (Alonso, et al., 1990); se verifica para trayectorias tensionales isotrópicas como las que se muestran en la Figura 46 y las trayectorias tensionales con desviador como las que se muestran en la Figura 48, las comparaciones se muestran en la Figura 47 y Figura 49 respectivamente.

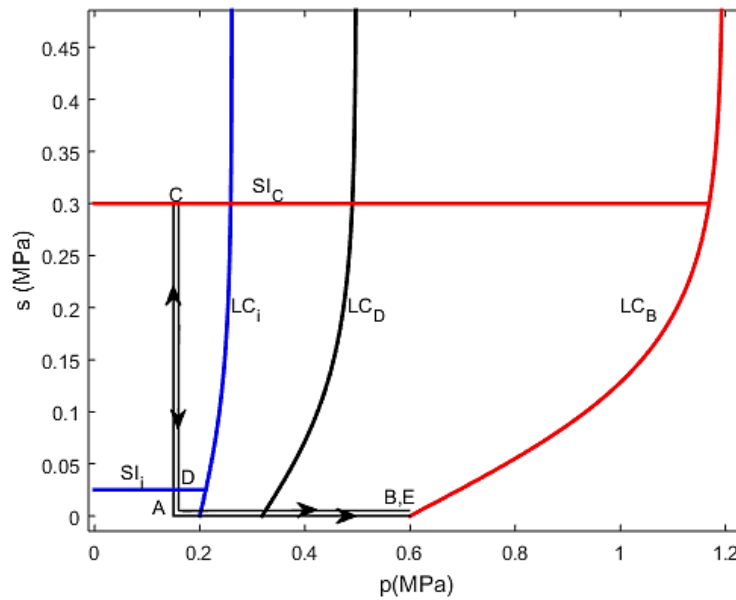


Figura 46. Trayectorias tensionales isotrópicas.

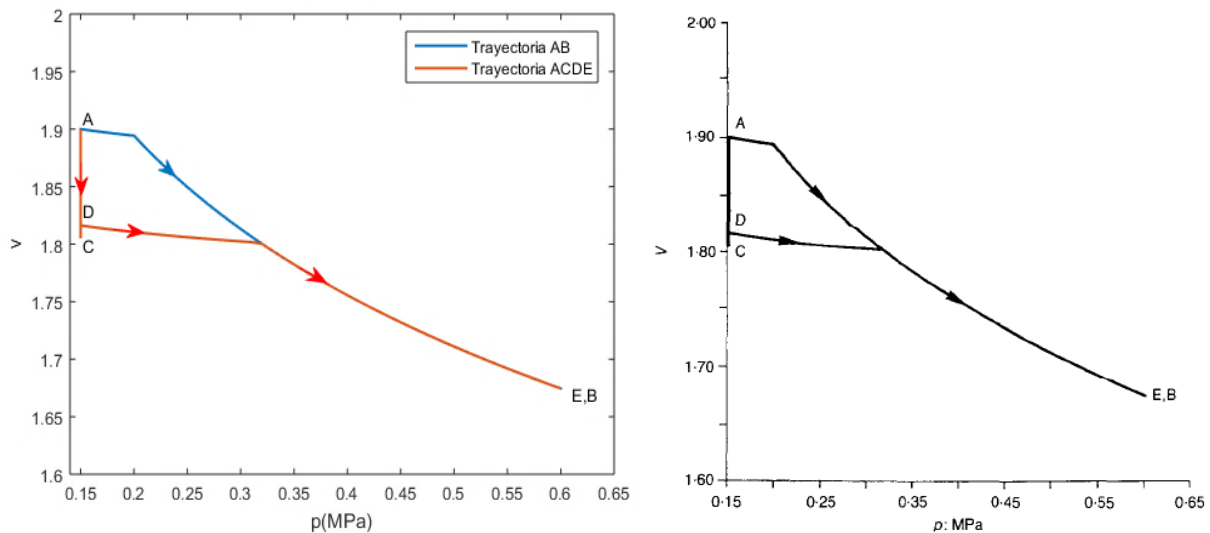


Figura 47. Cambio en el volumen específico con la tensión media neta, a la izquierda el calculado con el programa desarrollado y a la derecha la gráfica original mostrada en (Alonso, et al., 1990).

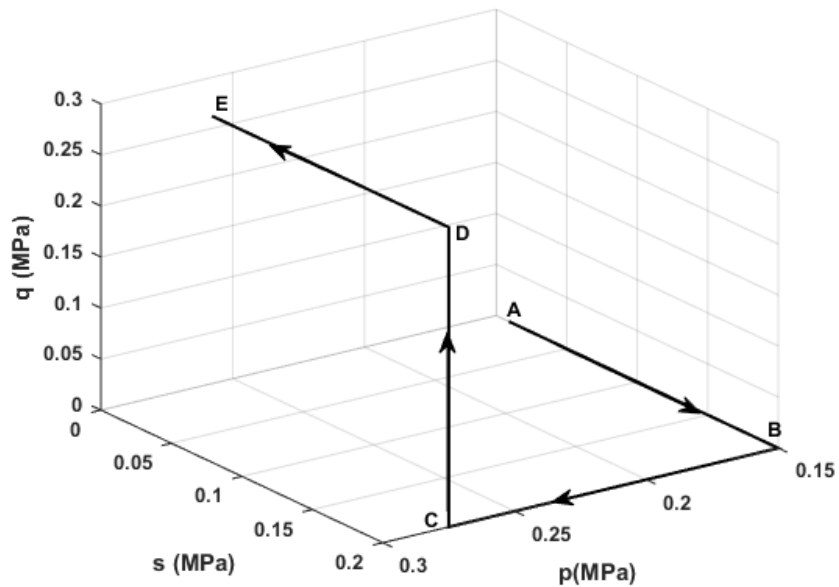


Figura 48. Trayectoria tensional con desviador.

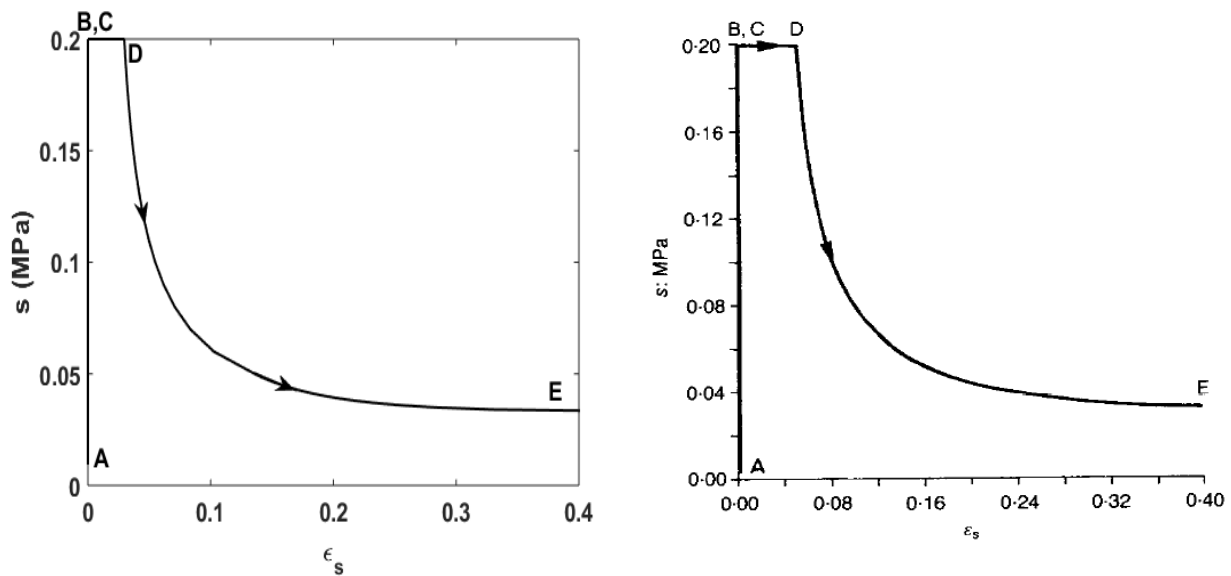


Figura 49. Variación de la deformación de corte para la trayectoria con tensión desviadora, a la izquierda se muestra el cálculo realizado con el programa y a la izquierda la gráfica original mostrada en (Alonso, et al., 1990)

### 3.4 PROGRAMA EN MATLAB DEL MODELO BÁSICO DE BARCELONA (BBM) PARA TRAYECTORIAS DE HUMEDAD CONSTANTE

Se desarrolla un programa iterativo adaptando el modelo BBM y ajustándolo a trayectorias a humedad constante al acoplarlo con una curva de retención del tipo Van Genuchten.

Se aplica una modificación para la función  $p_s$  reemplazando la ley original por la que se muestra en la Ecuación (55).

$$p_s = \frac{s}{a + b * s} \quad (55)$$

Donde  $s$  es la succión,  $a$  y  $b$  parámetros

La expresión de la curva de retención de agua de tipo Van Genuchten modificada para tener en cuenta los cambios de porosidad se muestra en la Ecuación (56).

$$S_r = \left[ 1 + \left( \frac{s}{P_0 * \exp(a(\phi - \phi_0))} \right)^{[1/1-\lambda_0*\exp(c(\phi-\phi_0))]} \right]^{[-\lambda_0*\exp(c(\phi-\phi_0))]} \quad (56)$$

Donde  $s$  es la succión,  $P_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $a$ ,  $c$  son parámetros del modelo Van Genuchten que controlan la forma de la curva,  $\phi$  es la porosidad y  $\phi_0$  es el parámetro de referencia de Van Genuchten y que en este caso se asume igual a la porosidad inicial.

#### 3.4.1 Definición paso a paso del programa BBM para humedad constante

A continuación, se explica paso a paso el funcionamiento del programa explicando sus principales características:

1. El programa carga desde un archivo de MS Excel los parámetros del modelo BBM descritos en la Sección 3.3 con excepción del parámetro  $k$  que controla el aumento de la cohesión con la succión, el cual desaparece al realizarse una modificación a la función  $p_s$ , que pasa a depender de los parámetros  $a$  y  $b$ . Además, se cargan los parámetros del modelo Van Genuchten y varias propiedades del suelo. En la Tabla 12 se muestra la lista de los nuevos parámetros.



**Tabla 12. Parámetros modelo BBM y curva de retención del tipo Van Genuchten.**

Parámetro	Unidades	Símbolo
Parámetro de rigidez para cambios de tensión de media para estado virgen del suelo	-	$\lambda(0)$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Parámetro que controla el aumento de la cohesión del suelo con la succión	-	$a$
Parámetro que controla el aumento de la cohesión del suelo con la succión	MPa <sup>-1</sup>	$b$
Parámetro de endurecimiento de la superficie de fluencia por aumentos de succión	MPa	$S_0$
Presión atmosférica	MPa	$P_{at}$
Peso específico de las partículas sólidas del suelo	MN/m <sup>3</sup>	$\gamma_s$
Peso específico del agua	MN/m <sup>3</sup>	$\gamma_w$
Humedad inicial	-	$w$
Parámetro de Van Genuchten	-	$\lambda_{ovg}$
Parámetro de Van Genuchten	-	$a_{vg}$
Parámetro de Van Genuchten	-	$b_{vg}$
Parámetro de Van Genuchten	MPa	$P_{ovg}$

- Después se carga la trayectoria tensional desde un archivo de MS Excel, la trayectoria viene dada en el orden  $(p, q)$ , un ejemplo se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13. Trayectoria tensional  $(p, q)$ .**

PUNTO	$p$ (MPa)	$q$ (MPa)
1	$p_1$	$q_1$
2	$p_2$	$q_2$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$n-1$	$p_{n-1}$	$q_{n-1}$
$n$	$p_n$	$q_n$

- Una vez cargados los parámetros y la trayectoria se extrae el número de puntos  $n$ , que determinará el tamaño de los vectores de la trayectoria y de otras variables fundamentales del modelo las cuales se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14. Variables tensionales para una trayectoria de humedad constante.**

Variable	Vector
Tensión media neta	$p$
Tensión desviadora	$q$
Succión	$s$
Presión de preconsolidación en condiciones no saturadas	$p_0$
Presión de preconsolidación para condiciones saturadas	$p_0^*$
Parámetro de rigidez para cambios de succión en estado virgen del suelo	$\lambda(s)$
Función de aumento de la tensión media inducido por succión	$p_s$
Índice de poros	$e$
Volumen específico	$v$
Porosidad	$\phi$
Grado de saturación	$S_r$
Succión	$s$
Humedad	$w$

- Se crean los vectores de deformaciones volumétricas y de corte, elásticas y plásticas, debidas a cambios en la tensión media y cambios de succión tal y como se muestran en la Tabla 11.
- Se calculan los parámetros fundamentales y valores de entrada como se muestra a continuación:

Parámetro de flujo no asociado de (Ohmaki, 1982) dado en la Ecuación (35).

Gravedad específica de las partículas sólidas:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (57)$$

Donde  $\gamma_s$  es el peso específico de las partículas sólidas y  $\gamma_w$  el peso específico del agua.

Porosidad inicial:

$$\phi_0 = \frac{e_0}{1 + e_0} \quad (58)$$

Donde  $e_0$  es el índice de poros inicial.

Grado de saturación inicial:

$$S_{r0} = \frac{G_s * w}{e_0} \quad (59)$$

Succión inicial:

$$s_0 = P_{0vg} * \left[ S_{r0}^{\left[ \frac{1}{- \lambda_{ovg}} \right]} - 1 \right]^{[1 - \lambda_{ovg}]} \quad (60)$$

6. Se almacena el valor inicial en la posición 1 en los vectores de las variables  $p_0^*, p_0, \lambda(s), p_s, e, v, \phi, S_r, s$  y  $w$ . Y se inicializa la variable *error* definida como la diferencia entre la succión supuesta de entrada y la succión calculada al final de cada paso, es decir:

$$error = |s_f - s_2| \quad (61)$$

7. Se ejecuta ciclo for en el que se aplica el incremento de tensión en cada punto de la trayectoria y se realizan las iteraciones de la posición 2 a la posición  $n$ .
8. Se ejecuta un ciclo while con la condición:  $error > tolerancia$ ; en este caso se toma una tolerancia de 0.00001 MPa. Una vez se entra en el ciclo se calculan los valores de las variables  $p_{02}^*, p_{02}, \lambda(s_2), p_{s2}$  tal y como se indica en el paso 7 de la sección 3.3 Después se calculan los incrementos de deformación  $d\varepsilon_{vp}^e, d\varepsilon_{vs}^e, d\varepsilon_{vs}^p, d\varepsilon_{vp}^p, d\varepsilon_v^e, d\varepsilon_v^p, d\varepsilon_v$  para el paso siguiendo el procedimiento descrito en los pasos 8 y 9 de la sección 3.3. Con los incrementos de deformación calculados se hallan los valores del índice de poros  $e_2$  mediante la Ecuación (62), la porosidad  $\phi_2$  y grado de saturación  $S_{r2}$  al final del paso usando la Ecuación (63).

$$e_2 = e_1 - d\varepsilon_v(1 + e_0) \quad (62)$$

$$S_{r2} = \frac{G_s * w}{e_2} \quad (63)$$

Posteriormente se introduce un condicional if para asegurar que el grado de saturación se encuentre en el rango de variación natural es decir  $0 < S_r \leq 1$  el valor revisado se almacena en la variable  $S_{r2c}$ .

En caso de que la condición sea verdadera se conserva el valor de grado de saturación calculado y se halla el valor de succión al final del paso  $s_f$  por medio de la Ecuación (64).

$$s_f = P_{0vg} * \exp(a_{vg}(\phi_2 - \phi_0)) * \left( S_{r2}^{\left[ \frac{-1}{\lambda_0 * \exp(c_{vg}(\phi_2 - \phi_0))} \right]} - 1 \right)^{[1 - \lambda_0 * \exp(c_{vg}(\phi_2 - \phi_0))]} \quad (64)$$

En caso de que la condición sea falsa se asigna un valor de 1 al grado de saturación y un valor de cero a la succión  $s_f$  y cero a la variable *error*.

Una vez calculada la succión final se calcula el valor de la variable *error* y para finalizar el ciclo se asigna el valor de la succión final calculada como el valor de prueba para el siguiente paso, y a continuación se revisa el valor de la humedad calculada al final del ciclo. El diagrama de flujo del ciclo se muestra en la Figura 50.

9. En este paso se almacena la información obtenida en el ciclo while para las variables  $p_0^*, p_0, \lambda(s), p_s, e, v, \phi, S_r, s, w, d\varepsilon_{vp}^e, d\varepsilon_{vs}^e, d\varepsilon_{vs}^p, d\varepsilon_{vp}^p, d\varepsilon_v^e$  y  $d\varepsilon_v^p$  en cada paso de incremento de carga.  
Adicionalmente se asignan los valores de las variables de prueba para el siguiente paso de carga y se reinicia la variable *error*.
10. Se ejecuta un ciclo for para calcular el vector de incremento de deformación volumétrica total  $d\varepsilon_v$ .
11. Se ejecuta un ciclo for para calcular el vector de deformación volumétrica total acumulada  $\varepsilon_v$ .

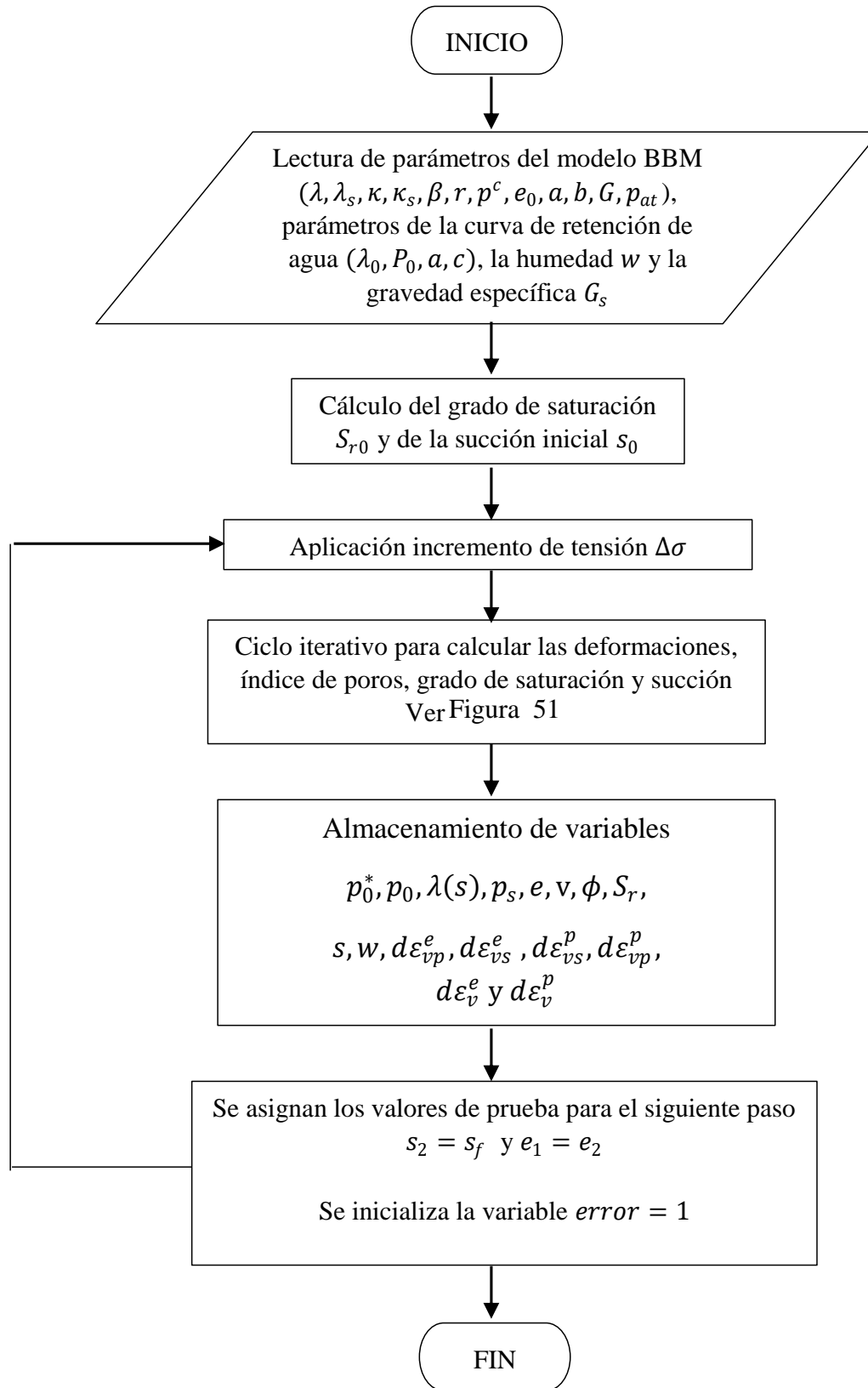


Figura 50. Diagrama de flujo del programa BBM con humedad constante.

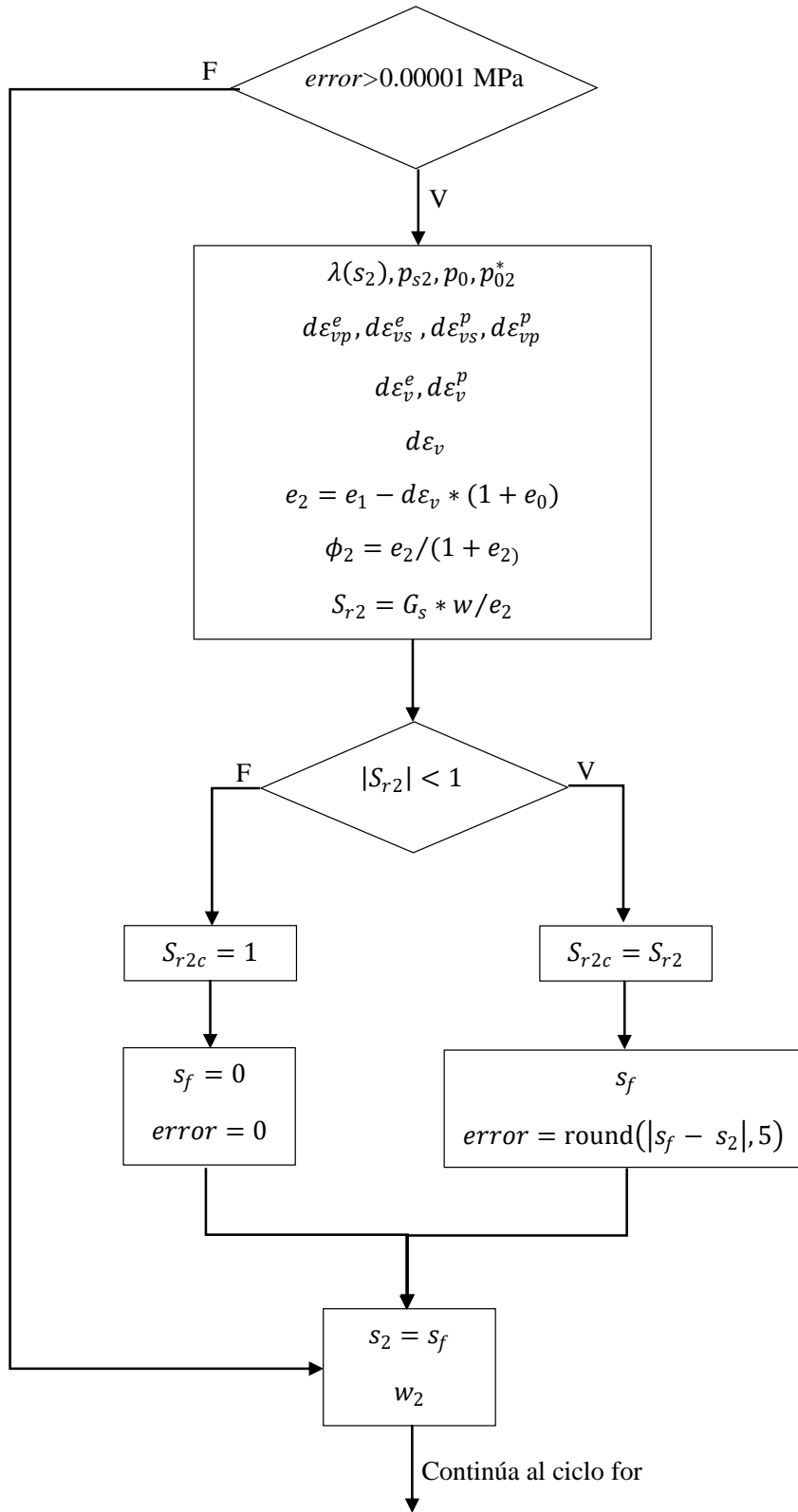


Figura 51. Diagrama de flujo ciclo while.

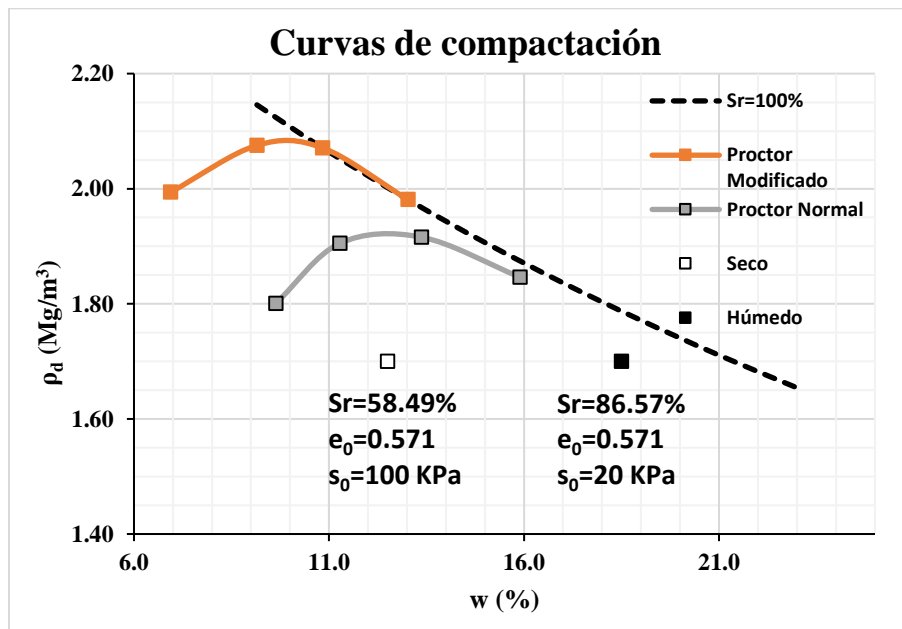
#### 4. INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE MEDIANTE LOS MODELOS DE VAN GENUCHTEN Y VAN GENUCHTEN MODIFICADO (FEBEX)

En este capítulo se realiza el ajuste simultaneo de los datos experimentales medidos en laboratorio mediante los modelos de Van Genuchten y FEBEX para los ensayos de compresión a humedad y succión constante realizados por (Mora, 2016) con muestras compactadas del limo arcilloso de Barcelona cuyas características se muestran en la Tabla 15

**Tabla 15. Propiedades del suelo usado en los ensayos de compresión (Mora, 2016).**

Propiedad	Valor
Partículas < 75 $\mu\text{m}$	52.6%
Partículas < 2 $\mu\text{m}$	13.2%
Gs	2.67
LL	30.5%
IP	11.0%

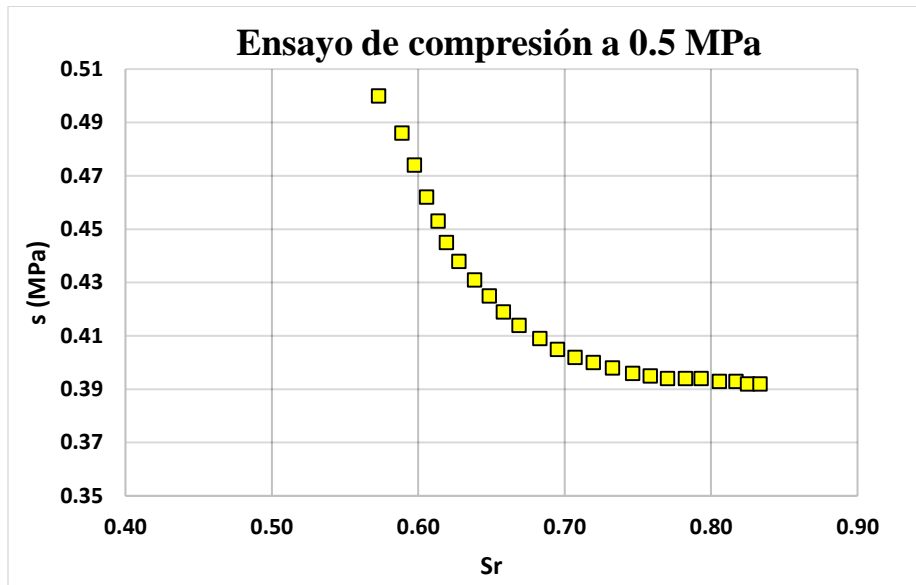
La compactación del suelo se realizó para una densidad seca de  $1.70 \text{ Mg/cm}^3$  y para humedades de 12.5 y 18.5% puntos localizados sobre la rama seca y húmeda de la curva de compactación respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 52. En este estudio se modelan los ensayos correspondientes a la muestra localizada sobre la rama seca de la curva de compactación. Por otra parte, los datos de la curva de retención de agua usados en la modelación corresponden a los medidos por (Mora, 2016).



**Figura 52. Curvas de compactación del suelo (Mora, 2016).**

#### 4.1 AJUSTE DE DATOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO 1 A HUMEDAD CONSTANTE CON MODELO VAN GENUCHTEN

Los datos medidos de la curva de retención y los datos medidos en el ensayo de compresión a succión inicial de 0.50 MPa, que se muestran en la Figura 53, estos se ajustan simultáneamente a un modelo del tipo Van Genuchten mediante el método de los mínimos cuadrados usando la herramienta Solver de MS Excel, el procedimiento de ajuste se muestra en la **Tabla 16**; los parámetros a ajustar son  $a$ ,  $c$ ,  $P_0$  y  $\lambda_0$ .



**Figura 53.**Datos ensayo de compresión para succión inicial de 0.50 MPa.

En este caso se busca minimizar la suma de las diferencias al cuadrado de los valores calculados con el modelo Van Genuchten respecto a los  $n$  valores medidos en laboratorio tanto para la curva de retención de agua y para los  $m$  valores de la trayectoria descrita en el ensayo de compresión a humedad constante. La ecuación (65) corresponde a la función objetivo a minimizar.

**Tabla 16.** Ajuste de datos medidos en laboratorio mediante el modelo Van Genuchten.

Punto	$S_r$	$s_{Medido}$ (MPa)	$s_{VanGenuchten}$ (MPa)	$\ln(s_{VG}) - \ln(s_M)$	$[\ln(s_{VG}) - \ln(s_M)]^2$
1	$S_{r1}$	$s_{M1}$	$s_{VG1}$	$\ln(s_{VG1}) - \ln(s_{M1})$	$[\ln(s_{VG1}) - \ln(s_{M1})]^2$
2	$S_{r2}$	$s_{M2}$	$s_{VG2}$	$\ln(s_{VG2}) - \ln(s_{M2})$	$[\ln(s_{VG2}) - \ln(s_{M2})]^2$
:	:	:	:	:	:
$n$	$S_{rn}$	$s_{Mn}$	$s_{VGn}$	$\ln(s_{VGn}) - \ln(s_{Mn})$	$[\ln(s_{VGn}) - \ln(s_{Mn})]^2$

$$\sum_{i=1}^n [\ln(s_{VGi}) - \ln(s_{Mi})]^2$$



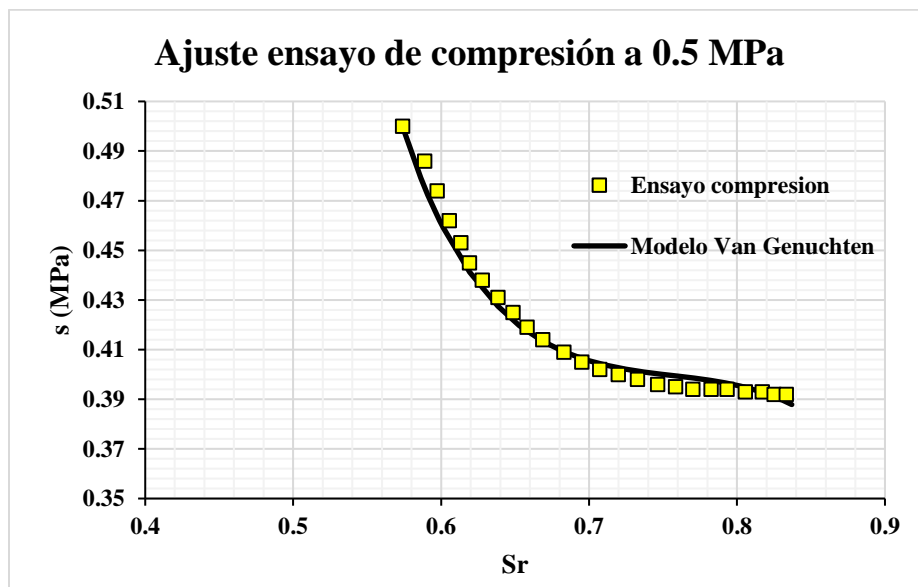
$$\sum_{i=1}^n [\ln(s_{VGi}) - \ln(s_{Mi})]^2 + \sum_{i=1}^m [\ln(s_{VGi}) - \ln(s_{Mi})]^2 = \min \quad (65)$$

Se realizan varios ajustes en los que a los valores correspondientes a la curva de retención se les asigna un peso igual a uno, y a los datos de la trayectoria del ensayo de compresión se les da diferentes pesos en función de su importancia; al primer punto del ensayo de compresión se le da especial importancia y se le asigna un peso de 1000 ya que es fundamental que los puntos de inicio coincidan lo mayor posible, al resto de los puntos de la trayectoria del ensayo se les da un peso de 100.

