

# **Maestría en Ingeniería Civil**

**Modelación física de la capacidad portante de cimentaciones superficiales considerando el efecto del clima.**

**Diego Julián Martínez Suarez**

**Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019**



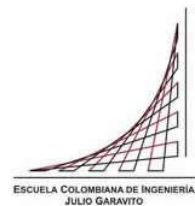
**Modelación física de la capacidad portante de cimentaciones superficiales considerando el efecto del clima.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia.**

**Catalina Lozada López**

**Directora**

**Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019**



La tesis de maestría titulada “**Modelación física de la capacidad portante de cimentaciones superficiales considerando el efecto del clima**”, presentada por Diego Julian Martínez Suarez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.

Director de la tesis  
Catalina Lozada López  
Jurado  
Fabián René Álvarez Sierra  
Jurado  
Lina Ximena Garzón Ávila

Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019

## Dedicatoria

A mi familia que siempre me apoyado en todos los momentos difíciles y en especial a mi abuela María Teresa que siempre ha creído en mí y sin su apoyo nada de esto lo hubiera podido logrado.

## Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a la ingeniera Catalina Lozada por su acompañamiento y sus conocimientos, ya que por ellos se elaboró este gran trabajo con su gran esfuerzo. Este trabajo no habría sido posible sin su guía.

Agradecer a los laboratoristas Marco Contreras y Osmar Tolosa por haber apoyado diversas actividades y al estudiante de maestría Andrés Mejía que realizamos un buen trabajo en conjunto. A la Escuela Colombiana de Ingeniería por haberme permitido ser parte de su equipo.

## Resumen

En los últimos años se han estudiado diversas formas para cuantificar la capacidad portante de los suelos, pero no se cuenta con una teoría sólida que mantenga todas las variables que involucran la resistencia del suelo incluyendo el efecto de la parcial saturación. Durante la última década se ha seguido utilizando la teoría clásica de Terzaghi (1945) para suelos totalmente saturados, donde se puede evaluar la capacidad máxima del suelo. Para incluir el efecto de la saturación parcial del suelo, se han desarrollado formulaciones teóricas para suelos parcialmente saturados como la de Bishop (1959) donde se evalúa la interfaz aire-agua. Aproximaciones más recientes como las de (Costa, Cintra, & Zornberg, 2003; S. Y. Oloo, Fredlund, & Gan, 1997; Vanapalli & Mohamed, 2007), incluyen la succión para describir la resistencia al corte.

En el presente trabajo de grado se realizó inicialmente una revisión teórica de las formulaciones existentes para evaluar la capacidad portante de suelos parcialmente saturados, así como de los métodos disponibles para poder evaluar la succión y los parámetros de resistencia al corte en condición de parcial saturación. Posteriormente se realizaron modelaciones físicas de capacidad portante de una cimentación superficial en el suelo de Bogotá para diferentes grados de saturación. Lo anterior con el fin de relacionar los resultados de los ensayos a escala reducida con los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) mediante ensayos corte directo en el suelo blando natural. Los contenidos de humedad utilizados en los modelos fueron 49%, 27% y 23%. Posteriormente, se elaboró el mismo procedimiento con muestras reconstituidas del mismo suelo donde se realizaron modelos físicos para muestras compactadas y con diferentes contenidos de humedad 34%, 28% y 24%.

El suelo usado se caracterizó de acuerdo con las especificaciones INVIAS 2013 y se utilizaron procedimientos experimentales propuestos por (Oh & Vanapalli, 2013; Sáez & Escario, 1986) para evaluar los parámetros de resistencia en suelos naturales. Se comprobó que el cambio de humedad influencia directamente a la resistencia al corte, aumentando la succión del suelo y la capacidad portante hasta 1000%.

Palabras clave: succión, capacidad portante, resistencia al corte no drenado, suelo parcialmente no saturado

## **Abstract**

In recent years, different ways to quantify the bearing capacity of soils have been studied, but there is no solid theory that considers all the variables that influence soil shear resistance, including the effect of partial saturation. During the last decade, the classical theory of Terzaghi (1945) has continued to be used for saturated soils, where the maximum soil capacity can be evaluated. To include the effect of partial saturation, theoretical formulations have been developed for partially saturated soils such as Bishop's (1959), where the air-water interface is evaluated. More recent approaches such as those of Costa, Cintra, & Zornberg (2003), S. Y. Oloo, Fredlund, & Gan (1997), Vanapalli & Mohamed (2007), include suction to describe shear resistance.

In the present document, a theoretical review of the existing formulations to evaluate the bearing capacity of partially saturated soils is presented initially, as well as of the available methods to evaluate the suction and the parameters of shear resistance in condition of partial saturation. Subsequently, a physical modeling of the bearing capacity of a shallow foundation in Bogotá soil, for different degrees of saturation, was performed. The above in order to relate the results of these tests on a reduced scale with the parameters of shear resistance (cohesion and internal friction angle) obtained by direct shear tests on the natural soft soil. The moisture contents used in the models were 49%, 27% and 23%. Finally, the same procedure was used with reconstituted samples of the same soil where physical models were made for compacted samples and with different moisture contents (34%, 28% and 24%).

The soil used was characterized according to INVIAS 2013 specifications and experimental procedures proposed by Oh & Vanapalli (2013) and Sáez & Escario (1986) were used to evaluate the resistance parameters in natural soils. It was found that the change in moisture directly influences the shear strength, increasing soil suction and bearing capacity up to 1000%.

Keywords: suction, bearing capacity, undrained shear resistance, partially saturated soil

## Tabla de Contenido

<b>Resumen</b> .....	6
<b>Abstract</b> .....	7
1. Introducción.....	15
2. Problema de investigación .....	16
2.1. Planteamiento del problema .....	16
2.2. Objetivos de la Investigación .....	17
2.1. Objetivo general.....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
2.3. Metodología .....	18
3. Marco Teórico .....	21
3.1. Teoría de succión matricial, total y osmótica. ....	21
3.2. Técnicas de medición de succión métodos directos y no directos .....	22
3.2.1. Métodos directos.....	22
3.3. Curva de retención de humedad .....	26
3.4. Resistencia al corte de suelos saturados .....	28
3.5. Capacidad portante en suelos saturados .....	29
3.6. Resistencia al corte en suelos no saturados.....	32
3.7. Capacidad portante en suelos no saturados.....	37
3.7.1. Velocidad de penetración.....	41
4. Resultados .....	43
4.1. Influencia de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelo natural .....	43
4.1.1 Exploración del Suelo.....	43
4.1.2 Consolidación.....	45
4.1.3 Acondicionamiento y extracción de muestra en suelo natural .....	47
4.1.4 Curva de retención de humedad en el suelo natural.....	50
4.1.5 Velocidad de penetración.....	54
4.1.6 Ensayos de capacidad portante suelo natural .....	55
4.1.7 Ensayos de corte directo suelo natural.....	61
4.1.8 Ensayos de compresión inconfiada en muestra natural.....	65
4.1.9 Modelación numérica suelo natural .....	67
4.2. Influencia de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelo reconstituido.....	71



4.2.1	Reconstitución de la muestra .....	72
4.2.2	Acondicionamiento .....	76
4.2.3	Curva de retención de humedad en suelo reconstituido .....	76
4.2.4	Ensayos de capacidad portante suelo reconstituido .....	78
4.2.5	Ensayos de corte directo suelo reconstituido.....	82
4.2.6	Ensayos de compresión inconfina da suelo reconstituido.....	84
4.2.7	Modelación numérica suelos reconstituidos .....	86
5.	Análisis de resultados .....	90
5.1.	Curva de retención de humedad suelo natural y suelo reconstituido.....	90
5.2.	Capacidad portante suelo natural y reconstituido .....	92
5.2.1.	Capacidad portante en suelo natural.....	92
5.2.2.	Capacidad Portante en suelos reconstituidos.....	96
6.	Conclusiones.....	98
7.	Referencias .....	99
8.	Anexos .....	104
8.1	Consolidación.....	104
8.1.1	Carga de 250 g .....	104
8.1.2	Carga de 500 g .....	105
8.1.3	Carga de 1000 g .....	105
8.1.4	Carga de 2000 g .....	106
8.1.5	Carga de 4000 g .....	106
8.1.6	Carga de 8000 g .....	107
8.1.7	Carga de 16000 g .....	107
8.1.8	Carga de 32000 g .....	108
8.1.9	Curva de compresibilidad.....	109
8.2	Velocidad de penetración .....	110
8.3	Ensayos de corte directo suelo natural.....	111
8.3.1	Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 236 kPa .....	111
8.3.2	Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 236 kPa .....	112
8.3.3	Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 1506 kPa .....	113
8.3.4	Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 1569 kPa.....	114
8.4	Ensayos de corte directo suelo natural influencia de la anisotropía.....	115
8.4.1	Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 245 kPa .....	115
8.4.2	Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 280 kPa .....	116

8.4.3	Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 772 kPa .....	117
8.4.4	Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 648 kPa .....	118
8.4.5	Ensayo 5 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 1569 kPa .....	119
8.4.6	Ensayo 5 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 1569 kPa.....	120
8.5	Ensayos de compresión inconfiada .....	121
8.5.1	Ensayo 1 Succión 44 kPa.....	121
8.5.2	Ensayo 2 Succión 236 kPa.....	122
8.5.3	Ensayo 3 Succión 324 kPa.....	123
8.5.4	Ensayo 4 Succión 482 kPa.....	124
8.5.5	Ensayo 5 Succión 726 kPa.....	125
8.5.6	Ensayo 6 Succión 1147 kPa.....	126
8.5.7	Ensayo 7 Succión 1864 kPa.....	127
8.6	Clasificación del suelo reconstituido .....	128
8.6.1	Límite líquido y límite plástico Secado 0.....	128
8.6.2	Límite líquido y límite plástico Secado 1.....	129
8.6.3	Límite líquido y límite plástico Secado 2.....	130
8.6.4	Límite líquido y límite plástico Secado 3.....	131
8.6.5	Límite líquido y límite plástico Secado 4.....	132
8.6.6	Límite líquido y límite plástico Secado 5.....	133
8.7	Compactación de suelo reconstituido .....	134
8.7.1	Curva Proctor .....	134
8.8	Curva de retención de humedad suelo reconstituido .....	135
8.8.1	Punto 1.....	135
8.8.2	Punto 2.....	136
8.8.3	Punto 3.....	137
8.8.4	Punto 4.....	138
8.8.5	Punto 5.....	139
8.8.6	Punto 6.....	140
8.8.7	Punto 7.....	141
8.9	Ensayos de corte directo suelo reconstituido.....	142
8.9.1	Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 528 kPa .....	142
8.9.2	Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 528 kPa .....	143
8.9.3	Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 2446 kPa .....	144
8.9.4	Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 2302 kPa.....	145

8.9.5	Ensayo 5 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 4970 kPa .....	146
8.9.6	Ensayo 6 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 3929 kPa.....	147
8.10	Ensayos de compresión inconfiada muestra reconstituida .....	148
8.10.1	Ensayo 1 Succión 2680 kPa.....	148
8.10.2	Ensayo 2 Succión 2557 kPa.....	149
8.10.3	Ensayo 3 Succión 2557 kPa.....	150
8.10.4	Ensayo 4 Succión 2618 kPa.....	151
8.10.5	Ensayo 5 Succión 2635 kPa.....	152
8.10.6	Ensayo 6 Succión 5617 kPa.....	153

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Rango de succión de métodos de medición de curva de retención de humedad....	26
<b>Tabla 2</b>	Resumen de exploración del suelo.....	43
<b>Tabla 3</b>	Actividad de las Arcillas tomada Skempton (1952).....	44
<b>Tabla 4</b>	Parámetros iniciales para ensayo de consolidación .....	46
<b>Tabla 5</b>	Resultados del ensayo de compresibilidad.....	47
<b>Tabla 6</b>	Descripción de humedad y tiempo de secado para muestra natural.....	48
<b>Tabla 7</b>	Medidas de $\theta$ vs succión para curva SWCC suelo natural.....	52
<b>Tabla 8</b>	Parámetros de entrada del software RECT suelo natural.....	53
<b>Tabla 9</b>	Valores obtenidos del programa RECT .....	53
<b>Tabla 10</b>	Parámetros para determinar velocidad de penetración .....	55
<b>Tabla 11</b>	Ensayos de capacidad portante en suelo natural .....	56
<b>Tabla 12</b>	Resultados de capacidad portante para el ensayo No.1 .....	59
<b>Tabla 13</b>	Resultados de capacidad portante para el ensayo No.2.....	60
<b>Tabla 14</b>	Resultados de capacidad portante para el Ensayo No.3 .....	61
<b>Tabla 15</b>	Resultados de corte directo muestra natural. ....	62
<b>Tabla 16</b>	Resultados de corte directo perpendicular a la sedimentación. ....	64
<b>Tabla 17</b>	Resultados de compresión inconfiada suelo natural.....	66
<b>Tabla 18</b>	Parámetros de entrada de modelación en Plaxis 2D muestra natural.....	67
<b>Tabla 19</b>	Resultados de resistencia al corte no drenado a partir de la succión para suelo natural.....	69
<b>Tabla 20</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 1 .....	69
<b>Tabla 21</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 2 .....	70
<b>Tabla 22</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 3 .....	71
<b>Tabla 23</b>	Resultados obtenidos de diferentes LL y LP.....	72
<b>Tabla 24</b>	Descripción de humedad y tiempo de secado para muestra remodelada.....	76
<b>Tabla 25</b>	Medidas de $\theta$ vs succión para curva SWCC suelo reconstituido .....	77
<b>Tabla 26</b>	Parámetros obtenidos del software RECT suelo reconstituido .....	77
<b>Tabla 27</b>	Descripción de ensayos de capacidad portante suelo reconstituido .....	78
<b>Tabla 28</b>	Resultados de capacidad portante para el ensayo No.1 R .....	80
<b>Tabla 29</b>	Resultados de capacidad portante para el ensayo No.2 R .....	81
<b>Tabla 30</b>	Resultados de capacidad portante para el Ensayo No.3 R.....	82
<b>Tabla 31</b>	Resultados de corte directo muestra reconstituida .....	83
<b>Tabla 32</b>	Resultados de compresión inconfiada suelo reconstituido.....	85
<b>Tabla 33</b>	Parámetros de entrada modelación en Plaxis 2D muestra reconstituida .....	86
<b>Tabla 34</b>	Resultados de resistencia al corte no drenada a partir de la succión para suelo reconstituido.....	87
<b>Tabla 35</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 1 R.....	88
<b>Tabla 36</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 2 R.....	89
<b>Tabla 37</b>	Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 3 R.....	90