Los valores de los parámetros ajustados se muestran en la Tabla 17 y el ajuste del modelo para la curva de retención se muestran en la Figura 55, el ajuste del modelo al ensayo de compresión a 0.50 MPa se muestra en la Figura 54.

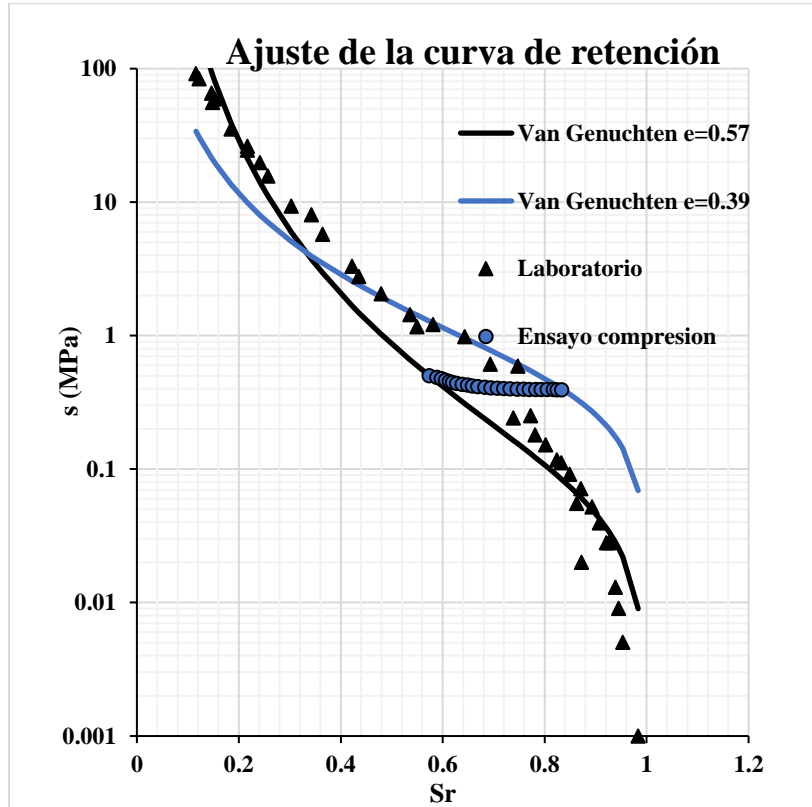
**Tabla 17. Parámetros del modelo Van Genuchten para el ensayo de 0.50 MPa.**

$P_0$ (MPa)	$\lambda_0$	$a$	$c$
0.064	0.209	-24.802	-5.843



**Figura 54. Ajuste de datos ensayo de compresión para el modelo de Van Genuchten.**

Se observa que el ajuste del modelo de Van Genuchten es bastante aproximado a la trayectoria descrita en el ensayo de compresión. Con estos datos ajustados se modela el ensayo con el programa BBM a humedad constante desarrollado en la Sección 3.4.



**Figura 55. Ajuste de la curva de retención de agua mediante modelo Van Genuchten.**

Se observa que el ajuste a los datos de la curva de retención es bueno y que los puntos inicial y final del ensayo se encuentran sobre las curvas de retención a volumen constante para las porosidades asociadas a los índices de vacíos  $e$  de 0.571 y 0.39 respectivamente.

Cabe reseñar el problema que se presenta para grados de saturación inferiores a 0.35, zona en la cual la curva para un índice de poros de 0.39 se encuentra por debajo de la curva para 0.57 este problema es propio del modelo Van Genuchten y se puede corregir con la introducción de un factor adicional en el modelo Van Genuchten, la corrección aplicada se muestra en la Ecuación (66) conocido como modelo FEBEX, el ajuste de los datos con este modelo se muestra en la Sección 4.2.

$$S_r = \left[ 1 + \left( \frac{s}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} * \left( 1 + \frac{s}{P_d} \right)^{\lambda_d} \quad (66)$$

Donde  $P_d$  es la succión asociada a un grado de saturación igual a cero por lo general tomada como 1000 MPa y  $\lambda_d$  es un parámetro del modelo.

## 4.2 AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 1 CON MODELO FEBEX

Para el ajuste de los datos de la curva de retención y del ensayo de compresión se utiliza la misma metodología de la Sección 4.1, de nuevo los parámetros a ajustar son  $a$ ,  $c$ ,  $P_0$  y  $\lambda_d$ ; el parámetro  $\lambda_d$  se impone a conveniencia para facilitar el ajuste. Las modificaciones con respecto al procedimiento de la Sección 4.1 se explican a continuación:

En este caso el modelo no puede expresarse de forma explícita para el cálculo de la succión, por lo que este debe hacerse mediante iteraciones o de otro modo ajustar por mínimos cuadrados los valores de grado de saturación, por facilidad de cálculo se elige la segunda opción; para los datos de la curva de retención el procedimiento se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18. Procedimiento de ajuste de los datos de la curva de retención con modelo FEBEX.**

Punto	s (MPa)	$S_{r\_Medido}$	$S_{r\_FEBEX}$	$(S_{r\_Medido} - S_{r\_FEBEX})^2$
1	$s_1$	$S_{rM1}$	$S_{r\_FBX1}$	$(S_{rM1} - S_r)^2$
2	$s_2$	$S_{rM2}$	$S_{r\_FBX2}$	$(S_{rM2} - S_r)^2$
:	:	:	:	:
$n$	$s_n$	$S_{rMn}$	$S_{r\_FBXn}$	$(S_{rMn} - S_r)^2$

$$\sum_{i=1}^n (S_{r\_Mi} - S_r)^2$$

Para el ajuste de los datos del ensayo de compresión se encuentra que es más conveniente ajustar los valores de la succión en un procedimiento idéntico al mostrado en la **Tabla 16**. También se encuentra que para este modelo no es necesario utilizar el sistema de pesos ya que los valores de los puntos del ensayo de compresión tienden a ajustar más fácilmente que para el modelo de Van Genuchten, la función a optimizar se muestra en la ecuación (67).

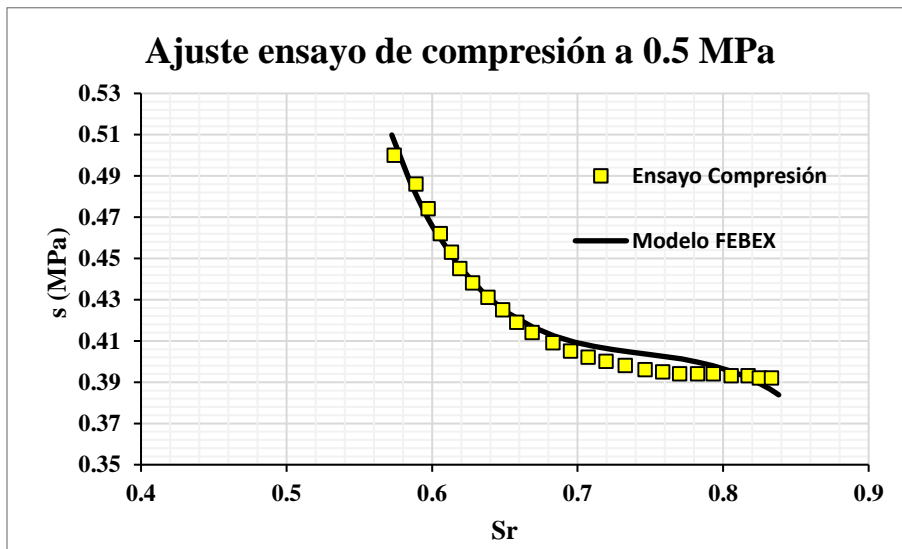
$$\sum_{i=1}^n (S_{r\_Mi} - S_r)^2 + \sum_{i=1}^m [\ln(S_{FBXi}) - \ln(S_{Mi})]^2 = \min \quad (67)$$

Los valores de los parámetros ajustados para el modelo FEBEX se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Parámetros ajustados del modelo FEBEX para el ensayo de 0.50 MPa.**

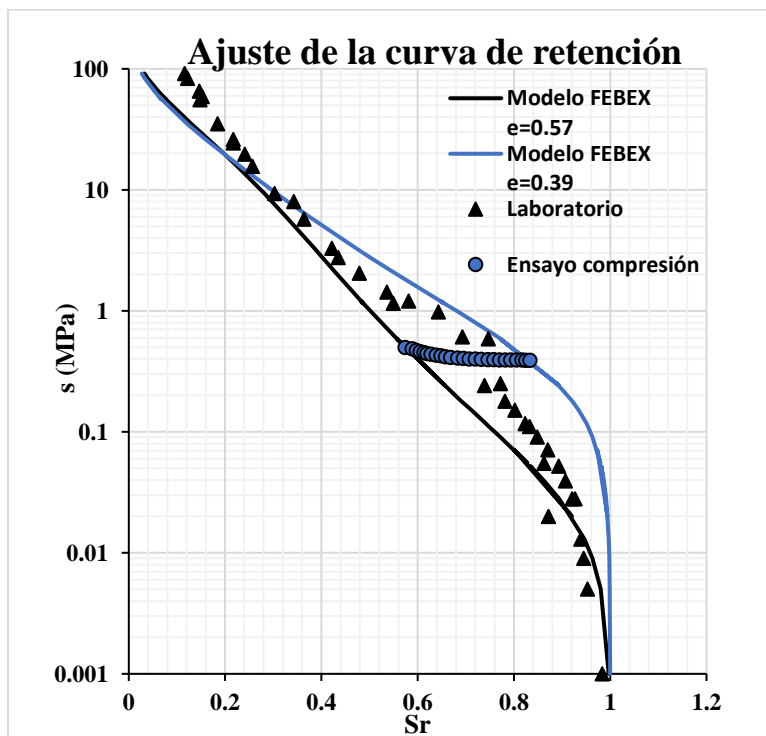
$P_0$ (MPa)	$\lambda_0$	$a$	$c$	$\lambda_d$	$P_d$ (MPa)
0.064	0.209	-24.802	-5.843	20	1000

El ajuste de los datos del ensayo de compresión se muestra en la Figura 56, se puede observar que el ajuste es bueno y que se asemeja bastante al ajuste realizado anteriormente con el modelo de Van Genuchten.



**Figura 56. Ajuste de los datos del ensayo de compresión para el modelo FEBEX.**

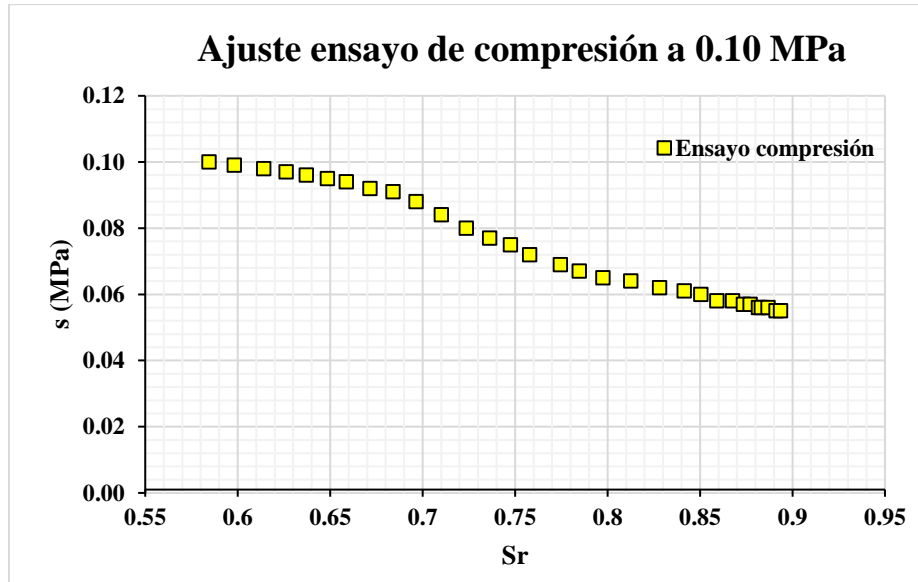
El ajuste de los datos de la curva de retención se muestra en la Figura 57, se observa que es un ajuste bueno y que soluciona de manera satisfactoria el problema mostrado por el modelo de Van Genuchten en la sección 4.1.



**Figura 57. Ajuste de la curva de retención de agua con modelo FEBEX.**

### 4.3 AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 2 CON MODELO VAN GENUCHTEN

En esta sección se ajustan los datos del ensayo de compresión a humedad constante y para la curva de retención de agua, para una succión inicial de 0.10 MPa. siguiendo la metodología descrita en la sección 4.1, los datos correspondientes al ensayo de compresión se muestran en la Figura 58.



**Figura 58. Datos ensayo de compresión para succión inicial de 0.10 MPa.**

Los valores de los parámetros ajustados para el ensayo de 0.10 MPa se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20. Parámetros del modelo Van Genuchten para el ensayo de 0.10 MPa.**

$P_0$ (MPa)	$\lambda_0$	$a$	$c$
0.0097	0.186	-21.522	-2.50

El ajuste de los datos del ensayo de compresión se muestra en la Figura 59, se puede observar que el ajuste es razonable.

Cabe reseñar que en este caso y dado el rango de succiones del ensayo es decir de 0.10 a 0.005 MPa el modelo de Van Genuchten no presenta el problema descrito en la sección 4.1, esto se puede comprobar al observar el ajuste para los datos de la curva de retención de agua en la Figura 60, se observa que la curva de retención correspondiente a un índice de poros de 0.57 se encuentra siempre por debajo de la curva de retención asociada al índice de poros de 0.39.

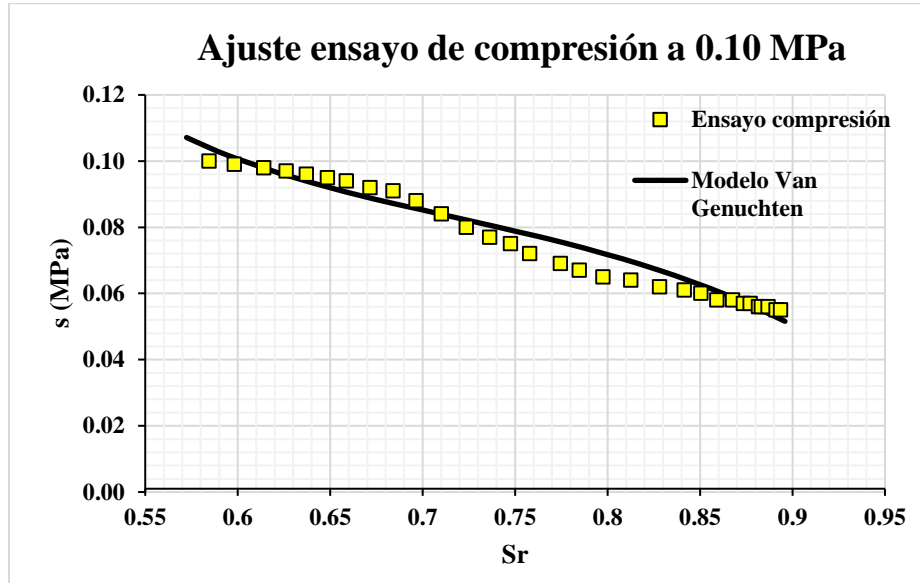


Figura 59. Ajuste de datos ensayo de compresión para el modelo Van Genuchten.

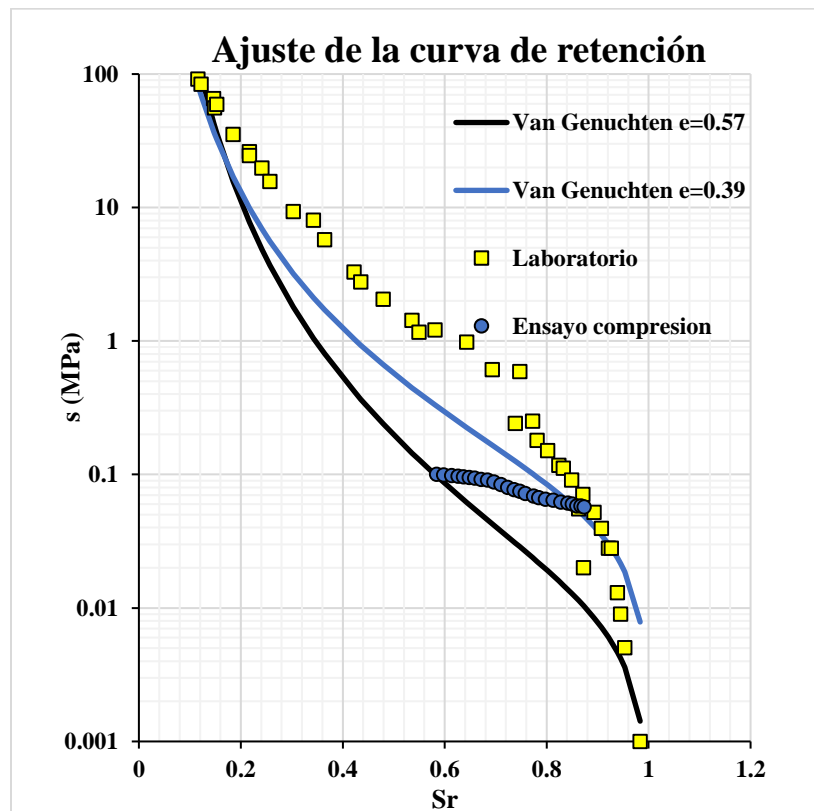


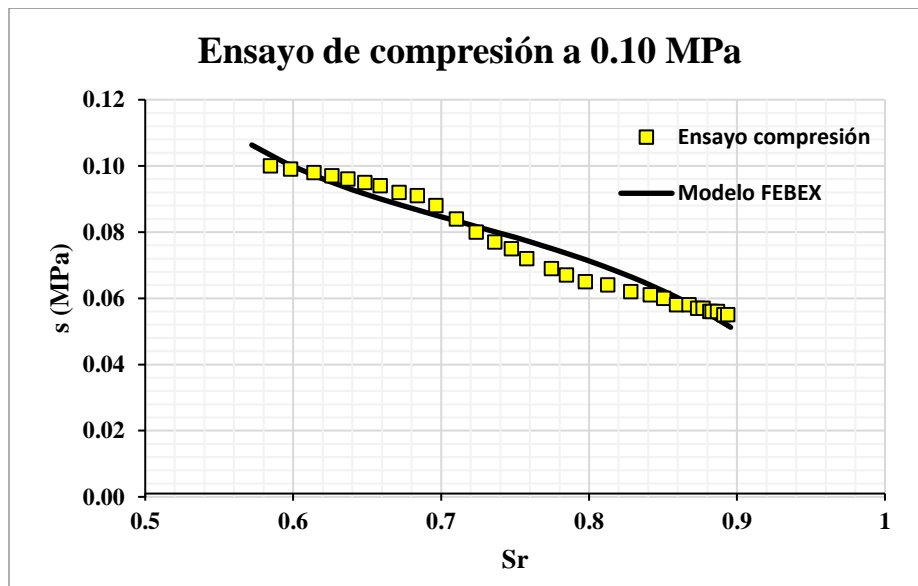
Figura 60. Ajuste de la curva de retención de agua para el modelo van Genuchten.

#### 4.4 AJUSTE DE DATOS DEL LABORATORIO PARA EL ENSAYO 2 CON MODELO FEBEX

En esta sección se ajustan los datos del ensayo de compresión a humedad constante y para la curva de retención de agua, para una succión inicial de 0.10 MPa. siguiendo la metodología descrita en la sección 4.2 para realizar el ajuste mediante el modelo FEBEX, el valor de los parámetros ajustados se muestra en la Tabla 21 y el ajuste de los datos del ensayo de compresión se muestra en la Figura 61.

**Tabla 21. Parámetros del modelo FEBEX para el ensayo de 0.10 MPa.**

$P_0$ (MPa)	$\lambda_0$	$a$	$c$	$\lambda_d$	$P_d$ (MPa)
0.0097	0.186	-21.522	-2.5	20	1000



**Figura 61. Ajuste de datos del ensayo de compresión para el modelo FEBEX.**

Se puede observar que el ajuste de los datos es bueno y además los valores calculados de grado de saturación con el modelo FEBEX se asemejan bastante a los calculados con el modelo Van Genuchten.

Por otro lado, el ajuste de la curva de retención correspondiente se muestra en la Figura 62, donde se puede observar que se prioriza claramente el primer punto del ensayo de compresión el cual se encuentra en una zona por debajo de la curva de retención esto es debido al proceso de secado-humedecimiento previamente realizado en la muestra de suelo.

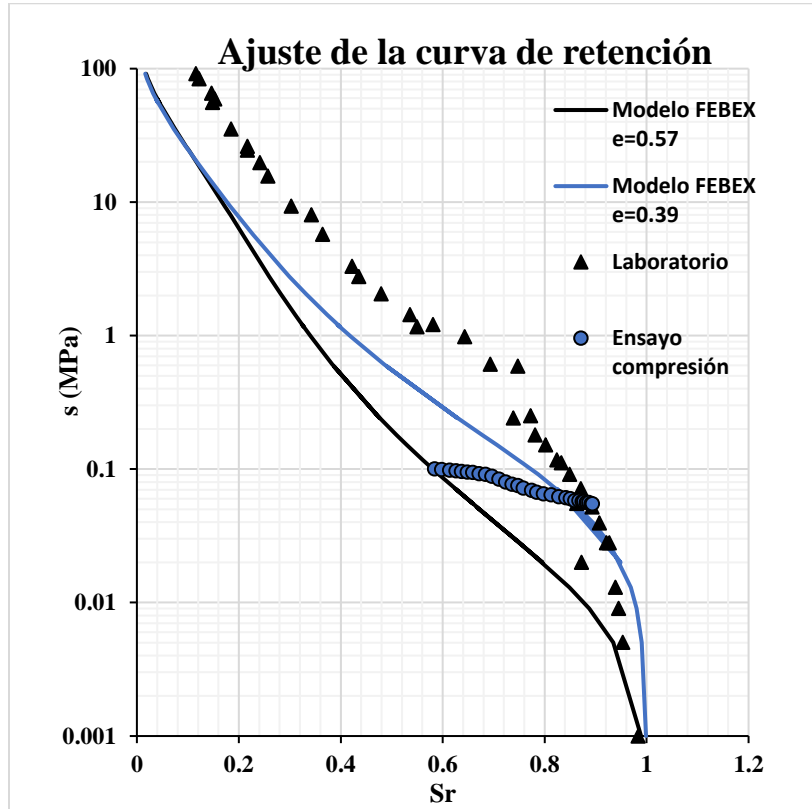


Figura 62. Ajuste de la curva de retención de agua para el modelo FEBEX.

#### 4.5 INTERPRETACIÓN CICLO SECADO-HUMEDECIMIENTO EN LOS ENSAYOS A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE

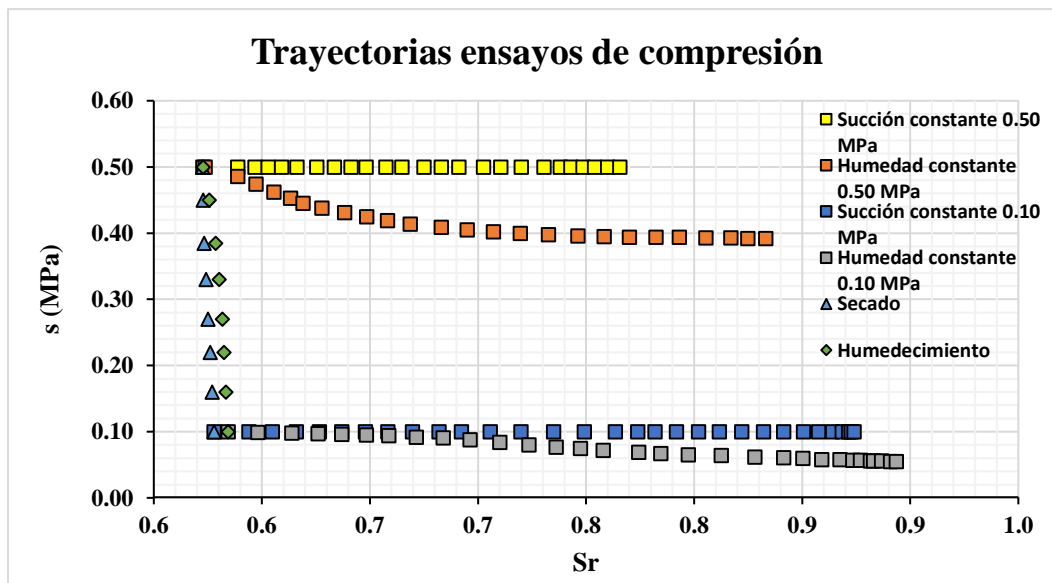


Figura 63. Ensayos de compresión a humedad y succión constante.



Como se puede observar en la Figura 63 durante en ensayo se realiza un ciclo de secado-humedecimiento entre 0.10 y 0.50 MPa, este ciclo hace que la curva de retención para el ensayo 2 se encuentre en una zona por debajo de la curva para el ensayo 1, por lo que sí se calcula el grado de saturación para el punto inicial del ensayo 2 con los mismo parámetros del ensayo 1, arrojará un grado de saturación mucho mayor al que realmente le corresponde, dado este escenario no es razonable intentar modelar ambos ensayos con un solo grupo de parámetros, ya que conducirán a resultados erróneos.

Por lo tanto, se hace necesario solucionar este problema para modelar ambos ensayos con un único conjunto de parámetros. Primero hay que decir que la zona donde se encuentra el punto inicial por el que pasa la curva de retención del ensayo 2 se denomina zona de *scanning*, en esta zona el comportamiento del suelo es caótico, y además se presenta el fenómeno de histéresis durante los ciclos de secado-humedecimiento; ya que se pasa de una curva de retención en estado húmedo a una curva de retención en estado seco o viceversa.

En el caso del presente estudio la curva de estado seco será la curva para el ensayo a 0.50 MPa y la curva para el ensayo a 0.10 MPa corresponderá a un estado intermedio entre el estado seco y el estado húmedo cuya curva se desconoce, esta situación se ilustra en la Figura 64, donde la curva en estado húmedo se dibuja esquemáticamente para dar mayor claridad.

Ahora bien, es claro que el suelo al ser sometido a un proceso de humedecimiento para pasar de una succión de 0.50 a 0.10 MPa, no realiza este proceso por la curva de retención inicial si no que lo realiza por una trayectoria diferente dado que se encuentra en la zona de scanning.

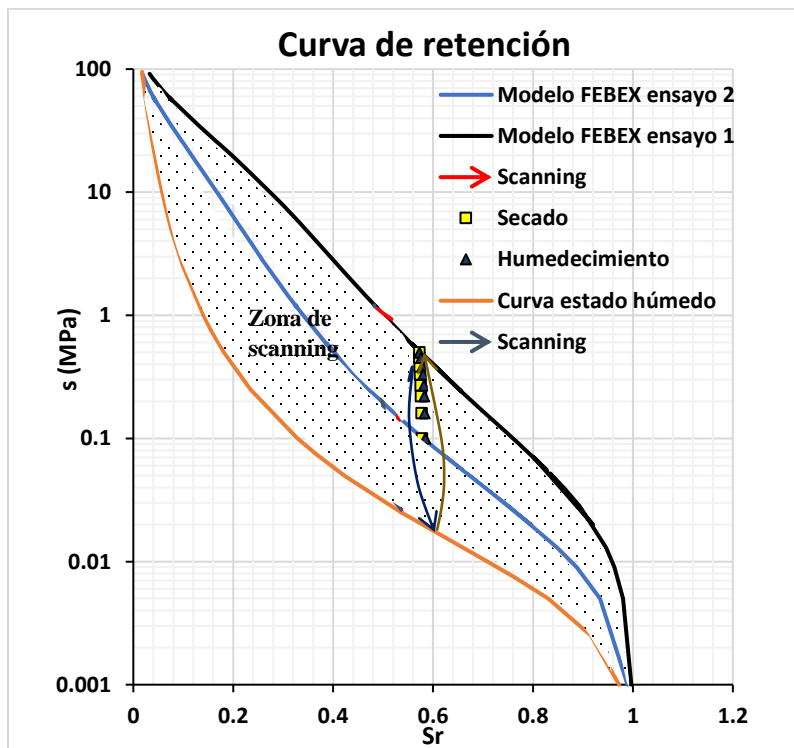
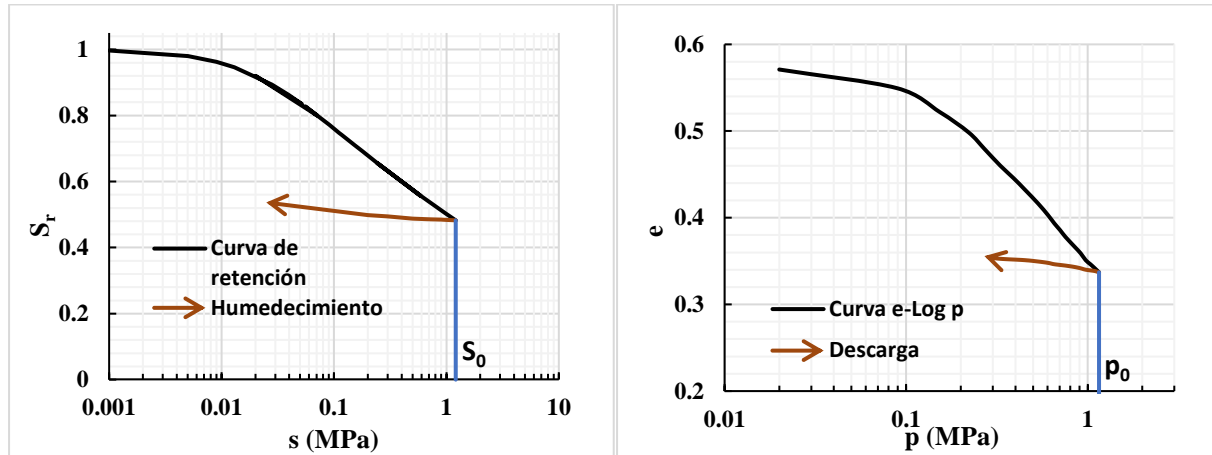


Figura 64. Curvas de retención y zona de scanning.

A continuación, se propone una solución para el problema del scanning, haciendo un símil entre la curva edométrica  $e-\log p$  y la curva de retención  $S_r-\log s$ , se observa que tienen comportamientos similares ante los procesos de carga-descarga o secado-humedecimiento como se muestra en la Figura 65.



**Figura 65. Curva de retención y curva e-log p.**

Como se observa en la Figura 65, en la zona de scanning el suelo reacciona de manera casi lineal ante procesos de humedecimiento y secado, por lo que se propone un ley lineal de fácil implementación para representar ambos procesos.

La ley que se propone para representar el scanning que se presenta durante el ciclo secado humedecimiento del suelo es la sugerida por (Della Vecchia, et al., 2013), la cual se ajusta muy bien para el ciclo de secado-humedecimiento hecho en el ensayo de laboratorio en la ecuación (68) se muestra dicha ley.

$$dS_r = -k_s * ds \quad (68)$$

Donde  $S_r$  es el grado de saturación,  $k_s$  es un parámetro “elástico” ante los cambios producidos por la succión  $s$ .

Mediante el uso de esta ley se puede reproducir de manera adecuada el comportamiento del suelo en la zona de scanning durante las fases de secado y humedecimiento que se llevan a cabo, la implementación de la ley de scanning se muestra en la Figura 66.

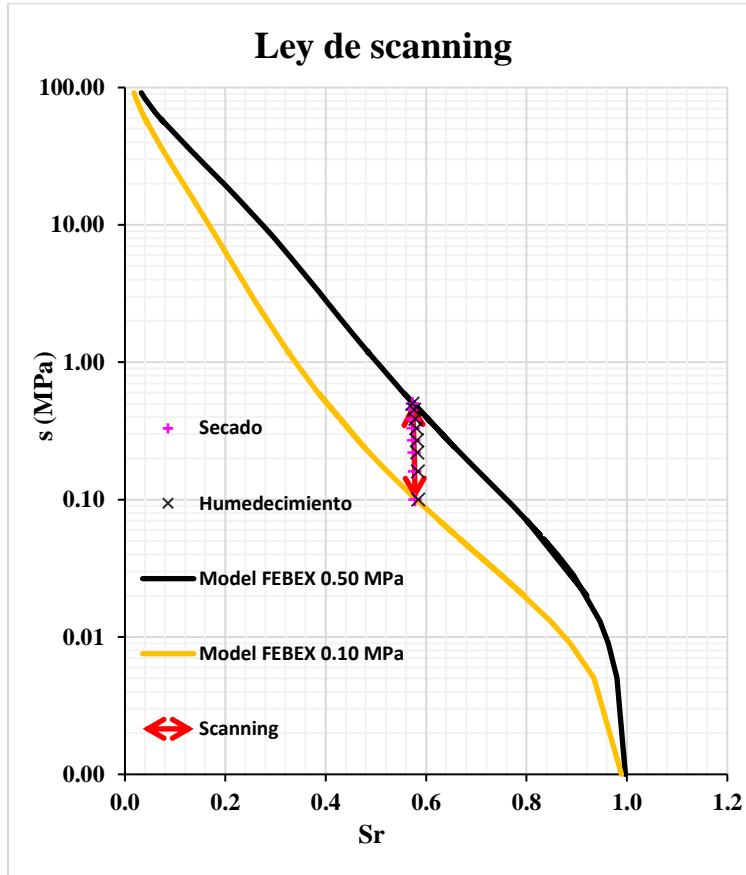


Figura 66. Ajuste del ciclo secado-humedecimiento con la ley de scanning.

#### 4.6 CÁLCULO DE LA LEY DE SCANNING

Integrando la ecuación (68) y tomando los puntos de los ensayos de laboratorio correspondientes a la fase de secado-humedecimiento se realiza un ajuste por mínimos cuadrados y se llega a una ley de scanning como la que se muestra en la ecuación (69).

$$S_r = -k_s * s + S_{r0} \quad (69)$$

Donde  $S_{r0}$  es el grado de saturación correspondiente a una succión igual a cero.

Ahora se realiza el ajuste por mínimos cuadrados mostrado en la para hallar los parámetros  $k_s$  y  $S_{r0}$ , el cual se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22. Ajuste por mínimos cuadrados para la ley de scanning**

Punto	S (MPa)	$S_{rsecado}$	$S_{rw}$	$S_{r\_scanning}$	$(S_{rd} - S_{r\_scanning})^2$	$(S_{rw} - S_{r\_scanning})^2$
1	0.1	0.5779	0.5845	0.5777	2.57E-08	8.39E-06
2	0.16	0.5770	0.5833	0.5769	2.48E-08	8.87E-06
3	0.22	0.5761	0.5824	0.5760	3.96E-09	1.12E-05
4	0.27	0.5751	0.5817	0.5753	2.95E-08	1.32E-05
5	0.33	0.5742	0.5803	0.5745	7.10E-08	1.21E-05
6	0.385	0.5733	0.5786	0.5737	1.86E-07	8.66E-06
7	0.45	0.5728	0.5757	0.5728	1.37E-10	1.95E-06
8	0.5	0.5726	0.5728	0.5721	2.29E-07	2.12E-07
<b>Suma</b>					5.79E-05	6.45E-05
<b>Suma total</b>					1.22E-04	

Los valores de los parámetros ajustados para la ley de scanning se muestran en la Tabla 23.

**Tabla 23. Parámetros para la ley de scanning.**

$k_s$ (MPa <sup>-1</sup> )	$S_{r0}$
0.0208	0.5837

Observando los datos de la Tabla 22 se encuentra que la ley de scanning se ajusta bien para los procesos de secado y humedecimiento por lo cual esta es suficiente para modelar ambos procesos.

## 5. MODELACIÓN DE LOS ENSAYOS 1 Y 2 A HUMEDAD Y SUCCIÓN CONSTANTE

En esta sección se modelan los ensayos de compresión realizados por (Mora, 2016) en el limo arcilloso de Barcelona; los ensayos se dividen en compresión con humedad constante a dos niveles distintos de succión inicial de 0.10 y 0.50 MPa, los otros ensayos corresponden a compresión con succión constante para valores de 0.10 y 0.50 MPa; las trayectorias tensionales se muestran en la Figura 63.

La modelación de los ensayos 1 y 2 a humedad y succión constante se realiza mediante los modelos BBM y FEBEX.

Los valores de los parámetros para realizar la modelación con el modelo BBM se muestran en la Tabla 24.

**Tabla 24. Parámetros del modelo BBM para la modelación del ensayo.**

Parámetro	Unidades	Valor
$p_0^*$	MPa	0.25
$\lambda(0)$	-	0.08
$\kappa$	-	0.014
$e_0$	-	0.57
$G$	MPa	10
$P^c$	MPa	0.1
$\lambda_s$	-	0.001
$\kappa_s$	-	0.0001
$r$	-	0.65
$\beta$	MPa <sup>-1</sup>	0.00003
$a$	-	9.32
$b$	MPa <sup>-1</sup>	1.9
$S_0$	MPa	0.1
$P_{at}$	MPa	0.1

Los valores de los parámetros del modelo FEBEX son los mostrados en la Tabla 19 para los ensayos con succión inicial de 0.50 MPa y los mostrados en la Tabla 21 corresponden a los ensayos realizados con succión inicial de 0.10 MPa. Entre tanto la ecuación para la ley de scanning se muestra en la Tabla 23.

### 5.1 MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 1 A HUMEDAD CONSTANTE

La trayectoria tensional en el plano tensión media neta-succión ( $p-s$ ) para los datos experimentales y la modelación se muestra en la Figura 67

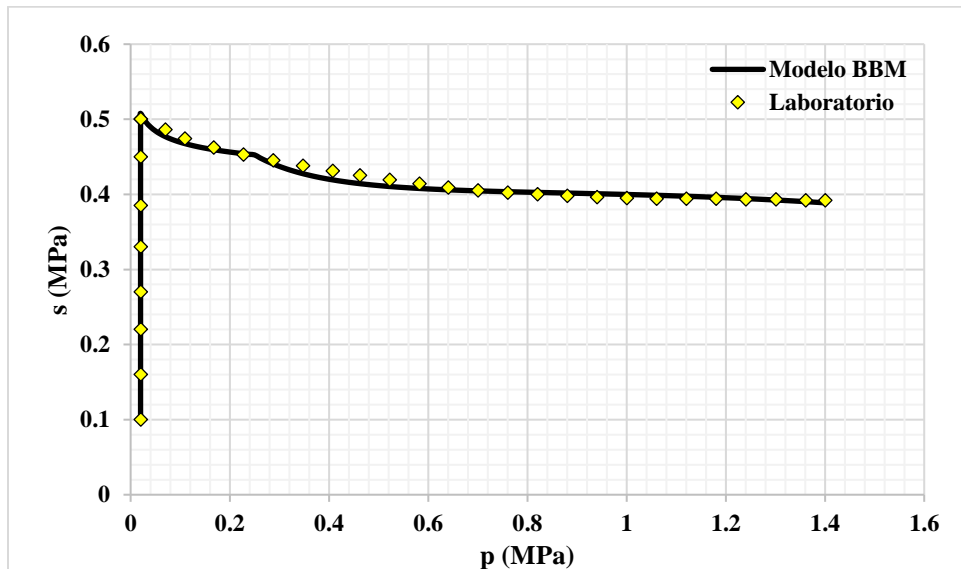


Figura 67. Trayectoria tensional del ensayo de compresión 1 a succión constante.

Como se observa en la Figura 67 el ajuste de los valores de succión es muy bueno lo que indica la utilidad del algoritmo utilizado para hallar los valores de la succión a lo largo de la trayectoria, se observa el cambio de comportamiento de la trayectoria luego de tocar la superficie de fluencia. En la Figura 68 se observa que el índice de poros precedido se ajusta muy bien a los datos experimentales, aunque sobre el final del ensayo predice valores ligeramente más altos que los medidos.

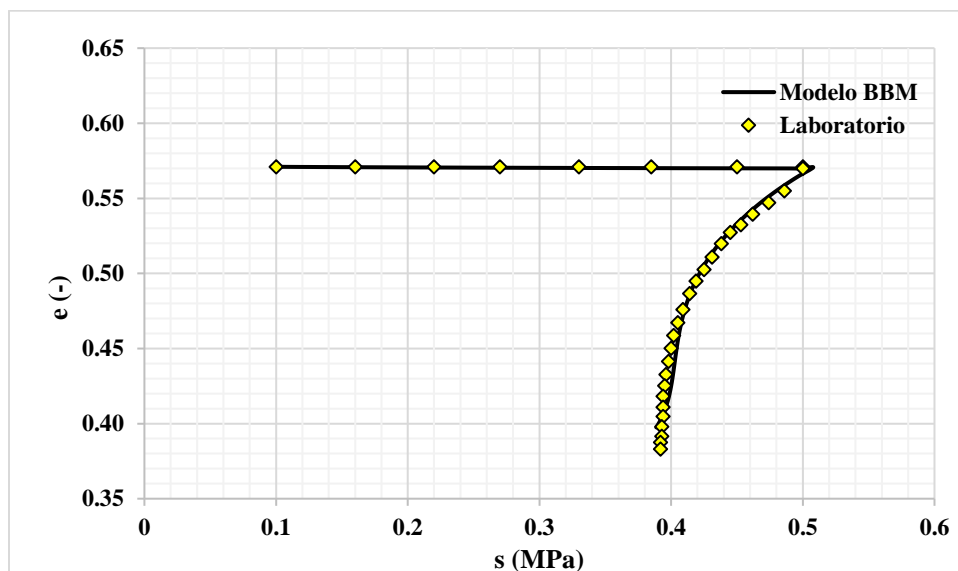
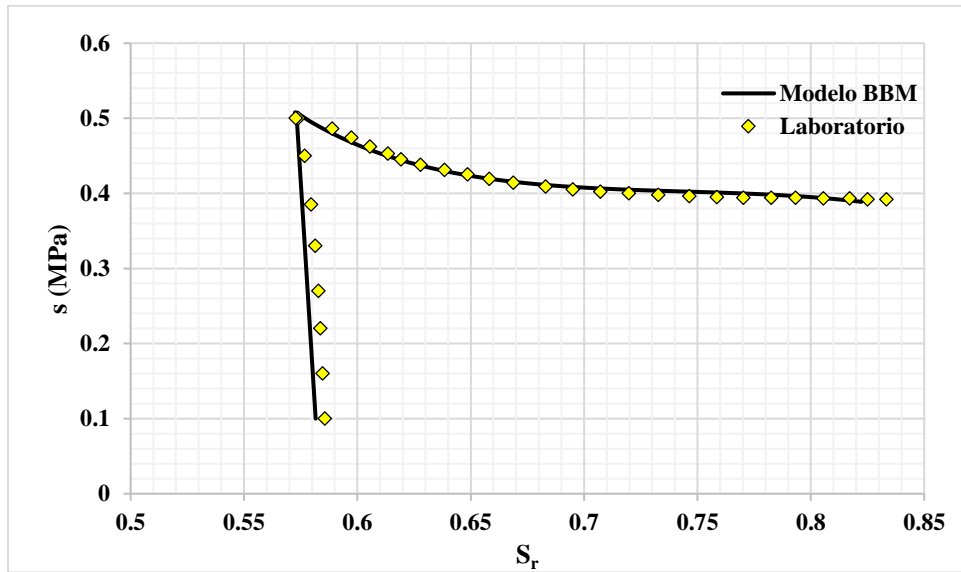


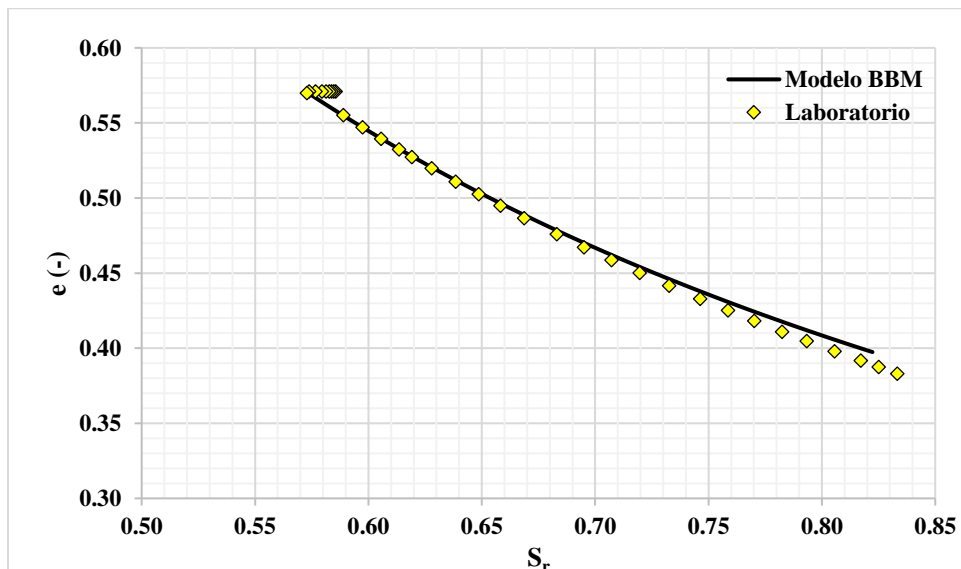
Figura 68. Gráfica índice de poros vs succión del ensayo 1 a humedad constante.

En la Figura 69 se observa el ajuste de los valores predecidos de succión y grado de saturación, el ajuste es bastante bueno aunque en la parte final del ensayo los valores predecidos de grado de saturación son ligeramente más bajos que los valores registrados en laboratorio.

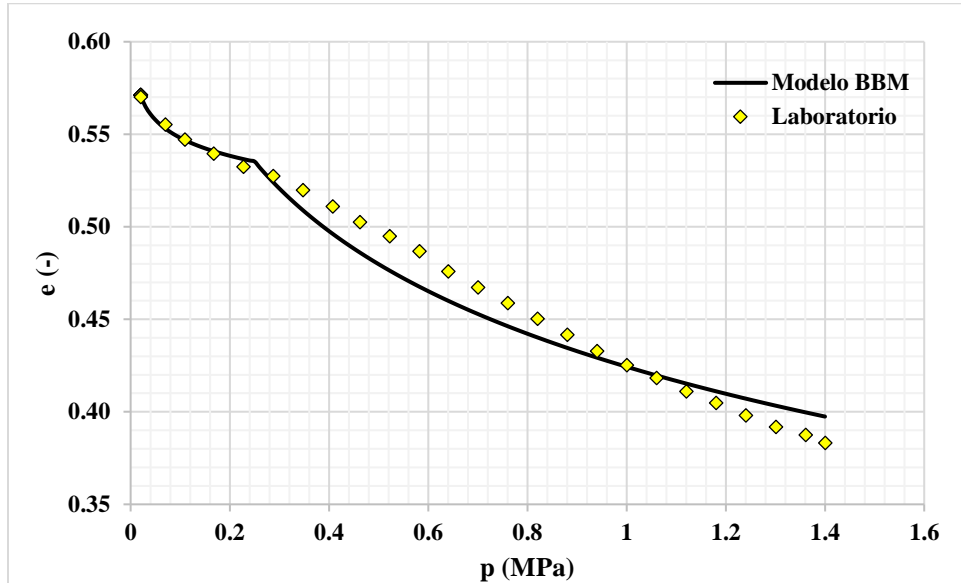


**Figura 69.** Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 1 a humedad constante.

La predicción de la variación del índice de poros con el grado de saturación se puede ver en la Figura 70 en la que se ve que la predicción realizada con el modelo es bastante buena excepto en la parte final del ensayo en la que los valores de grado de saturación son ligeramente más bajos para el modelo.



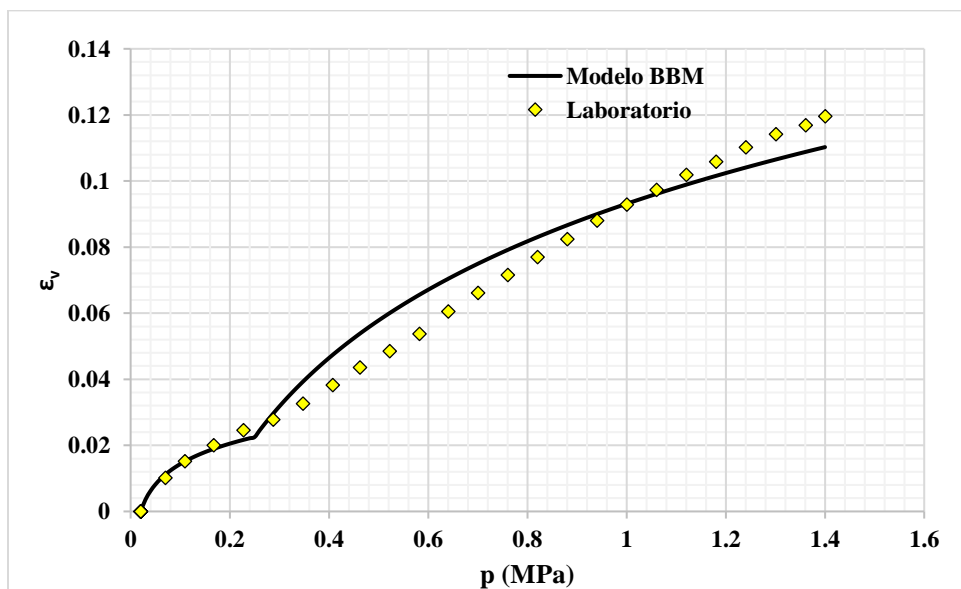
**Figura 70.** Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 1 a humedad constante.



**Figura 71.** Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 1 a humedad constante.

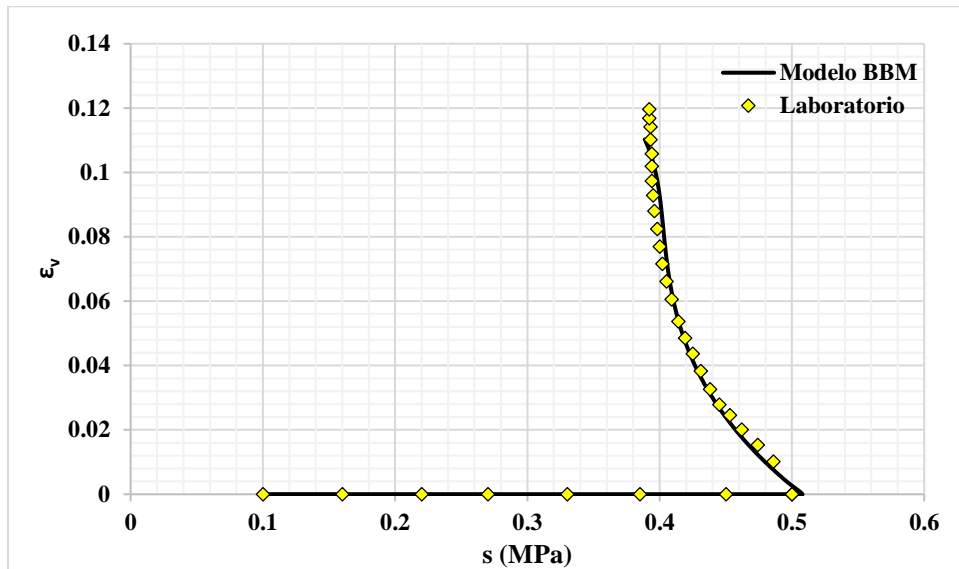
En la Figura 71 se muestra la variación del índice de poros con la tensión media neta, se puede apreciar que el ajuste es muy bueno al inicio del ensayo hasta tocar la superficie de fluencia y luego sigue reproduciendo razonablemente el ensayo.

La variación de la deformación volumétrica con la tensión media neta se ajusta bastante bien hasta tocar la superficie de fluencia y posteriormente ajusta razonablemente y permite predecir la tendencia observada en el comportamiento del ensayo tal y como se observa en la Figura 72.



**Figura 72.** Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 1 a humedad constante.



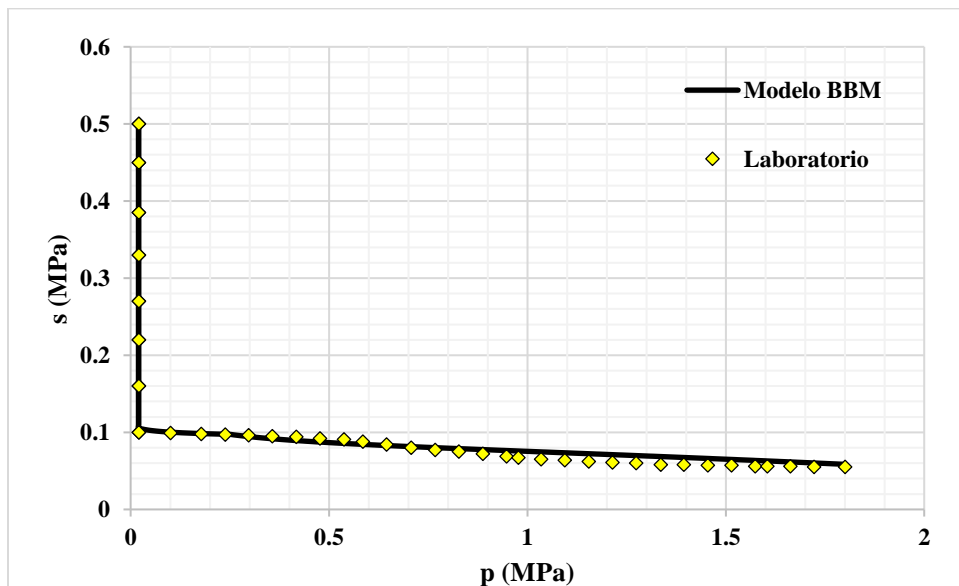


**Figura 73. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 1 a humedad constante.**

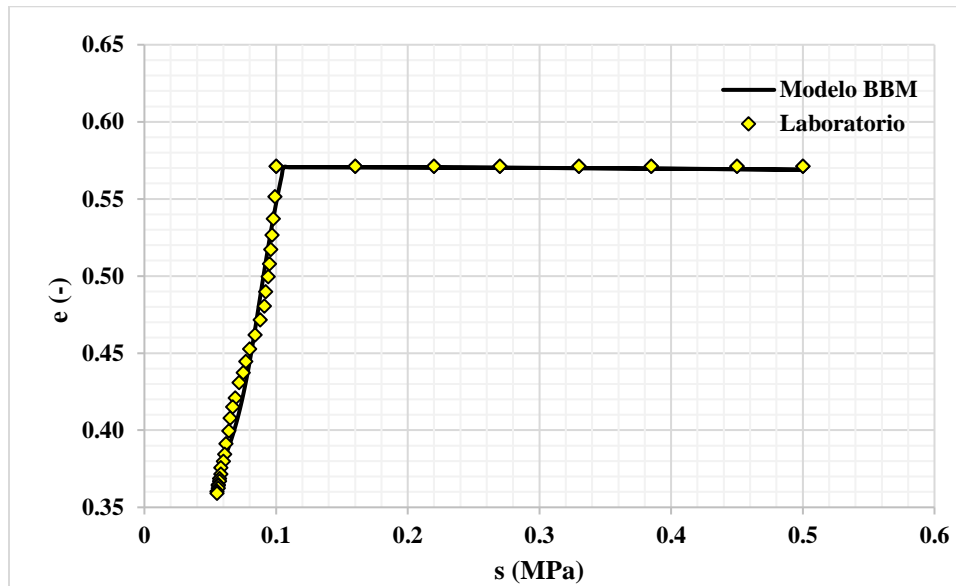
El ajuste de la variación de la deformación volumétrica con la succión se ajusta bastante bien mediante el modelo como se observa en la Figura 73, se observa que al final del ensayo se predicen valores ligeramente más bajos de deformación volumétrica que los medidos en el laboratorio.

## 5.2 MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 2 A HUMEDAD CONSTANTE

La trayectoria tensional en el plano tensión media neta-succión ( $p-s$ ) para los datos experimentales y la modelación se muestra en la Figura 74,

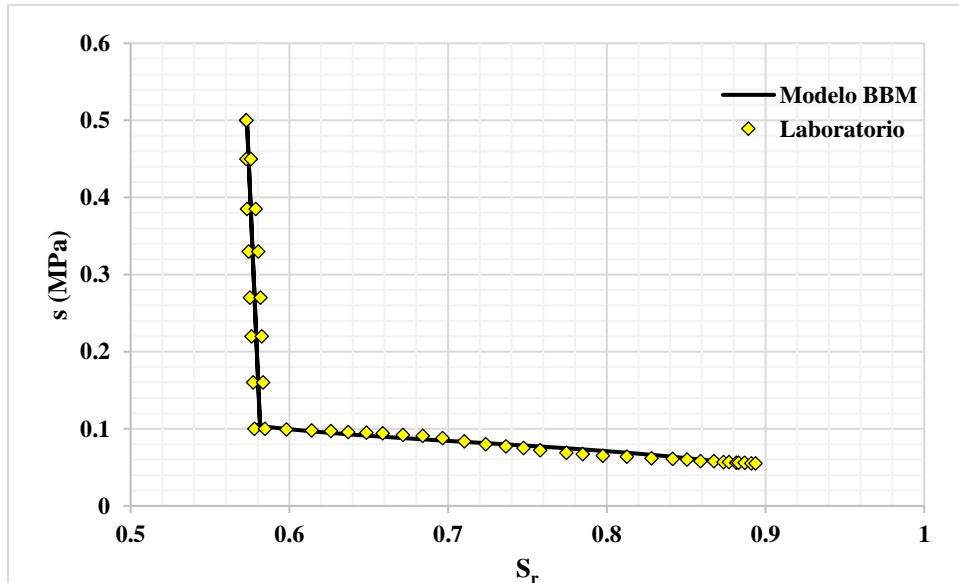


**Figura 74. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante.**



**Figura 75.**Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 2 a humedad constante.

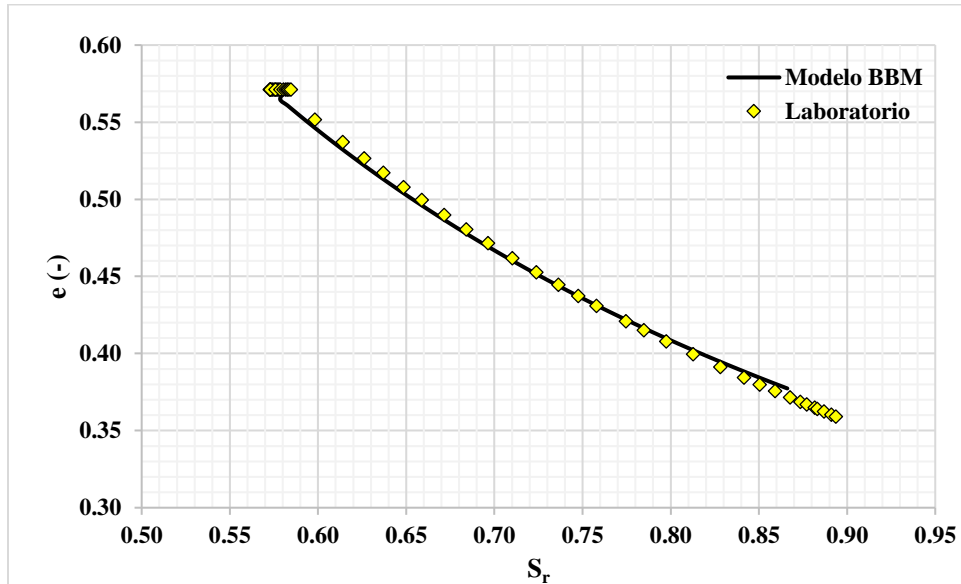
En la Figura 75 se muestra la variación del índice de poros con a succión, se observa que la fase de secado-humedecimiento produce cambios muy pequeños en el índice de poros, el ajuste en general es bastante bueno excepto en la parte final del ensayo donde los valores predecidos son ligeramente más altos que los medidos en laboratorio.



**Figura 76.**Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 2 a humedad constante.

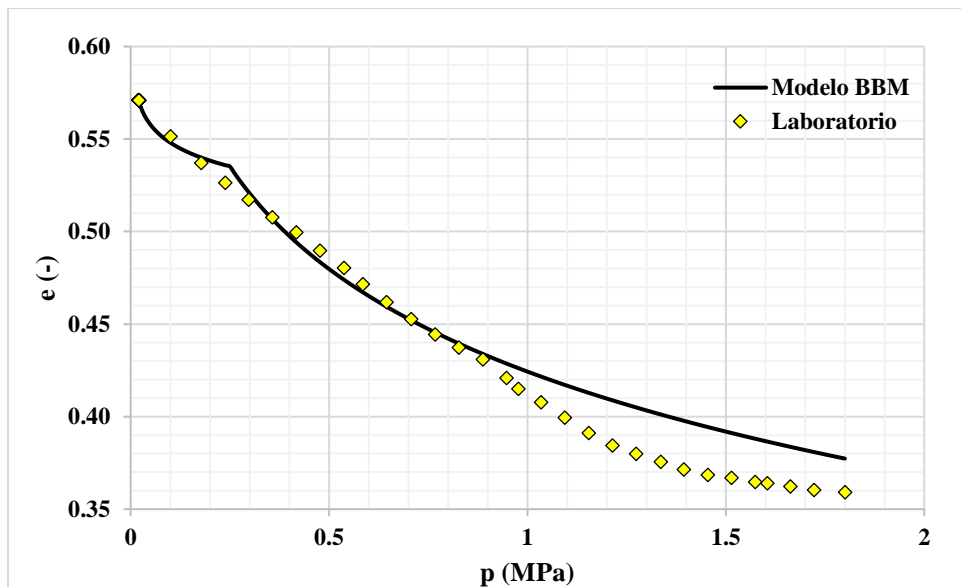
En la Figura 76 se muestra la variación de la succión con el grado de saturación, se observa un buen ajuste en general, al final del ensayo los valores de grado de saturación son ligeramente más bajos que los medidos en laboratorio, esto es debido al cruce que presenta la curva de retención de agua con los datos medidos en la Figura 62.

El cambio en el índice de poros con el grado de saturación se muestra en la Figura 77 se observa un ajuste bastante bueno, también se presenta el problema de valores más altos al final del ensayo ocasionado por el corte de la curva de retención de agua con los datos de laboratorio como se muestra en la Figura 62.

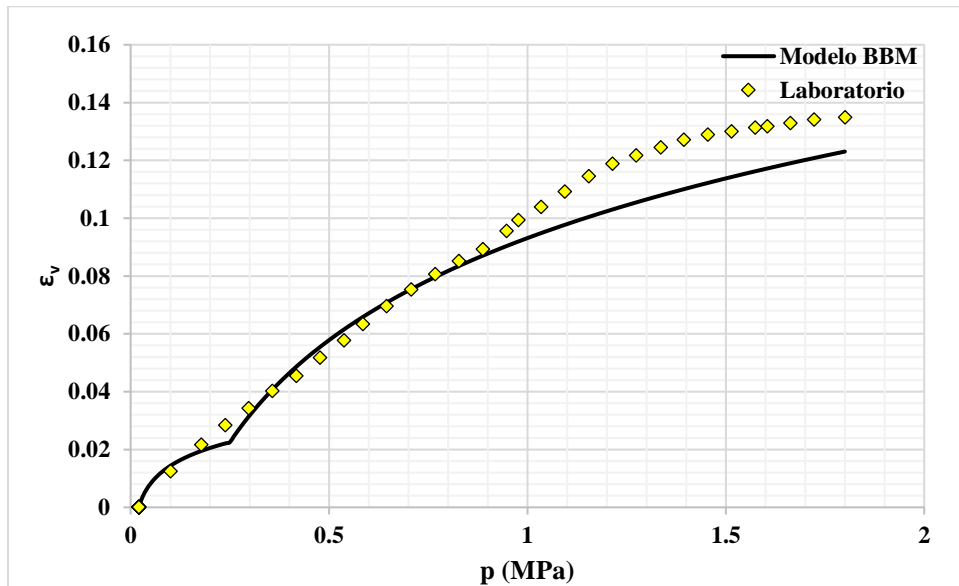


**Figura 77.**Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 2 a humedad constante.

En la Figura 78 se observa la variación del índice de poros con la tensión media neta, el ajuste es bueno en la primera mitad del ensayo pero en la parte final los valores predecidos del índice de poros son ligeramente más altos que los medidos en el laboratorio.