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Metodología con actividades a realizar .....	19
<b>Figura 2</b> Clasificación de tensiómetros tomada de (A. Ridley & Burland, 1995) .....	23
<b>Figura 3</b> Placa de presión tomada de ( a. M. Ridley & Burland, 1993) .....	24
<b>Figura 4</b> Papel de filtro tomado de (Bulut & Leong, 2009).....	25
<b>figura 5</b> Psicrómetro de transistor tomado de (Bulut & Leong, 2009) .....	25
<b>Figura 6</b> Sensor de conductividad térmica tomado de ( <i>Bulut &amp; Leong, 2009</i> ) .....	26
<b>Figura 7</b> Curva de retención de humedad planteado por Vanapalli, 1996 .....	27
<b>Figura 8</b> Relación esfuerzo-deformación tomada de Prandlt,1920.....	29
<b>Figura 9</b> Superficie de falla planteada por Terzaghi, 1943 .....	30
<b>Figura 10</b> Sistema multifacético planteado por Fredlund, 1976.....	33
<b>Figura 11</b> Montaje de equipo de capacidad portante planteado por Vanapalli (2006) .....	39
<b>Figura 12</b> Curva de distribución de tamaño por difracción laser.....	45
<b>Figura 13</b> Clasificación del suelo (Carta de plasticidad) .....	45
<b>Figura 14</b> Curva de compresibilidad de limo arcilloso natural de Bogotá .....	47
<b>Figura 15</b> a) Molde metálico acotado en cm b) Hincado de molde metálico en el terreno ...	48
<b>Figura 16</b> a) temperatura y b) humedad relativa acondicionamiento ensayo No. 2 .....	49
<b>Figura 17</b> a) temperatura y b) humedad relativa acondicionamiento ensayo No. 3 .....	49
<b>Figura 18</b> Acondicionamiento de la muestra .....	50
<b>Figura 19</b> WP4-T de la universidad de los Andes .....	51
<b>Figura 20</b> Montaje del ensayo de papel filtro.....	51
<b>Figura 21</b> Curva de retención de humedad para limo arcilloso de la ciudad de Bogotá .....	54
<b>Figura 22</b> Curva de consolidación ajustada por House et al. 2001.....	54
<b>Figura 23</b> Procedimiento para ensayos de capacidad portante a) Montaje b) aplicación de carga c) distribución de ensayos en la muestra. ....	57
<b>Figura 24</b> Perfil de humedad de los ensayos de capacidad portante suelo natural .....	58
<b>Figura 25</b> Ensayo No.1 humedad gravimétrica del 50%, succión de 236 kPa.....	58
<b>Figura 26</b> Ensayo No.2 humedad gravimétrica del 23%, succión de 1764 kPa.....	59
<b>Figura 27</b> Ensayo No.2 C2 sobre muestra con humedad de 22.5 % de humedad .....	60
<b>Figura 28</b> Ensayo No.3 humedad gravimétrica del 27%, succión de 1177 kPa.....	61
<b>Figura 29</b> Resultados de ensayos de corte directo a diferentes succiones suelo natural. ...	62
<b>Figura 30</b> Envoltente de resistencia al corte en el espacio ( $\sigma$ , $tu$ , $s$ ) suelo natural .....	63
<b>Figura 31</b> Ensayos de corte directo perpendicular a la sedimentación a diferentes succiones .....	64
<b>Figura 32</b> Envoltente de resistencia al corte perpendicular a la sedimentación en el espacio ( $\sigma$ , $tu$ , $s$ ) .....	65
<b>Figura 33</b> Probetas a diferentes contenidos de humedad para ensayo de compresión inconfiada.....	65
<b>Figura 34</b> Resultados de ensayos de compresión inconfiada a diferentes contenidos de humedad suelo natural .....	66
<b>Figura 35</b> Correlación de resistencia al corte no drenado vs Succión suelo natural.....	67
<b>Figura 36</b> Modelo en Plaxis 2D ensayo No 3 S2.....	68
<b>Figura 37</b> Resultados de la modelación en Plaxis 2D ensayo No.1 .....	69
<b>Figura 38</b> Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 2 .....	70
<b>Figura 39</b> Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 3 .....	71
<b>Figura 40</b> Cambios en límite líquido y plástico a diferentes ciclos de reconstitución .....	73

<b>Figura 41</b>	Carta de plasticidad con los diferentes ciclos de reconstituido.....	73
<b>Figura 42</b>	Curva de compactación del Limo Arcilloso de Bogotá.....	75
<b>Figura 43</b>	Compactación de muestra en el Laboratorio de Estructuras.....	76
<b>Figura 44</b>	Curva de retención de humedad para limo arcilloso reconstituida .....	78
<b>Figura 45</b>	Perfil de humedad de los ensayo de capacidad portante suelo reconstituido.....	79
<b>Figura 46</b>	Ensayo No.1 R humedad gravimétrica del 34%, succión de 1034 kPa .....	80
<b>Figura 47</b>	Ensayo No.2 R humedad gravimétrica del 27%, succión de 1607 kPa .....	81
<b>Figura 48</b>	Ensayo No.3 R humedad gravimétrica del 19%, succión de 3621 kPa. ....	82
<b>Figura 49</b>	Resultados de ensayos de corte directo a diferentes succiones muestras remodeladas.....	83
<b>Figura 50</b>	Envolvente de resistencia al corte suelo reconstituido en el espacio ( $\sigma$ , $\tau$ , $s$ )....	84
<b>Figura 51</b>	Resultados de ensayos de compresión inconfiada a diferentes contenidos de humedad muestras reconstituidas .....	85
<b>Figura 52</b>	Correlación de resistencia al corte no drenado vs Succión suelo reconstituida...	86
<b>Figura 53</b>	Resultados de la modelación en Plaxis 2D ensayo No.1 R.....	87
<b>Figura 54</b>	Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 2 R.....	89
<b>Figura 55</b>	Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 3 R.....	90
<b>Figura 56</b>	Curvas SWCC para suelo natural y suelo reconstituido .....	91
<b>Figura 57</b>	Resultados de capacidad portante vs succión suelos naturales.....	94
<b>Figura 58</b>	Concentración de esfuerzos ensayo de corte directo.....	95
<b>Figura 59</b>	Comparación entre la capacidad portante suelo natural medida y calculada por lo métodos de estimación a) zapatas circulares b) zapatas cuadradas .....	95
<b>Figura 60</b>	Resultados de capacidad portante vs succión suelo reconstituido .....	96
<b>Figura 61</b>	Comparación entre la capacidad portante suelo reconstituido medido y calculada por lo métodos de estimación a) zapatas circulares b) zapatas cuadradas .....	97

## 1. Introducción

La capacidad portante es la carga máxima que puede soportar un suelo al aplicar una carga en una cimentación. En la actualidad, se utilizan métodos de cálculo propuestos por (Terzaghi, 1945) y (Meyerhof, 1951); estas teorías han sido basadas en la mecánica de suelos saturados. Sin embargo, dependiendo de la posición del nivel freático, los suelos en muchas ocasiones se encuentran parcialmente saturados. El grado de saturación del suelo se ve afectado por las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la precipitación. Al utilizar la teoría convencional de la mecánica de suelos saturados se sobrevalora la resistencia última, causando un diseño seguro, pero más costoso. Con el fin de estudiar el comportamiento de los suelos no saturados al estar sometidos a cargas aplicadas en la superficie, surgen nuevos métodos de cálculo de capacidad portante para cimentaciones superficiales que incluyen el efecto de la succión.

El estudio de la capacidad portante en los suelos no saturados, incluye como parámetro de resistencia la succión (parámetro de resistencia al corte adicional a la cohesión y al ángulo de fricción) (D.G. Fredlund & Rahardjo, 1987). Con base en esto, se han hecho modificaciones a la ecuación de capacidad portante a través de ensayos en arenas, estos ensayos han mostrado una buena relación entre las ecuaciones propuestas y las mediciones experimentales (Oloo, Fredlund, & Gan, 1997), (Costa, Cintra, & Zornberg, 2003), (S. K. Vanapalli & Mohamed, 2007) (Sai K Vanapalli & Mohamed, 2013). Otros autores como (Lu & Likos, 2006) (Lu, Godt, & Wu, 2010) (Vahedifard, Asce, Robinson, & Asce, 2016) han propuesto soluciones teóricas de capacidad portante en el marco de la termodinámica a través de resultados de triaxiales en arenas y arcillas considerando parámetros de resistencia no saturados.

A pesar de las múltiples investigaciones sobre la formulación teórica de la capacidad portante de fundaciones en suelos no saturados, en la actualidad existen pocos resultados experimentales del efecto de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos blandos (Oh & Vanapalli, 2013). Por lo tanto, en este trabajo se quiere estudiar la capacidad portante del suelo blando de Bogotá para diferentes grados de saturación lo cual permitirá la validación de las formulaciones teóricas y su futura inclusión en el diseño geotécnico

## **2. Problema de investigación**

### **2.1. Planteamiento del problema**

La capacidad portante es la carga máxima que puede soportar un suelo, una medida importante para el diseño de cimentaciones superficiales. En la actualidad, se utilizan métodos de cálculo propuestos por (Terzaghi, 1945) y (Meyerhof, 1951); estas teorías han sido basadas en la mecánica de suelos saturados. Sin embargo, dependiendo de la posición del nivel freático, los suelos en muchas ocasiones se encuentran parcialmente saturados. Adicionalmente las variables ambientales como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la precipitación afectan el grado de saturación. En estas condiciones, al utilizar la teoría convencional de la mecánica de suelos saturados se sobrevalora la resistencia última, causando un diseño seguro, pero más costoso. Por esta razón, surgen nuevos métodos que incluyen el efecto de la succión. La succión depende del grado de saturación y por lo tanto de las condiciones climáticas en la superficie.

En los últimos años, se ha investigado el efecto de la succión en la capacidad portante de fundaciones superficiales. El estudio de la capacidad portante en los suelos no saturados, incluye como parámetro de resistencia la succión (parámetro de resistencia al corte adicional a la cohesión y al ángulo de fricción) (D.G. Fredlund & Rahardjo, 1987). Con base en estos principios, se han hecho modificaciones a la ecuación de capacidad portante a través de ensayos en arenas, estos ensayos han mostrado una buena relación entre las ecuaciones propuestas y mediciones experimentales (Oloo, Fredlund, & Gan, 1997), (Costa, Cintra, & Zornberg, 2003), (S. K. Vanapalli & Mohamed, 2007) (Sai K Vanapalli & Mohamed, 2013). Otros autores como (Lu & Likos, 2006) (Lu, Godt, & Wu, 2010) (Vahedifard, Asce, Robinson, & Asce, 2016) han propuesto soluciones teóricas de capacidad portante en el marco de la termodinámica a través de resultados de triaxiales en arenas y arcillas considerando parámetros de resistencia no saturados

A pesar de las múltiples investigaciones, sobre la formulación teórica de la capacidad portante de fundaciones en suelos no saturados, en la actualidad no existen resultados experimentales en cimentaciones superficiales en suelos blandos naturales que incluyan el efecto de la succión. Por lo tanto, en este trabajo se quiere estudiar la capacidad portante del suelo blando de Bogotá para diferentes grados de saturación (variación de las



condiciones climáticas) lo cual permitirá la validación de las formulaciones teóricas y la futura inclusión en el diseño geotécnico.

## **2.2. Objetivos de la Investigación**

### **2.1. Objetivo general.**

Estudiar el efecto del grado de saturación en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelo blando natural a través de ensayos en escala reducida.

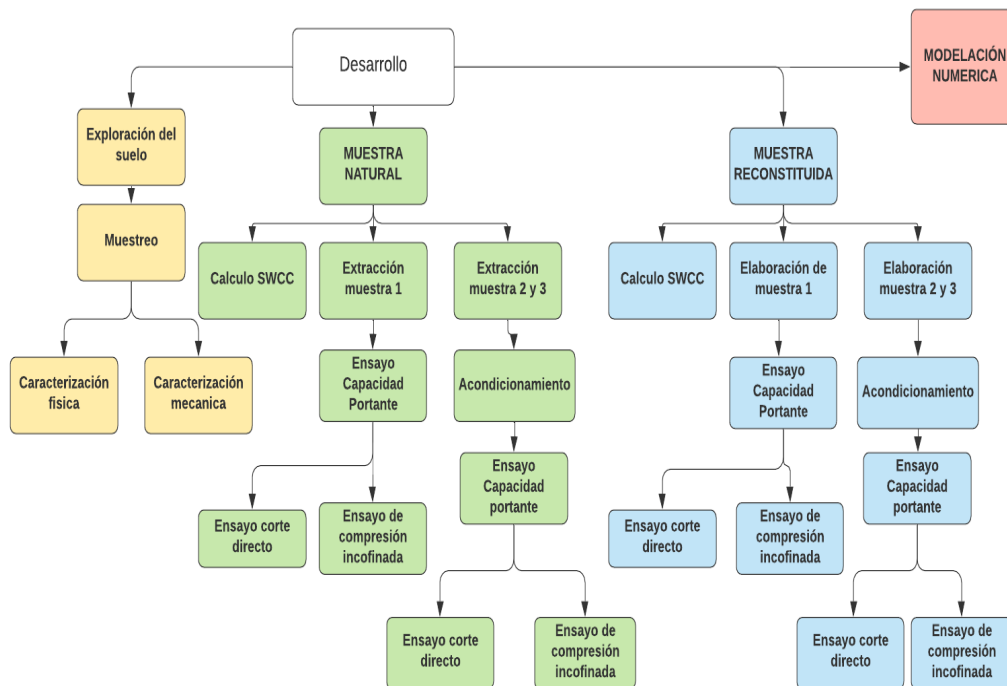
### **2.2. Objetivos específicos.**

- Estudiar el efecto del grado de saturación y por lo tanto de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales y comparar con la condición saturada.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con las formulaciones teóricas existentes para el cálculo de la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos no saturados.

### **2.3. Metodología**

Para verificar la capacidad portante en suelos parcialmente saturados, es importante tener en cuenta las propiedades del suelo, las condiciones de flujo ensayado y los parámetros de resistencia. El suelo que se utilizó es un limo arcilloso blando de Bogotá extraído del campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (parte norte del bloque L). El presente trabajo hace parte de la convocatoria interna de Jóvenes investigadores aprobada para el año 2018.

Las características del suelo se determinaron a través de ensayos de laboratorio como: Contenido de humedad, gravedad específica, límites de Atterberg y granulometría. Las condiciones de flujo se determinaron a través del ensayo de consolidación y los parámetros de resistencia por el ensayo de corte directo y compresión inconfiada. La metodología se trabajó en 4 etapas como se puede ver en la Figura 1. La actividad No 1 se realizó en conjunto con las tesis de maestría del estudiante Andrés Mejía.



**Figura 1** Metodología con actividades a realizar

Como se observa en la Figura 1, se realizaron modelaciones físicas y se tuvieron en cuenta las variables físicas que podían afectar los resultados de los ensayos a escala reducida de capacidad portante como:

- Muestreo
- Cambios estacionaros
- Grietas
- Cambios en el nivel freático

1. Se realizaron exploraciones superficiales, trincheras de 2\*2\*2 m donde se hinca el molde de 31 cm de diámetro con 19 cm de alto, para realizar ensayo de capacidad portante y se sacan muestras para ensayos de laboratorio. Se tiene cuidado ya que el suelo muestra una sensibilidad media.
2. Se debe tener especial cuidado con el cambio estacional ya que por la histéresis del suelo se van obtener resultados diferentes. En este trabajo solo se evaluó el camino de secado. Estos fenómenos de desecación se pueden

producir por abatimiento del nivel freático, crecimientos de la población, presencia de vegetación.

3. Las fisuras se presentan cuando la succión matricial excede la resistencia a la tracción del suelo, se generaron grietas sin afectar el comportamiento mecánico del suelo.
4. Se simula el nivel freático muy bajo para que no afecte los resultados del ensayo de capacidad portante a escala reducida.

### 3. Marco Teórico

A lo largo del capítulo se expone brevemente el sustento teórico de la investigación. Se inicia por una descripción de la succión y su papel como variable de estado en los suelos parcialmente saturados, seguidamente se introducen las técnicas de medición de la succión tanto en campo como en laboratorio, en este caso con el psicrómetro (WP4) y el papel filtro; después continua con la construcción de la curva de retención de humedad.

Posteriormente se encuentra una síntesis de las propiedades mecánicas de interés para esta investigación junto con la referencia del ensayo aplicable; finalizando con una descripción amplia de teorías modernas de capacidad portante en suelos no saturados.

#### 3.1. Teoría de succión matricial, total y osmótica.

El concepto de la succión ha sido desarrollado en la física de suelos, dirigido a la saturación del suelo en contacto con las plantas. La succión del suelo se conoce como el estado libre de la energía del agua en el suelo y puede medirse en términos de presión de vapor parcial del agua en el suelo (S. J. Richards, 1965). La definición de succión total (termodinámica) se puede escribir como:

$$\psi = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v} * \ln\left(\frac{\bar{v}_w}{\bar{v}_{v0}}\right) \quad [3.1]$$

- $\Psi$ : Succión total
- R: Constante de gas universal [ 8.31432 J/ (Mol K)].
- T : Temperatura absoluta [T=(273.26+t°)]
- t: Temperatura (°C)
- $v_{w0}$ : Volumen específico del agua o el inverso de la densidad del agua [m<sup>3</sup>/kg].
- $\omega_v$ : Masa molecular del vapor de agua [ 18.106 kg/kmol]
- $\bar{v}_w$ : Presión parcial de vapor de agua [kPa]
- $\bar{v}_{v0}$ : Presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura [kPa].