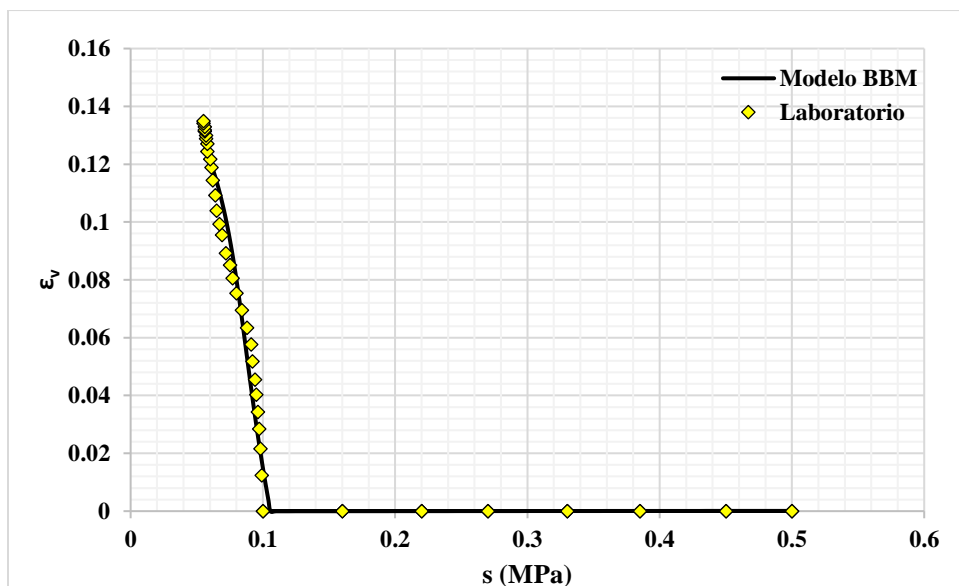
**Figura 78.**Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante.



**Figura 79. Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 2 a humedad constante.**

Como se observa en la Figura 79 los valores predichos de la deformación volumétrica se ajustan bastante bien en la primera parte del ensayo y en la parte final se observan valores un poco más bajos que los medidos en el laboratorio. Se observa claramente un cambio de comportamiento al superar la superficie de fluencia.

En la Figura 80 se observa la variación de la deformación volumétrica con la succión, se observa un ajuste bastante bueno excepto al final del ensayo donde se predicen valores más bajos que los medidos en el laboratorio.



**Figura 80. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 2 a humedad constante.**

### 5.3 MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 1 A SUCCIÓN CONSTANTE

La trayectoria tensional en el plano de tensión media neta-succión ( $p-s$ ) del ensayo 2 a succión constante se muestra en la Figura 81, se aprecia la fase de secado pasando de una succión de 0.10 MPa hasta un valor de 0.50 MPa de y posteriormente la compresión isotrópica inicia a un valor de succión de 0.50 MPa.

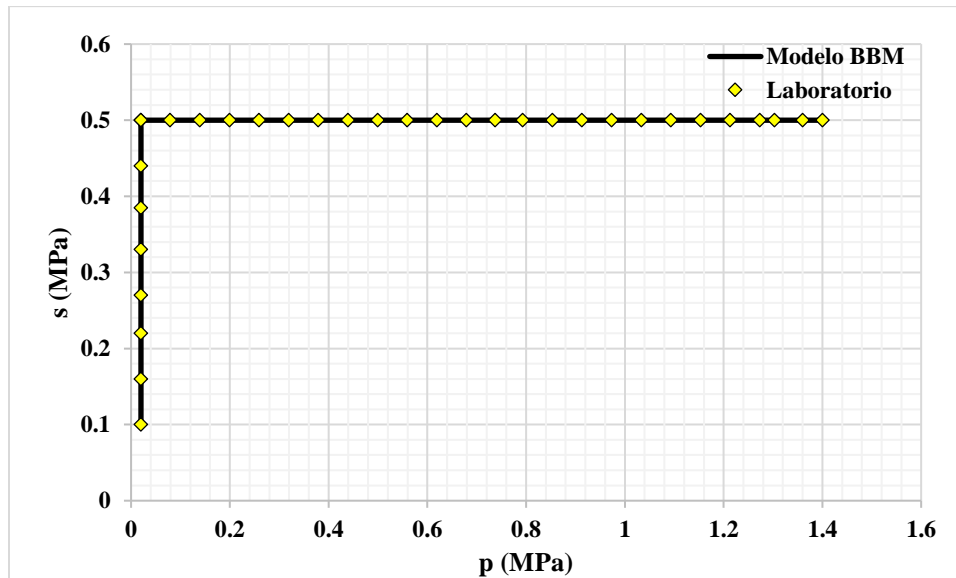


Figura 81. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante.

La variación del índice de poros con la succión se muestra en la Figura 82, se observa que los valores predecidos al final del ensayo son ligeramente menores que los medidos en laboratorio, aunque el ajuste en general es bueno.

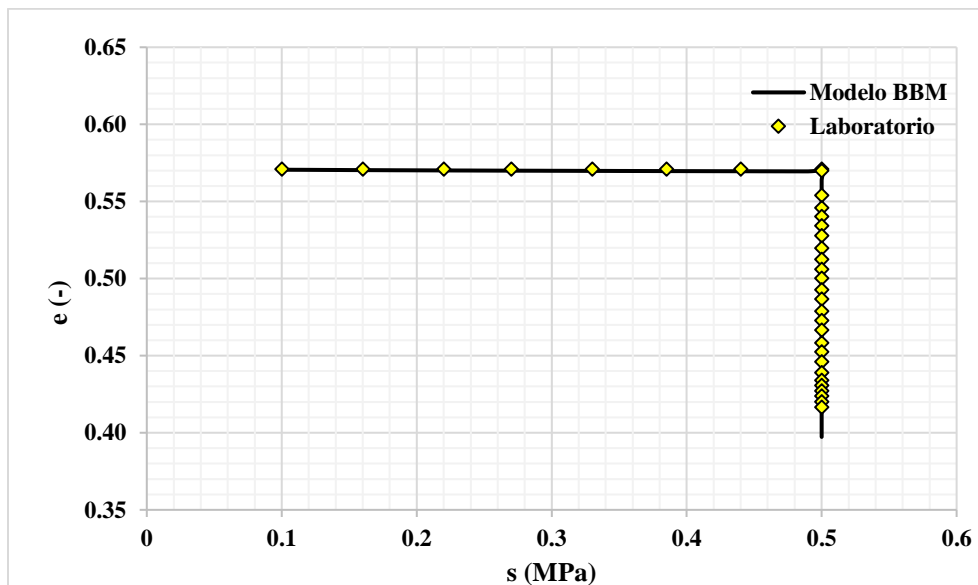
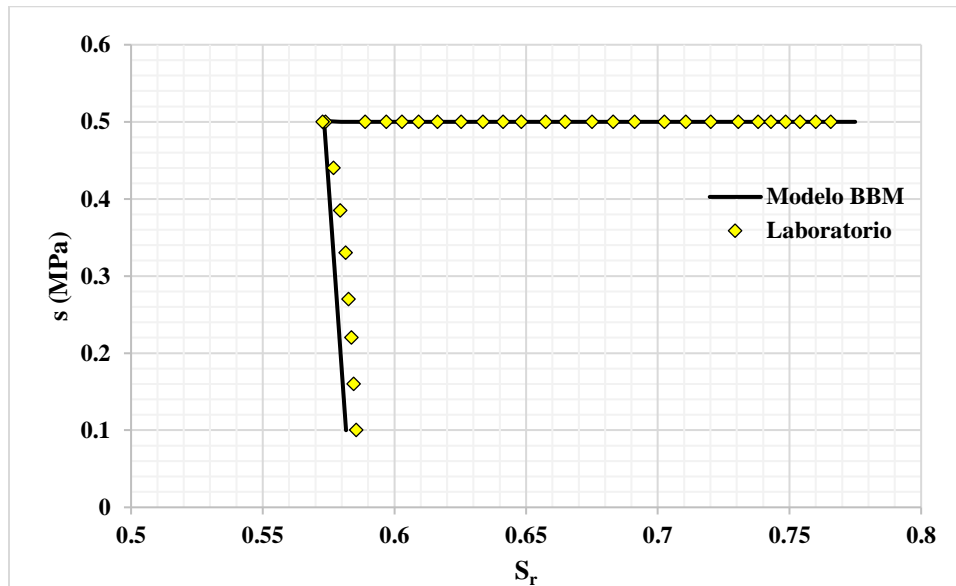


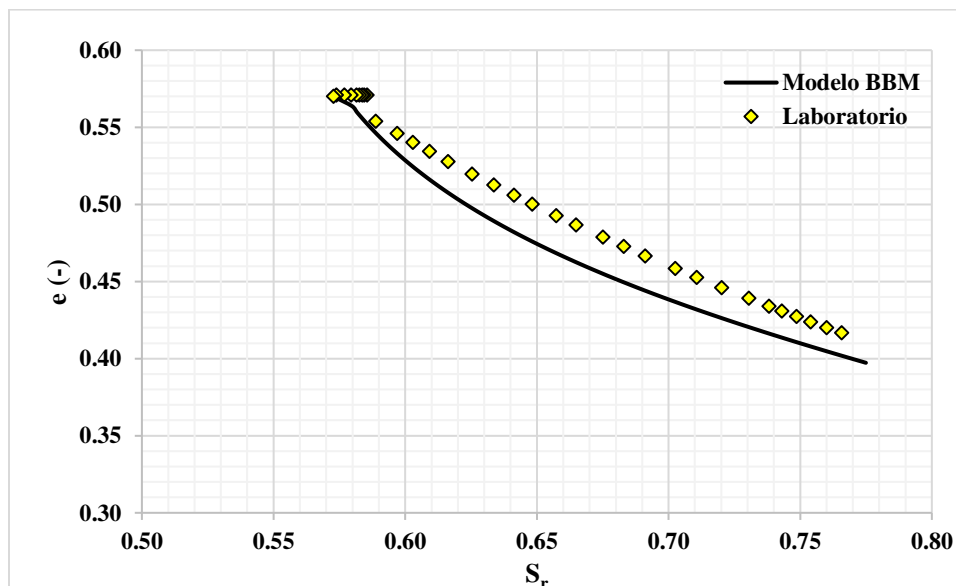
Figura 82. Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 1 a succión constante.



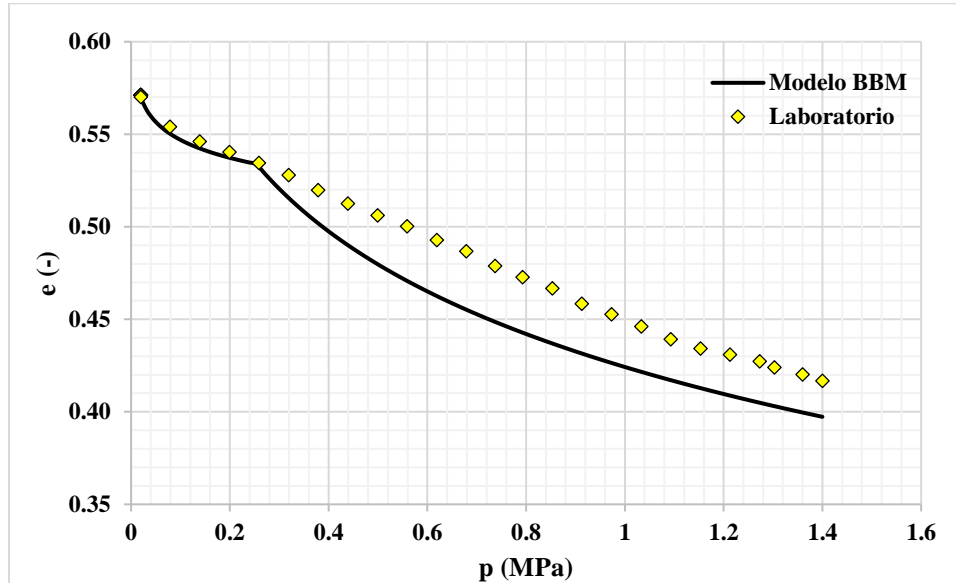
**Figura 83.** Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 1 a succión constante.

En la Figura 83 se muestra la variación del grado de saturación con la succión, se observa que al final del ensayo se predicen valores de grado de saturación ligeramente más altos que los medidos en laboratorio.

La variación del índice de poros con el grado de saturación se muestra en la Figura 84 se observa que el ajuste es aceptable y que los valores predichos son ligeramente menores que los medidos en laboratorio.

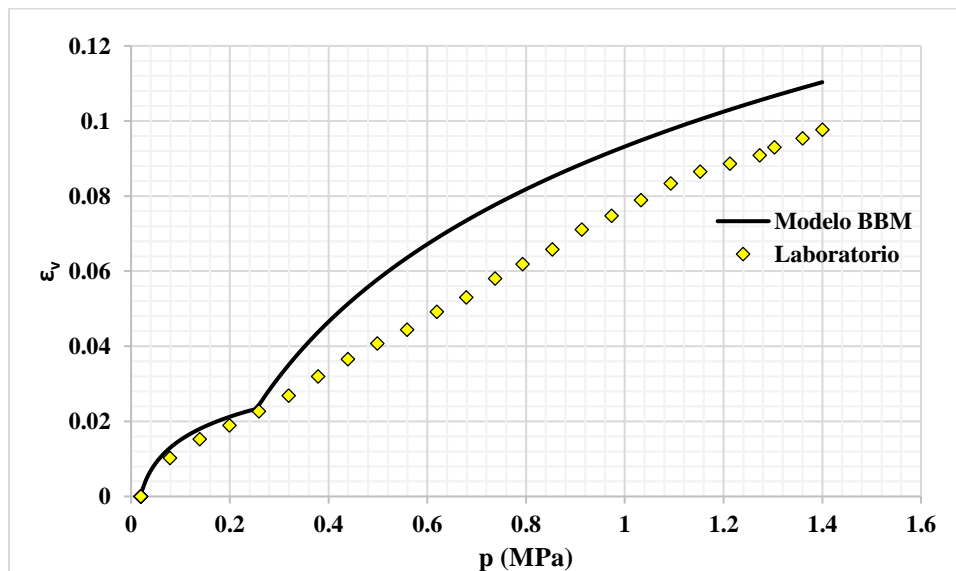


**Figura 84.** Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 1 a succión constante.



**Figura 85.**Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante.

En la Figura 85 se observa el cambio en el índice de poros respecto a la tensión media neta, se observa un buena ajuste al inicio del ensayo y una vez alcanzada la superficie de fluencia los valores predcidos del índice de poros son menores que los medidos en laboratorio esto es debido a que las deformaciones volumétricas predcidas son mayores a las medidas en laboratorio tal y como se observa en la Figura 86, donde al inicio el ajuste es bastante bueno y al final se produce un aumento que al final disminuye, un caso similar ocurre con la variación de la deformación volumétrica con la succión donde al final los valores predcidos son superiores a los medidos como se muestra en la Figura 87.



**Figura 86.**Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 1 a succión constante.

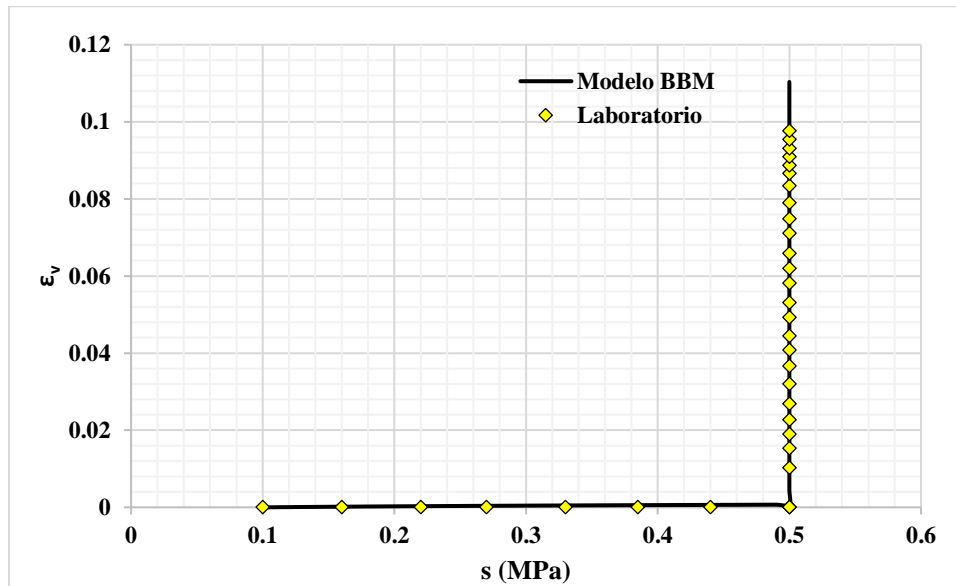


Figura 87. Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 1 a succión constante.

#### 5.4 MODELACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN 2 A SUCCIÓN CONSTANTE

La trayectoria tensional en el plano de tensión media neta-succión ( $p-s$ ) del ensayo 2 a succión constante se muestra en la Figura 88, se aprecia el ciclo de secado-humedecimiento hasta un valor de 0.50 MPa de succión y posteriormente la compresión isotrópica iniciando en un valor de succión de 0.10 MPa.

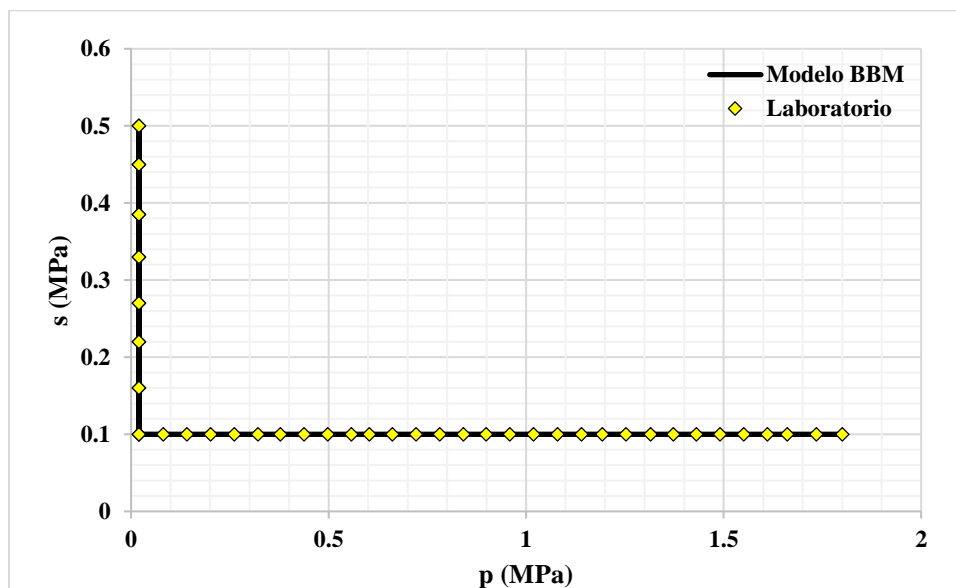
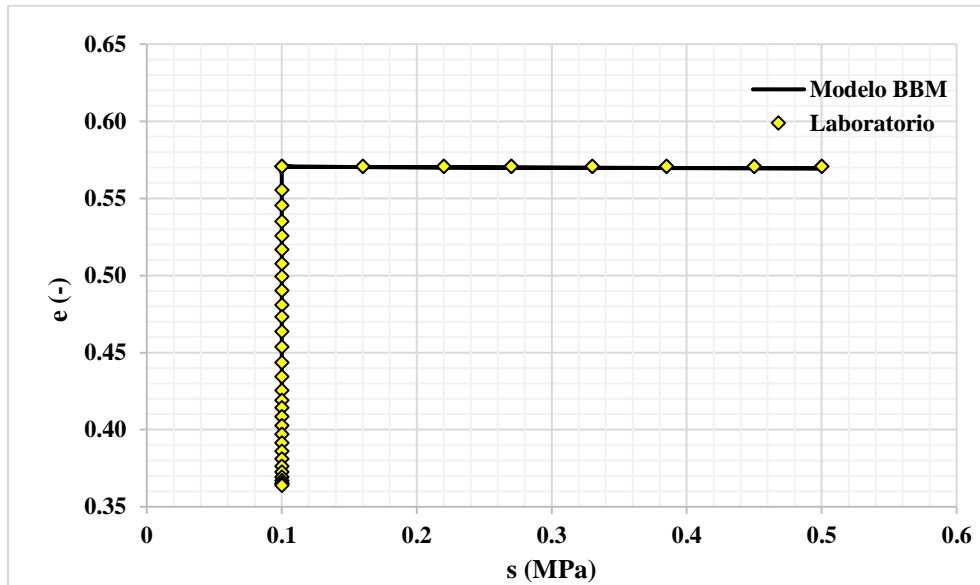


Figura 88. Trayectoria tensional succión-tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante.

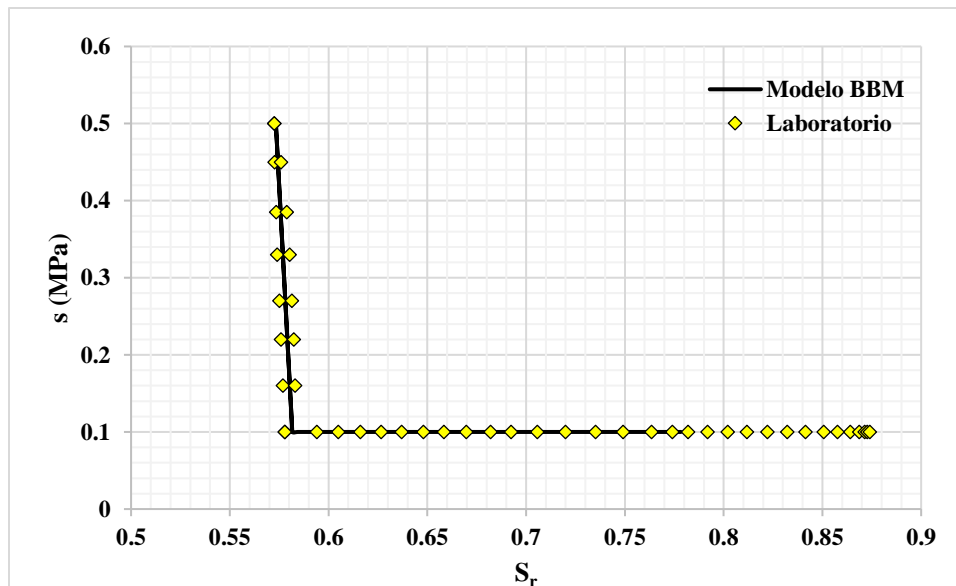


En la Figura 89 se muestra la variación del índice de poros con la succión, el ajuste es bueno excepto al final del ensayo donde los valores predecidos son ligeramente mayores a los medidos en el laboratorio.

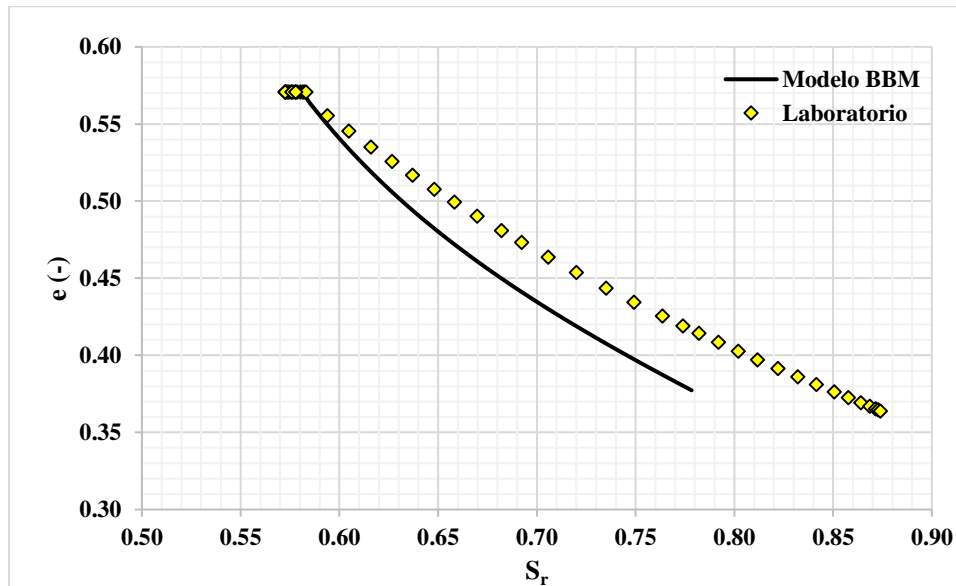


**Figura 89.**Gráfica índice de poros vs succión para el ensayo 2 a succión constante.

La variación de la succión con el grado de saturación se muestra en la Figura 90, se observa que el ajuste en el ciclo de secado-humedecimiento es bastante bueno, en la fase de compresión los valores predecidos de grado de saturación fueron menores que los medidos en laboratorio esto es debido a que la trayectoria tensional seguida “escapa” del ajuste de la curva de retención de agua una vez superado un valor de 0.78 MPa aproximadamente.



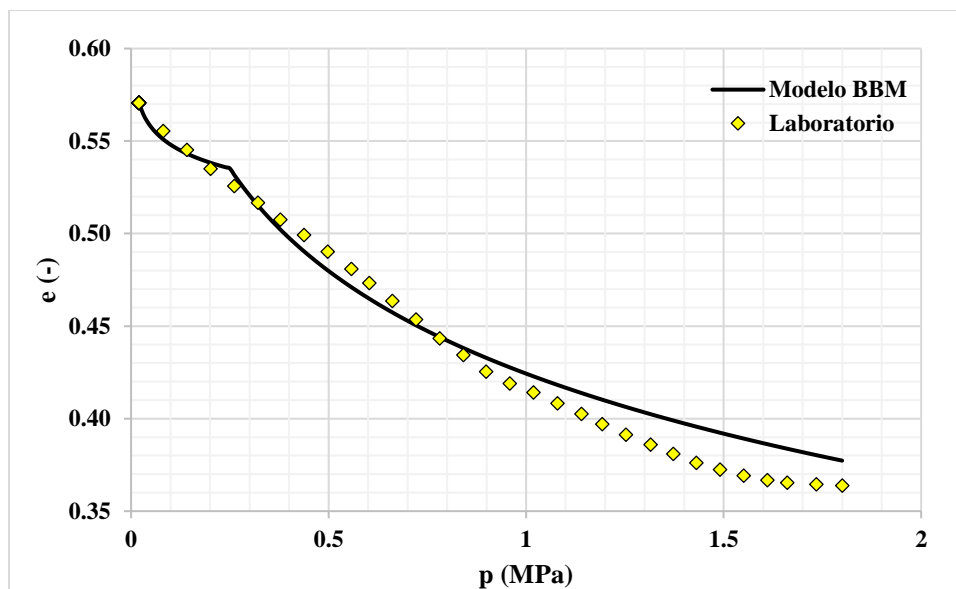
**Figura 90.**Gráfica succión vs grado de saturación para el ensayo 2 a succión constante.



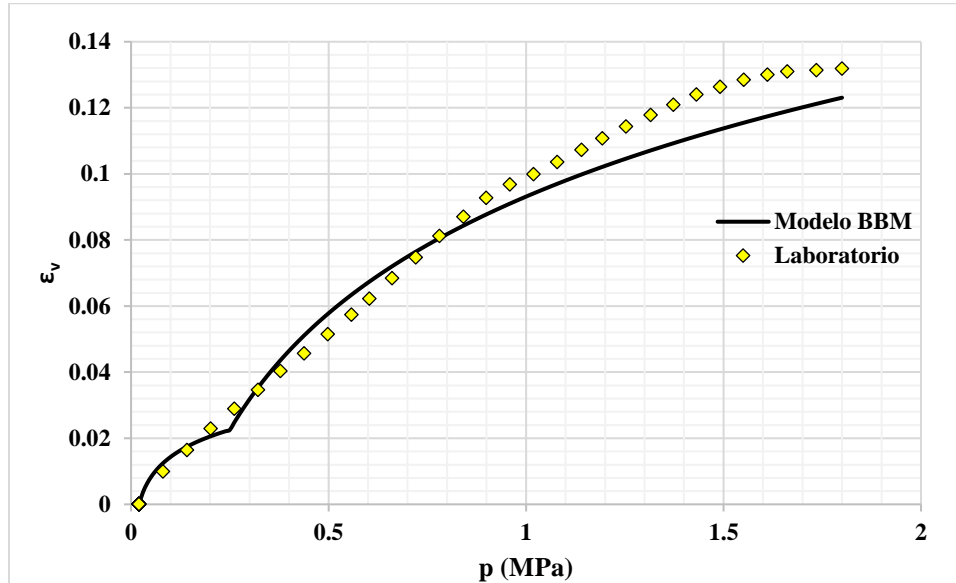
**Figura 91.** Gráfica índice de poros vs grado de saturación para el ensayo 2 a succión constante.

En la Figura 91 se observa el cambio en el índice de poros con el grado de saturación, se observa que en el inicio del ensayo los valores de la predicción son bastante similares a los medidos en laboratorio, posteriormente los valores de índice de poros predcidos por el modelo tienden a ser inferiores que los medidos en laboratorio.

El ajuste de los valores predcidos de índice de poros en función de la tensión media neta se observa en la Figura 92 donde los valores de índice de poros obtenidos del modelo se aproximan bastante a los valores medidos en el laboratorio a lo largo del ensayo.



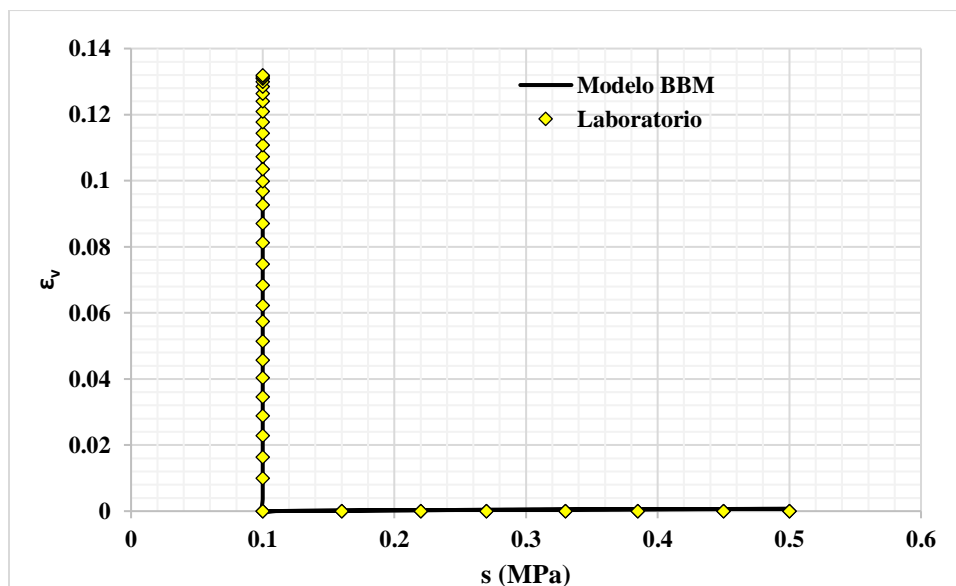
**Figura 92.** Gráfica índice de poros vs tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante.



**Figura 93.** Gráfica deformación volumétrica vs tensión media neta para el ensayo 2 a succión constante.

El ajuste de los valores de deformación volumétrica en función de la tensión media neta obtenidos del modelo se muestran en la Figura 93 donde se observa que al igual que en el caso del índice de poros los valores predcidos son bastante similares a los datos medidos en el laboratorio.

La variación de la deformación volumétrica con la succión se observa en la Figura 94 donde se aprecia que en el ciclo secado-humedecimiento las deformaciones volumétricas tienen valores despreciables sobre el cambio de volumen, así mismo se observa que los valores predcidos de deformación al final del ensayo son aproximadamente 2% menores a los medidos en laboratorio.



**Figura 94.** Gráfica deformación volumétrica vs succión para el ensayo 2 a succión constante.

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa en MATLAB para esquema explícito del modelo Cam Clay Modificado (MCCM) para el caso de suelos saturados y un programa con esquema explícito para el modelo Barcelona Basic Model (BBM) para suelos no saturados con el que se modeló la parte mecánica de los ensayos de laboratorio. Por otro lado, la parte hidráulica se desarrolló con los modelos de Van Genuchten original y corregido (FEBEX) además de incorporar una curva tipo scanning para tener en cuenta la histéresis de la curva de retención. La estructura general de los programas desarrollados se muestra a continuación:

1. Cargar desde MS Excel los parámetros de cada modelo  $(M, \lambda, \kappa, G, p_0)$  para el MCCM,  $(\lambda, \lambda_s, \kappa, \kappa_s, \beta, r, p^c, e_0, k, G, p_{at}, s_0)$  para el BBM,  $(\lambda_0, P_0, a, c)$  para el Van Genuchten y  $(\lambda_0, P_0, \lambda_d, P_d, a, c)$  para el Van Genuchten modificado.
2. Cargar desde MS Excel la trayectoria tensional tensión media neta- succión  $(p, s)$  para ensayos de succión constante y tensión media neta  $p$  para ensayos a humedad constante.
3. Se crean los vectores de almacenamiento de información para el cálculo de deformaciones y elaboración de gráficos.
4. Cálculo de parámetros iniciales  $\alpha, G_s, \phi_0, S_{r0}, s_0$  según el ensayo.
5. Cálculo de incrementos de deformación.
6. Cálculo del índice de poros  $e$ , del grado de saturación  $S_r$  y de la succión final  $s_f$ .
7. Repetir el paso 6 hasta que la variable error sea menor o igual a la tolerancia establecida de 0.00001 MPa para los ensayos de humedad constante.
8. Almacenar las variables  $p_0^*, p_0, \lambda(s), p_s, e, v, \phi, S_r, s, w, d\varepsilon_{vp}^e, d\varepsilon_{vs}^e, d\varepsilon_{vs}^p, d\varepsilon_{vp}^p, d\varepsilon_v^e$  y  $d\varepsilon_v^p$ .