Se puede cuantificar la succión total en la ecuación 1 en términos de presión de vapor ( $\bar{v}_w/\bar{v}_{v0}$ ) este término se llama humedad relativa. Si la humedad relativa es del 100% la succión es 0, pero si esta baja indica presencia de succión en el suelo (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993). Desde el punto de vista de la termodinámica, la succión total se

compone de dos partes: succión matricial y succión osmótica; la succión total es la energía libre del suelo, mientras que la succión matricial y osmótica son componentes de la energía libre (D.G. Fredlund & Rahardjo, 1987). La succión total se puede expresar como:

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad [3.2]$$

- $(u_a - u_w)$  = Succión matricial
- $\pi$  : Succión osmótica
- $U_w$ : Presión del agua
- $U_a$ : Presión del aire

La succión matricial se ha asociado con la condición de humedad, llevando al uso de términos como potencial capilar, presión capilar, presión de succión o tensión capilar (L. A. Richards & Gardner, 1936). Donde la succión matricial se debe a los efectos de los sólidos, la curvatura del menisco (que es inversamente proporcional a la diferencia de presiones de aire y de agua) debido a la tensión superficial esta curvatura contribuye a la reducción de la humedad relativa (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993). Otro componente es la succión osmótica determinada por la cantidad de solutos en la humedad del suelo los cuales afectan las propiedades termodinámicas disminuyendo la humedad relativa (Shukla, 2004).

### **3.2. Técnicas de medición de succión métodos directos y no directos**

Para determinar la succión existen dos técnicas de medición: directa y no directa. En la técnica de medición directa, la medida se toma in-situ o se llevan a laboratorio. Para la forma indirecta se toman características del suelo como el contenido de humedad o las variables termodinámicas y se relaciona con los valores de la succión.

#### **3.2.1. Métodos directos**

En estos métodos, la succión que se necesita determinar es la matricial la cual gobierna el comportamiento de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Esta medición se hace debido a un intercambio de agua entre el instrumento y el suelo debido a la presión negativa del poro ( a. M. Ridley & Burland, 1993):

**Tensiómetros:** Los tensiómetros fueron utilizados a principios del siglo XX para medir la succión con fines agrícolas como (L. A. Richards & Gardner, 1936) donde hace referencia a los tensiómetros de mercurio y se fueron desarrollando utilizando como

potencial de referencia una solución osmótica (Peck & Rabbidge, 1969).

La aplicación de los tensiómetros con fines ingenieriles lo estudia (Stannard, 1986) para las condiciones de succión en rellenos de basura, pero concluyendo muchas aplicaciones en los suelos no saturados. La limitación más grande de los tensiómetros es el rango de succión medible (0 a 100 KPa), donde una succión mayor puede presentar problemas de cavitación. El tensiómetro permite un intercambio de agua entre el suelo y el tensiómetro, hasta que la tensión que sostiene el agua en el tensiómetro es igual a la tensión que sostiene el agua en el suelo (A. Ridley & Burland, 1995). Los tensiómetros se pueden clasificar cómo se muestra en la

Figura 2:

- a) Manómetro de mercurio
- b) Manómetro de vacío
- c) Transductor de presión electrónica

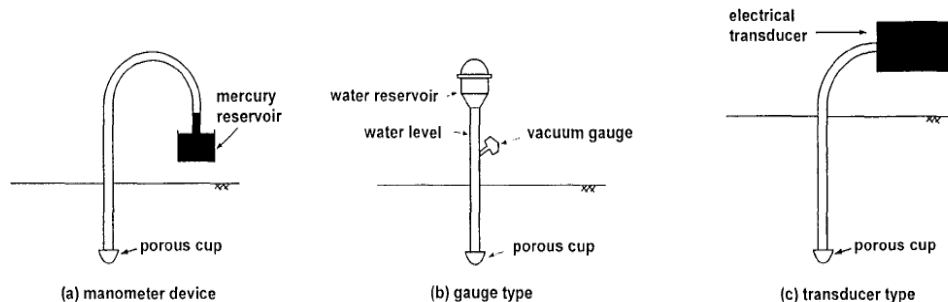
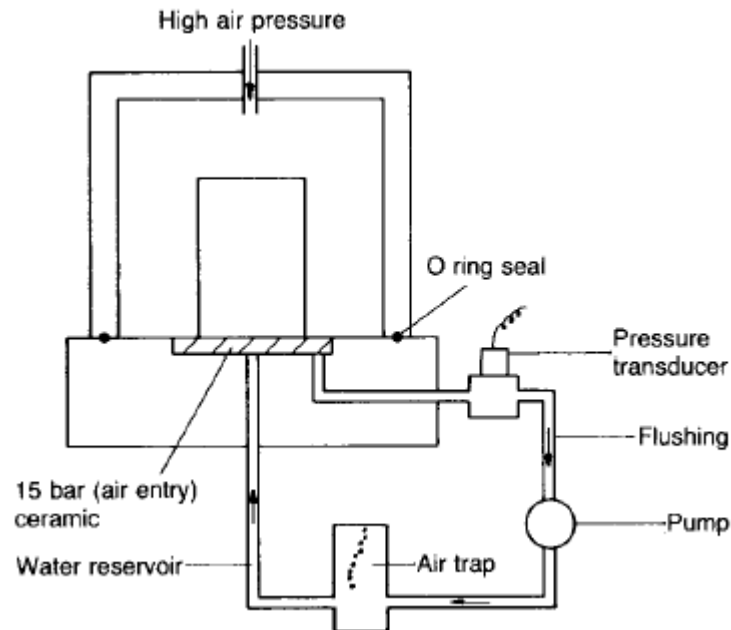


Figura 2 Clasificación de tensiómetros tomada de (A. Ridley & Burland, 1995)

**Placas de presión:** La placa de presión trabaja con el principio de traslación de ejes (Hilf, 1956) para evitar la formación de burbujas de aire. Lo que hace es elevar la presión del aire mayor a la presión de agua para producir una succión positiva. Sin embargo, hay un pequeño error causado por el movimiento del agua. Investigadores que han utilizado estas placas para suelos parcialmente saturados como se ilustra en la Figura 3 son: (Lourenço, Gallipoli, Toll, & Evans, 2006; Sáez & Escario, 1986; Wheeler & Sivakumar, 1995; Zakaria, 1994; Zhan, Chen, & Ng, 2007). Estos investigadores utilizan aparatos de medición de resistencia como el triaxial y el corte directo modificados con la placa de presión, para poder trabajar con varias succiones y diferentes grados de saturación.



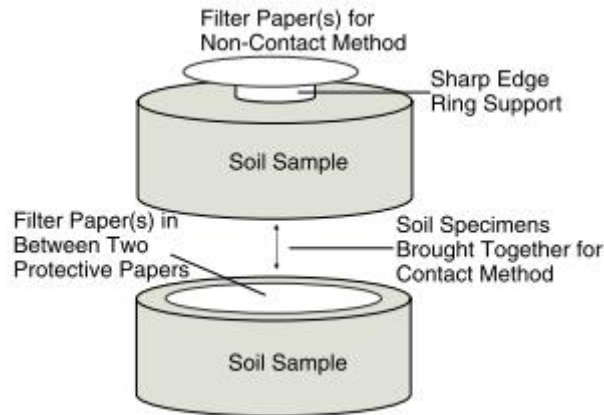
**Figura 3** Placa de presión tomada de ( a. M. Ridley & Burland, 1993)

### Métodos indirectos

Existen métodos que han sido investigados para medir succiones superiores a la presión atmosférica, estos están calibrados contra alguna propiedad atmosférica como la temperatura (D.G. Fredlund & Rahardjo, 1987):

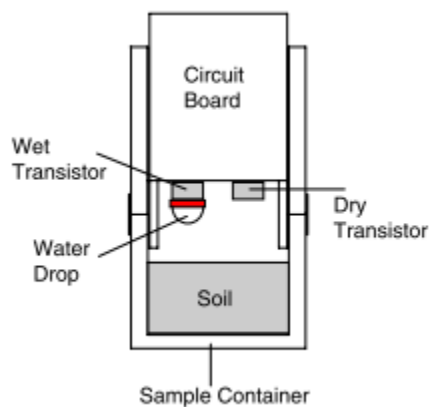
Papel filtro: El papel filtro es un método que se investigó por las limitaciones del bajo rango de succión de los métodos directos. El primer investigador en utilizar el papel como material de contacto fue (L. A. Richards & Gardner, 1936) enterrando el papel en el suelo. Pero (McQueen & Miller, 1968) modificaron el ensayo colocando el papel en el suelo en lugar de enterrarlo y obtuvo una curva de calibración más completa. El método se basa en el supuesto que el potencial hídrico del suelo húmedo y el del papel de filtro en contacto serán el mismo en equilibrio,(S. AL-KHAFAF AND R. J. HANKS, 1974); este método puede medir un rango de succión muy alta de 0,1 a 150000 KPa y de 1 a 1500000 cm de agua (McQueen & Miller, 1968). En la actualidad y en Colombia existe norma para este ensayo INV-159-13 (Determinación de la succión de un suelo usando papel filtro) como se muestra en la figura 4.





**Figura 4** Papel de filtro tomado de (Bulut & Leong, 2009)

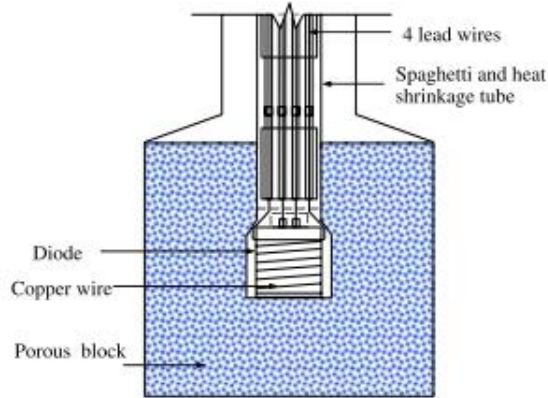
Psicrómetros: Este es otro método indirecto que utiliza la humedad para determinar la succión. Los psicrómetros de tamber fueron desarrollados (Spanner, 1951) los cuales miden la succión sobre observaciones de la presión de vapor en equilibrio, utilizando la medición tipo psicómetro. Otro psicrómetro es el sensor tipo bucle húmedo desarrollado por (Ogata, 1958) que utiliza mediciones tipo higrómetro y psicómetro. Estos utilizan una corriente para enfriar la unión del termopar por debajo del punto de rocío del aire y el agua se condense en la unión. La evaporación y la condensación se equilibran y crean un voltaje, este se convierte en succión (Bulut & Leong, 2009). Estos miden rango de succión entre 300 a 7000 kPa. Recientemente se desarrolló el psicrómetro de transistor como se ilustra en figura 5 que consiste en un contenedor térmicamente aislado que contiene sondas psicométricas. El sensor se utiliza para inferir la humedad relativa del ambiente en equilibrio con una muestra de suelo, este mide una gama de 100 a 10000 kPa(Bulut & Leong, 2009).



**figura 5** Psicrómetro de transistor tomado de (Bulut & Leong, 2009)

Sensor conductividad térmica: Este método a diferencia de los anteriores que miden el

contenido de humedad, relaciona la temperatura con la conductividad térmica. Un sensor de potencial matricial mide la disipación de calor para detectar el contenido de agua de un bloque poroso en equilibrio con el suelo (C. J. Phene, G. J. Hoffman, 1971). El rango de medición de la succión matricial de 10 a 1500 kPa.



**Figura 6** Sensor de conductividad térmica tomado de (Bulut & Leong, 2009)

En esta tabla se pueden ver los rangos de succión que se pueden medir según el método utilizado:

**Tabla 1** Rango de succión de métodos de medición de curva de retención de humedad

Método	Medición	Rango kPa
Tensiómetro	Directa	0-100
Placa presión	Directa	0-5000
Papel de filtro	Indirecta	0-150000
Psicrómetros	Indirecta	100-100000
Sensor de conductividad térmica	Indirecta	10-15000

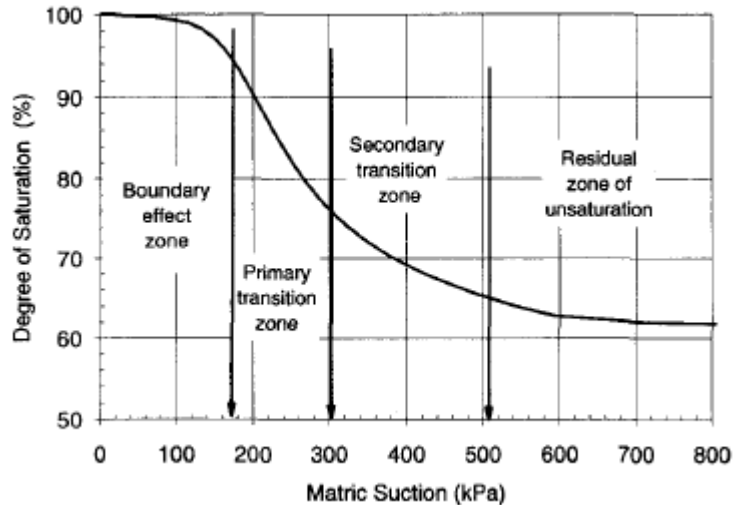
Fuente: (Elaboración propia)

### 3.3. Curva de retención de humedad

La curva de retención de humedad se precisa como la relación de la cantidad de agua en el suelo y la succión matricial. El contenido de agua se puede definir en la curva de retención de humedad como el contenido gravimétrico, contenido volumétrico o por el grado de saturación. El proceso de transición del contenido de agua en el suelo se da por secado y humedeciendo. Muchos investigadores intentaron determinar la curva de retención de humedad para suelos específicos, pero sin éxito, por la influencia de la estructura y la compactación. Pero incluso cuando todas las variables estaban controladas la curva de retención de humedad al secado y humedecimiento cambia (S. J. Richards, 1965) lo que indica un efecto de histéresis, no siendo una función única, si no

dependiente de la historia de humedad del suelo (Shukla, 2004).

La curva de retención de humedad presenta tres etapas como muestra la Figura 7 (S K Vanapalli, Fredlund, Pufahl, & Clifton, 1996). La primera etapa de efecto límite donde todos los poros están llenos de agua, se puede decir que está totalmente saturado. La segunda etapa de transición donde la cantidad de agua en las partículas de suelos se reduce significativamente con el aumento en la succión. Y finalmente la etapa residual donde la succión conduce a un cambio relativamente pequeño en el contenido de agua



**Figura 7** Curva de retención de humedad planteado por Vanapalli, 1996

Se han desarrollado métodos para calcular indirectamente la curva de succión. Estos se pueden clasificar en tres:

- 1) Estimación estadística de los contenidos de agua a valores de succión matricial derivando ecuaciones para estimar la relación continua del contenido de humedad del suelo con los potenciales y conductividad hidráulica (K. E. Saxton, W. J. Rawls, J. S. Romberger, 1986).
- 2) Correlaciones de propiedades del suelo con los parámetros de ajuste de una ecuación analítica que representa la succión por análisis de regresión múltiple derivando ecuaciones para parámetros de la curva de (D.G. Fredlund, Xing, & Huang, 1994) basados en predicciones del índice de plasticidad y relación de vacíos (Y. Y. Perera, C. E. Zapata, W. N. Houston, 2005) en este método se puede calcular grado de saturación usando matriz de succión con precisión de menos de 15% para suelos no-plásticos y menos del 10% de error para plásticos.
- 3) Estimación de la curva de succión usando un modelo conceptual de física (M.

D. Fredlund, 1997) mediante una curva de distribución de tamaño de grano, donde se hace una serie incremental de tamaños de partículas desde la más pequeño a la más grande para construir una curva característica global, superponiendo las curvas para proporcionar una curva de retención de humedad para todo el suelo. Para calcular la curva utiliza la ecuación (D.G. Fredlund et al., 1994) readaptada para producir un ajuste satisfactorio de la distribución del tamaño del grano.

### 3.4. Resistencia al corte de suelos saturados

La resistencia al corte se describe a partir de una ecuación totalmente empírica, dada por Coulomb en 1776 desarrollada mientras estudiaba los empujes en muros de contención; basada en el deslizamiento de dos superficies planas (Berry & Reid, 1996). En (Terzaghi, 1945) se incluye el concepto de esfuerzos efectivos donde contiene la presión de poros, como el agua no puede soportar esfuerzos cortantes, entonces la resistencia al corte depende de la magnitud que soporta el esqueleto del suelo. La ecuación es:

$$\tau = c' + \sigma * \tan \phi' \quad [3.3]$$

- $\tau$ : resistencia al corte
- $c'$ : cohesión efectiva
- $\sigma$ : esfuerzo normal en el plano de falla
- $\phi'$ : ángulo de fricción efectiva

En 1900 Mohr introduce un diagrama que representa el estado de esfuerzos de un material. Con este diagrama (Terzaghi, 1945) introduce una ecuación empírica que está representada en el círculo como una envolvente de falla, que interseca en el eje horizontal con un ángulo  $\phi$  y en el eje vertical a una distancia  $c$ . Los procedimientos con el círculo Mohr son válidos para cualquier material e independientemente que los esfuerzos principales incluyan agua, porque no se hace ninguna suposición con respecto a las propiedades físicas.

En este criterio se toma como un problema de deformación plana ya que se asume que  $\sigma_2$  es igual a  $\sigma_3$  siendo  $\sigma_2$  el esfuerzo principal intermedio y  $\sigma_3$  el esfuerzo principal menor; si estos son diferentes para las condiciones de equilibrio requieren que las direcciones  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$  se corten en ángulos rectos. El criterio de falla de Mohr-Coulomb

se puede describir como una función de los esfuerzos principales y del cortante, este se basa en que la falla solo depende de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . La falla ocurre tan pronto como los esfuerzos principales satisfacen la ecuación de resistencia al corte.

### 3.5. Capacidad portante en suelos saturados

La capacidad portante en suelos saturados ha tenido gran desarrollo a finales del siglo XIX y durante todo el siglo XX. Grandes autores como (Rankine, 1856) con la teoría de presiones activas y pasivas comienzan a dar una orientación de estas teorías. A comienzos del siglo XX (Prandtl, 1920) plantea una relación esfuerzo-deformación con un comportamiento elasto-plástico como se muestra en la Figura 8. Otra gran contribución es una superficie de falla con una zona pasiva, activa y una transición circular. Otros investigadores también dieron grandes contribuciones como (Reissner, 1909) el cual propone materiales sin peso con fricción interna, (Caquot, 1935) de las primeras soluciones de fundaciones y (Buisman, 1935) sugirió la superposición del término peso en la ecuación de capacidad portante.

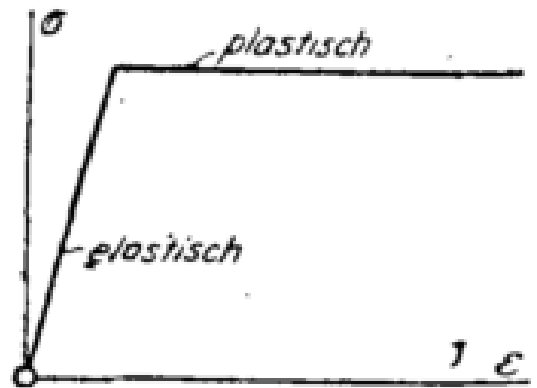
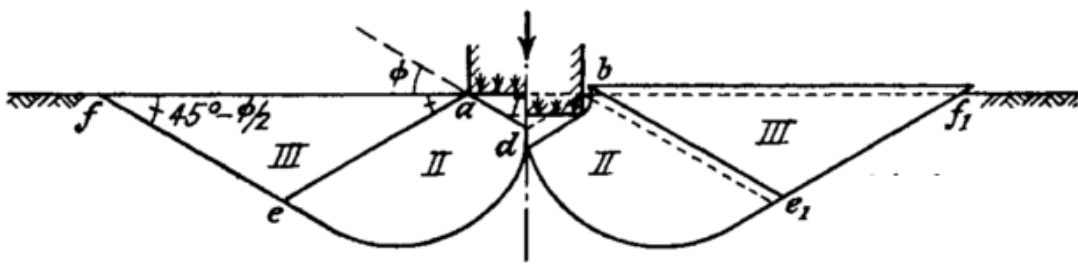


Figura 8 Relación esfuerzo-deformación tomada de Prandtl, 1920

Con estas grandes contribuciones (Terzaghi, 1943) comienza hacer un análisis más detallado de la capacidad portante. Planteando una superficie de falla como se muestra en la Figura 9. Donde analiza una superficie de suelo homogénea de base rugosa y cargas verticales.



**Figura 9** Superficie de falla planteada por Terzaghi, 1943

Con estas suposiciones Terzaghi (1943) propone que el suelo por debajo de la base está en equilibrio elástico (hasta que la carga crece superando  $q_u$ ) teniendo una transición de elástico a plástico. Si esta tendencia se mantiene de flujo plástico y si la base alcanza un equilibrio plástico, esta se hunde deslizándose produciendo una falla por corte debido a una compresión lateral inadecuada. Las superficies potenciales en un material plástico ideal se interceptan entre sí en cada punto de la zona de equilibrio plástico a un ángulo de  $90-\Phi$ . Por lo tanto, la cuña activa debe elevarse a un ángulo  $\Phi$ . Para entender este fenómeno se divide la superficie en tres zonas:

- I. Una zona en forma de cuña activa situada debajo de la zona cargada, los principales esfuerzos verticales.
- II. Dos zonas de corte radial que comienza desde los bordes exteriores cuyos límites cruzan la horizontal en un ángulo  $45 + \frac{\phi}{2}$  y  $45 - \frac{\phi}{2}$ . Para los suelos puramente cohesivos esta zona se comporta circular y para los que tienen fricción como espiral de radio  $r = r_0 e^{\theta \cdot \tan \phi}$ .
- III. Dos zonas de Rankine en forma de cuñas pasivas.

Otra gran contribución de (Terzaghi, 1943) es ignorar la resistencia al corte por encima de la base, mediante una sobrecarga que se define como  $q = \gamma * D_f$ . Para determinar los factores  $N_c$  y  $N_q$  se toman momentos. Lo mismo hace para determinar  $N_\gamma$  lo calcula tomando el centro de la superficie en  $ad$ , de la Figura 9 de la espiral-logarítmica y encuentra la superficie crítica que produce la presión pasiva. Resuelve la ecuación como axialmente simétrico, deformación plana, dando la ecuación de capacidad portante de Terzaghi que por superposición de términos resulta en:

$$q_u = CN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad [3.4]$$

Donde  $N_c, N_q, N_\gamma$  son factores que dependen solo de  $\Phi$ . Años más tarde (Meyerhof, 1951) hace un análisis de la teoría de Terzaghi concluyendo que es una representación suficiente de la capacidad portante, pero propone una nueva ecuación para  $N_\gamma$ . Después (Meyerhof, 1963) hace un análisis más detallado de factores que no se tuvieron en cuenta que son:

- La inclinación de la carga ya que, si el punto de aplicación de carga no se encuentra exactamente en el centro, la falla comenzará por la excentricidad.
- La forma de la base ya que en el análisis anterior solo se tuvo en cuenta, base rectangular de ancho  $2B$  y base circular.
- El nivel de la cimentación ya que la resistencia aumenta con la profundidad.

Teniendo en cuenta factores dados por (A. W. Skempton, 1951; HANSEN, 1960; Terzaghi, Peck, & Mesri, 1948) se agregaron los factores a la ecuación y dando una mejor aproximación.

Otro autor que investigo estos factores con mayor profundidad fue (Vesic, 1973). Para los factores de forma hacen pruebas comparativas con diferentes formas. Los efectos de forma son mayormente semi-empírica. El efecto a la carga en la superficie lo justifica por el hecho que el suelo de la sobrecarga es más débil que el del estrato de apoyo. También hace referencia a otros factores que podrían afectar la carga ultima que son:

- Factor de inclinación del terreno.
- Factor de inclinación de la carga.
- Influencia en la comprensibilidad del suelo y efectos de escala, donde precede que todo el análisis de carga ultima se basa que el suelo es incomprensible y que debería aplicarse en casos donde se espera fallas de corte general. Aumentado el  $N_\gamma$  en el tamaño de la base.
- Influencia de la rugosidad de la base, debido a que la solución general de (Prandtl, 1920) no satisface las ecuaciones de compatibilidad de velocidad de deformación.
- Efectos de la tasa de carga, con una carga lo suficientemente baja para que no sienta efectos viscosos y de inercia.

Con los factores unificados (Vesic, 1973) muestra la ecuación de capacidad portante:

$$q_{ult} = CN_c S_c d_c i_c g_c b_{c*} + qN_q S_q d_q i_q g_q b_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad [3.5]$$

- $S_c, S_q, S_\gamma$  : factores de forma
- $d_c, d_q, d_\gamma$  : factores de profundidad.
- $i_c, i_q, i_\gamma$  : factores de inclinación de carga.
- $g, g_q, g_\gamma$  : factores de inclinación del terreno.
- $b_c, b_q, b_\gamma$  : factores de inclinación de la base

### 3.6. Resistencia al corte en suelos no saturados

La incorporación de la matriz de succión en el estado de esfuerzos ha sido de gran interés para entender el comportamiento de los suelos parcialmente saturados. La más importante para el análisis en el campo de la geotecnia es la succión matricial que es la energía necesaria para remover una molécula de agua de la matriz del suelo, sin que este cambie su estado ( a. M. Ridley & Burland, 1993). Los primeros estudios de la de la incorporación de la succión matricial se dan con el modelo (Bishop, 1960) donde se consideran las fuerzas inter partículas físico-químicas llevando al grado efectivo de saturación que depende de factores como el estado de esfuerzo, el grado de saturación y el tipo de suelo (Lu, Godt, & Wu, 2010) mediante esta ecuación:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad [3.6]$$

donde  $\chi$ : Parámetro de grado efectivo de saturación.

Sin embargo no se ha podido aplicar la ecuación, ya que incorpora un parámetro del suelo  $\chi$  para juntar más de una variables de esfuerzos; sin poder consistir en variables de esfuerzo independiente (D. G. Fredlund, 1979). Teniendo en cuenta estas limitaciones Fredlund & Morgenstern (1977) proponen un sistema de fases, donde incluyen una interface aire-agua. Este sistema se compone de cuatro fases: Aire, agua, suelo y una película o lamina de grosor, que se comporta como una membrana bajo tensión entretejida a lo largo de la estructura del suelo; la propiedad más específica es la capacidad de ejercer una tracción.

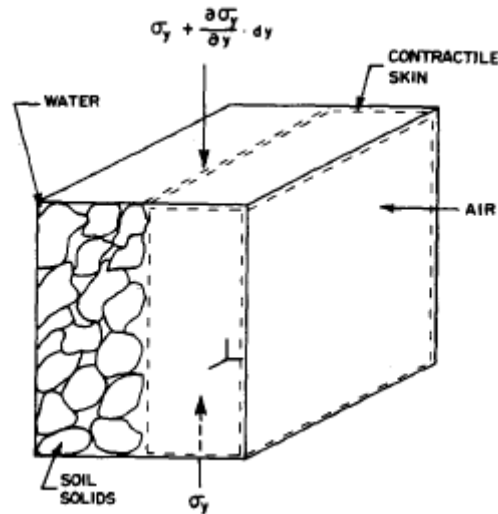
Describe el comportamiento en dos fases:

- Equilibrio bajo gradientes de esfuerzo aplicados (suelo y lámina)
- Dos fases que fluyen bajo gradiente de esfuerzo aplicado (aire y agua)

Para lograr el equilibrio Fredlund & Morgenstern (1977) considera un elemento cubico,



donde escribe las ecuaciones de equilibrio para cada una de las fases y una ecuación de equilibrio total. Para cada una de las fases supone una fuerza de cuerpo entre la lámina y la fase (aire, agua y suelo). Las ecuaciones de equilibrio de la lámina se pueden escribir en un estado general de esfuerzo, pero las tensiones no pueden medirse físicamente a sí que las desacopla en una fase multifacética como se ilustra en la Figura 10 donde agrega fuerzas adicionales para que sea equivalente el sistema.



**Figura 10** Sistema multifacético planteado por Fredlund, 1976

Al hacer equilibrio en la fase total hay tres posibles combinaciones que no dependen de la porosidad y son físicamente medibles. El análisis de esfuerzos muestra tres posibilidades del estado de esfuerzo en un suelo parcialmente saturado:

- $(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$
- $(\sigma - u_w), (u_a - u_w)$
- $(\sigma - u_a), (\sigma - u_w)$

La combinación  $(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$  es ventajosa ya que al cambiar la presión de poros no cambia las dos variables y la presión de poros puede separarse y medirse. Además (D. G. Fredlund, 1979; D G Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1978; Delwyn G. Fredlund & Morgenstern, 1977) hicieron ensayos para corroborar las variables propuestas.

Teniendo estas dos variables independientes (D G Fredlund et al., 1978) las introduce al estado de esfuerzo donde hace un análisis de dos posibles ecuaciones que se podrían utilizar de las tres posibles variables de esfuerzos para definir el estado de esfuerzo de un suelo parcialmente saturado. Estas son las ecuaciones que propone:

$$\tau = c' + (\sigma - U_w) * \tan \phi' + (U_a - U_w) * \tan \phi^u \quad [3.7]$$

donde  $\phi^u$ : Angulo de fricción con respecto a los cambios de  $(U_a - U_w)$

$$\tau = c' + (\sigma - U_a) * \tan \phi + (U_a - U_w) * \tan \phi^b \quad [3.8]$$

donde  $\phi^b$ : Angulo de fricción con respectos a los cambios de  $(U_a - U_w)$

La primera combinación tiene la ventaja de la transición del suelo saturado a parcialmente saturado, su desventaja cuando cambia la presión del agua se ve afectada las dos variables siendo la ventaja de la ecuación 8. Si la matriz de succión es mayor a ceros se requiere una tercera dimensión que trazar en el círculo de Mohr (en este análisis se toma el punto de esfuerzo superior).

Años después (Sáez & Escario, 1986) hacen ensayos con las ecuaciones propuestas por (D G Fredlund et al., 1978) en tres tipos de arcillas diferentes utilizando en un equipo de corte directo modificado que puede medir el cambio del ángulo de fricción con respecto a la succión en una amplia gama de succiones. Los autores concluyen que  $\tan \phi^b$  no es constante ni lineal como hace la simplificación (D G Fredlund et al., 1978) donde las succiones bajas muestran curvaturas. También concluyen que a altas succiones la resistencia sigue aumentando en las arcillas más plásticas, incluso en el estado residual.