Los parámetros de los modelos para la parte hidráulica Van Genuchten original y corregido se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados con base a los datos de laboratorio obtenidos en los ensayos a humedad y succión constante.

Se ha usado una ley lineal para modelar el comportamiento del suelo en la zona de scanning durante los ciclos de secado-humedecimiento.

Se ha logrado reproducir razonablemente el comportamiento del suelo para ensayos de humedad y succión constante mediante un conjunto único de parámetros acoplado de manera sencilla las partes mecánica e hidráulica mediante los modelos BBM y Van Genuchten original y modificado

Para lograr una predicción satisfactoria del comportamiento de los suelos no saturados es fundamental incorporar directamente la influencia de la parte hidráulica mediante modelos como el de Van Genuchten o similares.

## 6.1 LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En esta tesina se ha desarrollado un programa que acopla los modelos mecánico e hidráulico para suelos no saturados a lo largo de trayectorias de carga isótropas y triaxiales, pero solo fueron interpretados ensayos que seguían trayectorias isótropas por lo que un potencial desarrollo futuro es la predicción e interpretación de ensayos a lo largo de trayectorias tipo triaxial.

Se han desarrollado las bases para la formulación en términos de tensiones generalizadas  $(p, J, \theta)$ , por lo que se puede terminar de desarrollar dicha formulación e implementarla en la interpretación y predicción de ensayos triaxiales con trayectorias del tipo  $(\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3)$ . Esta implementación ha sido iniciada por el autor este TFM pero por razones de tiempo no se ha podido incluir en este documento.

El modelo utilizado en el desarrollo del programa es un modelo isótropo por lo que un posible desarrollo futuro es incluir el comportamiento anisótropo del suelo durante el proceso de compactación mediante la inclusión de modelos anisótropos como los desarrollados por (Cui & Delage, 1996) y (Romero & Jommi, 2008).

## 7. REFERENCIAS

- Ahmed, S., Lovell, C. W. J. & Diamond, S., 1974. Pore size and strength of a compacted clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, 100(GT4), pp. 407-425.
- Aitchison, G. D., 1960. *Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils*. London, Butterworths.
- Aitchison, G. D. & Bishop, A. W., 1960. London, Butherworths.
- Aitchison, G. D. & Donald, I. B., 1956. *Effective stresses in unsaturated soils*. Christchurch, New Zealand, New Zealand Institution of Engineers.
- Aitchison, G. D. & Woodburn, J. A., 1969. *Soil suction in foundation design*. Ciudad de Mexico , s.n., pp. 1-8.
- Alonso, E., 1993. *Unsaturated Soils: Recent developments and applications*. Barcelona, s.n.
- Alonso, E., Gens, A. & Hight, D., 1987. *Special problem soils*. Dublin, s.n., pp. 1087-1146.
- Alonso, E., Gens, A. & Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), pp. 504-430.
- Alonso, E., Vaunat, J. & Gens, A., 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54(1-2), pp. 173-183.
- Al-Sharrad, M. A., 2013. *Evolving anisotropy in unsaturated soils: experimental investigation and constitutive modelling*. Glasgow: PhD. thesis, University of Glasgow.
- Barden , L., Madedor, A. O. & Sides, G. R., 1969. Volume change characteristics of unsaturated clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 95(SM1), pp. 33-51.
- Barden, L., 1965. Consolidation of compacted and unsaturated soils. *Géotechnique*, 15(3), pp. 267-286.
- Barden, L., 1974. Consolidation of clays compacted 'dry' and 'wet' of optimum water content. *Géotechnique*, 24(4), pp. 605-625.
- Barden, L., McGown, A. & Collins, K., 1973. The collapse mechanism in the partly saturated soil. *Engineering Geology*, 7(1), pp. 49-60.
- Barrera, M., 2002. *Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Biot, M. A., 1941. General theory of three dimensional consolidation. *Applied Physics*, 12(2), pp. 155-164.
- Bishop, A. W., 1959. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, Volumen 39, pp. 859-863.

- Bishop, A. W., 1960. *The measurement of pore pressure in the triaxial test*. London, Butterworths, pp. 38-46.
- Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E. & Donald, I. B., 1960. *Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils*. New York, ASCE, pp. 503-532.
- Bishop, A. W. & Blight, G. E., 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique*, 13(3), pp. 177-197.
- Bishop, A. W. & Donald, I. B., 1961. *The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus*. Paris, s.n., pp. 13-21.
- Bishop, A. W. & Henkel, D. J., 1962. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. London: Edward Arnold Publishers Limited.
- Bjerrum, L. & Huder, J., 1957. *Measurement of the Permeability of Compacted Clays*. Londres, Butterworths Scientific Publications, pp. 1-6.
- Blight, G. E., 1961. *Strength and consolidation characteristics of compacted soils*. London: PhD. Thesis, Imperial College London.
- Bolzon, G., Schrefler, B. A. & Zienkiewicz, O. C., 1996. Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46(2), pp. 279-289.
- Burdine, N. T., 1952. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(3), p. 225G.
- Carman, P. C., 1953. Properties of capillary-held liquids. *Journal of Physical Chemistry*, 57(1), pp. 56-64.
- Chaudhary, B., 1955. *Compressibility characteristics of compacted soils*. London: MSc. Thesis, University of London.
- Coleman, J. D., 1962. Stress/strain relations of partly saturated soil. *Correspondence*. *Géotechnique*, 12(4), pp. 348-350.
- Collins, K. & McGown, A., 1974. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique*, 24(2), pp. 223-254.
- Croney, D., Coleman, J. D. & Black, W. P. M., 1958. Movement and distribution of water in soil relation to highway design and performance. *Highway Research Board Special Report*, Issue 40.
- Cui, Y. & Delage, P., 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), pp. 291-311.
- D'Onza, F., Gallipoli, D. & Wheeler, S., 2011. *Effect of anisotropy on the prediction of unsaturated soil response under triaxial and oedometric conditions*. Barcelona, s.n., pp. 787-794.
- Dafalias, Y., 1986. An anisotropic critical state soil plasticity model. *Mechanics Research Communications*, 13(6), pp. 341-347.

- Della Vecchia, G., Jommi, C. & Romero, E., 2013. A fully coupled elastic–plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, I(37), pp. 503-535.
- Diamond, S., 1970. Pore size distribution in clays. *Clays and Clay Minerals*, Volumen 18, pp. 7-23.
- Fredlund, D. G., 1979. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), pp. 121-139.
- Fredlund, D. G. & Morgenstern, N. R., 1976. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), pp. 261-276.
- Fredlund, D. G. & Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), pp. 521-532.
- Gallipoli, D., 2000. *Constitutive and numerical modelling of unsaturated soils*. Glasgow: PhD. Thesis, University of Glasgow.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R. & Vaunat, J., 2003. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, 53(1), pp. 123-135.
- Garcia Bengoechea, I., Lovell, C. W. & Altshaeffl, A. G., 1979. Pore distribution and permeability of silty clays. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT7), pp. 839-856.
- Gardner, W. R., 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water-table. *Soil Science American*, 85(4), pp. 228-232.
- Gens, A., 1995. *Constitutive modelling. Application to compacted soils*. Paris, Balkema.
- Gens, A. & Alonso, E., 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), pp. 1013-1032.
- Hill, C. B., 1967. *Consolidation of compacted clay*. Manchester: MSc. Thesis, University of Manchester.
- Hillel, D., 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. First ed. San Diego: Elsevier.
- Huang, C. H., 1981. *Pore size distribution of sandy soils and prediction of permeability*, Indianapolis: Indiana Department of Highways.
- Jennings, J. E., 1957. *Discussion on M. S. Youssef's paper*. s.l., ISSMFE, pp. 3-168.
- Jennings, J. E. & Burland, J. B., 1962. Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. *Géotechnique*, 12(2), pp. 125-144.
- Josa, A., 1988. *Un modelo elastoplástico para suelos no saturados*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.



- Josa, A., Balmaceda, A., Alonso, E. & Gens, A., 1992. *An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse*. Barcelona, s.n., pp. 815-826.
- Karube, D. & Kawai, K., 2001. The role of pore water in the mechanical behavior of the unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3-4), pp. 211-241.
- Kell, T. R., 1964. *The influence of compaction method on fabric of compacted clay*. Tucson(Arizona): Master of Science Thesis, University of Arizona.
- Kool, J. B. & Parker, J. C., 1987. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 23(1), pp. 105-114.
- Lambe, T. W., 1958. The structure of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, 84(SM-2), pp. 1-35.
- Larmour, D. Y., 1966. *One-dimensional consolidation of partially saturated clay*. Manchester: MSc Thesis, University of Manchester.
- Lloret, A., 1982. *Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Barcelona.
- Lloret, A. & Alonso, E., 1980. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Géotechnique*, 30(4), pp. 449-477.
- Lloret, A. & Alonso, E., 1985. *State surfaces for partially saturated soils*. San Francisco, ICSMFE.
- Loret, B. & Khalili, N., 2000. A three phase model for unsaturated soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(11), pp. 893-927.
- Madedor, A. O., 1967. *Consolidation characteristics of compacted clay*. Manchester: PhD. Thesis, University of Manchester.
- Matyas, E. L., 1963. *Compressibility and shear strength of compacted soils*. London: PhD. Thesis, University of London.
- Matyas, E. L. & Radhakrishna, H. S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique*, 18(4), pp. 432-448.
- Mendoza, M. J. & Alberro, J., 1992. *Engineering properties and microstructure of compacted cohesive soils*. Ciudad de Mexico, Raúl Marsal Volume, pp. 247-264.
- Mora, R., 2016. *Efectos de la microestructura en el comportamiento hidromecánico de suelos compactados*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universitat Polytecnica de Catalunya.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated. *Water Resources Research*, 12(3), pp. 513-522.
- Ng, C. W. & Menzies, B., 2007. *Advanced Unsaturated Soils Mechanics and Engineering*. First ed. New York: Taylor & Francis.

- Ohmaki, S., 1982. *Stress-strain behaviour of anisotropically, normally consolidated cohesive soil.* Zurich, s.n., pp. 250-269.
- Parker, J. C. & Lenhard, R. J., 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation-pressure relations. *Water Resources Research*, 23(12), pp. 2187-2196.
- Proctor, R. R., 1933. The design and construction off rolled-earth dams. *Engng News Rec.*, 111(9), pp. 245-248.
- Romero, E., 1999. *Thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study.* Barcelona: PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Romero, E., Della Vecchia, G. & Jommi, C., 2011. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, 61(4), pp. 313-328.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A., 2001. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3-4), pp. 311-332.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A., 1999. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Engineering Geology*, Volumen 54, pp. 117-127.
- Romero, E. & Jommi, C., 2008. An insight into the role of hydraulic history on the volume changes of anisotropic clayey soils. *Water Resources Research*, 44(W12412).
- Romero, E. & Vaunat, J., 2000. *Retention curves of deformable clays.* Rotterdam, Balkema, pp. 91-106.
- Sanchez, M., Gens, A., Guimaraes, L. N. & Olivella, S., 2005. A double structure generalized plasticity model for expansive materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volumen 29, pp. 751-787.
- Seed, H. B. & Chan, C. K., 1959. Structure and strength characteristics of compacted clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 84(SM-2), pp. 87-128.
- Stropeit, K. & Wheeler, S. C. Y., 2008. *An anisotropic elasto-plastic model for unsaturated soils.* Durham, s.n., pp. 625-631.
- van Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the water permeability of unsaturated soils. *Soil Science Society American Jorunal* , 44(5), pp. 982-898.
- Vaunat, J., Romero, E. & Jommi, C., 2000. *An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils.* Trento, Balkema, pp. 121-138.
- Wheeler, S. J. & Sivakumar, V., 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique*, 45(1), pp. 35-53.

## APÉNDICE A

Tomando el incremento de deformación producido por los cambios en la succión:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds_0}{s_0 + p_{at}} \quad (\text{A.1})$$

Y el incremento de deformación producido por los cambios en la tensión media neta:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (\text{A.2})$$

Igualando las expresiones queda:

$$\frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds_0}{s_0 + p_{at}} \quad (\text{A.3})$$

Aislando el termino dependiente de  $p_0^*$  como sigue:

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{\lambda(0) - \kappa} \frac{ds_0}{s_0 + p_{at}} \quad (\text{A.4})$$

Expresando en forma incremental:

$$\ln\left(\frac{p_{0(i+1)}^*}{p_{0(i)}^*}\right) = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{\lambda(0) - \kappa} * \ln\left(\frac{s_{0(i+1)} + p_{at}}{s_{0(i)} + p_{at}}\right) \quad (\text{A.5})$$

Despejando el termino  $p_{0(i+1)}^*$ :

$$p_{0(i+1)}^* = p_{0(i)}^* * e^{\ln\left(\frac{s_{0(i+1)} + p_{at}}{s_{0(i)} + p_{at}}\right) * \frac{\lambda_s - \kappa_s}{\lambda(0) - \kappa}} \quad (\text{A.6})$$

Que es la expresión usada para calcular la tensión de preconsolidación saturada al final de cada incremento.

## APÉNDICE B

En este Apéndice se desarrolla la formulación del modelo BBM para tensiones generalizadas siguiendo las bases propuestas por (Alonso, 1993).

Dada la ecuación de la superficie de fluencia del modelo BBM

$$F = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (\text{B.1})$$

Dividiendo entre  $M^2(p + p_s)^2$  queda:

$$F = \frac{q^2}{M^2(p + p_s)^2} - \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)} = 0 \quad (\text{B.2})$$

En términos de tensiones generalizadas queda como:

$$F(p, J, \theta, s, p_0^*) = \frac{J^2}{g^2(\theta)(p + p_s)^2} - \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)} = 0 \quad (\text{B.3})$$

Donde  $p$  es la tensión media neta como función del primer invariante del tensor  $\sigma_{ij}$ ,  $J^2$  el segundo invariante del tensor de tensiones,  $\theta$  el ángulo de Lode.

Llamando  $t^2$  el término de la izquierda, la superficie de fluencia se puede reescribir como:

$$F(p, J, \theta, s, p_0^*) = t^2 - \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)} = 0 \quad (\text{B.4})$$

Ahora se halla la regla de flujo mediante la expresión:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{B.5})$$

Donde la derivada  $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$  se calcula como:

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial F}{\partial p} * \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial J} * \frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial \theta} * \frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{B.6})$$

A continuación, se presenta el cálculo de las derivadas  $\frac{\partial F}{\partial p}$ ,  $\frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial J}$ ,  $\frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial \theta}$  y  $\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}}$

**Cálculo del termino  $\frac{\partial F}{\partial p}$**

Hallando primero la derivada de  $t^2$  respecto a  $p$  como sigue:

$$\frac{dt^2}{dp} = \left( \frac{J^2}{g^2(\theta)} * \frac{1}{(p + p_s)^2} \right)' = \frac{J^2}{g^2(\theta)} * -\frac{2}{(p + p_s)^3} \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{dt^2}{dp} = -\frac{2J^2}{(p + p_s) * g^2(\theta) * (p + p_s)^2} = -\frac{2t^2}{p + p_s} \quad (\text{B.8})$$

Ahora se halla la derivada de  $-\frac{(p_0-p)}{(p+p_s)}$  respecto a  $p$ , denominando  $\alpha$  al termino  $-\frac{(p_0-p)}{(p+p_s)}$  se tiene:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial p} = -\left( \frac{(-1) * (p + p_s) - (1) * (p_0 - p)}{(p + p_s)^2} \right) \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial p} = -\left( \frac{-p - p_s - p_0 + p}{(p + p_s)^2} \right) = \frac{p_s + p_0}{(p + p_s)^2} \quad (\text{B.10})$$

Ahora sumando los términos B.8 y B.10:

$$\frac{\partial F}{\partial p} = \frac{dt^2}{dp} + \frac{\partial \alpha}{\partial p} \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial F}{\partial p} = -\frac{2t^2}{p + p_s} + \frac{p_s + p_0}{(p + p_s)^2} \quad (\text{B.12})$$

**Cálculo del termino  $\frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}}$**

Tomando la definición de  $p$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (\text{B.13})$$

Y derivando respecto a cada término del tensor  $\sigma_{ij}$  se tiene:

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma_{11}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{22}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{33}} = \frac{1}{3} \quad (\text{B.14})$$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma_{12}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{21}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{13}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{31}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{23}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma_{32}} = 0 \quad (\text{B.15})$$

Escribiendo la derivada en forma vectorial:

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} = \left( \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, 0, 0 \right)^T \quad (\text{B.16})$$

**Cálculo del termino  $\frac{\partial F}{\partial J}$**

$$\frac{\partial F}{\partial J} = \frac{2J}{g^2(\theta) * (p + p_s)^2} = \frac{2t^2}{J} \quad (\text{B.17})$$

**Cálculo del termino  $\frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}}$**

Tomando la definición del segundo invariante  $J^2$

$$J^2 = \frac{1}{6} * [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \quad (\text{B.18})$$

Derivando respecto a cada término del tensor  $\sigma_{ij}$  se tiene:

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{11}} = \frac{1}{6} * [2(\sigma_x - \sigma_y) + 2(\sigma_x - \sigma_z)] = \frac{1}{6} * [2(\sigma_x - \sigma_y + \sigma_x - \sigma_z)] = \frac{1}{3} * [2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z] \quad (\text{B.19})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{22}} = \frac{1}{6} * [-2(\sigma_x - \sigma_y) + 2(\sigma_y - \sigma_z)] = \frac{1}{6} [-2(\sigma_x - \sigma_y - \sigma_y - \sigma_z)] = -\frac{1}{3} [-2\sigma_y + \sigma_x + \sigma_z] \quad (\text{B.20})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{33}} = \frac{1}{6} * [-2(\sigma_x - \sigma_z) - 2(\sigma_y - \sigma_z)] = \frac{1}{6} [-2\sigma_x + 2\sigma_z - 2\sigma_y + 2\sigma_z] = \frac{1}{3} [2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y] \quad (\text{B.21})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{12}} = \frac{\partial J}{\partial \sigma_{21}} = 2\tau_{xy} \quad (\text{B.22})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{13}} = \frac{\partial J}{\partial \sigma_{31}} = 2\tau_{xz} \quad (\text{B.23})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{23}} = \frac{\partial J}{\partial \sigma_{32}} = 2\tau_{yz} \quad (\text{B.24})$$

Ordenando la derivada en forma vectorial:

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{2J} \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - u_a \\ \frac{1}{3}(2\sigma_y - \sigma_x - \sigma_z) - u_a \\ \frac{1}{3}(2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) - u_a \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{xz} \\ 2\tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (\text{B.25})$$

Recordando la definición del tensor  $s_{ij}$

$$s_{ij} = \sigma_{ij}^* - p\delta_{ij} \text{ donde } \sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} - u_a\delta_{ij} \quad (\text{B.26})$$

$$s_{11} = s_x = \sigma_{11}^* - \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \sigma_x - u_a - \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - u_a \quad (\text{B.27})$$

$$s_{22} = s_y = \frac{1}{3}(2\sigma_y - \sigma_x - \sigma_z) - u_a \quad (\text{B.28})$$

$$s_{33} = s_z = \frac{1}{3}(2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) - u_a \quad (\text{B.29})$$

Por lo que la derivada  $\frac{\partial J}{\partial \sigma}$  se puede reescribir como:

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{2J} (s_x, s_y, s_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz})^T \quad (\text{B.30})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial \theta}$**

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = \frac{\partial F}{\partial g(\theta)} * g'(\theta) = -\frac{2t^2}{g(\theta) * g'(\theta)} \quad (\text{B.31})$$

Donde la expresión  $g(\theta)$  corresponde al criterio de falla utilizado en este caso se desarrolla la formulación para un criterio de rotura Mohr-Coulomb que tiene la siguiente expresión:

$$g(\theta) = \frac{\sin \phi}{\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi} \quad (\text{B.32})$$

Derivando  $g$  respecto a  $\theta$ :

$$g'(\theta) = \frac{\sin \phi \left( \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta \sin \phi \right)}{\left( \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right)^2} \quad (\text{B.33})$$

Reemplazando  $g'(\theta)$  y  $g(\theta)$  en B.33

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = - \frac{2t^2}{\left( \frac{\sin \phi}{\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi} \right) * \left( \frac{\sin \phi \left( \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta \sin \phi \right)}{\left( \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right)^2} \right)} \quad (\text{B.34})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}}$**

Tomando la definición del ángulo de Lode:

$$\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\det s_{ij}}{J^3} \right) \quad (\text{B.35})$$

Reescribiendo la expresión:

$$\sin(-3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\det s_{ij}}{J^3} \quad (\text{B.36})$$

Derivando respecto a  $\sigma_{ij}$

$$-3 \cos(-3\theta) * \frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\partial \left( \frac{\det s_{ij}}{J^3} \right)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{B.37})$$

Reordenando y agrupando:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3\sqrt{3}}{2 * -3 \cos(3\theta)} \frac{\partial \left( \frac{\det s_{ij}}{J^3} \right)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{B.38})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3\sqrt{3}}{2 * -3 \cos(3\theta)} * \left( \frac{\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}} * J^3 - \frac{\partial J^3}{\partial \sigma_{ij}} * \det s_{ij}}{(J^3)^2} \right) \quad (\text{B.39})$$



### Cálculo del término $\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}}$

Se toma el tensor  $s_{ij}$  y se calcula su determinante  $\det s_{ij}$

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} s_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & s_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & s_z \end{bmatrix}; \det s_{ij} = s_x s_y s_z + 2\tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz} - \tau_{xy}^2 s_z - \tau_{xz}^2 s_y - \tau_{yz}^2 s_x \quad (\text{B.40})$$

Ahora se deriva la ecuación B.40 respecto al tensor  $\sigma_{ij}$

$$\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}} = \left( \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{ij}} s_y + s_x \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{ij}} \right) s_z + \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{ij}} (s_x s_y) - \tau_{xy}^2 \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{ij}} - \tau_{xz}^2 \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{ij}} - \tau_{yz}^2 \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{B.41})$$

En la ecuación B.41 los términos correspondientes a  $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \sigma_{ij}}$  y  $\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial \sigma_{ij}}$  son iguales a cero.

Ahora se calculan las derivadas de  $s_x$ ,  $s_y$  y  $s_z$  respecto a  $\sigma_{ij}$

Recordando la expresión de  $s_x$

$$s_x = \frac{1}{3} (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - u_a \quad (\text{B.42})$$

Derivando  $s_x$  respecto a  $\sigma_{ij}$

$$\frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{ij}} \rightarrow \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_x} = \frac{2}{3}; \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_y} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_z} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_x}{\partial \sigma_{xz}} = 0 \quad (\text{B.43})$$

Análogamente para  $s_y$  y  $s_z$

$$\frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{ij}} \rightarrow \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_x} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_y} = \frac{2}{3}; \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_z} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_y}{\partial \sigma_{xz}} = 0 \quad (\text{B.44})$$

Y para  $s_z$

$$\frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{ij}} \rightarrow \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_x} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_y} = -\frac{1}{3}; \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_z} = \frac{2}{3}; \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{xz}} = \frac{\partial s_z}{\partial \sigma_{xz}} = 0 \quad (\text{B.45})$$

Ahora las derivadas del determinante  $\det s_{ij}$  respecto a  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  y  $\tau_{yz}$

$$\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \tau_{xy}} = 2 * \tau_{zy} * \tau_{xz} - 2 * \tau_{xy} * s_z \quad (\text{B.46})$$

$$\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \tau_{xz}} = 2 * \tau_{xy} * \tau_{yz} - 2 * \tau_{xz} * s_y \quad (\text{B.47})$$

$$\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \tau_{yz}} = 2 * \tau_{xy} * \tau_{xz} - 2 * \tau_{yz} * s_x \quad (\text{B.48})$$

Ahora reemplazando las derivadas de las ecuaciones B.45, B.44 y B.43 en la ecuación B.41 se obtienen las derivadas de  $\frac{\det s_{ij}}{J^3}$  respecto a  $\sigma_{ij}$  como sigue

$$\frac{\partial \det s_x}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3} [2s_y s_z - s_x s_z - s_x s_y - (2\tau_{yz}^2 - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2)] = \chi_1 \quad (\text{B.49})$$

$$\frac{\partial \det s_y}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3} [2s_x s_z - s_y s_z - s_x s_y - (2\tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2)] = \chi_2 \quad (\text{B.50})$$

$$\frac{\partial \det s_z}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3} [2s_x s_y - s_y s_z - s_x s_z - (2\tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2)] = \chi_3 \quad (\text{B.51})$$

$$\frac{\partial \det s_{xy}}{\partial \sigma_{ij}} = 2(\tau_{xy} * \tau_{xz} - \tau_{xy} * s_x) = \chi_4 \quad (\text{B.52})$$

$$\frac{\partial \det s_{xz}}{\partial \sigma_{ij}} = 2(\tau_{xy} * \tau_{yz} - \tau_{xz} * s_y) = \chi_5 \quad (\text{B.53})$$

$$\frac{\partial \det s_{yz}}{\partial \sigma_{ij}} = 2(\tau_{xy} * \tau_{xz} - \tau_{yz} * s_z) = \chi_6 \quad (\text{B.54})$$

Ordenando en forma vectorial queda:

$$\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}} = (\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6)^T \quad (\text{B.55})$$

Calculando la derivada  $\frac{\partial J^3}{\partial \sigma_{ij}}$  y multiplicando por  $\frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}}$

$$\frac{\partial J^3}{\partial \sigma_{ij}} = 3 * J^2 * \frac{\partial J}{\partial \sigma_{ij}} = 3J^2 * \left( \frac{1}{2J} (s_x, s_y, s_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz})^T \right) \quad (\text{B.56})$$

Reemplazando las derivadas  $\frac{\partial \det s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}}$  y  $\frac{\partial J^3}{\partial \sigma_{ij}}$  en la ecuación B.39 y operando:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\sqrt{3}}{-2 * \cos(3\theta)} \left[ \frac{(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6)^T * J^3 - (\det s_{ij}) \left( \frac{3J^2}{2J} (s_x, s_y, s_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz})^T \right)}{J^6} \right]$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\sqrt{3}}{-2 * \cos(3\theta)} \left[ \frac{(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6)^T}{J^3} - \frac{3(\det s_{ij})(s_x, s_y, s_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz})^T}{2J^5} \right]$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\sqrt{3}(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6)^T}{-2 * \cos(3\theta) * J^3} + \frac{3\sqrt{3}}{2J^5} \frac{\det s_{ij}}{2 * \cos(3\theta)} (s_x, s_y, s_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz})^T \quad (B.57)$$

Con las ecuaciones B.12, B.16, B.17, B.25, B.34 y B.57 se halla la derivada  $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$  y calcular la regla de flujo de la ecuación B.5.

Ahora se halla la condición de consistencia

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial s} ds + \frac{\partial F}{\partial p_0^*} \frac{\partial p_0^*}{\partial \varepsilon_v^p} d\varepsilon_v^p = 0 \quad (B.58)$$

Recordando la ecuación de la superficie de fluencia

$$F(p, J, \theta, s, p_0^*) = \frac{J^2}{g^2(\theta)(p + p_s)^2} - \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)} = 0$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial s}$**

$$\frac{\partial F}{\partial s} = \frac{\partial F}{\partial p_s} \frac{\partial p_s}{\partial s} + \frac{\partial F}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial s} \quad (B.59)$$

Se hallan las derivadas  $\frac{\partial F}{\partial p_s}$ ,  $\frac{\partial p_s}{\partial s}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial p_0}$  y  $\frac{\partial p_0}{\partial s}$  como se muestra a continuación:

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial p_s}$**

Derivando  $F$  respecto a  $p_s$

$$\frac{\partial F}{\partial p_s} = \frac{J^2}{g^2(\theta)} \frac{\partial \left( \frac{1}{(p+p_s)^2} \right)}{\partial p_s} - \frac{\partial \left( \frac{(p_0-p)}{(p+p_s)} \right)}{\partial p_s}$$

$$\frac{\partial F}{\partial p_s} = \frac{J^2}{g^2(\theta)} \frac{-2(p + p_s)}{(p + p_s)^4} - \frac{(-1 * (p_0 - p))}{(p + p_s)^2}$$

Operando y ordenando:

$$\frac{\partial F}{\partial p_s} = \frac{-2t^2}{(p + p_s)} + \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)^2} \quad (\text{B.60})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial p_s}{\partial s}$**

Dependiendo de la ley usada para la función  $p_s$  la derivada cambiará

$$p_s = k * s, \quad \frac{\partial p_s}{\partial s} = k \quad (\text{B.61})$$

O también

$$p_s = \frac{s}{a + bs}, \quad \frac{\partial p_s}{\partial s} = \frac{a}{(a + bs)^2} \quad (\text{B.62})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial p_0}$**

$$\frac{\partial F}{\partial p_0} = \frac{-1}{(p + p_s)} \quad (\text{B.63})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial p_0}{\partial s}$**

Partiendo de la función  $\lambda(s) * [(1 - r) * \exp(-\beta s) + r]$

$$\frac{\partial \lambda(s)}{\partial s} = \lambda(0) * [-\beta(1 - r) * \exp(-\beta s)] = -\beta(1 - r) * \exp(-\beta s) \quad (\text{B.64})$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial s} = p_c * \left[ \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{(\lambda(0) - \kappa)}{\lambda(s) - \kappa}} * \ln \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right) * \frac{-\beta(1 - r) * \exp(-\beta s) * (\lambda(0) - \kappa)}{(\lambda(s) - \kappa)^2} \right] \quad (\text{B.65})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial s}$**

Reemplazando las derivadas de las ecuaciones B.60, B.61, B.63 y B.65 en la ecuación B.59

$$\frac{\partial F}{\partial s} = \left( \frac{-2t^2}{(p + p_s)} + \frac{(p_0 - p)}{(p + p_s)^2} \right) * \left( \frac{a}{(a + bs)^2} \right) + \left( \frac{-1}{(p + p_s)} \right) * \frac{\partial p_0}{\partial s} \quad (\text{B.66})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial F}{\partial p_0^*}$**

$$\frac{\partial F}{\partial p_0^*} = \frac{\partial F}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial p_0^*} \quad (\text{B.67})$$

**Cálculo del término  $\frac{\partial p_0}{\partial p_0^*}$**

Tomando la ecuación de  $p_0$

$$p_0 = p_c * \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\left( \frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa} \right)}$$

Derivando respecto a  $p_0^*$

$$\frac{\partial p_0}{\partial p_0^*} = \left( \frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa} \right) * p_c \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\left( \frac{\lambda(0) - \lambda(s)}{\lambda(s) - \kappa} \right)} \quad (\text{B.68})$$

Reemplazando las ecuaciones B.63 y B.68 en la ecuación B.67

$$\frac{\partial F}{\partial p_0^*} = \left( \frac{-1}{(p + p_s)} \right) * \left[ \left( \frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa} \right) * p_c \left( \frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\left( \frac{\lambda(0) - \lambda(s)}{\lambda(s) - \kappa} \right)} \right] \quad (\text{B.69})$$

$$\frac{\partial p_0^*}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{v}{\lambda(0) - \kappa} * p_0^* \quad (\text{B.70})$$

Por lo tanto, la condición de consistencia se halla reemplazando las ecuaciones B.6, B.66, B.69 y B.70 en la ecuación B.58