Otro autor que hace el análisis de la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados es (Vanapalli, Fredlund, Pufahl, & Clifton, 1996) donde se relaciona la curva de retención de humedad con la resistencia al corte. También amplía la ecuación de la resistencia al corte mediante el área normalizada del agua  $a_w$  que se puede relacionar con la velocidad a la cual la succión contribuye a la resistencia al corte. Donde el área normalizada se define como la relación entre al área tota de agua al 100% y el área correspondiente a cualquier grado de saturación; debido a que es un numero adimensional y a que está relacionado con el grado de saturación se puede relacionar con el contenido volumétrico.

$$a_w = \theta^k \quad [3.9]$$

donde  $\theta$  : Contenido volumétrico

K: Parámetro de ajuste

Este parámetro de ajuste es para obtener una mejor correlación entre los datos medidos y los experimentales. El incremento en la resistencia al corte en términos de contenido volumétrico es:

$$\tau_{us} = (U_a - U_w) * \theta^k * \tan \phi' \quad [3.10]$$

donde  $\tau_{us}$ : Resistencia al corte al aporte a la succión.

Este propone otra ecuación donde no se utiliza el parámetro  $\kappa$ , en términos de grado de saturación

$$\tau = c' + (\sigma - U_a) * \tan \phi' + (U_a - U_w) * \tan \phi' * \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r}\right) \quad [3.11]$$

Donde  $S$ : grado de saturación

$S_r$ : grado de saturación residual

Esta ecuación es favorable ya que  $S_r$  se puede determinar con la curva de retención de humedad, para poder verificar. Esta ecuación ha sido validada por (Vanapalli et al., 1996) utilizando una máquina de corte directo modificada realizaron ensayos dando una buena relación con lo predicho por la ecuación.

Otros investigadores que describen la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados es (Lu et al., 2010; Lu & Likos, 2006) donde hace un análisis para determinar la resistencia al corte modificando la teoría de (Bishop 1959), siguiendo el concepto de esfuerzo efectivo de Terzaghi y de cohesión aparente de la teoría clásica de la mecánica de suelos. Se considera un análisis microscópico de fuerzas y esfuerzos interparticulares precedentes, para determinar una expresión para el esfuerzo intergranular en suelos no saturados  $\sigma_s$ ; se define como el esfuerzo de succión y se conceptualiza como el resultado de esfuerzos fisicoquímicos entre partículas atribuidas a la cementación química, atracción de Van der Waals, repulsión de doble capa, esfuerzo capilar y presión negativa del agua. Por lo tanto, el esfuerzo de succión es una función característica del sistema (suelo-agua) descrito por una curva característica de esfuerzo de succión:

$$\sigma_s' = f(u_a - u_w) = f(S) = f(\theta) \quad [3.12]$$

También se puede escribir

$$\sigma_s' = \sigma_s - \sigma_{co} \quad [3.13]$$

donde  $\sigma_s'$ :esfuerzo de succión

$\sigma_s$ : esfuerzo de succión no corregido

$\sigma_{co}$ : esfuerzo de tracción aparente

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma_s \quad [3.14]$$

La magnitud del esfuerzo de succión depende de la succión matricial y la cohesión aparente que varía del estado saturado al parcialmente saturado. El cambio de la succión y el esfuerzo de succión en el estado parcialmente saturado, se puede relacionar conceptualmente con los regímenes de succión explicados en el capítulo 7 de la curva de retención de humedad, siendo paralelo a los conceptos ampliamente aceptados de la curva de retención de humedad.

Siguiendo estos conceptos (Lu et al., 2010) proponen una ecuación de forma cerrada para la resistencia al corte desde el marco de la mecánica del continuo, basándose en una formulación termodinámica. Donde definen la curva de retención de humedad bilineal, antes de la entrada de aire como un medio continuo equivalente y después de la entrada del aire como el cambio de la energía del agua en su estado de agua libre consumida principalmente como esfuerzo de succión describiéndola como:

$$\sigma_s = -(u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \leq 0 \quad [3.15]$$

$$\sigma_s = f(u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad [3.16]$$

Donde  $f$  es una función de escala que describe el vínculo entre el esfuerzo de succión y la succión matricial. Esta función la definen como  $S_e$  el grado de saturación normalizado con la siguiente aproximación:

$$\sigma_s = -(u_a - u_w)S_e \quad V_w > V_r \quad [3.17]$$

donde  $V_w$ : Volumen total del agua

$V_r$ : volumen residual de agua

Como el agua residual unida tiene una densidad de energía libre significativamente menor que el agua libre, el agua añadía a un sistema granular seco hasta un volumen  $V_w > V_r$  se acumulara primero en esta capa. Utilizaron el modelo de (Van Genuchten, 1980) de la curva de retención de humedad para definir el grado de saturación normalizado como:

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad [3.18]$$

Donde  $n$  y  $\alpha$  son parámetros de ajuste empíricos de las propiedades insaturadas del

suelo,  $\alpha$  siendo la inversa de la presión de la entrada del aire para el suelo saturado y  $n$  el parámetro de distribución del tamaño del poro. Obtuvieron una ecuación de forma cerrada para el esfuerzo efectivo en todo el rango de presión de agua:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \leq 0 \quad [3.19]$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{\{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n\}^{1-1/n}} \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad [3.20]$$

Entonces la resistencia al corte se puede describir con estos parámetros con la siguiente ecuación:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) - \sigma_s] \tan \phi' \quad [3.21]$$

### 3.7. Capacidad portante en suelos no saturados

La capacidad portante en suelos parcialmente saturados ha sido un tema de poca investigación, ya que para el cálculo de este se utiliza la teoría convencional de (Terzaghi, 1945) de suelos saturados. La teoría propuesta por (Terzaghi, 1945) da una buena aproximación para el cálculo en las condiciones de los suelos saturados, pero en los suelos parcialmente saturados sobre-valoriza la capacidad portante. Los primeros en investigar los efectos de la pérdida de la capacidad portante asociado a la pérdida de la saturación fueron (Meyerhof, 1955; Terzaghi, Peck, & Mesri, 1948) mediante parámetros efectivos en el peso de cimentación  $N_\gamma$ . Basado en lo anterior (Meyerhof, 1955) propuso un modelo analítico en suelos puramente friccionantes donde utiliza la diferencia entre el peso unitario sumergido y un peso unitario (entre el suelo y el nivel freático) multiplicado por factor  $F$  que está entre 0 (totalmente sumergido) y 1 (agua en la superficie o por debajo de la superficie). Sin embargo, el cálculo de la capacidad portante debido a la disminución del cambio del peso  $N_\gamma$ , no es un enfoque adecuado ya que solo se tiene en cuenta el efecto de las presiones positivas ignorando el efecto en las presiones negativas (Costa et al., 2003).

Para explicar la capacidad portante en suelos parcialmente saturados (S. Y. Oloo et al., 1997) toma la teoría de (D G Fredlund et al., 1978) cual plantea que el suelo se somete a una presión de agua negativa más allá de su valor de entrada de aire, el aire entra a los poros y se vuelve insaturado. Este planteamiento incorpora el término de la succión matricial en la resistencia al corte. Como se describió en el capítulo anterior la limitación para describir la resistencia al corte en términos de  $\tan \phi^b$  es que no es lineal, teniendo

en cuenta esta limitación (S. Y. Oloo et al., 1997) utiliza una envolvente bilineal propuesta por (Gan 1988) donde divide la ecuación en dos partes; (i) la contribución de la succión en la entrada del aire y (ii) la contribución de la succión después de la entrada de aire. Desarrollo la ecuación de capacidad portante tomando equilibrio límite, la contribución a la succión en las fuerzas pasivas y la resistencia al corte a lo largo de la espiral logarítmica de la superficie de falla. Si la succión matricial es uniforme la expresión está dada por:

$$qf = [c' + (u_a - u_w) * \tan \phi^b] * N_c + \frac{1}{2} * B\gamma N_\gamma \quad [3.22]$$

En esta ecuación propuesta por (S. Y. Oloo et al., 1997) no se tiene en cuenta la sobrecarga ya que fue propuesta para pavimentos.

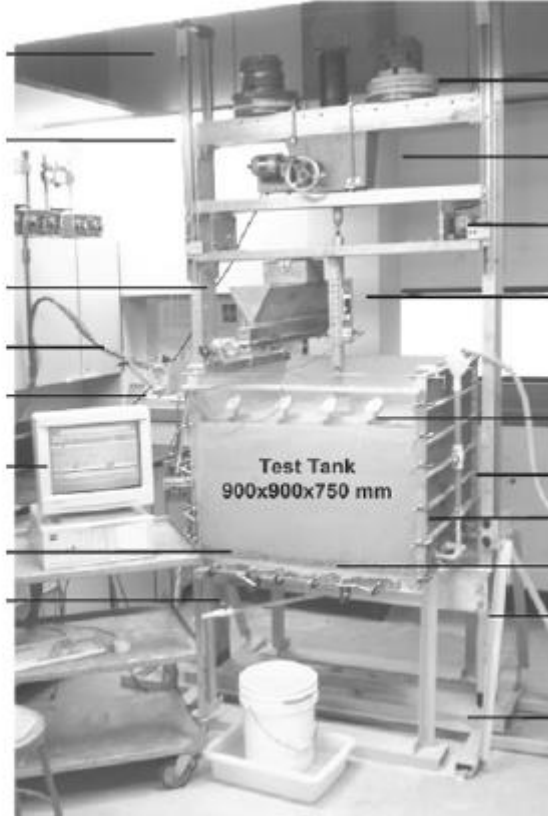
Para poder aplicar la ecuación 12 y entender el cambio de asentamientos producidos por la succión (Costa et al., 2003) hace pruebas de carga de placas a 1.5 m de profundidad en suelos lateríticos, donde mediante la reacción con una viga produce esfuerzos y la succión la monitorea con tensiómetros. La misma investigación analizó la influencia de la succión en los cambios de asentamientos, donde un aumento considerable de succión conduce un aumento sustancial en la rigidez en otras palabras al aumentar la succión disminuyen los asentamientos. Para el análisis de la capacidad portante los autores toman un esfuerzo de fluencia, donde definen el esfuerzo de falla el cual corresponde al inicio de la deformación permanente del suelo, concluyendo que un pequeño aumento en la succión de 10 kPa conduce a esfuerzos de falla dos veces mayor a cuando es la succión es cero. Para el análisis teórico utiliza la siguiente ecuación:

$$q_{ult} = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] N_c S_c + q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad [3.23]$$

Donde los parámetros de resistencia al corte no saturado los obtienen de pruebas triaxiales controlando la succión. Utilizando la ecuación 13 se obtuvieron resultados conservadores para la capacidad portante del sistema sometido a ensayo, cinco veces más alto que lo resultados experimentales de pruebas inundadas y tres veces mayor de pruebas húmedas.

Para poder mejorar las aproximaciones anteriores (Vanapalli & Mohamed, 2007) utilizaron el mismo concepto del capítulo anterior, donde se utiliza un parámetro de ajuste y la curva de retención de humedad. Para medir la capacidad portante desarrollaron un equipo de modelación física a escala reducida con zapatas, que

consiste en una celda de carga que genera esfuerzos en un molde metálico donde se pueden generar varias condiciones, como cambio del nivel freático y condiciones totalmente saturadas. El montaje experimental realizado se muestra en la Figura 11.



**Figura 11** Montaje de equipo de capacidad portante planteado por Vanapalli (2006)

Tomando el concepto (Vanapalli et al., 1996) reemplaza el parámetro  $\tan \phi^b = S^\psi$  para tener en cuenta la variación no lineal de la resistencia al corte quedando la siguiente ecuación:

$$q_{ult} = [c' + (u_a - u_w) S^\psi \tan \phi'] N_c S_c + q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad [24]$$

donde  $\psi$ : parámetro de ajuste de la capacidad portante.

Este parámetro  $\psi$ , como el parámetro  $\kappa$  está limitado ya que para utilizar este parámetro se deben tener los resultados experimentales disponibles. Para poder superar esta limitación (Garven & Vanapalli, 2006) proponen una relación en  $\kappa$  y el índice de plasticidad IP. Teniendo en cuenta valor de la entrada del aire y el parámetro de ajuste que modifica la ecuación quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$q_{ult} = [c' + (u_a - u_w)_b (1 - S^\psi) \tan \phi' + (u_a - u_w)_{avr} (S^\psi) \tan \phi'] N_c S_c + q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad [3.25]$$

- $(u_a - u_w)_{avr} = \frac{1}{2}((u_a - u_w)_1 + (u_a - u_w)_2)$
- $(u_a - u_w)_1$ : Succión matricial cerca a la base
- $(u_a - u_w)_2$ : Succión en la parte inferior del bulbo de tensión 1.5 B.
- $(u_a - u_w)_b$ : Entrada del aire.

Similar el método utilizado (Costa et al., 2003) este método es conservador, pero mucho más aproximado. Donde obtuvieron diferentes valores de la succión matricial variando el nivel freático, logrando una comparación razonable entre lo medido y lo estimado. El parámetro de ajuste (Garven & Vanapalli, 2006) hacen una exhaustiva revisión de 19 ecuaciones propuestas para determinar la resistencia al corte, donde 6 utilizan la curva de retención de humedad, abarcando 10 suelos. Para las arenas ensayadas por (Vanapalli & Mohamed, 2007) es 1 para suelos de granos para suelos de grano fino se requiere un valor mayor. La relación propuesta es:

$$\psi = 1.0 + 0.34Ip - 0.0031Ip^2$$

[3.26]

Los últimos investigadores en estudiar la capacidad portante en suelos no saturados son (Vahedifard, Asce, Robinson, & Asce, 2016) donde presenta un método unificado de capacidad portante de fundaciones poca profundas bajo flujo constante siguiendo los conceptos de (Lu et al., 2010; Lu & Likos, 2006). Abarcando las variaciones de la profundidad del nivel freático y diversas condiciones de flujo superficial (evaporación y filtración), utilizando el modelo de (Garner 1958) desarrollan soluciones analíticas unidimensionales de perfiles de succión matricial en estado estacionario infiltración vertical o tasas de evaporación. Definen la conductividad hidráulica como:

$$k = k_s e^{-\alpha(u_a - u_w)} \quad [3.27]$$

donde  $k_s$ : la conductividad hidráulica saturada, aplicando la ley de Darcy y el modelo de Garner (1958), junto con la imposición de condiciones límites de succiones matricial cero en el nivel freático es decir  $z=0$ , donde  $z$  es la altura del nivel freático y una tasa de infiltración o evaporación constante  $q$  en la superficie del suelo, permite que se obtenga el perfil de succión matricial unidimensional con profundidad (Yeh 1989; Lu y Likos 2004)

$$(u_a - u_w) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ \left( 1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha z} - \frac{q}{k_s} \right] \quad [3.28]$$

Donde  $\gamma_w$ : peso unitario del agua, definen  $S_e$  versus  $z$  en condiciones de filtración vertical



no saturado como

$$S_e = \left( \frac{1}{1 + \{-\ln[(1 + \frac{q}{k_s})e^{-\gamma_w \alpha z - \frac{q}{k_s}}]\}^n} \right)^{(n-1)/n} \quad [3.29]$$

La  $\sigma_s$  que contribuye directamente al esfuerzo efectivo en condiciones de filtración vertical insaturado se puede obtener mediante la combinación

$$\sigma_s = -\frac{1}{\alpha} \frac{\ln[(1 + \frac{q}{k_s})e^{-\gamma_w \alpha z - \frac{q}{k_s}}]}{(1 + \{-\ln[(1 + \frac{q}{k_s})e^{-\gamma_w \alpha z - \frac{q}{k_s}}]\}^n)^{(n-1)/n}} \quad [3.30]$$

La ecuación de forma cerrada, para el perfil de esfuerzo de succión se ha empleado con éxito en problemas clásicos de geotecnia.

Igual que en la ecuación de Vanapalli (2007) esta ecuación utiliza la ecuación clásica de Terzaghi de capacidad portante a través del concepto de cohesión total, siguiendo el enfoque explicado, la capacidad portante de suelos parcialmente saturados la estiman de la siguiente manera

$$q_{ult} = [c' + (a(1 - S_{e,AVR}) \tan \phi' + [(u_a - u_w)S_e]_{AVR} \tan \phi')]N_c S_c + qN_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad [3.31]$$

donde  $a$  :representa la presión de entrada de aire

$S_{e,AVR}$ : grado de saturación promedio, que es una función de la succión matricial promedio

$[(u_a - u_w)S_e]_{AVR}$ : esfuerzo de succión promedio más allá de la entrada de aire

Al seleccionar los parámetros de entrada apropiados, la formulación propuesta puede usarse para estimar  $q_{ult}$  para suelos de grano fino y grueso bajo diversas condiciones de límite de flujo superficial y con diferentes grados de saturación (Vahedifard et al., 2016). Este método utiliza la integración numérica de elementos diferenciales para calcular la succión matricial promedio dentro de la zona del bulbo de esfuerzo debajo de la base.

### 3.7.1. Velocidad de penetración

Para definir el comportamiento drenado o no drenado de las arcillas es de suma importancia seleccionar una velocidad de penetración adecuada. Esta velocidad puede estar afectada por los fenómenos de consolidación, a medida que se reduce la tasa de penetración, la resistencia comienza aumentar con el aumento debido a los efectos de viscosos (Craig, 1985). Para seleccionar una velocidad de penetración se toma la ecuación (Chung, Randolph, & Schneider, 2006) mediante una estimación de una velocidad adimensional  $V$ , define los límites de velocidad correspondientes al comportamiento drenado y no-drenado (o tasa de penetración); donde dependerá del

diámetro de la zapata  $d$ , coeficiente de consolidación  $C_v$  y  $v$  como la velocidad de penetración.

$$V = \frac{vd_s}{C_v} \quad [3.32]$$

Una curva envolvente, definida en la ecuación 3.32, considera diferentes velocidades de aplicación para una barra T y fue propuesta después de un estudio experimental por (House et al. 2001).

$$\frac{q}{q_{ref}} = \frac{1+bv}{1+cV^d}$$

[3.33]

Donde  $q_{ref}$  es la resistencia de penetración de referencia y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son parámetros de ajuste de la curva, tomados por (House et al. 2001), donde son constantes para la arcilla (1, 2.77, 2.47, 1.30).

## 4. Resultados

### 4.1. Influencia de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelo natural

#### 4.1.1 Exploración del Suelo

En el bloque L de la Escuela Colombiana de Ingeniería se realizó una exploración del subsuelo para conocer sus propiedades físicas como se muestra en la Tabla 2, el suelo de interés que se va estudiar es la capa superficial ya que tiene mayor influencia de desecación. Se realizaron ensayos de laboratorio en cada estrato encontrado, como fueron Gravedad específica (INV E-128-13), densidad aparente (ASTM 7263-09), humedad (INV E 121-13) y límites de Atterberg (INV E 125 y 126-13). La tabla 3 nos muestra una disminución de densidad aparente mientras aumenta la profundidad de los estratos, la gravedad específica en los dos primeros estratos corresponde a un limo arenoso y los siguientes estratos a posibles arcillas limosas.

**Tabla 2** Resumen de exploración del suelo

Profundidad (m)			DESCRIPCIÓN	SUCS	Y (T/m <sup>3</sup> )	G <sub>s</sub>	Prof. Media	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0	-	0.2	Capa vegetal		1					
0.2	-	0.3	Relleno		1.8		0.25			
0.3	-	0.6	Materia orgánica negra		1.04		0.45			
0.6	-	0.7	Limo amarillo oscuro algo plástico	MH	1.372	2.64	0.65	62.33	48.97	13.36
0.7	-	1.3	Limo café oscuro no plástico	ML	1.72	2.62	1.00			
1.4	-	1.5	Limo arcilloso habano con gris, plástica	MH	1.70	2.70	1.45	87.11	42.68	44.43
1.5	-	2.9	Arcilla gris clara con vetas de oxidación, plástica	CH	1.7	2.7	2.15	74.5	28.41	46.09
2.9	-	3.7		MH	1.64	2.69	3.30	70.59	40.67	29.92
3.7	-	3.9		MH	1.47	2.69	3.80	64.54	36.6	27.94
3.9	-	4.1	Arcilla limosa gris oscura, algo plástica	MH			4.00	63.19	44.35	18.84

Para estudiar el suelo de interés, se retiró el suelo hasta una profundidad de 1.5m con el objetivo de alcanzar el limo arcilloso plástico, tipo de la ciudad de Bogotá. Este suelo presenta partículas arcillosas como se puede ver en la en la Figura 12 (granulometría laser ISO 13320 2009), se considera arcilla a las partículas menores a 2 μm (Skempton, 1951); en consecuencia el 10 % de partículas son menores a este tamaño, esto nos indica una fracción de arcilla, garantizando fuerzas de tensión superficial y fuerzas derivada de la presión negativa del poro (succión) (Lu & Likos, 2006). La granulometría

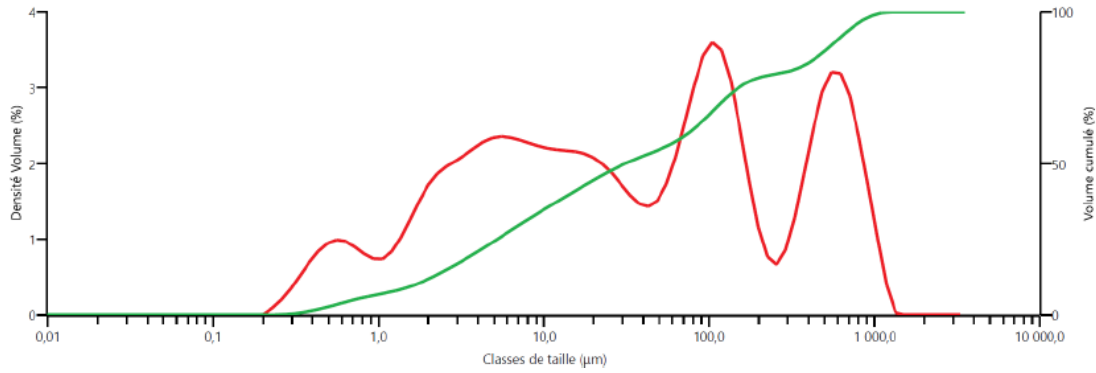
laser se realizó dentro del proyecto de convocatoria interna 2017. Teniendo en cuenta el porcentaje de arcilla y el índice de plasticidad como se muestra en la tabla 2 se calcula la actividad definida por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla}} = 4.24 \quad [4.1]$$

Como se indica en la tabla 3 la fracción arcillosa podrá ser susceptible a cambios volumétricos por el agua absorbida, y muy probablemente tendrá problemas de expansividad ya la fracción arcillosa es activa, anqué tiene un bajo contenido de arcillas.

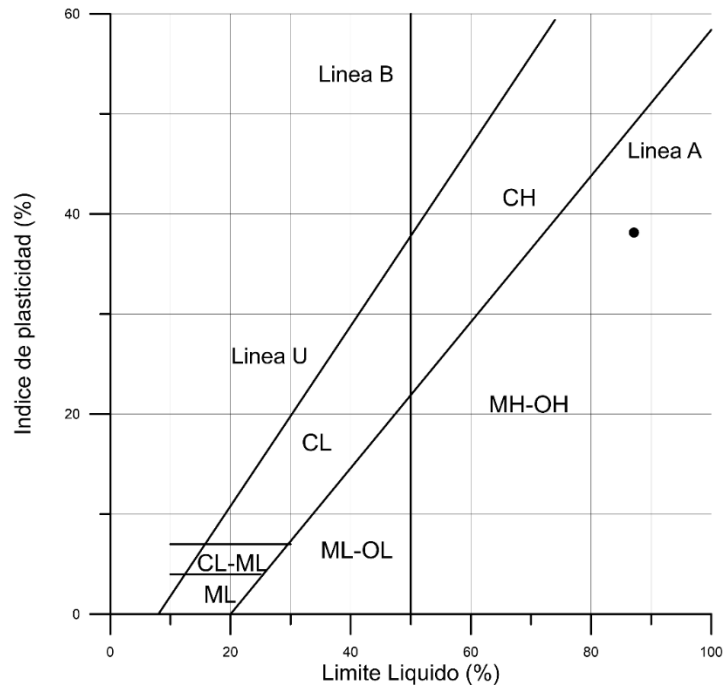
**Tabla 3** Actividad de las Arcillas tomada Skempton (1952)

Descripción	Actividad A
Arcillas inactivas	< 0.75
Arcillas Normal	0.725-1.25
Arcillas activas	>1.25
<b>Mineral</b>	<b>ACTIVIDAD A</b>
KAOLINITA	0.3-0.5
ILITA	0.5-1.3
NA- MONTMORILLONITA	4-7
CA- MONTMORILLONITA	0.5-2.0



**Figura 12** Curva de distribución de tamaño por difracción laser

El suelo investigado es considerado un limo de alta plasticidad como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13** Clasificación del suelo (Carta de plasticidad)

#### 4.1.2 Consolidación

Después de evaluar las caracterizaciones físicas del material se debe abordar los efectos mecánicos. Uno de los ensayos más importantes del comportamiento mecánico del suelo es el ensayo de consolidación; la metodología de este ensayo se sigue bajo la norma INV E 154-13. El ensayo de consolidación se realizó en el limo arcilloso con

incrementos de esfuerzos con  $LIR = \frac{\Delta\sigma'}{\sigma} = 1'$ , donde  $\Delta\sigma'$  es el incremento de esfuerzo y  $\sigma$  es el esfuerzo en la muestra. La exploración se realizó en época de invierno para asegurar que la muestra se encuentre totalmente saturada y no realizar un proceso de saturación. En la Tabla 4 se muestran los parámetros iniciales del suelo.

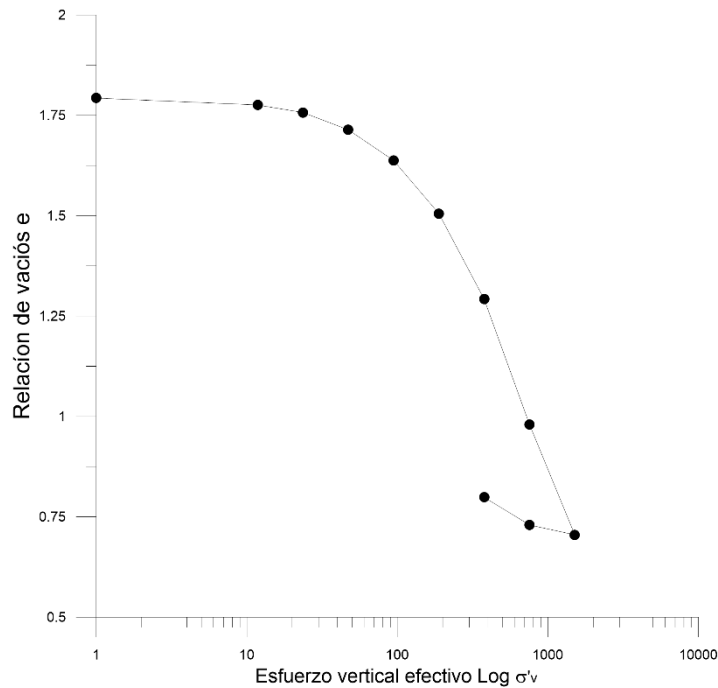
**Tabla 4** Parámetros iniciales para ensayo de consolidación

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<i>G<sub>s</sub></i>	2.70	
<i>w (%)</i>	0.68	%
<i>Area</i>	20.79	cm <sup>2</sup>
<i>Volumen</i>	40.35	cm <sup>3</sup>
<i>W anillo (g)</i>	48.52	g
<i>W muestra+anillo (g)</i>	113.94	g
<i>W muestra hum (g)</i>	65.42	g
<i>W s (g)</i>	39.01	g
<i>H<sub>o</sub> (cm) =</i>	1.94	cm
<i>γ w=</i>	1.00	g/cm <sup>3</sup>
<i>H<sub>s</sub></i>	0.69	cm
<i>H<sub>v</sub></i>	1.25	cm
<i>eo</i>	1.79	cm
<i>V<sub>s</sub></i>	14.45	cm <sup>3</sup>

Uno de los factores más importantes en el ensayo de consolidación es el efecto por la duración de carga, por lo tanto, se incrementa la carga siguiendo la metodología de D. W Taylor, determinado el t<sub>90</sub> (tiempo para alcanzar el 90% de la consolidación primaria) de la gráfica desplazamientos vs raíz de tiempo y se determina el coeficiente de consolidación vertical para cada incremento de carga (12, 24, 47, 94, 189, 377, 755, 1510 kPa). Posteriormente, se graficó el esfuerzo efectivo vertical vs la relación de vacíos como se ilustra en la Figura 14, el historial de esfuerzos del limo arcilloso nos muestra un esfuerzo de preconsolidación cerca de 180 kPa con una relación de sobreconsolidación (OCR) cerca de 11, esto quiere decir que podrá tener asentamientos muy pequeños a cargas menores a 180 kPa. La razón de este esfuerzo de preconsolidación tan grande se puede atribuir al origen geológico del estrato, donde estuvo cargado por una lámina de agua por su origen lacustre o a la preconsolidación por el efecto de la subsidencia y desecación del suelo de Bogotá.

De la curva de compresibilidad se determinó el índice de compresibilidad y de recompresión como se muestra en la Tabla 5. La permeabilidad se calculó a partir del

coeficiente de compresibilidad volumétrica y el coeficiente de consolidación vertical para el nivel de esfuerzo in-situ.



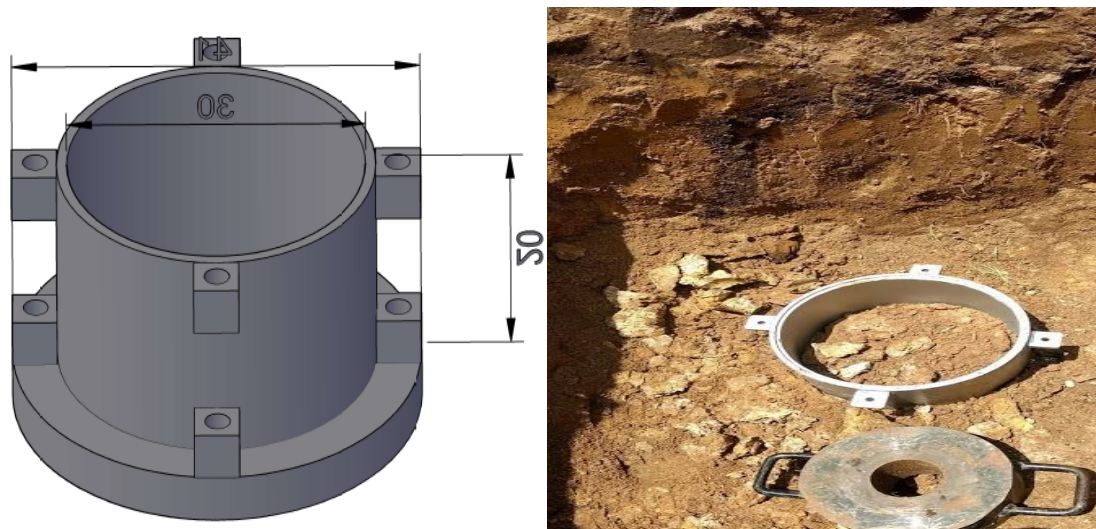
**Figura 14** Curva de compresibilidad de limo arcilloso natural de Bogotá

**Tabla 5** Resultados del ensayo de compresibilidad

Propiedad	Valor
<b>Ks (m/s)</b>	1.47x10-9
<b>Cc</b>	0.906
<b>Cr</b>	0.183

### 4.1.3 Acondicionamiento y extracción de muestra en suelo natural

Una vez realizada la caracterización tanto física como mecánica al limo arcilloso se procede a extraer la muestra del terreno. La extracción se realizó con un molde metálico cilíndrico de 30 cm de diámetro y 20 cm de altura como se muestra en la Figura 15 a). Se ejecutó una calicata de 2 x 2 x 1.5 m de profundidad para poder hincar el molde en el suelo de interés como se muestra en la Figura 15 b). El molde se hincó 10 cm más profundo para evitar la alteración de la muestra en los bordes y se extrajo el molde excavando los alrededores.