**ANEXOS**

## **ANEXO 1**

---

```

clear
%PROGRAMA PARA EL CALCULO DE DEFORMACIONES CON MODELO CAM CLAY
  MODIFICADO
%MASTER EN INGENIERIA DEL TERRENO E INGENIERIA SISMICA

%


---


PARAMETROS=xlsread('PARAMETROSMCCM','PARAMETROSMCCM','C1:C6');
  %CARGA LOS PARÁMETROS DEL MODELO CAM CLAY

Po=PARAMETROS(1);           %PRESION DE PRECONSOLIDACIÓN
M=PARAMETROS(2);           %PENDIENTE LINEA DE ESTADO
  CRÍTICO
LAMBDA=PARAMETROS(3);      %PENDIENTE RECTA DE COMPRESIÓN
  NORMAL
KAPPA=PARAMETROS(4);       %PENDIENTE RECTA DE DESCARGA
e_zero=PARAMETROS(5);      %INDICE DE POROS INICIAL
G=PARAMETROS(6);           %MODULO DE CORTE
%


---


%SE CARGA LA LISTA DE PUNTOS p' y q DE LA TRAYECTORIA
%SE CREAN LAS VARIABLES DEL PROBLEMA

PUNTOS=xlsread('PUNTOSMCC','A2:C102');           %CARGA LA LISTA DE
  PUNTOS
DIMENSION=size(PUNTOS);           %INDICA EL NÚMERO DE
  PUNTOS
Numpuntos=dimension(1);
Puntos_p=PUNTOS(:,2);           %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS
  PUNTOS p'
Puntos_q=PUNTOS(:,3);           %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS
  PUNTOS q
Poi=zeros(1,Numpuntos);           %CREA EL VECTOR DONDE SE
  ALMACENAN LOS Po
delta_def_vol_elastica=zeros(1,Numpuntos-1);     %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA
delta_def_corte_elastica=zeros(1,Numpuntos-1);    %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE ELÁSTICA
delta_def_vol_plastica=zeros(1,Numpuntos-1);      %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA
delta_def_corte_plastica=zeros(1,Numpuntos-1);    %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE PLÁSTICA
delta_def_volumetrica=zeros(1,Numpuntos);          %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA
delta_def_corte=zeros(1,Numpuntos);               %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE
eta=zeros(1,Numpuntos);                           %CREA EL VECTOR
  CON LA VARIABLE nu PARA CADA PUNTO (p',q)
def_volumetrica=zeros(1,Numpuntos);               %CREA EL VECTOR DE
  DEFORMACIÓN VOLUMETRICA
def_corte=zeros(1,Numpuntos);                     %CREA EL VECTOR DE
  DEFORMACIÓN DE CORTE

```

---





---

```

    delta_def_vol_plastica(k)=(LAMBDA-KAPPA)/(1+e_zero))*log(Poi(k
+1)/Poi(k));          %CÁLCULO DEL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN
VOLUMÉTRICA PLÁSTICA

%-----
%SE CALCULAN LAS DEFORMACIONES DE CORTE PLÁSTICAS

delta_def_corte_plastica(k)=((delta_def_vol_plastica(k))*2*((eta(k)+eta(k
+1))/2))/((M^2)-((eta(k)+eta(k+1))/2)^2);

%delta_def_corte_plastica(k)=((delta_def_vol_plastica(k))*2*((eta(k-1)))/
((M^2)-((eta(k-1))^2)));
%SE CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN DE CORTE PLÁSTICA

%-----
%SE CALCULAN LAS DEFORMACIONES VOLUMÉTRICAS ELÁSTICAS
delta_def_vol_elastica(k)=(KAPPA/(1+e_zero))*log(PUNTOS_P(k+1)/
PUNTOS_P(k));          %SE CALCULA EL
INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA

%-----
%SE CALCULAN LAS DEFORMACIONES DE CORTE ELÁSTICAS
delta_def_corte_elastica(k)=(PUNTOS_q(k+1)-PUNTOS_q(k))/(3*G);
%SE CALCULA EL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE CORTE
end

%SE CALCULAN LAS DEFORMACIONES TOTALES VOLUMÉTRICAS Y DE CORTE
delta_def_volumetrica(k
+1)=delta_def_vol_elastica(k)+delta_def_vol_plastica(k);
delta_def_corte(k
+1)=delta_def_corte_elastica(k)+delta_def_corte_plastica(k);

end

%
%-----
%CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES VOLUMÉTRICAS Y DE CORTE

for f=2:(NUMPUNTOS)

    def_volumetrica(f)=def_volumetrica(f-1)+delta_def_volumetrica(f);
    def_corte(f)=def_corte(f-1)+delta_def_corte(f);
    incrementos_plasticos(f)=delta_def_corte_plastica(f-1)/
delta_def_vol_plastica(f-1);

end

%
%-----
%CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES VERTICAL Y RADIAL

for x=1:NUMPUNTOS
    def_vertical(x)=def_corte(x)+(def_volumetrica(x)/3);
    def_radial(x)=(0.5)*(def_volumetrica(x)-def_vertical(x));

```

---

---

end

```
%
%GRAFICAS
%GRÁFICA DEFORMACION VERTICAL-DESVIADOR
figure(1)
plot(def_vertical,PUNTOS_q,'b','LineWidth',1.5)
title('Desviador vs Deformación Vertical')
%text(0.1,180,'* \epsilon_z')
xlabel('Deformación vertical \epsilon_z')
ylabel(' Tensión desviadora q(kPa)')
axis([0 0.30 0 100])

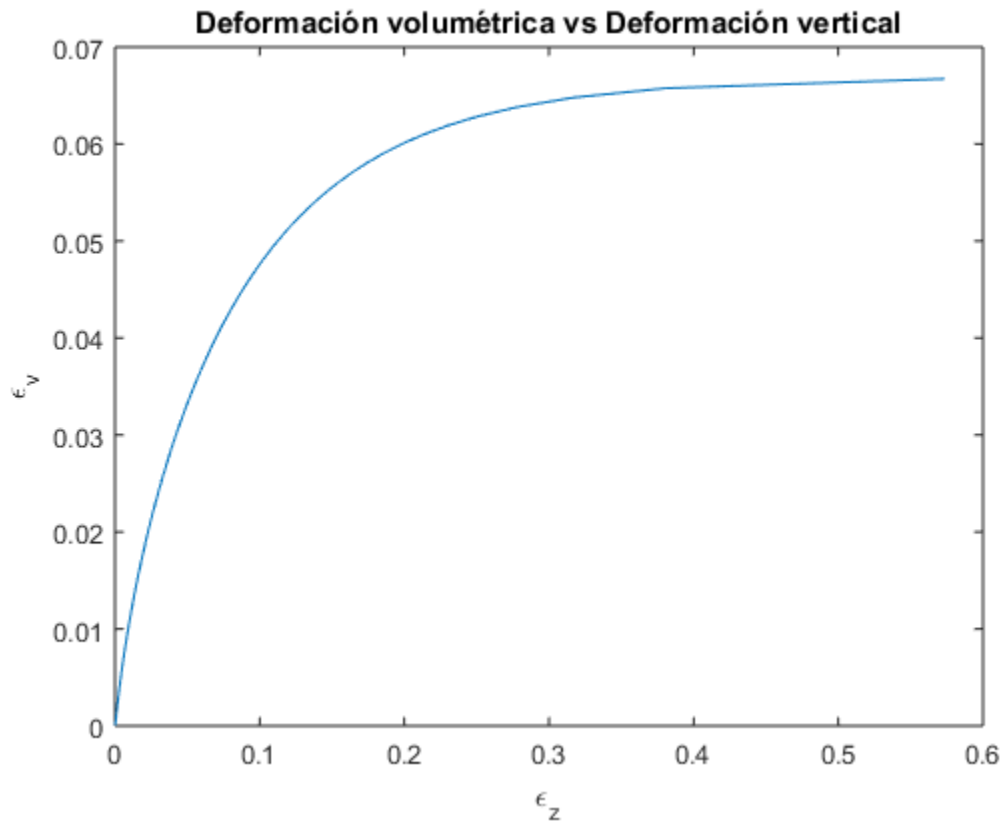
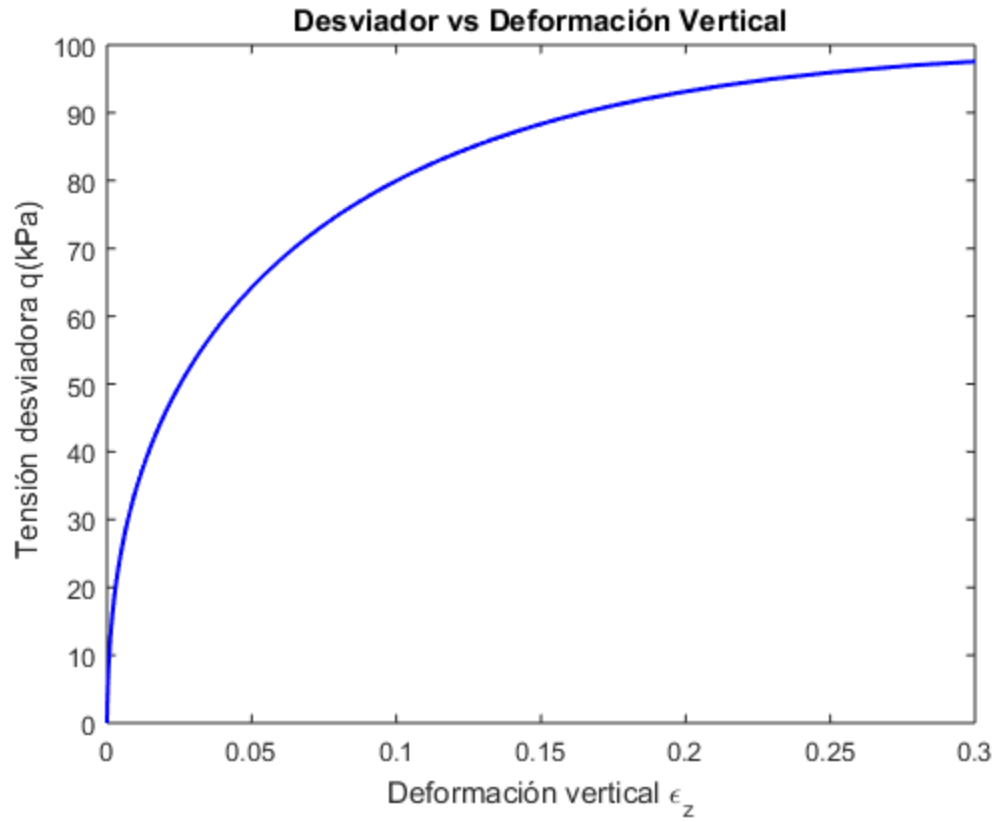
%GRAFICA DEFORMACIÓN VERTICAL-DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA
figure(2)
plot(def_vertical,def_volumetrica)
title('Deformación volumétrica vs Deformación vertical')
xlabel('\epsilon_z')
ylabel('\epsilon_v')

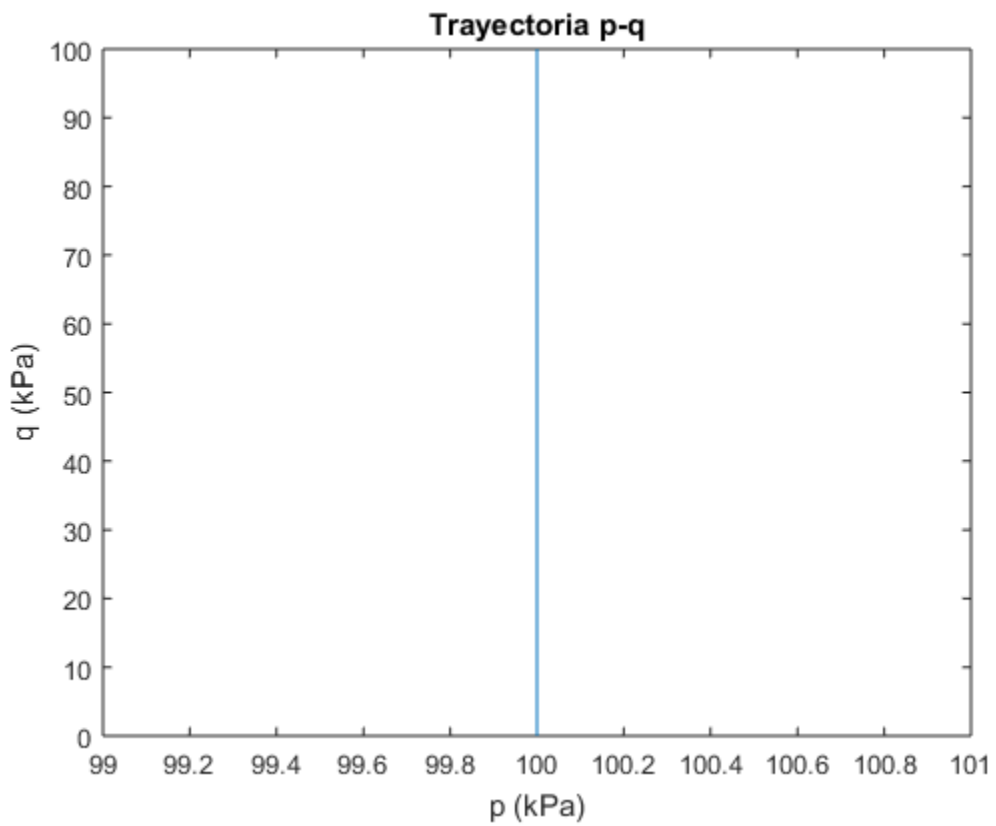
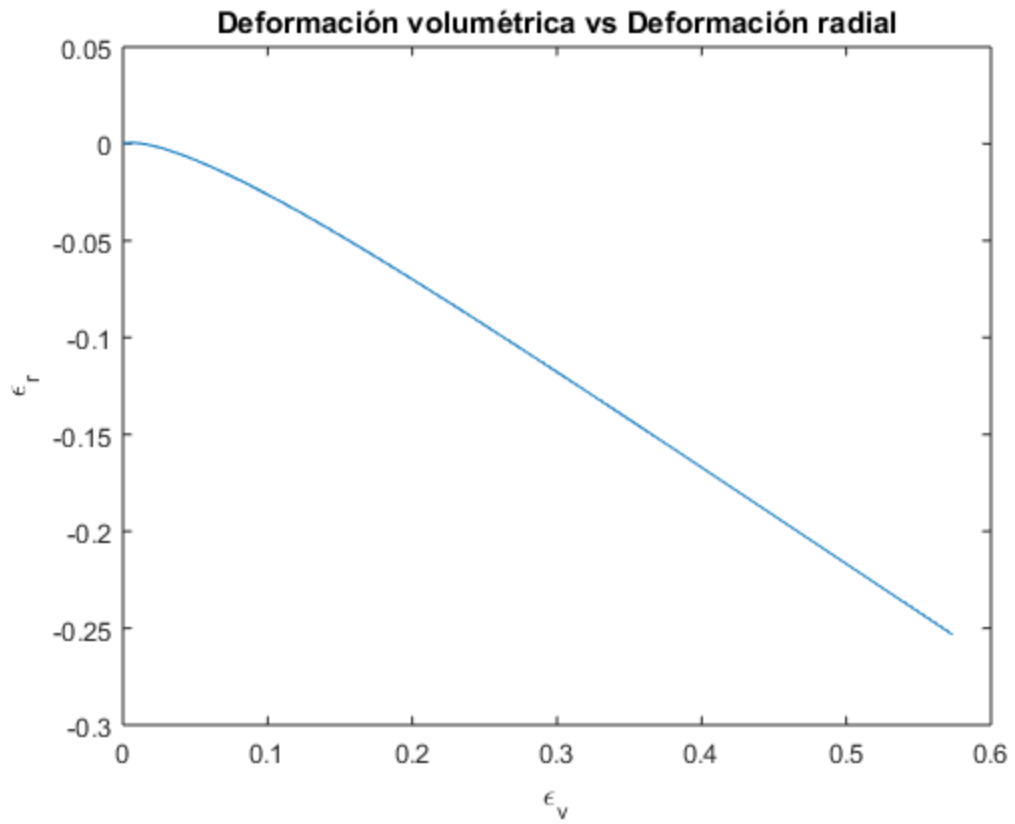
%GRÁFICA DEFORMACIÓN VERTICAL-DEFORMACIÓN RADIAL
figure(3)
plot(def_vertical,def_radial)
title('Deformación volumétrica vs Deformación radial')
xlabel('\epsilon_v')
ylabel('\epsilon_r')

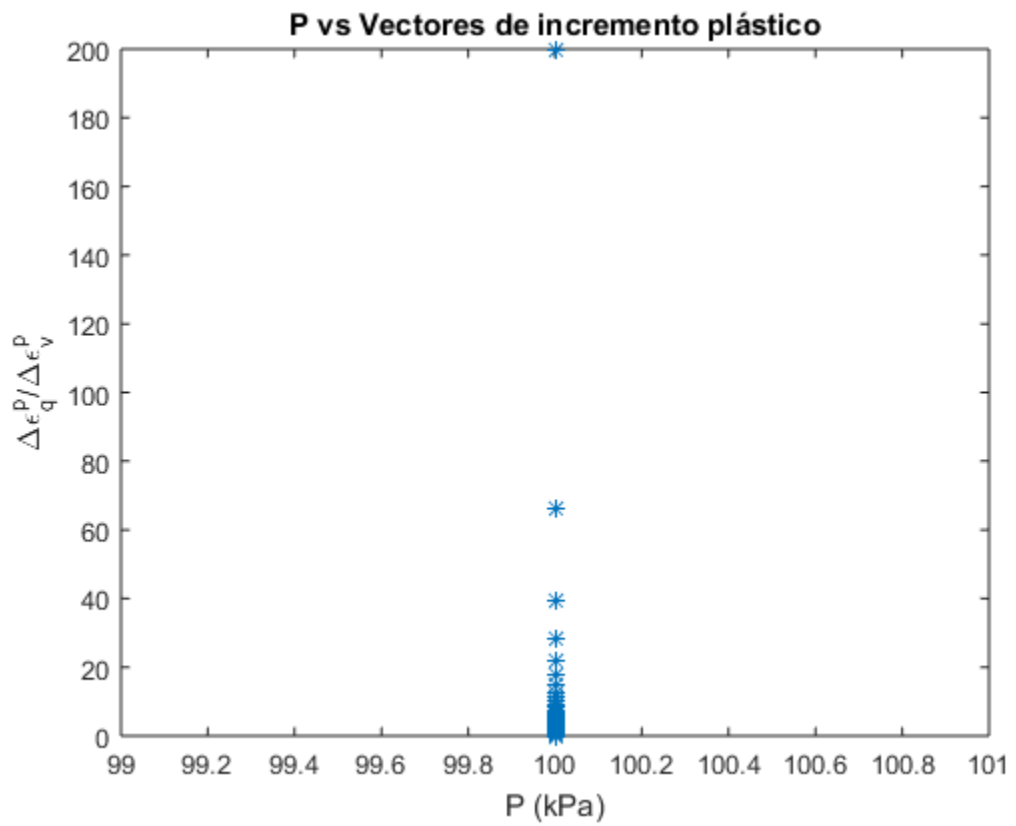
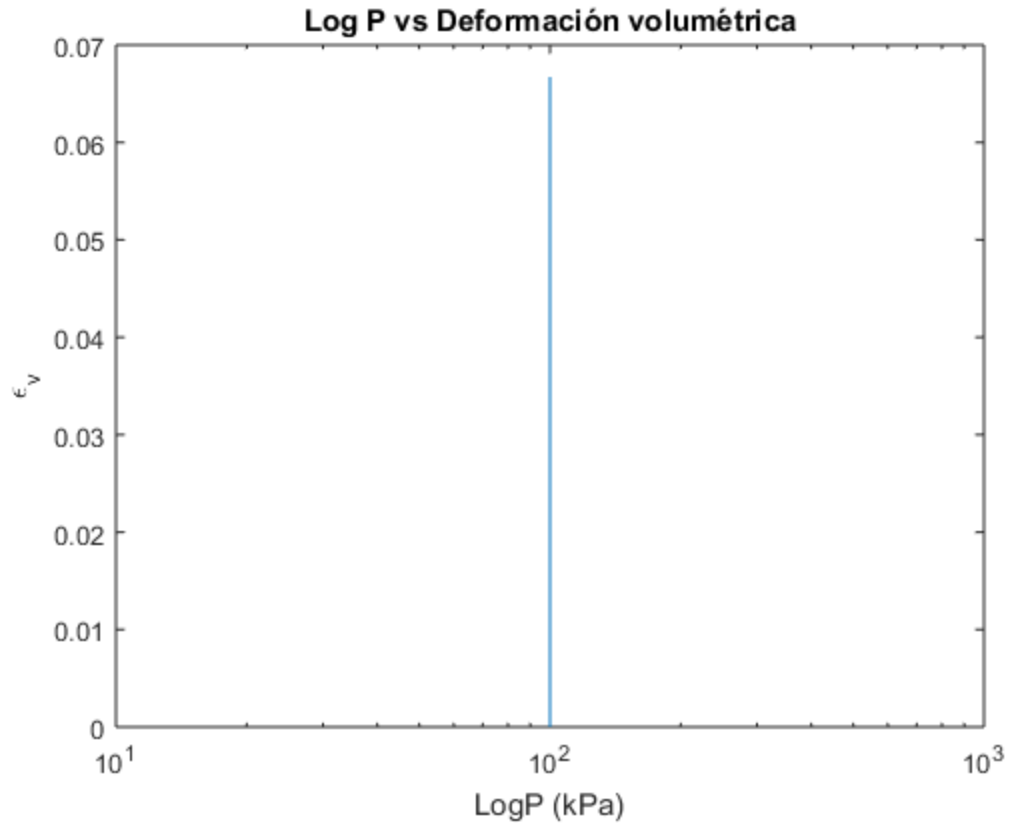
%TRAYECTORIA p'-q
figure(4)
plot(PUNTOS_P,PUNTOS_q)
text(160,150,'ensayo')
title('Trayectoria p-q')
xlabel('p (kPa)')
ylabel('q (kPa)')

%GRAFICA LogP-DEFORMACIÓN VOLUMETRICA
figure(5)
semilogx(PUNTOS_P,def_volumetrica)
title('Log P vs Deformación volumétrica')
xlabel('LogP (kPa)')
ylabel('\epsilon_v')

%GRAFICA P-VECTORES DE INCREMENTO PLÁSTICO
figure(6)
plot(PUNTOS_P,incrementos_plasticos,'*')
title('P vs Vectores de incremento plástico')
xlabel('P (kPa)')
ylabel('\Delta\epsilon_q^p/\Delta\epsilon_v^p')
```







## **ANEXO 2**

---

```

clear
%PROGRAMA PARA EL CALCULO DE DEFORMACIONES CON MODELO BARCELONA BÁSICO
  (BBM)
%MÁSTER EN INGENIERÍA DEL TERRENO E INGENIERÍA SÍSMICA

%
%-----
%CARGA DE LOS PÁRAMETROS DE MODELO BÁSICO DE BARCELONA

PARAMETROS=xlsread('PARAMETROSBBM','EJEMPLO_3','C1:C14');
Poi=PARAMETROS(1);           %PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN
  INICIAL EN ESTADO SATURADO
M=PARAMETROS(2);           %PENDIENTE LÍNEA DE ESTADO
  CRÍTICO
LAMBDA_zero=PARAMETROS(3);   %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ PARA
  CAMBIOS DE TENSIÓN DE MEDIA PARA ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_zero=PARAMETROS(4);   %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA
  PARA CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
e_zero=PARAMETROS(5);       %ÍNDICE DE POROS INICIAL
G=PARAMETROS(6);           %MÓDULO DE CORTE
Pc=PARAMETROS(7);          %PRESIÓN DE REFERENCIA
LAMBDA_S=PARAMETROS(8);     %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ PARA CAMBIOS DE
  SUCCIÓN EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_S=PARAMETROS(9);     %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA PARA
  CAMBIOS DE SUCCIÓN
r=PARAMETROS(10);          %PARÁMETRO QUE DEFINE LA RIGIDEZ MÁXIMA DEL
  SUELO
BETA=PARAMETROS(11);        %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL AUMENTO DE LA
  RIGIDEZ DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
k=PARAMETROS(12);          %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL AUMENTO DE LA
  COHESIÓN DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
s_o=PARAMETROS(13);        %PÁRAMETRO DE ENDURECIMIENTO DE LA
  SUPERFICIE DE FLUENCIA POR AUMENTOS DE SUCCIÓN
Pat=PARAMETROS(14);        %PRESIÓN ATMOSFÉRICA
%
%-----
alpha=(M*(M-9)*(M-3)/(9*(6-M)))*(1/1-(KAPPA_zero/LAMBDA_zero));
  %PARAMETRO DE FLUJO NO ASOCIADO DE OHMAKI
%
%-----
%SE CARGA LA TRAYECTORIA (p',q,s)

PUNTOS=xlsread('TRAYECTORIAS','TRAYECTORIA2_EJEMPLO_3');   %CARGA
  LA LISTA DE PUNTOS (p',q y s RESPECTIVAMENTE)
DIMENSION=size(PUNTOS);                                     %INDICA EL
  NÚMERO DE PUNTOS DE LA TRAYECTORIA
NUMPUNTOS=DIMENSION(1);
PUNTOS_p=PUNTOS(:,2);   %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS PUNTOS
  p' (MPa)
PUNTOS_q=PUNTOS(:,3);   %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS PUNTOS q
  (MPa)
PUNTOS_s=PUNTOS(:,4);   %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS PUNTOS s
  (MPa)
%
%-----

```

---



---

```

Po_sati=ones(1,NUMPUNTOS)*Poi;           %CREA EL VECTOR DONDE SE
ALMACENAN LAS PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Po=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR CON LAS PRESIONES DE
PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
S_o=zeros(1,NUMPUNTOS)*s_o;           %CREA EL VECTOR CON LOS VALORES
MÁXIMOS DE SUCCIÓN A LOS QUE HA ESTADO SOMETIDO EL SUELO
F_LAMBDA_s=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR DE PÁRAMETRO DE
RIGIDEZ PARA LA TENSIÓN MEDIA EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
Ps=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR DE AUMENTO DE LA
TENSIÓN MEDIA INDUCIDO POR SUCCIÓN
e=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR DE ÍNDICE DE
POROS
v=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR DE VOLUMEN
ESPECÍFICO
%
%CREACIÓN DE VECTORES AUXILIARES

%VECTORES PARA GRAFICAR SUPERFICIE DE FLUENCIA INICIAL

%CREA UN VECTOR AUXILIAR CON VALORES DE SUCCIÓN PARA GRAFICAR LAS
SUPERFICIES DE FLUENCIA INICIAL Y FINAL

S=linspace(0,0.5,NUMPUNTOS);

%CREA EL VECTOR DE PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
PARA GRAFICAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA INICIAL

Po1=zeros(1,NUMPUNTOS);

%CREA EL VECTOR DEL PÁRAMETRO DE LAMBDA PARA TENSIÓN MEDIA PARA
GRAFICAR SUPERFICIE DE FLUENCIA INICIAL

L_s=zeros(1,NUMPUNTOS);

%VECTORES PARA GRAFICAR SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

%CREA EL VECTOR DE PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
PARA GRAFICAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

Po2=zeros(1,NUMPUNTOS);

%CREA EL VECTOR DEL PÁRAMETRO DE LAMBDA PARA TENSIÓN MEDIA PARA
GRAFICAR SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

L_s2=zeros(1,NUMPUNTOS);

v_dev=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA UN VECTOR AUXILIAR
PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN ESPECÍFICO
Posat=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA UN VECTOR CON LAS PRESIONES
DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
Posat_c=zeros(1,NUMPUNTOS);           %CREA EL VECTOR CON LAS
PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN CORREGIDAS EN ESTADO NO SATURADO
%

```

---

---

```

%SE CREAN LOS VECTORES DE DEFORMACIONES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS,
INDUCIDAS TANTO POR CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA COMO DE SUCCIÓN

delta_def_vol_elastica_p=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
CAMBIOS EN LA TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_elastica_s=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
CAMBIOS DE SUCCIÓN
delta_def_vol_elastica=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR DE
INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
def_vol_elastica=zeros(1,NUMPUNTOS);              %CREA EL VECTOR DE
DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
%-----

delta_def_vol_plastica_p=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_plastica_s=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
CAMBIOS DE SUCCIÓN
delta_def_vol_plastica=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA TOTAL
def_vol_plastica=zeros(1,NUMPUNTOS);              %CREA EL VECTOR DE
DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA TOTAL
%-----

delta_def_volumetrica=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR DE
INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA TOTAL

def_volumetrica=zeros(1,NUMPUNTOS);              %CREA EL VECTOR
DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA
%-----
%SE CREAN LOS VECTORES DE DEFORMACIONES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS DE CORTE

delta_def_corte_elastica=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE ELÁSTICA
delta_def_corte_plastica=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE PLÁSTICA
delta_def_corte=zeros(1,NUMPUNTOS);              %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE TOTAL

def_corte=zeros(1,NUMPUNTOS);                  %CREA EL VECTOR
DE DEFORMACIÓN DE CORTE

incrementos_plasticos=zeros(1,NUMPUNTOS);        %CREA EL VECTOR
DE INCREMENTOS PLÁSTICOS
%-----

%CICLO PARA EL CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN, PÁRAMETRO
LAMBDA POR AUMENTOS DE TENSIÓN MEDIA Y SUCCIONES MÁXIMAS

for n=1:NUMPUNTOS

```

---

---

```

%CÁLCULO DE VECTORES AUXILIARES PARA GRAFICAR LA SUPERFICIE DE
FLUENCIA INICIAL

%CÁLCULO DEL PARÁMETRO LAMBDA EN FUNCIÓN DE LA SUCCIÓN, PARA GRAFICAR
LA SUPERFICIE DE FLUENCIA INICIAL

L_s(n)=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*S(n))+r));

%CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO,
PARA GRAFICAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA INICIAL

Pol(n)=Pc*((Po_sati(n)/Pc)^((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/(L_s(n)-
KAPPA_zero)));

%
%

%CÁLCULO DEL PARÁMETRO LAMBDA EN FUNCIÓN DE LA SUCCIÓN PARA LA
TRAYECTORIA

F_LAMBDA_s(n)=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*PUNTOS_s(n))+r));

        %CÁLCULO DEL INCREMENTO DE COHESIÓN CON LA SUCCIÓN PARA LA
TRAYECTORIA

Ps(n)=k*PUNTOS_s(n);

        %CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN PARA LA TRAYECTORIA

Po(n)=max((Pc*((Po_sati(n)/Pc)^((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
(F_LAMBDA_s(n)-KAPPA_zero))),... \n
((PUNTOS_q(n)^2)/(M^2)*(PUNTOS_p(n)+Ps(n)))+PUNTOS_p(n));

        %CÁLCULO DE LA SUCCIÓN MÁXIMA PARA LA TRAYECTORIA

S_o(n)=max(s_o,max(PUNTOS_s(1:n)));

        %CALCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN SATURADA

if PUNTOS_s(n)>= S_o(n)

        Posat(n)=max((Pc*((max(Po(1:n)/Pc)^((F_LAMBDA_s(n)-
KAPPA_zero)/(LAMBDA_zero-KAPPA_zero))),... \n
        Posat(n-1)*exp(log((S_o(n)+Pc)/(S_o(n-1)+Pc))*((LAMBDA_S-
KAPPA_S)/(LAMBDA_zero-KAPPA_zero))));
else
        Posat(n)=(Pc*((Po(n)/Pc)^((F_LAMBDA_s(n)-KAPPA_zero)/
(LAMBDA_zero-KAPPA_zero))));
end

        Posat_c(n)=max(Posat(1:n));

```

---

---

```

end

%
%

%CICLO PARA EL CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES ELÁSTICAS Y/O PLÁSTICAS,
  PRODUCIDAS POR INCREMENTOS DE TENSIÓN MEDIA p' (MPa)
%
  DE SUCCIÓN s (MPa) y DESVIADOR q (MPa)

for m=1:NUMPUNTOS-1

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA POR CAMBIOS
    DE TENSIÓN MEDIA

    delta_def_vol_elastica_p(m)=(KAPPA_zero/
    (1+e_zero))*log(PUNTOS_p(m+1)/PUNTOS_p(m));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA POR
    CAMBIOS DE SUCCIÓN

    delta_def_vol_elastica_s(m)=(KAPPA_S/(1+e_zero))*log((PUNTOS_s(m
    +1)+Pat)/(PUNTOS_s(m)+Pat));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA POR
    CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA

    delta_def_vol_plastica_p(m)=((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
    (1+e_zero))*log(Posat_c(m+1)/Posat_c(m));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA POR
    CAMBIOS DE SUCCIÓN

    delta_def_vol_plastica_s(m)=((LAMBDA_S-KAPPA_S)/
    (1+e_zero))*log((S_o(m+1)+Pat)/(S_o(m)+Pat));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA DE
    CORTE

    delta_def_corte_elastica(m)=(PUNTOS_q(m+1)-PUNTOS_q(m))/(3*G);

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA DE
    CORTE

    delta_def_corte_plastica(m)=(((delta_def_vol_plastica_p(m))*(2*(PUNTOS_q(m
    +1)*alpha)))/((M^2)*... \n
    (2*PUNTOS_p(m+1)+Ps(m+1)-Po(m+1)))));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA

    delta_def_vol_elastica(m)=delta_def_vol_elastica_p(m)+delta_def_vol_elastica_s(m)