**Figura 15** a) Molde metálico acotado en cm b) Hincado de molde metálico en el terreno

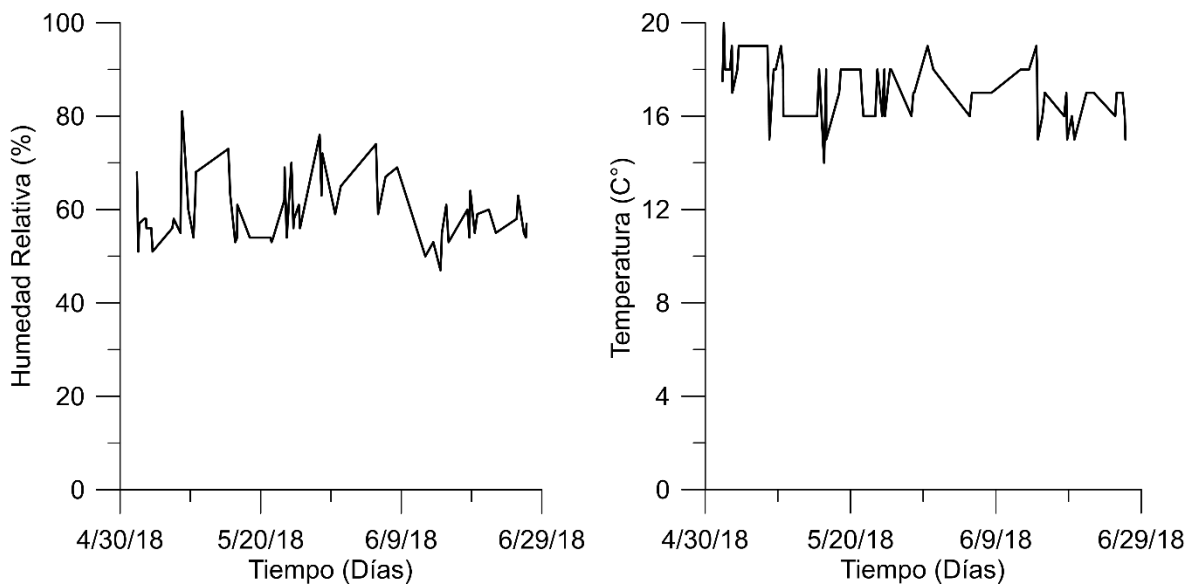
En este suelo, se tomaron 3 muestras para realizar ensayos de capacidad portante a escala reducida dejando secar la muestra hasta alcanzar diferentes valores de humedad (Ver tabla 7). Las muestras se tomaron en diferentes épocas del año con humedades iniciales promedió entre el 60 y el 48%, posteriormente se acondicionaron de la siguiente manera:

- Muestra No. 1: los ensayos realizados en esta muestra se realizaron directamente con el contenido de humedad inicial del terreno.
- Muestra No. 2: se dejó secar la muestra durante 52 días comenzando el 5 de mayo del 2018 hasta el 26 de junio del 2018, el secado se realizó en el laboratorio de suelos y pavimentos donde en este periodo se registraron una humedad relativa promedió de 59% y temperatura promedió de 17° C como se muestra en la Figura 16.
- Muestra No. 3: se tuvo un periodo de acondicionamiento de 28 días (entre el 24 de octubre hasta el 19 de noviembre del 2018), con una temperatura promedió de 18° C y una humedad relativa promedió de 54% como se muestra en la Figura 17.

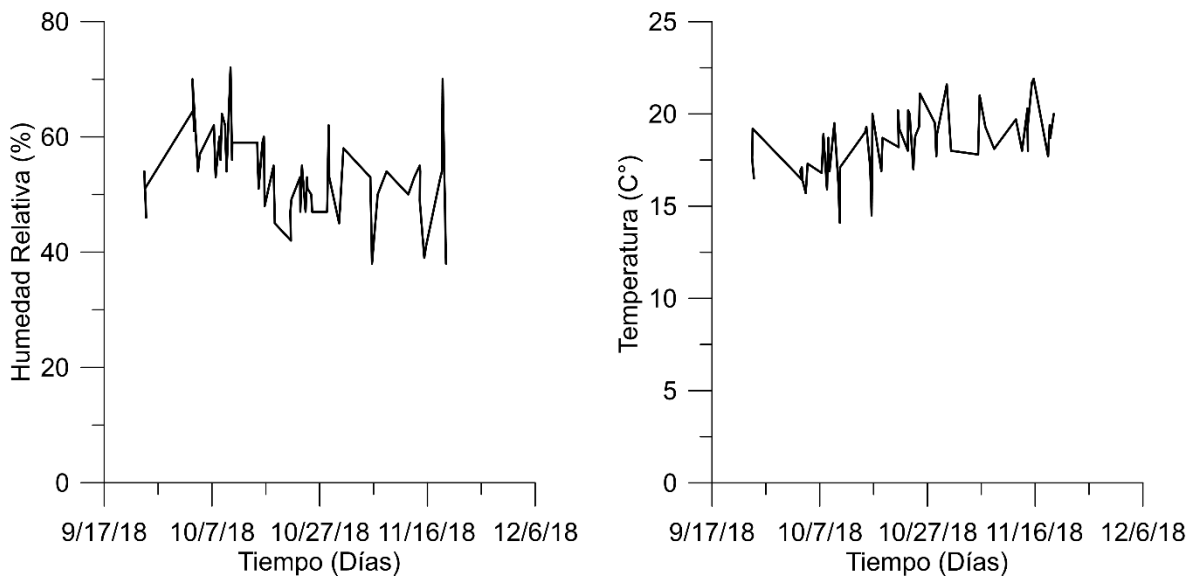
**Tabla 6** Descripción de humedad y tiempo de secado para muestra natural

<i>Suelos ensayados</i>	<i>Tiempo de secado del suelo (días)</i>	<i>Contenido final de humedad gravimétrica (%)</i>
<i>Ensayo No. 1</i>	0	50
<i>Ensayo No. 2</i>	52	23
<i>Ensayo No. 3</i>	28	27





**Figura 16** a) temperatura y b) humedad relativa acondicionamiento ensayo No. 2



**Figura 17** a) temperatura y b) humedad relativa acondicionamiento ensayo No. 3

Se tuvo bastante cuidado en la etapa de acondicionamiento ya que las muestras podrían sufrir de secado radial mientras se disminuye el diámetro y de secado por la parte inferior del molde. Para solucionar el primer problema se le agregó a la muestra plastilina por los bordes del molde y para el segundo problema se controló el nivel de agua de la muestra usando una probeta de 1000 ml conectada a la parte inferior del molde. Para permitir el flujo de agua en el suelo, se instaló una capa de arena en la parte inferior del molde de 3 cm, este montaje se puede ver en la Figura 18.

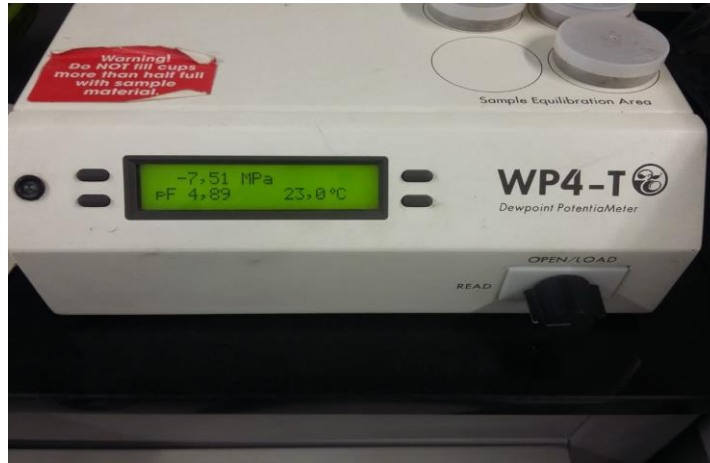


**Figura 18** Acondicionamiento de la muestra

#### **4.1.4 Curva de retención de humedad en el suelo natural**

Como se nombró en el capítulo 3.6, la incorporación de la presión de succión en el estado de esfuerzos ha sido de gran interés para entender el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, por esta razón se trata la succión como una variable de estado. Para determinar la curva de retención de humedad, se midió la succión de un suelo para diferentes contenidos de humedad. Debido al amplio rango de succiones esperadas en el suelo, las cuales pueden estar en el rango de de 0 a 15000 kPa (D.G. Fredlund et al., 1994), se decidió utilizar dos técnicas de medición :

1. Psicrómetro de punto de rocío (WP4): Se utilizó el WP4-T de la Universidad de los Andes, que es una herramienta de gran utilidad ya que permite medir la succión en 5 minutos, con un rango de medición 0.1 a 300 MPa y una precisión de  $\pm 0.1$  MPa como se muestra en la Figura 19. Se llevaron muestras cilíndricas de arcilla inalterada de 3.5 cm de diámetro con 0.5 cm de altura y se dejaron secar en periodos cortos con una semana de acondicionamiento para alcanzar equilibrio hidráulico. Se tomaron 8 medidas de succión para diferentes contenidos de humedad gravimétrica desde 25.81% hasta 6.02%.



**Figura 19** WP4-T de la universidad de los Andes

2. Papel filtro: Esta técnica de medición es de las más utilizadas en los laboratorios para medir la curva de retención de humedad, el método se basa en el supuesto que el potencial hídrico del suelo húmedo y el del papel filtro en contacto serán el mismo en equilibrio (S. AL-KHAFAT AND R. J. HANKS, 1974). Esta técnica se utilizó para humedades altas con el objetivo de completar la curva para succiones bajas que no alcanza a medir el WP4. Se utilizó la metodología propuesta por la norma INV-159-13 (determinación de la succión de un suelo usando papel filtro). El ensayo se realizó con papel Whatman No. 42 con capacidad de retención de 2.5  $\mu\text{m}$ . El montaje del ensayo se muestra en la Figura 20.



**Figura 20** Montaje del ensayo de papel filtro

Se obtuvieron 10 puntos para determinar la curva de retención de humedad como se muestra en la Tabla 7, como se nombró en el capítulo 3.3 existen varios métodos para ajustar matemáticamente la curva retención, en esta investigación se seleccionó el de (Van Genuchten, 1980). La curva de retención de humedad se realizó dentro del

proyecto de convocatoria interna 2017 mencionado anteriormente.

**Tabla 7** Medidas de  $\theta$  vs succión para curva SWCC suelo natural

	$\theta$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Suc. (kpa)	h (m)
WP4	0,088	77950	7945,973
WP4	0,097	61710	6290,520
WP4	0,129	15240	1553,517
WP4	0,168	10930	1114,169
WP4	0,179	9220	939,857
WP4	0,224	5260	536,188
WP4	0,261	3000	305,810
WP4	0,272	2310	235,474
P. filtro	0,420	1561	159,095
P. filtro	0,513	527	53,721

Este método se basa en la teoría de (Mualem, 1950) donde describe la curva SWCC en ecuaciones matemáticas basadas en la distribución de poros donde suponiendo que el suelo consiste en conjuntos de poros interconectados (M. D. Fredlund, 1997), la ecuación que define el modelo de Van Genuchten-Mualem es:

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

[4.2]

- $\theta_s$ = Contenido de agua saturado
- $\theta_r$ =Contenido de agua residual
- $\alpha$ = Valor de entrada de aire
- $n$ = Valor relacionado con los tamaños del poro
- $m$ =Parámetro de ajuste de la curva
- $h$ =succión en metros

Los valores  $\theta_s$  y  $\theta_r$  se calcularon experimentalmente, el primer valor se estimó con relaciones de fase cuando el grado de saturación es 100% y el segundo se estima dejando secar las muestras hasta que el grado de saturación no cambia. Para determinar los demás parámetros se utilizó un software de optimización llamado RECT de la compañía PC-PROGRESS, que utiliza mínimos cuadrados para estimar los coeficientes desconocidos. En este software se ingresaron los valores iniciales

como se muestra en Tabla 8, la columna de índice hace referencia a si el valor se tiene que iterar (0 valor conocido y 1 valor para iterar), los valores obtenidos por iteración son  $\alpha$  y  $n$  ya que  $m=(1-1/n)$  y el valor  $l$  es el parámetro de conductividad de poros el cual típicamente se toma como 0.5 según (Mualem , 1976). Los parámetros que se desean ajustar mediante la optimización de mínimos cuadrados se suponen inicialmente como 0,033 y 1,40 y se ingresan los valores obtenidos experimentalmente mostrados en la Tabla 7.

**Tabla 8** Parámetros de entrada del software RECT suelo natural

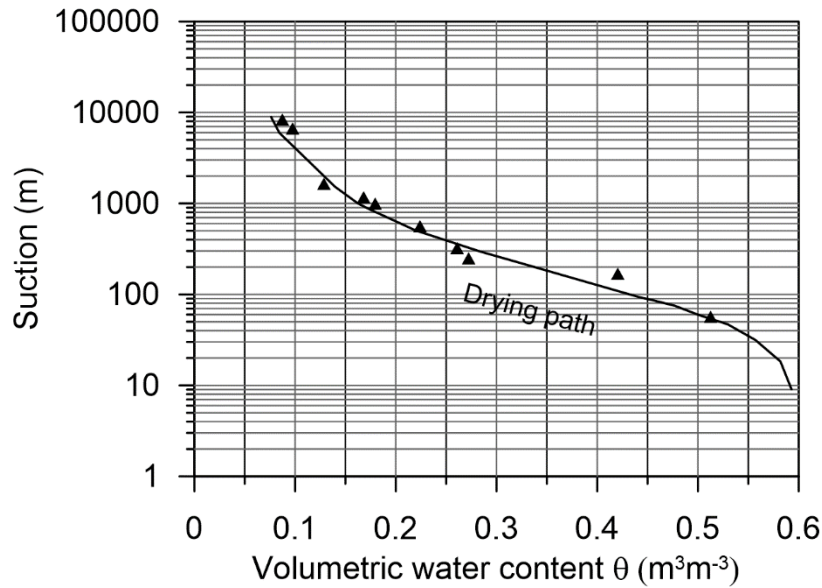
No	Parámetro		
-	Nombre	Valor inicial	Índice
1	$\theta_r$ ( $m^3/m^3$ )	0,0400	0
2	$\theta_s$ ( $m^3/m^3$ )	0,6000	0
3	$\alpha$	0,0330	1
4	$\eta$	1,4000	1
5	$l$	0,5000	0

El programa itera los valores de  $\alpha$  y  $n$  obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 9.