```

---



---

```

    %CALCULA LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN TOTAL VOLUMÉTRICA Y DE
    CORTE

    %CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

    %delta_def_volumetrica(i
+1)=delta_def_vol_elastica(i)+delta_def_vol_plastica(i);

    %CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN DE CORTE

    %delta_def_corte(i
+1)=delta_def_corte_elastica(i)+delta_def_corte_plastica(i);

%end

%CICLO PARA EL CÁLCULO LOS VECTORES DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA Y DE
CORTE

for j=2:NUMPUNTOS

    %CALCULA EL VECTOR DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

    def_volumetrica(j)=delta_def_volumetrica(j)+def_volumetrica(j-1);

    %CALCULA EL VECTOR DE DEFORMACIÓN DE CORTE

    def_corte(j)=delta_def_corte(j)+def_corte(j-1);

    %CALCULA LA RELACION DE INCREMENTOS PLASTICOS

    incrementos_plasticos(j)=delta_def_volumetrica(j-1)/
delta_def_corte(j-1);

end

%
%

%CICLO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POROS

for d=1:NUMPUNTOS

    v_dev(d)=(def_volumetrica(d)*(1+e_zero));

    %CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POROS

    e(d)=e_zero-v_dev(d);

    %CÁLCULO DE VOLUMEN ESPECÍFICO

    v(d)=e(d)+1;

end

```

---

---

```

%
%

%CICLO PARA CALCULAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

for k=1:NUMPUNTOS
    %CÁLCULO DEL PARÁMETRO LAMBDA EN CONDICIONES NO SATURADAS EN FUNCIÓN
    DE LA SUCCIÓN PARA
    %GRAFICAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

    L_s2(k)=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*S(k))+r));

    %CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO PARA
    GRAFICAR LA SUPERFICIE DE FLUENCIA FINAL

    Po2(k)=Pc*((max(Posat_c)/Pc)^((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/(L_s2(k)-
    KAPPA_zero)));

end

%ELABORACIÓN DE LAS GRAFICAS

%GRÁFICA DE LAS SUPERFICIES DE FLUENCIA INICIAL Y FINAL

figure(1)
plot(Po1,S,'b',PUNTOS_p,PUNTOS_s,'k',Po2,S,'r','Linewidth',1.5)
title('Superficie de Fluencia Inicial, Final y Trayectoria')
xlabel('p(Mpa)')
ylabel('s(MPa)')
legend('LC 1','Trayectoria','LC 2')

%GRÁFICA DE TENSIÓN MEDIA p' (MPa) vs VOLUMEN ESPECIFICO

figure(2)
plot(PUNTOS_p,v,'-', 'Linewidth',1.5)
title('Tensión media vs Volumen específico')
xlabel('p(MPa)')
ylabel('v')
axis([0 0.7 1.60 2])

%GRÁFICA DE DEFORMACIÓN DE CORTE vs SUCCIÓN s (MPa)

figure(3)
plot(def_corte,PUNTOS_s,'Linewidth',1.5)
xlabel('\epsilon_s')
ylabel('s (MPa)')

%GRÁFICA DE DEFORMACIÓN DE CORTE vs DESVIADOR q (MPa)

figure (4)
plot(def_corte,PUNTOS_q,'Linewidth',1.5)
xlabel('\epsilon_s')
ylabel('q (MPa)')

```

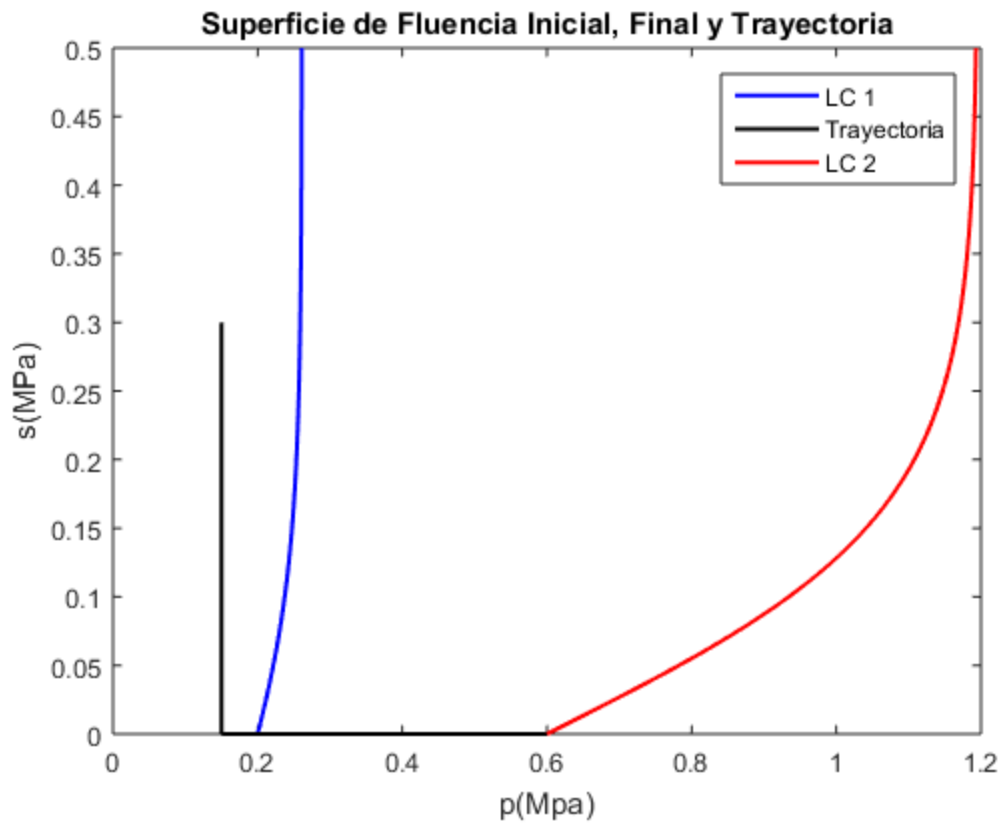
---

---

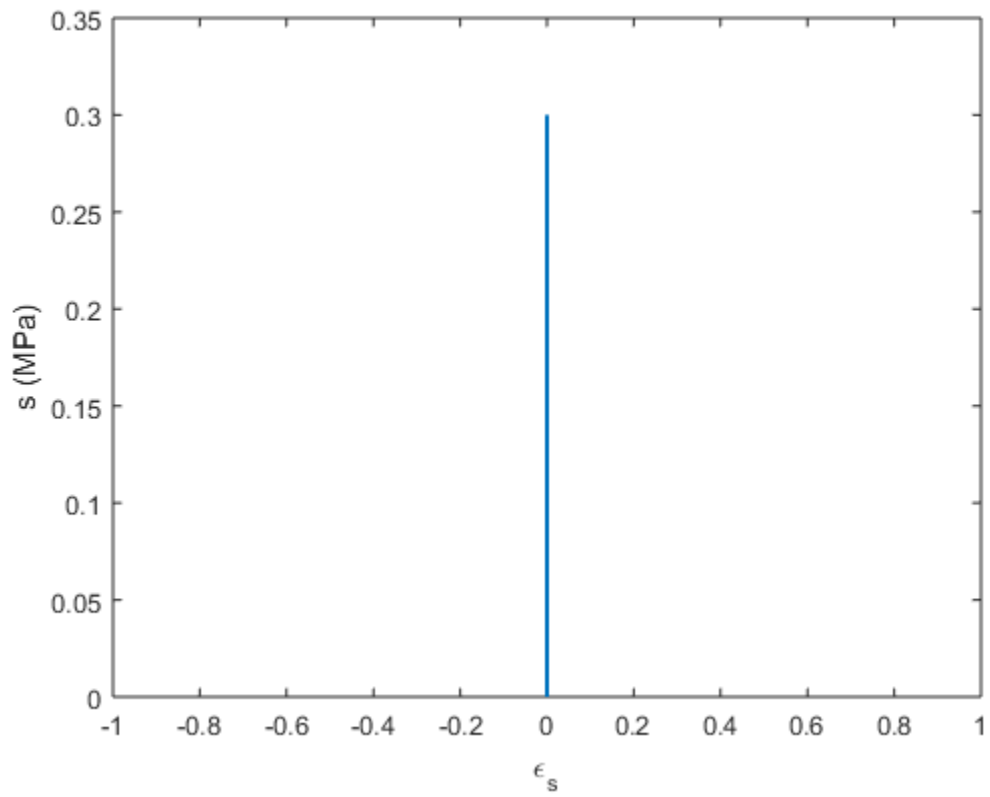
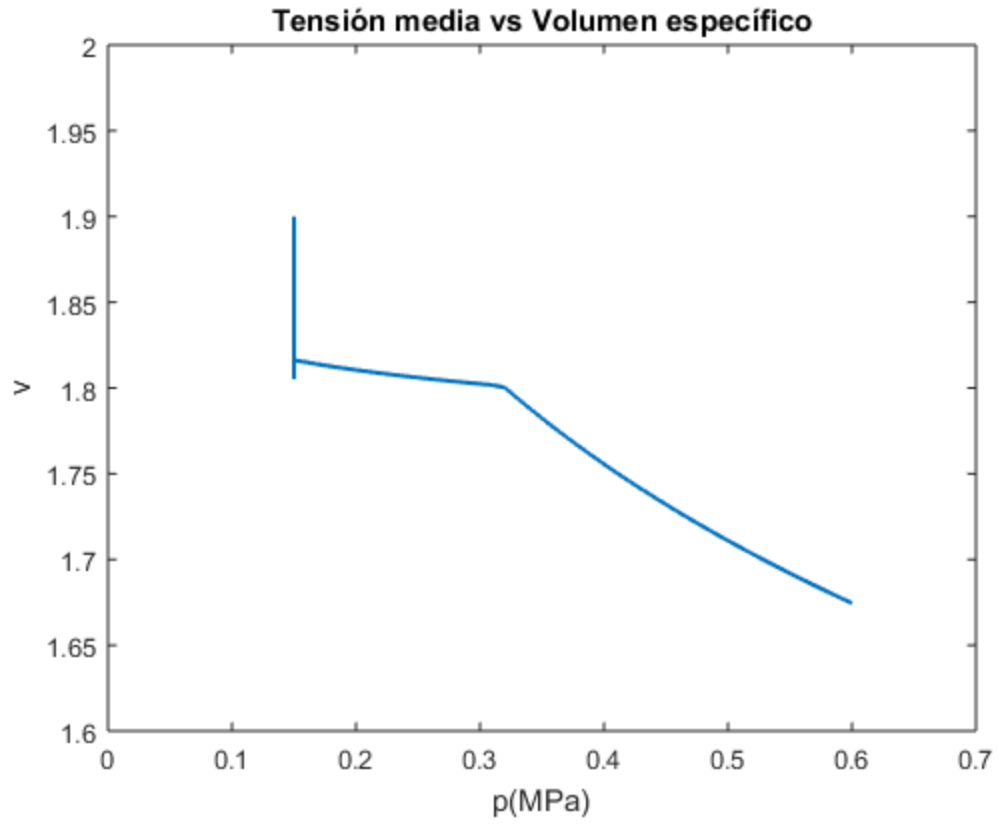
```
%GRÁFICA DE TENSIÓN MEDIA vs INCREMENTOS PLÁSTICOS
```

```
figure(5)  
plot(PUNTOS_p,incrementos_plasticos,'Linewidth',1.5)  
xlabel('p(MPa)')  
ylabel('\Delta\epsilon_q^p/\Delta\epsilon_v^p')
```

```
figure(6)  
plot(def_volumetrica,def_corte,'Linewidth',1.5)  
xlabel('\epsilon_v')  
ylabel('\epsilon_s')
```







## **ANEXO 3**

---

```

clear
%PROGRAMA PARA EL CALCULO DE DEFORMACIONES CON MODELO BARCELONA BÁSICO
  (BBM) Y PARTE HIDRÁULICA CON MODELO VAN GENUCHTEN
%MÁSTER EN INGENIERÍA DEL TERRENO E INGENIERÍA SÍSMICA

%
%-----
%CARGA DE LOS PARÁMETROS DE MODELO BÁSICO DE BARCELONA

PARAMETROS=xlsread('PARAMETROS_WCTE','PARAMETROS_W_CTE_ENSAYO_1','B1:B24');
Poi=PARAMETROS(1); %PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN
  INICIAL EN ESTADO SATURADO
M=PARAMETROS(2); %PENDIENTE LÍNEA DE ESTADO
  CRÍTICO
LAMBDA_zero=PARAMETROS(3); %PARÁMETRO DE RIGIDEZ PARA
  CAMBIOS DE TENSIÓN DE MEDIA PARA ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_zero=PARAMETROS(4); %PARÁMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA
  PARA CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
e_zero=PARAMETROS(5); %ÍNDICE DE POROS INICIAL
G=PARAMETROS(6); %MÓDULO DE CORTE
Pc=PARAMETROS(7); %PRESIÓN DE REFERENCIA
LAMBDA_S=PARAMETROS(8); %PARÁMETRO DE RIGIDEZ PARA
  CAMBIOS DE SUCCIÓN EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_S=PARAMETROS(9); %PARÁMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA
  PARA CAMBIOS DE SUCCIÓN
r=PARAMETROS(10); %PARÁMETRO QUE DEFINE LA
  RIGIDEZ MÁXIMA DEL SUELO
BETA=PARAMETROS(11); %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA RIGIDEZ DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
a=PARAMETROS(12); %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA COHESIÓN DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
b=PARAMETROS(13); %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA COHESIÓN DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
s_o=PARAMETROS(14); %PARÁMETRO DE ENDURECIMIENTO DE
  LA SUPERFICIE DE FLUENCIA POR AUMENTOS DE SUCCIÓN
Pat=PARAMETROS(15); %PRESIÓN ATMOSFÉRICA
gamma_s=PARAMETROS(16); %PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS
gamma_w=PARAMETROS(17); %PESO ESPECÍFICO DEL AGUA
w=PARAMETROS(18); %HUMEDAD INICIAL
lambda_ovg=PARAMETROS(19); %PARÁMETRO DE FORMA VAN
  GENUCHTEN
a_vg=PARAMETROS(20); %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
c_vg=PARAMETROS(21); %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
Po_vg=PARAMETROS(22); %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN

%SE CARGA LA TRAYECTORIA (p)

PUNTOS=xlsread('TRAYECTORIAS_ENSAYOS_COMPRESION','COMPRESION_ENSAYO_1');
  %CARGA LA LISTA DE PUNTOS (p´)
DIMENSION=size(PUNTOS); %INDICA EL
  NÚMERO DE PUNTOS DE LA TRAYECTORIA
NUMPUNTOS=(DIMENSION(1));

```

---

---

```

PUNTOS_p=PUNTOS(:,2);           %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS PUNTOS
    p(MPa)
PUNTOS_q=PUNTOS(:,3);           %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS
    PUNTOS q (MPa)

%
Po_sati=ones(1,NUMPUNTOS)*Poi;   %CREA EL VECTOR DONDE SE
    ALMACENAN LAS PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Po_v=zeros(1,NUMPUNTOS);         %CREA EL VECTOR CON LAS
    PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
F_LAMBDA_s_v=zeros(1,NUMPUNTOS); %CREA EL VECTOR DE PÁRAMETRO
    DE RIGIDEZ PARA LA TENSIÓN MEDIA EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
Ps_v=zeros(1,NUMPUNTOS);         %CREA EL VECTOR DE AUMENTO DE
    LA TENSIÓN MEDIA INDUCIDO POR SUCCIÓN
e_v=zeros(1,NUMPUNTOS);          %CREA EL VECTOR DE ÍNDICE DE
    POROS
v=zeros(1,NUMPUNTOS);            %CREA EL VECTOR DE VOLUMEN
    ESPECÍFICO
phi_v=zeros(1,NUMPUNTOS);        %CREA EL VECTOR DE LA
    POROSIDAD
Sr_v=zeros(1,NUMPUNTOS);         %CREA EL VECTOR DE GRADO DE
    SATURACIÓN AJUSTADO
s_v=zeros(1,NUMPUNTOS);          %CREA EL VECTOR DE SUCCIÓN
    AJUSTADA CON MODELO VAN GENUCHTEN
w_v=zeros(1,NUMPUNTOS);          %CREA EL VECTOR DE HUMEDADES
    AJUSTADAS
%
%SE CREAN LOS VECTORES DE DEFORMACIONES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS,
    INDUCIDAS TANTO POR CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA COMO DE SUCCIÓN

delta_def_vol_elastica_pv=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR
    DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
    CAMBIOS EN LA TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_elastica_sv=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR
    DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
    CAMBIOS DE SUCCIÓN
delta_def_vol_elastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR DE
    INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
def_vol_elastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS);          %CREA EL VECTOR
    DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
%-----
delta_def_vol_plastica_pv=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR
    DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
    CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_plastica_sv=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR
    DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
    CAMBIOS DE SUCCIÓN
delta_def_vol_plastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS-1); %CREA EL VECTOR
    DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA TOTAL
def_vol_plastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS);          %CREA EL VECTOR DE
    DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA TOTAL

```

---

---

```

delta_def_volumetrica_v=zeros(1,NUMPUNTOS-1);           %CREA EL VECTOR
  CON LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA
def_volumetrica=zeros(1,NUMPUNTOS);                     %CREA EL VECTOR
  DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA
%
%
%CÁLCULO DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES

alpha=(M*(M-9)*(M-3)/(9*(6-M)))*(1/1-(KAPPA_zero/LAMBDA_zero));
  %PARAMETRO DE FLUJO NO ASOCIADO DE OHMAKI
Gs=gamma_s/gamma_w;
  %CÁLCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS
phi_zero=e_zero/(1+e_zero);
  %CÁLCULO DE LA POROSIDAD INICIAL
Sr_o=w*Gs/e_zero;
  %CÁLCULO DEL GRADO DE SATURACIÓN INICIAL
s_i=Po_vg*((Sr_o^(-1/lambda_ovg))-1)^(1-lambda_ovg);
  %CÁLCULO DE LA SUCCIÓN INICIAL
incremento=0.01;                                       %CREA EL VALOR DEL INCREMENTO DE TENSIÓN
  MEDIA NETA PARA CADA PASO DE CARGA
%
%ASIGNA LOS VALORES PARA LA PRIMERA POSICIÓN DE LOS VECTORES

Po_sati(1)=Poi;                                       %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
  NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO PARA LA POSICIÓN 1
Po_v(1)=Poi;                                          %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
  NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO PARA LA POSICIÓN 1
F_LAMBDA_s_v(1)=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*s_i)+r); %ALMACENA
  VALOR DE LA FUNCIÓN LAMBDA PARA LA POSICIÓN 1
Ps_v(1)=s_i/(a+b*s_i);                               %ALMACENA EL VALOR DE LA FUNCIÓN Ps PARA
  LA POSICIÓN 1
e_v(1)=e_zero;                                       %ALMACENA EL VALOR DEL ÍNDICE DE POROS
  PARA LA POSICIÓN 1
phi_v(1)=phi_zero;                                   %ALMACENA EL VALOR DE LA POROSIDADPARA LA
  POSICIÓN 1
Sr_v(1)=Sr_o;                                        %ALMACENA EL VALOR DEL GRADO DE SATURACIÓN
  PARA LA POSICIÓN 1
s_v(1)=s_i;                                          %ALMACENA EL VALOR DE LA SUCCIÓN PARA LA
  POSICIÓN 1
w_v(1)=w;                                           %ALMACENA EL VALOR DE LA HUMEDAD PARA LA
  POSICIÓN 1
%
%SE ASIGNAN LOS VALORES EN LAS POSICIONES 1 Y 2 DE LOS VECTORES
  (p,e,Sr y
  %s)PARA REALIZAR EL PRIMER CICLO DE CÁLCULO

p_1=PUNTOS_p(1);                                     %ASIGNA LA POSICIÓN 1 DEL VECTOR DE
  TENSIÓN MEDIA NETA
p_2=PUNTOS_p(2);                                     %ASIGNA LA POSICIÓN 2 DEL VECTOR DE
  TENSIÓN MEDIA NETA

```

---

---

```

s_1=s_i; %ASIGNA EL PRIMER VALOR DE LA SUCCIÓN PARA
LA PRIMERA ITERACIÓN
s_2=s_i;

S_o1=max(s_1,s_o); %ASIGNA LA POSICIÓN 1 DEL VECTOR DE
SUCCIONES MÁXIMAS
S_o2=max(s_1,s_o); %ASIGNA LA POSICIÓN 2 DEL VECTOR DE
SUCCIONES MÁXIMAS

e_1=e_zero; %ASIGNA EL VALOR INICIAL DE ÍNDICE DE
POROS
Posat_1=Poi; %ASIGNA EL VALOR INICIAL DE LA TENSIÓN DE
PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Sr_limite=Sr_o; %INICIALIZA UNA VARIABLE AUXILIAR QUE
CONTROLA LA APARICIÓN DE %GRADOS DE SATURACIÓN SUPERIORES A 1.

error=1; %INICIALIZA LA VARIABLE error DEFINIDA
COMO LA DIFERENCIA ENTRE LA SUCCIÓN %SUPUESTA Y LA SUCCIÓN CALCULADA AL FINAL
DEL %CICLO

%CICLO PARA CALCULAR EL VALOR DE LA SUCCIÓN PARA CALCULAR EL VALOR DE
LA
%SUCCIÓN PARA UNA TRAYECTORIA DE HUMEDAD CONSTANTE

for i=2:NUMPUNTOS

    %CICLO ITERATIVO PARA HALLAR EL VALOR DE LA SUCCIÓN

    while error>0

        %CÁLCULO DEL PARÁMETRO LAMBDA EN FUNCIÓN DE LA SUCCIÓN PARA LA
TRAYECTORIA

        F_LAMBDA_s=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*s_2)+r);

        %CÁLCULO DEL INCREMENTO DE COHESIÓN CON LA SUCCIÓN PARA LA
TRAYECTORIA

        Ps=s_2/(a+b*s_2);

        %CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN PARA LA TRAYECTORIA

        Po=max((Pc*((Posat_1/Pc)^((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
(F_LAMBDA_s-KAPPA_zero))),p_2);

        Posat_2=Pc*(Po/Pc)^((F_LAMBDA_s-KAPPA_zero)/(LAMBDA_zero-
KAPPA_zero));

        %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA POR
CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA

```

---

---

```

    delta_def_vol_elastica_p=(KAPPA_zero/(1+e_zero))*log(p_2/p_1);

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA
    POR CAMBIOS DE SUCCIÓN

    delta_def_vol_elastica_s=(KAPPA_S/(1+e_zero))*log((s_2+Pat)/
(s_1+Pat));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA
    POR CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA

    delta_def_vol_plastica_p=((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
(1+e_zero))*log(Posat_2/Posat_1);

    %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA
    POR CAMBIOS DE SUCCIÓN

    delta_def_vol_plastica_s=((LAMBDA_S-KAPPA_S)/
(1+e_zero))*log((S_o2+Pat)/(S_o1+Pat));

    %CALCULA EL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA

    delta_def_vol_elastica=delta_def_vol_elastica_p
+delta_def_vol_elastica_s;

    %CALCULA DEL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA

    delta_def_vol_plastica=delta_def_vol_plastica_p
+delta_def_vol_plastica_s;

    %CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

    delta_def_volumetrica=delta_def_vol_elastica
+delta_def_vol_plastica;

    %CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POROS

    e_2=e_1-delta_def_volumetrica*(1+e_zero);

    %CÁLCULO DE LA POROSIDAD

    phi_2=e_2/(1+e_2);

    %CÁLCULO DEL GRADO DE SATURACIÓN

    Sr_2=w*Gs/e_2;

    %CONDICIONAL PARA CORREGIR EL GRADO DE SATURACIÓN Y ASEGURAR
    QUE SEA IGUAL O MENOR A UNO (1)

    if abs(Sr_2)<1 && Sr_limite<1

        Sr_2c=Sr_2;

```

---

---

```

else
    Sr_2c=1;
end

%-----
%CÁLCULO DE LA SUCCIÓN Y CONDICIONAL PARA CORREGIR EL VALOR DE
LA SUCCIÓN PARA GRADOS DE
%SATURACIÓN MAYORES A UNO (1)

if Sr_2c<1

    %CÁLCULO DE LA SUCCIÓN CON LA ECUACIÓN DE VAN
    GENUCHTEN

    s_f=(Po_vg*exp(a_vg*(phi_2-phi_zero)))*(((Sr_2c^(-1/
    (lambda_ovg*exp(c_vg*... \n
    (phi_2-phi_zero))))-1)^(1-
    (lambda_ovg*exp(c_vg*(phi_2-phi_zero)))));

    %CÁLCULO DEL ERROR ENTRE LA SUCCIÓN SUPUESTA Y LA
    SUCCIÓN

    %FINAL

    error=round(abs(s_f-s_2),5);

else

    s_f=0;
    error=0;

end

%ASIGNA EL VALOR DE LA SUCCIÓN CALCULADA A LA SUCCIÓN FINAL

s_2=s_f;

%CÁLCULA EL VALOR DE LA HUMEDAD AL FINAL DEL CICLO

w_2=Sr_2c*e_2/Gs;

end

%
%ALMACENAMIENTO DE VARIABLES

Po_sati(i)=Posat_2; %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Po_v(i)=Po; %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
F_LAMBDA_s_v(i)=F_LAMBDA_s; %ALMACENA EL VALOR DE LA FUNCIÓN
LAMBDA PARA CADA PUNTO

```

---



---

```

    Ps_v(i)=Ps;                %ALMACENA EL VALOR DE LA FUNCIÓN Ps
PARA CADA PUNTO
    e_v(i)=e_2;                %ALMACENA EL VALOR DEL ÍNDICE DE POROS
AL FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    phi_v(i)=phi_2;           %ALMACENA EL VALOR DE LA POROSIDAD AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    Sr_v(i)=Sr_2c;            %ALMACENA EL VALOR DEL GRADO DE
SATURACIÓN AL FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    s_v(i)=s_f;                %ALMACENA EL VALOR DE LA SUCCIÓN AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    w_v(i)=w_2;                %ALMACENA EL VALOR DE LA HUMEDAD AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA

```

```

%
%ALMACENAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES CALCULADAS

```

```

%ALMACENAMIENTO DELTAS DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA POR CAMBIOS DE
SUCCIÓN Y
%POR CAMBIO DE TENSIÓN NETA

```

```

delta_def_vol_elastica_pv(i-1)=delta_def_vol_elastica_p;
delta_def_vol_elastica_sv(i-1)=delta_def_vol_elastica_s;
delta_def_vol_elastica_v(i-1)=delta_def_vol_elastica;

```

```

%ALMACENAMIENTO DELTAS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CAMBIOS DE
SUCCIÓN Y
%POR CAMBIO DE TENSIÓN NETA

```

```

delta_def_vol_plastica_pv(i-1)=delta_def_vol_plastica_p;
delta_def_vol_plastica_sv(i-1)=delta_def_vol_plastica_s;
delta_def_vol_plastica_v(i-1)=delta_def_vol_plastica;

```

```

%
%ASIGNACIÓN DE VALORES INICIALES DE TENSIÓN MEDIA NETA PARA EL
SIGUIENTE PASO DE
%CARGA

```

```

    p_1=PUNTOS_p(i);          %ASIGNA LA TENSIÓN MEDIA NETA INICIAL
DEL SIGUIENTE PASO DE CARGA
    p_2=PUNTOS_p(i)+incremento; %ASIGNA LA TENSIÓN MEDIA NETA FINAL
DEL SIGUIENTE PASO DE CARGA

```

```

%ASIGNACIÓN DE VALORES INICIALES DE SUCCIÓN PARA EL SIGUIENTE PASO
DE
%CARGA

```

```

    s_1=s_2;                  %ASIGNA LA SUCCIÓN INICIAL DEL
SIGUIENTE PASO DE CARGA
    s_2=s_f;                  %ASIGNA LA SUCCIÓN SUPUESTA DEL
SIGUIENTE PASO DE CARGA

```

---

```

    e_1=e_2; %ACTUALIZA EL VALOR DEL ÍNDICE DE
POROS PARA EL SIGUIENTE PASO DE CARGA

    Posat_1=max(Po_sati(1:i)); %ACTUALIZA EL VALOR DE LA TENSIÓN
MEDIA NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
    Sr_limite=max(Sr_v(1:i)); %AJUSTA EL GRADO DE SATURACIÓN PARA
EVITAR OSCILACIONES
    error=1; %ACTUALIZA EL VALOR DE LA VARIABLE
error PARA INICIALIZAR EL CICLO

end

%CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

for n=1:NUMPUNTOS-1

    delta_def_volumetrica_v(n
+1)=delta_def_vol_plastica_v(n)+delta_def_vol_elastica_v(n);

end

%CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

    for j=2:NUMPUNTOS

def_volumetrica(j)=delta_def_volumetrica_v(j)+def_volumetrica(j-1);

    end

secado=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','SECADO','A2:D42');
p_BBM=secado(:,1);
s_BBM=secado(:,2);
def_volBBM=secado(:,3);
e_BBM=secado(:,4);

p_total=[p_BBM' PUNTOS_p'];
s_total=[s_BBM' s_v];
def_volumetrica_total=[def_volBBM' def_volumetrica];
e_total=[e_BBM' e_v];

if NUMPUNTOS==139

resultados=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','ENSAYO_1_HUMEDAD','A1:E33');
s_resultados=resultados(:,1);
p_resultados=resultados(:,2);
def_volumetrica_resultados=resultados(:,3);
Sr_resultados=resultados(:,4);
e_resultados=resultados(:,5);

```

---

---

```

s_resultados_wcte=s_resultados(9:33);
Sr_resultados_wcte=Sr_resultados(9:33);
p_resultados_wcte=p_resultados(9:33);

else

resultados=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','ENSAYO_2_HUMEDAD','A1:E46');
s_resultados=resultados(:,1);
p_resultados=resultados(:,2);
def_volumetrica_resultados=resultados(:,3);
Sr_resultados=resultados(:,4);
e_resultados=resultados(:,5);
s_resultados_wcte=s_resultados(16:46);
Sr_resultados_wcte=Sr_resultados(16:46);
p_resultados_wcte=p_resultados(16:46);

end

figure(1)
plot(Sr_v,s_v,Sr_resultados_wcte,s_resultados_wcte,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('S_r')
ylabel('s(MPa)')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','Best')
legend('boxoff')
box off
%axis([0.40 0.90 0.0 0.15])

figure(2)
plot(p_total,s_total,p_resultados,s_resultados,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('s (MPa)')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
box off
%axis([0.01 3 0.35 0.6])

figure(3)
plot(PUNTOS_p,Sr_v,p_resultados_wcte,Sr_resultados_wcte,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('S_r')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
%axis([0.01 10 0.5 0.9])
box off

figure(4)
plot(s_total,def_volumetrica_total,s_resultados,def_volumetrica_resultados,'d','Li
xlabel('s(MPa)')
ylabel('\epsilon_v')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
%axis([0.20 0.55 0 0.15])

```

---

```

figure(5)
plot(p_total,def_volumetrica_total,p_resultados,def_volumetrica_resultados,'d','Li
xlabel('p(MPa)')
ylabel('\epsilon_v')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
%axis([0.01 10 0 0.15])

```

```

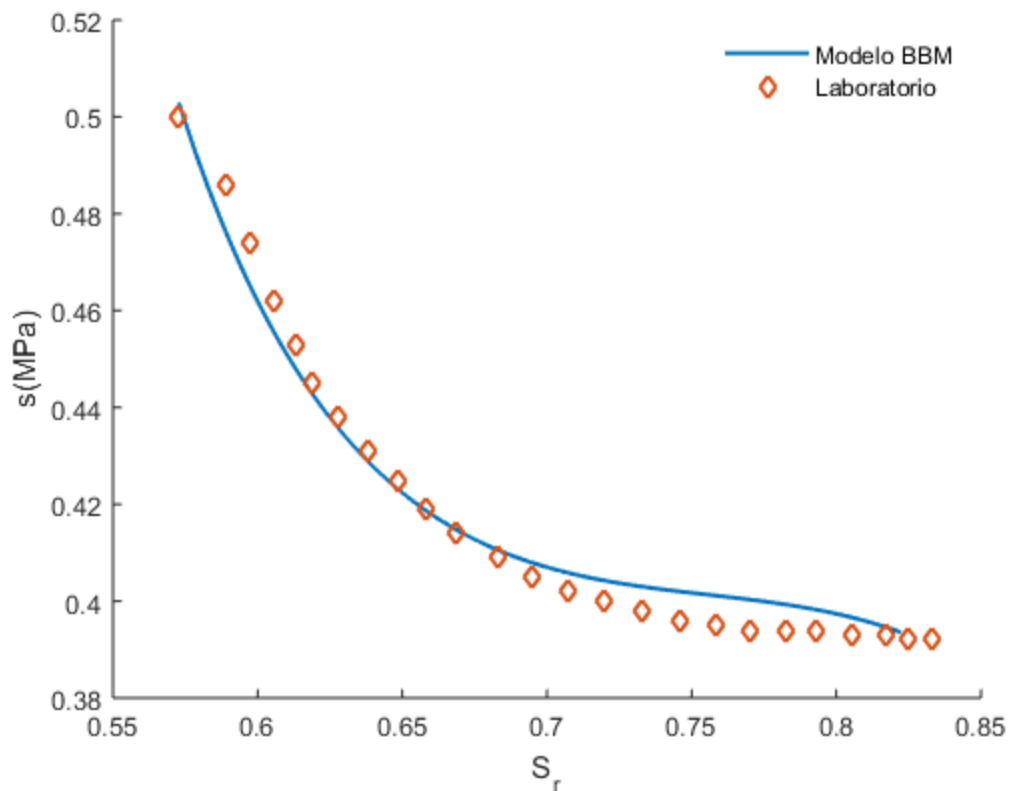
figure(6)
plot(p_total,e_total,p_resultados,e_resultados,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('e')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','Best')
legend('boxoff')

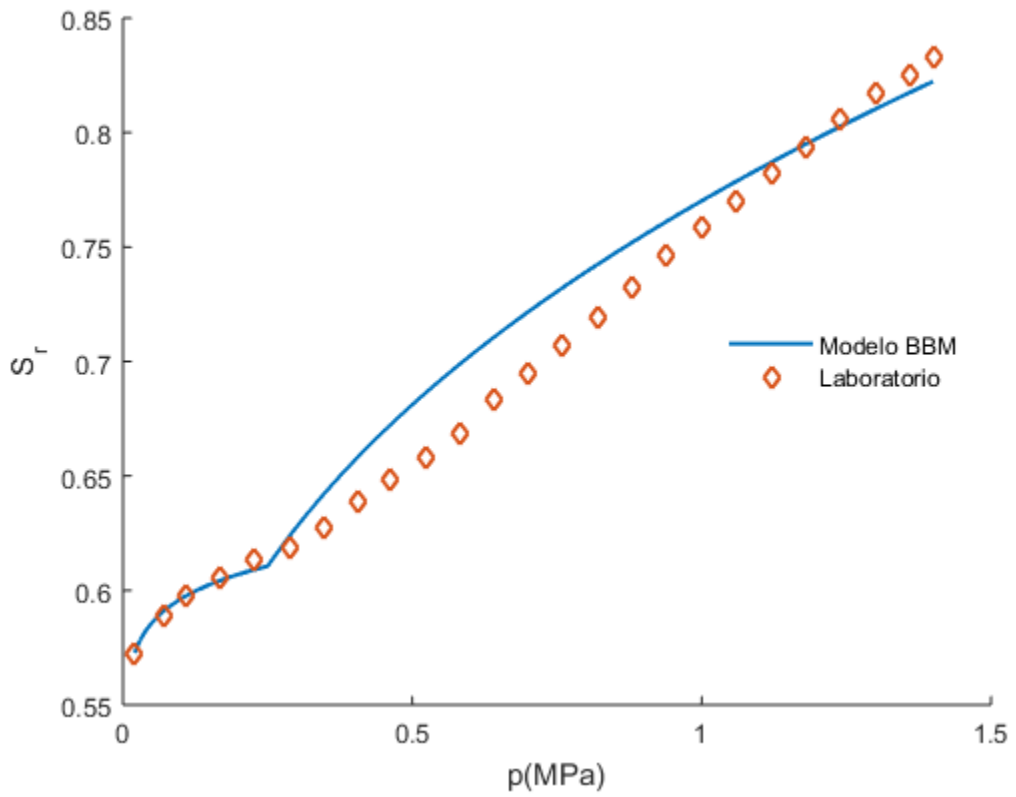
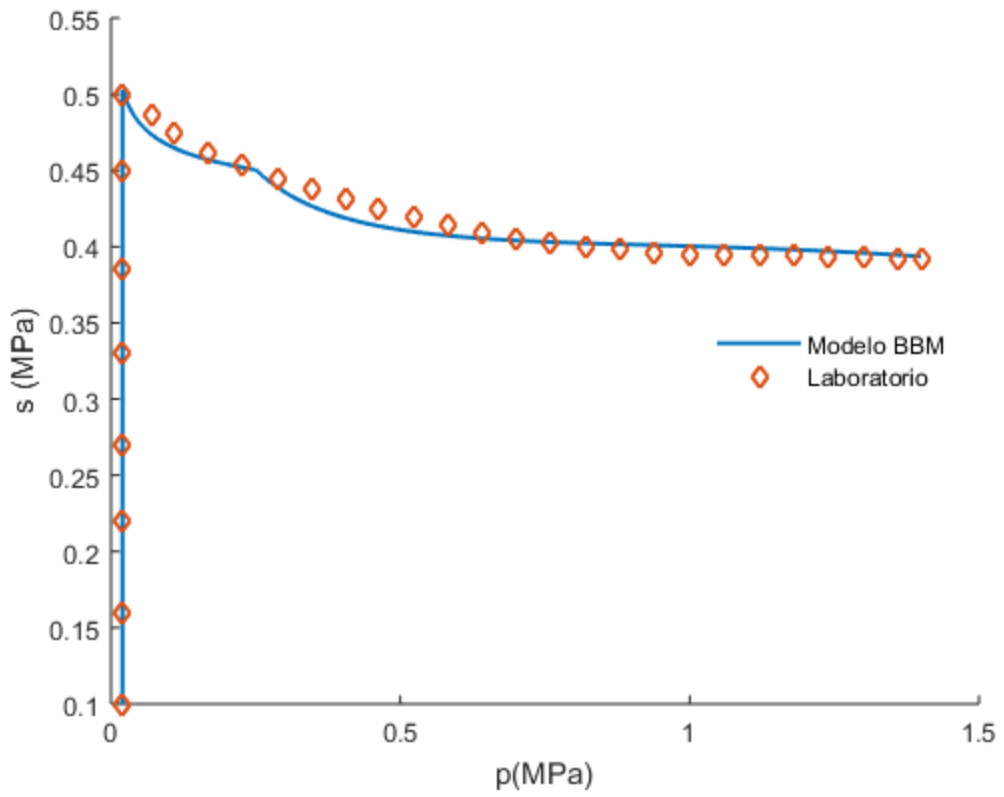
```

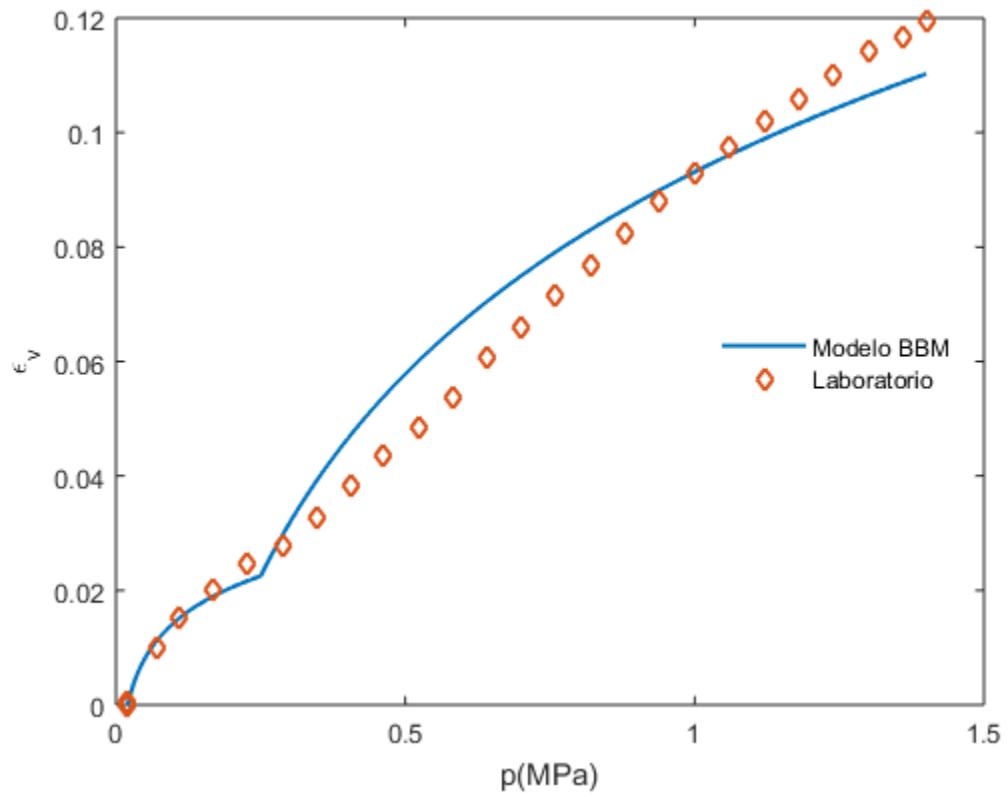
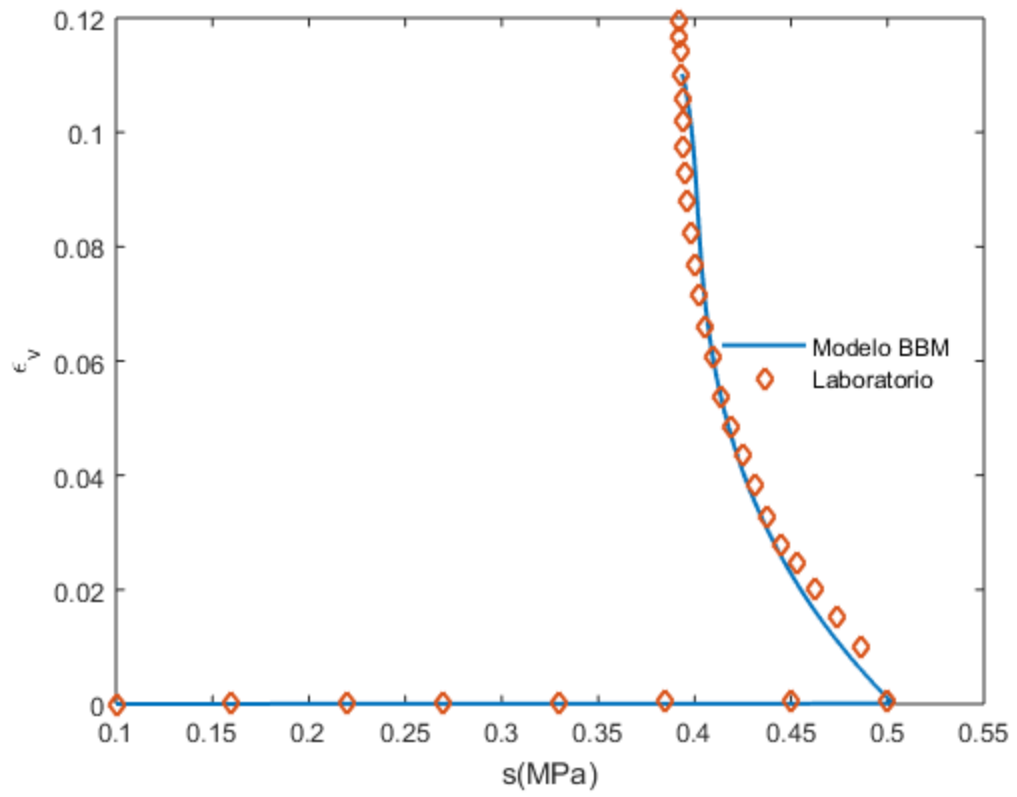
```

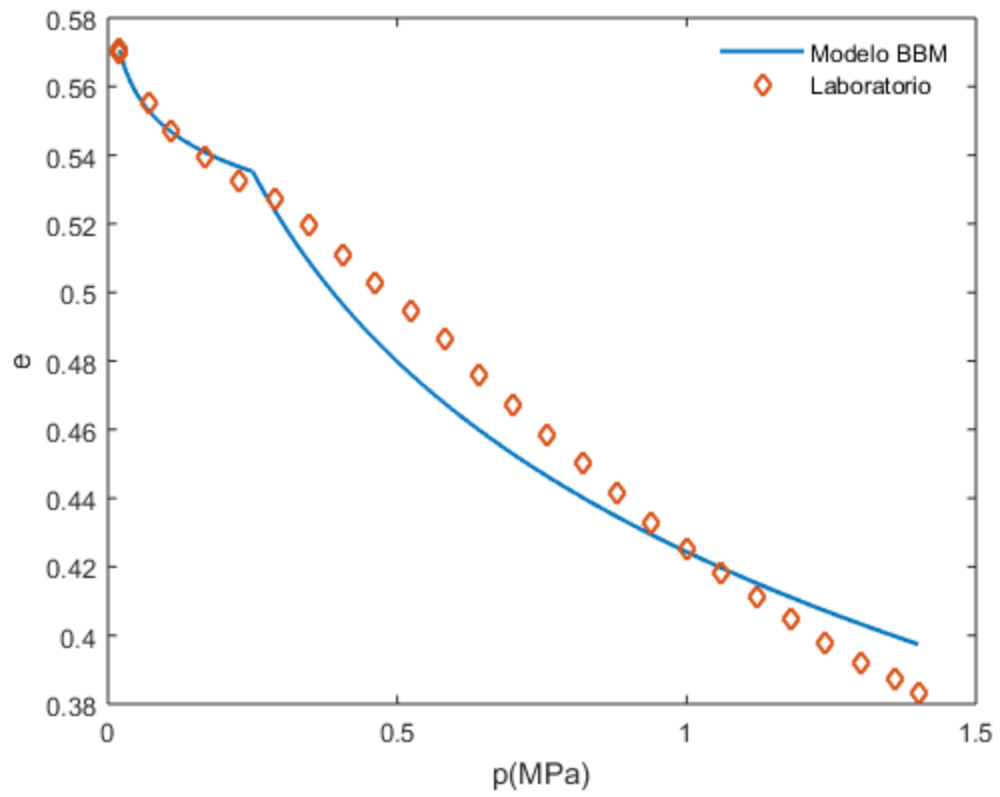
%figure(7)
%plot3(PUNTOS_p,s_v,PUNTOS_q,'LineWidth',1.5)
%xlabel('p(MPa)')
%ylabel('s(MPa)')
%zlabel('q (MPa)')
%grid on

```









*Published with MATLAB® R2015a*

## **ANEXO 4**



---

```

clear
%PROGRAMA PARA EL CALCULO DE DEFORMACIONES CON MODELO BARCELONA BÁSICO
  (BBM) Y PARTE HIDRÁULICA CON MODELO VAN GENUCHTEN MODIFICADO
%MÁSTER EN INGENIERÍA DEL TERRENO E INGENIERÍA SÍSMICA

%
%-----
%CARGA DE LOS PARÁMETROS DE MODELO BÁSICO DE BARCELONA

PARAMETROS=xlsread('PARAMETROS_WCTE','PARAMETROS_W_CTE_FBX_ENSAYO_2','B1:B24');
Poi=PARAMETROS(1);           %PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN
  INICIAL EN ESTADO SATURADO
M=PARAMETROS(2);           %PENDIENTE LÍNEA DE ESTADO
  CRÍTICO
LAMBDA_zero=PARAMETROS(3);   %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ PARA
  CAMBIOS DE TENSIÓN DE MEDIA PARA ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_zero=PARAMETROS(4);   %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA
  PARA CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
e_zero=PARAMETROS(5);       %ÍNDICE DE POROS INICIAL
G=PARAMETROS(6);           %MÓDULO DE CORTE
Pc=PARAMETROS(7);          %PRESIÓN DE REFERENCIA
LAMBDA_S=PARAMETROS(8);     %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ PARA
  CAMBIOS DE SUCCIÓN EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
KAPPA_S=PARAMETROS(9);     %PÁRAMETRO DE RIGIDEZ ELÁSTICA
  PARA CAMBIOS DE SUCCIÓN
r=PARAMETROS(10);          %PARÁMETRO QUE DEFINE LA
  RIGIDEZ MÁXIMA DEL SUELO
BETA=PARAMETROS(11);        %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA RIGIDEZ DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
a=PARAMETROS(12);          %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA COHESIÓN DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
b=PARAMETROS(13);          %PARÁMETRO QUE CONTROLA EL
  AUMENTO DE LA COHESIÓN DEL SUELO CON LA SUCCIÓN
s_o=PARAMETROS(14);        %PÁRAMETRO DE ENDURECIMIENTO DE
  LA SUPERFICIE DE FLUENCIA POR AUMENTOS DE SUCCIÓN
Pat=PARAMETROS(15);        %PRESIÓN ATMOSFÉRICA
gamma_s=PARAMETROS(16);    %PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS
gamma_w=PARAMETROS(17);    %PESO ESPECÍFICO DEL AGUA
w=PARAMETROS(18);          %HUMEDAD INICIAL
lambda_ovg=PARAMETROS(19); %PARÁMETRO DE FORMA VAN
  GENUCHTEN
a_vg=PARAMETROS(20);       %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
c_vg=PARAMETROS(21);       %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
Po_vg=PARAMETROS(22);      %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
Pd=PARAMETROS(23);         %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN
lambda_d=PARAMETROS(24);   %PARÁMETRO DE VAN GENUCHTEN

%SE CARGA LA TRAYECTORIA (p)

PUNTOS=xlsread('TRAYECTORIAS_ENSAYOS_COMPRESION','COMPRESION_ENSAYO_2');
  %CARGA LA LISTA DE PUNTOS (p´)

```

---

---

```

DIMENSION=size(PUNTOS);                                %INDICA EL
  NÚMERO DE PUNTOS DE LA TRAYECTORIA
NUMPUNTOS=(DIMENSION(1));
PUNTOS_p=PUNTOS(:,2);                                %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS PUNTOS
  p'(MPa)
PUNTOS_q=PUNTOS(:,3);                                %CREA EL VECTOR CON TODOS LOS
  PUNTOS q (MPa)

%

```

---

```

Po_sati=ones(1,NUMPUNTOS)*Poi;                        %CREA EL VECTOR DONDE SE
  ALMACENAN LAS PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Po_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR CON LAS
  PRESIONES DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
F_LAMBDA_s_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                    %CREA EL VECTOR DE PÁRAMETRO
  DE RIGIDEZ PARA LA TENSIÓN MEDIA EN ESTADO VIRGEN DEL SUELO
Ps_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR DE AUMENTO DE
  LA TENSIÓN MEDIA INDUCIDO POR SUCCIÓN
e_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR DE ÍNDICE DE
  POROS
v=zeros(1,NUMPUNTOS);                                %CREA EL VECTOR DE VOLUMEN
  ESPECÍFICO
phi_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                            %CREA EL VECTOR DE LA
  POROSIDAD
Sr_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR DE GRADO DE
  SATURACIÓN AJUSTADO
s_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR DE SUCCIÓN
  AJUSTADA CON MODELO VAN GENUCHTEN
w_v=zeros(1,NUMPUNTOS);                              %CREA EL VECTOR DE HUMEDADES
  AJUSTADAS
%

```

---

```

%SE CREAN LOS VECTORES DE DEFORMACIONES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS,
  INDUCIDAS TANTO POR CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA COMO DE SUCCIÓN

delta_def_vol_elastica_pv=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
  DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
  CAMBIOS EN LA TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_elastica_sv=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
  DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA CAUSADA POR
  CAMBIOS DE SUCCIÓN
delta_def_vol_elastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR DE
  INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
def_vol_elastica_v=zeros(1,NUMPUNTOS);              %CREA EL VECTOR
  DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA TOTAL
%-----

```

---

```

delta_def_vol_plastica_pv=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
  DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
  CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA
delta_def_vol_plastica_sv=zeros(1,NUMPUNTOS-1);      %CREA EL VECTOR
  DE INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA PRODUCIDA POR
  CAMBIOS DE SUCCIÓN

```

---



---

```

Sr_v(1)=Sr_o;           %ALMACENA EL VALOR DEL GRADO DE SATURACIÓN
  PARA LA POSICIÓN 1
s_v(1)=s_i;           %ALMACENA EL VALOR DE LA SUCCIÓN PARA LA
  POSICIÓN 1
w_v(1)=w;             %ALMACENA EL VALOR DE LA HUMEDAD PARA LA
  POSICIÓN 1

%
%SE ASIGNAN LOS VALORES EN LAS POSICIONES 1 Y 2 DE LOS VECTORES
  (p,e,Sr y
%s)PARA REALIZAR EL PRIMER CICLO DE CÁLCULO

p_1=PUNTOS_p(1);      %ASIGNA LA POSICIÓN 1 DEL VECTOR DE
  TENSIÓN MEDIA NETA
p_2=PUNTOS_p(2);      %ASIGNA LA POSICIÓN 2 DEL VECTOR DE
  TENSIÓN MEDIA NETA

s_1=s_i;              %ASIGNA EL PRIMER VALOR DE LA SUCCIÓN PARA
  LA PRIMERA ITERACIÓN
s_2=s_i;

S_o1=max(s_1,s_o);    %ASIGNA LA POSICIÓN 1 DEL VECTOR DE
  SUCCIONES MÁXIMAS
S_o2=max(s_1,s_o);    %ASIGNA LA POSICIÓN 2 DEL VECTOR DE
  SUCCIONES MÁXIMAS

e_1=e_zero;          %ASIGNA EL VALOR INICIAL DE ÍNDICE DE
  POROS
Posat_1=Poi;          %ASIGNA EL VALOR INICIAL DE LA TENSIÓN DE
  PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
Sr_limite=Sr_o;       %INICIALIZA UNA VARIABLE AUXILIAR QUE
  CONTROLA LA APARICIÓN DE
                                     %GRADOS DE SATURACIÓN SUPERIORES A 1.

error=1;              %INICIALIZA LA VARIABLE error DEFINIDA
  COMO LA DIFERENCIA ENTRE LA SUCCIÓN
                                     %SUPUESTA Y LA SUCCIÓN CALCULADA AL FINAL
  DEL
                                     %CICLO

%CICLO PARA CALCULAR EL VALOR DE LA SUCCIÓN PARA CALCULAR EL VALOR DE
  LA
%SUCCIÓN PARA UNA TRAYECTORIA DE HUMEDAD CONSTANTE

for i=2:NUMPUNTOS

    %CICLO ITERATIVO PARA HALLAR EL VALOR DE LA SUCCIÓN

    while error>0

        %CÁLCULO DEL PARÁMETRO LAMBDA EN FUNCIÓN DE LA SUCCIÓN PARA LA
        TRAYECTORIA

        F_LAMBDA_s=LAMBDA_zero*((1-r)*exp(-BETA*s_2)+r));

```

---

---

```

        %CÁLCULO DEL INCREMENTO DE COHESIÓN CON LA SUCCIÓN PARA LA
        TRAYECTORIA

        Ps=s_2/(a+b*s_2);

        %CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN PARA LA TRAYECTORIA

        Po=max((Pc*((Posat_1/Pc)^((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
        (F_LAMBDA_s-KAPPA_zero))))),p_2);

        Posat_2=Pc*(Po/Pc)^((F_LAMBDA_s-KAPPA_zero)/(LAMBDA_zero-
        KAPPA_zero));

        %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA POR
        CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA

        delta_def_vol_elastica_p=((KAPPA_zero/(1+e_zero))*log(p_2/
        p_1));

        %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA
        POR CAMBIOS DE SUCCIÓN

        delta_def_vol_elastica_s=((KAPPA_S/(1+e_zero))*log((s_2+Pat)/
        (s_1+Pat)));

        %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA
        POR CAMBIOS DE TENSIÓN MEDIA

        delta_def_vol_plastica_p=((LAMBDA_zero-KAPPA_zero)/
        (1+e_zero))*log(Posat_2/Posat_1);

        %CALCULA EL INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA
        POR CAMBIOS DE SUCCIÓN

        delta_def_vol_plastica_s=((LAMBDA_S-KAPPA_S)/
        (1+e_zero))*log((S_o2+Pat)/(S_o1+Pat)));

        %CALCULA EL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA ELÁSTICA

        delta_def_vol_elastica=delta_def_vol_elastica_p
        +delta_def_vol_elastica_s;

        %CALCULA DEL INCREMENTO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA PLÁSTICA

        delta_def_vol_plastica=delta_def_vol_plastica_p
        +delta_def_vol_plastica_s;

        %CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

        delta_def_volumetrica=delta_def_vol_elastica
        +delta_def_vol_plastica;

```

---

---

```

%CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POROS
e_2=real(e_1-delta_def_volumetrica*(1+e_zero));

%CÁLCULO DE LA POROSIDAD
phi_2=e_2/(1+e_2);

%CÁLCULO DEL GRADO DE SATURACIÓN
Sr_2=(w*Gs/e_2);

%CONDICIONAL PARA CORREGIR EL GRADO DE SATURACIÓN Y ASEGURAR
QUE SEA IGUAL O MENOR A UNO (1)

    if abs(Sr_2)<1 && Sr_limite<1

        Sr_2c=Sr_2;
    else

        Sr_2c=1;

    end

%-----
%CÁLCULO DE LA SUCCIÓN Y CONDICIONAL PARA CORREGIR EL VALOR DE
LA SUCCIÓN PARA GRADOS DE
%SATURACIÓN MAYORES A UNO (1)

    if Sr_2c<1

        %CÁLCULO DE LA SUCCIÓN CON LA ECUACIÓN DE VAN
GENUCHTEN

        syms s %SE DECLARA VARIABLE
SIMBOLICA s PARA PODER REALIZAR EL CÁLCULO

        %CÁLCULO DE LA SUCCIÓN CORRESPONDIENTE AL GRADO DE
SATURACIÓN

        succion=vpasolve((((1+((s/(Po_vg*exp(a_vg*(phi_2-
phi_zero))))^(1/(1-lambda_ovg*exp(c_vg*(phi_2-...\n
phi_zero))))))^(1-lambda_ovg*exp(c_vg*(phi_2-
phi_zero))))*(1-(s/Pd))^lambda_d)==Sr_2c),s,0:1);

        s_f=double(real(succion));

        %CÁLCULO DEL ERROR ENTRE LA SUCCIÓN SUPUESTA Y LA
SUCCIÓN

    %FINAL

```

---

---

```

        error=round(abs(s_f-s_2),5);

    else

        s_f=0;
        error=0;

    end

    %ASIGNA EL VALOR DE LA SUCCIÓN CALCULADA A LA SUCCIÓN FINAL

    s_2=s_f;

    %CÁLCULA EL VALOR DE LA HUMEDAD AL FINAL DEL CICLO

    w_2=Sr_2c*e_2/Gs;

    end

%
%ALMACENAMIENTO DE VARIABLES

    Po_sati(i)=Posat_2;           %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
    Po_v(i)=Po;                 %ALMACENA EL VALOR DE LA TENSIÓN MEDIA
NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO NO SATURADO
    F_LAMBDA_s_v(i)=F_LAMBDA_s; %ALMACENA EL VALOR DE LA FUNCIÓN
LAMBDA PARA CADA PUNTO
    Ps_v(i)=Ps;                 %ALMACENA EL VALOR DE LA FUNCIÓN Ps
PARA CADA PUNTO
    e_v(i)=e_2;                 %ALMACENA EL VALOR DEL ÍNDICE DE POROS
AL FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    phi_v(i)=phi_2;            %ALMACENA EL VALOR DE LA POROSIDAD AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    Sr_v(i)=Sr_2c;             %ALMACENA EL VALOR DEL GRADO DE
SATURACIÓN AL FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA
    s_v(i)=s_f;                %ALMACENA EL VALOR DE LA SUCCIÓN AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE
    w_v(i)=w_2;                %ALMACENA EL VALOR DE LA HUMEDAD AL
FINAL DE CADA INCREMENTO DE CARGA

%
%ALMACENAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES CALCULADAS

    %ALMACENAMIENTO DELTAS DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA POR CAMBIOS DE
SUCCIÓN Y
    %POR CAMBIO DE TENSIÓN NETA

    delta_def_vol_elastica_pv(i-1)=delta_def_vol_elastica_p;
    delta_def_vol_elastica_sv(i-1)=delta_def_vol_elastica_s;
    delta_def_vol_elastica_v(i-1)=delta_def_vol_elastica;

```

---

---

```

    %ALMACENAMIENTO DELTAS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CAMBIOS DE
    SUCCIÓN Y
    %POR CAMBIO DE TENSIÓN NETA

    delta_def_vol_plastica_pv(i-1)=delta_def_vol_plastica_p;
    delta_def_vol_plastica_sv(i-1)=delta_def_vol_plastica_s;
    delta_def_vol_plastica_v(i-1)=delta_def_vol_plastica;

%
%
%ASIGNACIÓN DE VALORES INICIALES DE TENSIÓN MEDIA NETA PARA EL
SIGUIENTE PASO DE
%CARGA

    p_1=PUNTOS_p(i);           %ASIGNA LA TENSIÓN MEDIA NETA INICIAL
    DEL SIGUIENTE PASO DE CARGA
    p_2=PUNTOS_p(i)+incremento; %ASIGNA LA TENSIÓN MEDIA NETA FINAL
    DEL SIGUIENTE PASO DE CARGA

    %ASIGNACIÓN DE VALORES INICIALES DE SUCCIÓN PARA EL SIGUIENTE PASO
    DE
    %CARGA

    s_1=s_2;                   %ASIGNA LA SUCCIÓN INICIAL DEL
    SIGUIENTE PASO DE CARGA
    s_2=s_f;                   %ASIGNA LA SUCCIÓN SUPUESTA DEL
    SIGUIENTE PASO DE CARGA
    e_1=e_2;                   %ACTUALIZA EL VALOR DEL ÍNDICE DE
    POROS PARA EL SIGUIENTE PASO DE CARGA

    Posat_1=max(Po_sati(1:i)); %ACTUALIZA EL VALOR DE LA TENSIÓN
    MEDIA NETA DE PRECONSOLIDACIÓN EN ESTADO SATURADO
    Sr_limite=max(Sr_v(1:i));  %AJUSTA EL GRADO DE SATURACIÓN PARA
    EVITAR OSCILACIONES
    error=1;                   %ACTUALIZA EL VALOR DE LA VARIABLE
    error PARA INICIALIZAR EL CICLO

end

%CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

for n=1:NUMPUNTOS-1

    delta_def_volumetrica_v(n
+1)=delta_def_vol_plastica_v(n)+delta_def_vol_elastica_v(n);

end

%CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

    for j=2:NUMPUNTOS

```

---



---

```

def_volumetrica(j)=delta_def_volumetrica_v(j)+def_volumetrica(j-1);

    end

%resultados=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','ENSAYO_1_HUMEDAD','A1:E46');
%s_resultados=resultados(:,1);
%p_resultados=resultados(:,2);
%def_volumetrica_resultados=resultados(:,3);
%Sr_resultados=resultados(:,4);
%e_resultados=resultados(:,5);
%s_resultados_wcte=s_resultados(9:33);
%Sr_resultados_wcte=Sr_resultados(9:33);
%p_resultados_wcte=p_resultados(9:33);

secado=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','SECADO','A2:D42');
p_BBM=secado(:,1);
s_BBM=secado(:,2);
def_volBBM=secado(:,3);
e_BBM=secado(:,4);

p_total=[p_BBM' PUNTOS_p'];
s_total=[s_BBM' s_v];
def_volumetrica_total=[def_volBBM' def_volumetrica];
e_total=[e_BBM' e_v];

if NUMPUNTOS==139

    resultados=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','ENSAYO_1_HUMEDAD','A1:E33');
    s_resultados=resultados(:,1);
    p_resultados=resultados(:,2);
    def_volumetrica_resultados=resultados(:,3);
    Sr_resultados=resultados(:,4);
    e_resultados=resultados(:,5);
    s_resultados_wcte=s_resultados(9:33);
    Sr_resultados_wcte=Sr_resultados(9:33);
    p_resultados_wcte=p_resultados(9:33);

else

    resultados=xlsread('RESULTADOS_LABORATORIO','ENSAYO_2_HUMEDAD','A1:E46');
    s_resultados=resultados(:,1);
    p_resultados=resultados(:,2);
    def_volumetrica_resultados=resultados(:,3);
    Sr_resultados=resultados(:,4);
    e_resultados=resultados(:,5);
    s_resultados_wcte=s_resultados(16:46);

```

---

---

```

    Sr_resultados_wcte=Sr_resultados(16:46);
    p_resultados_wcte=p_resultados(16:46);

end

figure(1)
plot(Sr_v,s_v,Sr_resultados_wcte,s_resultados_wcte,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('S_r')
ylabel('s(MPa)')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','Best')
legend('boxoff')
box off

figure(2)
plot(p_total,s_total,p_resultados,s_resultados,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('s (MPa)')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
box off

figure(3)
plot(PUNTOS_p,Sr_v,p_resultados_wcte,Sr_resultados_wcte,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('S_r')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')
box off

figure(4)
plot(s_total,def_volumetrica_total,s_resultados,def_volumetrica_resultados,'d','Li
xlabel('s(MPa)')
ylabel('\epsilon_v')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')

figure(5)
plot(p_total,def_volumetrica_total,p_resultados,def_volumetrica_resultados,'d','Li
xlabel('p(MPa)')
ylabel('\epsilon_v')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','East')
legend('boxoff')

figure(6)
plot(p_total,e_total,p_resultados,e_resultados,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('p(MPa)')
ylabel('e')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','Best')
legend('boxoff')

```

---

```
figure(7)
plot(s_total,e_total,s_resultados,e_resultados,'d','LineWidth',1.5)
xlabel('s(MPa)')
ylabel('e')
legend('Modelo BBM','Laboratorio','Location','Best')
```