**Tabla 9** Valores obtenidos del programa RECT

NO. ITER	SSQ	$\alpha$	$\eta$
0	0,01622	0,0330	1,4000
1	0,01257	0,0281	1,4002
2	0,00856	0,0202	1,4438
3	0,00632	0,0143	1,5170
4	0,00526	0,0133	1,5658
5	0,00524	0,0132	1,5728
6	0,00524	0,0132	1,5733
7	0,00524	0,0132	1,5733

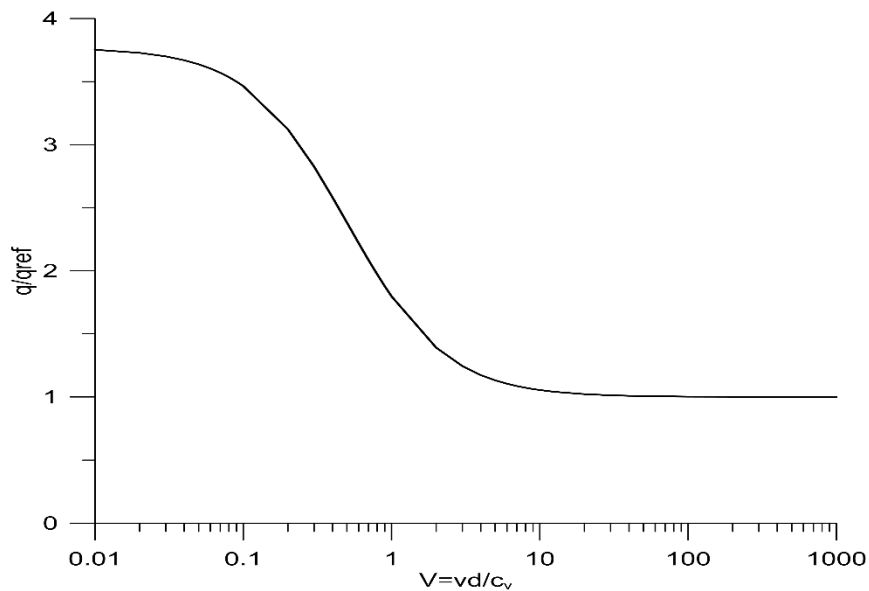
Como se muestra en la Tabla 9, el programa finaliza cuando se obtiene tres veces el mismo valor de la suma de los cuadrados SSQ, se tomaron los valores de la séptima iteración para construir la curva de retención de humedad. Se ingresan los valores en la ecuación 4.2 y se obtiene la humedad para los valores de succión tomados experimentalmente y se grafican como se ilustra en la Figura 21. El intervalo de succiones estudiado esta entre 0 a 1800 kPa.



**Figura 21** Curva de retención de humedad para limo arcilloso de la ciudad de Bogotá

#### 4.1.5 Velocidad de penetración

La velocidad de penetración es uno de los parámetros de entrada más importantes, ya que controla si el ensayo es drenado o no drenado. Como se nombró en el capítulo 3.17 se sigue la metodología propuesta por (House, Oliveira, & Randolph, 2001) donde se utilizan los parámetros de ajuste de la curva para arcillas (1, 2.77, 2.47, 1.30) propuestos por House (ver Figura 22).



**Figura 22** Curva de consolidación ajustada por House et al. 2001

Para utilizar la ecuación 3.32 se usó el coeficiente de consolidación vertical obtenido en

el ensayo de consolidación edométrica como se muestra en la Tabla 10. La base de la zapata utilizada es de 40 mm.

Como resultado y según lo propuesto por House (House et al., 2001), la velocidad adimensional deberá ser de 12.5, por lo tanto, para valores superiores a esta velocidad, el ensayo podrá considerarse como no drenado.

**Tabla 10** Parámetros para determinar velocidad de penetración

<b>Herramienta</b>	<b>Cv (mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>v (mm/s)</b>	<b>V</b>
<i>Fundación</i>	0,056919445	0,017787327	12.5

La velocidad del ensayo de corte directo será la misma propuesta por Lozada (Lozada, 2016). La velocidad de los ensayos de compresión inconfiada será la propuesta por la norma INV-152-13 (Compresión inconfiada en muestras de suelos) la cual establece una velocidad que genera una deformación axial de 0.5 a 2.5% por minuto.

#### **4.1.6 Ensayos de capacidad portante suelo natural**

Los ensayos de capacidad portante se realizaron en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Se utilizó la maquina DYNAPAVE 78-B7030 la cual puede producir una carga máxima de 30 kN y cuenta con un sistema de adquisición de datos que adquiere 0.8 datos por segundo.

Se realizaron 4 ensayos de capacidad portante en cada una de las muestras de suelo que tienen diferentes contenidos de humedad (ver Tabla 11). Como se muestra en la tabla se usaron 2 tipos de zapatas, cuadrada con base 4 cm y circular con un diámetro de 3.8 cm.

**Tabla 11** Ensayos de capacidad portante en suelo natural

<i>Muestra</i>	Tipo de cimentación	Humedad gravimétrica (%)	Nomenclatura
1	S (cuadrada)	50	No.1 S2
1	C (circular)	50	No 1 C1
1	C (circular)	50	No.1 C2
2	S (cuadrada)	22	No.2 S1
2	C (circular)	22	No.2 C1
3	S (cuadrada)	27	No.3 S1
3	S (cuadrada)	27	No.3 S2
3	C (circular)	27	No.3 C1

### **Montaje para aplicación de cargas**

En la Figura 23 se muestra el montaje y la ejecución del ensayo. Como primera estancia se verifico que la muestra no tuviera ningún elemento en la superficie y que estuviera totalmente plana (Figura 23a). Posteriormente, se ingresó el molde en la máquina de compresión y se puso la cimentación sobre la superficie como se muestra en la Figura 23 b. Por último, se impuso una pequeña carga para verificar que el actuador este tocando la cimentación y finalmente se ejecuta el ensayo de capacidad portante con velocidad de aplicación constante como se mencionó anteriormente. Los cuatro ensayos de capacidad portante realizados en cada muestra cuentan con una separación entre ellos de 1.5 B como se muestra en la Figura 23 c.





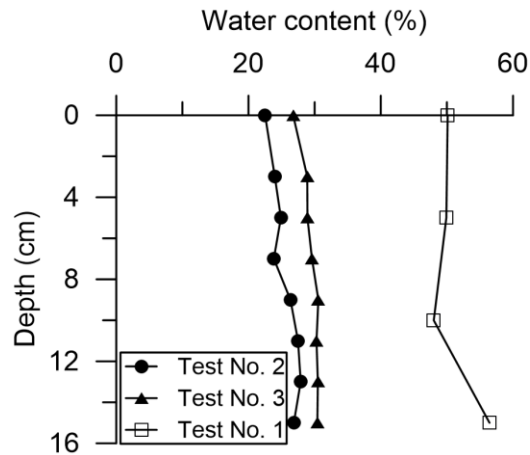
**Figura 23** Procedimiento para ensayos de capacidad portante a) Montaje b) aplicación de carga c) distribución de ensayos en la muestra.

### **Perfil de humedad de muestras de suelo**

Después de terminar el ensayo se realizó un perfil de humedad tomando muestras cada 5 cm desde la parte superior hasta la parte inferior de la muestra, se sigue el mismo procedimiento para todos los ensayos. El perfil de humedad del suelo para las tres muestras se grafica en la Figura 24.

La muestra No.1 cuenta con una humedad gravimétrica del 50% presentando una variación mínima del 2% hasta los últimos 4 cm. Con respecto a esta figura, la humedad tomada para los cálculos de capacidad portante será la superficial, de acuerdo con Terzaghi (Terzaghi, 1943), la cuña de falla en cimentaciones superficiales se genera a una distancia de  $1.5 B$ .

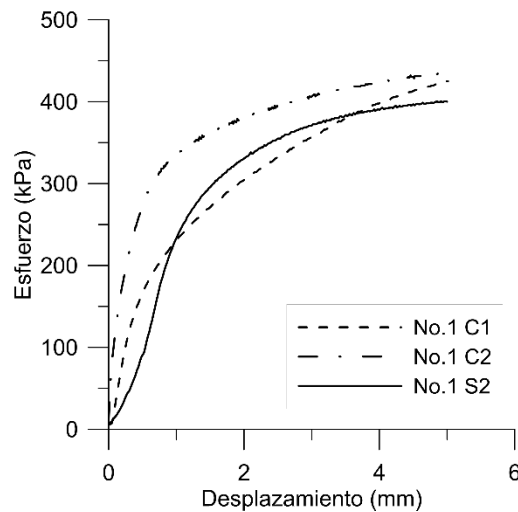
Para esta muestra, se tomó la succión de la SWCC a partir de la humedad gravimétrica. La succión generada fue 236 kPa, el contenido de humedad es cercano a la condición totalmente saturada, sin embargo, se está generando una presión de succión bastante considerable.



**Figura 24** Perfil de humedad de los ensayos de capacidad portante suelo natural

### **Resultados ensayos de capacidad portante Muestra No 1**

La Figura 25 muestra los resultados de la curva esfuerzo vs desplazamiento de los ensayos realizados en la muestra de suelo No 1, en esta figura se observa que el comportamiento del suelo no se ve influenciado por el tipo de zapata en los ensayos No.1 C2 y No.1 S2. Para determinar la capacidad se tomó como criterio de falla el esfuerzo para el cual el desplazamiento registrado es el 10% de la base de la zapata.



**Figura 25** Ensayo No.1 humedad gravimétrica del 50%, succión de 236 kPa.

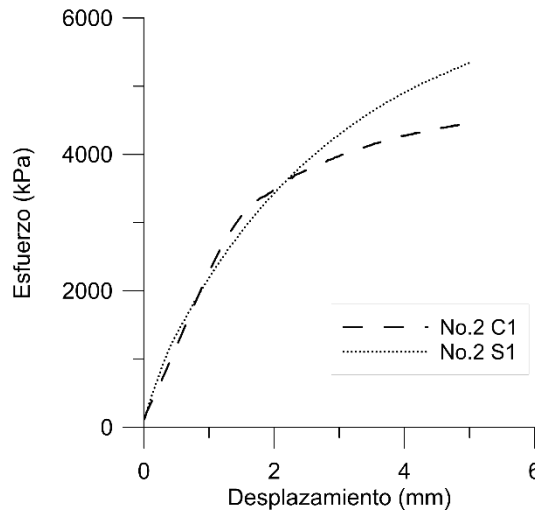
La Tabla 12 muestra los resultados de capacidad portante para los ensayos realizados en la muestra de suelo No 1. No se tuvo en cuenta el ensayo No.1 S1 ya que mostraba una tendencia muy diferente de los otros resultados.

**Tabla 12** Resultados de capacidad portante para el ensayo No.1

	$q_{max}$ (kPa)	Succión (kPa)	Humedad gravimétrica %
No.1 C1	392	236	50
No.1 C2	422	236	50
No.1 S2	390	236	50

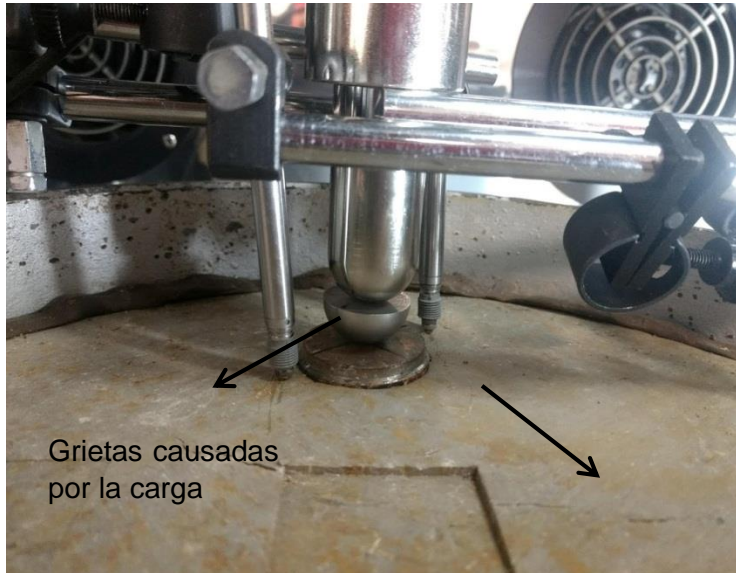
**Resultados ensayos de capacidad portante Muestra No 2**

La muestra No 2 tuvo un tiempo de acondicionamiento de casi 2 meses, donde alcanzo una humedad superficial del 22.5% como se muestra en la Figura 24, con baja variabilidad de humedad respecto a la altura total. La succión para esta humedad es de 1764 kPa, por esta razón hay un aumento en la succión del 650% con respecto a la muestra No 1. Como era de esperarse la capacidad portante aumenta drásticamente con respecto a la condición cercana a la saturación. Los resultados esfuerzo vs desplazamiento para esta muestra se muestra en la Figura 26.



**Figura 26** Ensayo No.2 humedad gravimétrica del 23%, succión de 1764 kPa.

La capacidad portante para el ensayo No.2 S1 fue de 4906 kPa, en este estudio solo se va tomar como representativo este valor, ya que los demás ensayos estuvieron afectados por condiciones de frontera como se muestra en la Figura 27, donde emergieron grietas generadas por el ensayo. Se observa que el comportamiento elástico de los dos ensayos que se muestran en la Figura 26 es similar, pero la capacidad última puede ser influenciada por el problema nombrado. En la Tabla 13 se muestran los resultados de los ensayos realizados en la muestra de suelo No 2.



**Figura 27** Ensayo No.2 C2 sobre muestra con humedad de 22.5 % de humedad

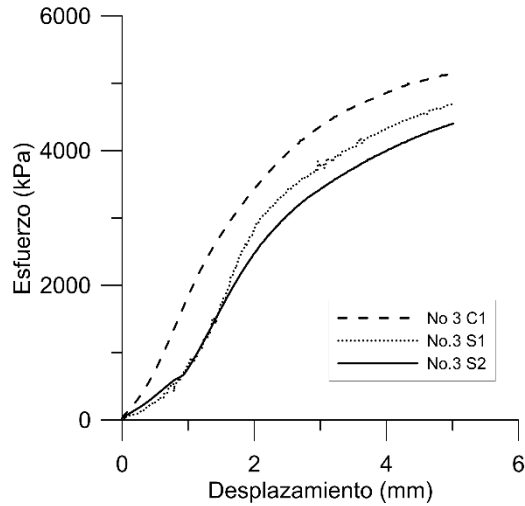
**Tabla 13** Resultados de capacidad portante para el ensayo No.2

	$q_{max}$ (kPa)	Succión (kPa)	Humedad gravimétrica %
No.2 C1	4274	1764	23
No.2 S1	4906	1764	23

### **Resultados ensayos de capacidad portante Muestra No 3**

Para el último ensayo se buscó una humedad intermedia, por esta razón el tiempo de acondicionamiento es la mitad, como se observa en la Figura 24 el contenido de humedad gravimétrica en la superficie es del 27% y la succión calculada fue de 1177 kPa.

En la Figura 28 se muestran los resultados obtenidos para la muestra No 3, donde la capacidad portante es muy superior a la muestra No 1, pero con una diferencia no tan grande de la muestra No 2, sin embargo el aumento en la succión de la muestra 2 a la 3 es de 587 kPa. Los resultados obtenidos de la muestra No 3 se muestran en la Tabla 14, donde se observar que la capacidad portante para los dos ensayos realizados en las zapatas cuadradas tienen la mismas tendencia, pero estas parecen estar influenciada por cambios de succión.



**Figura 28** Ensayo No.3 humedad gravimétrica del 27%, succión de 1177 kPa.

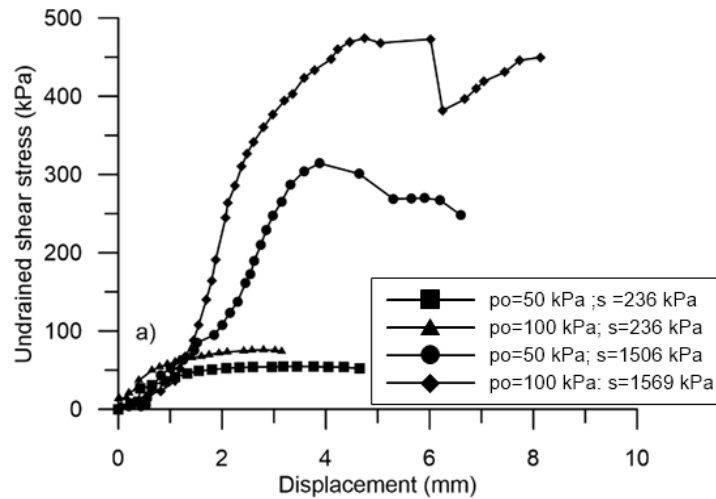
**Tabla 14** Resultados de capacidad portante para el Ensayo No.3

<b>Ensayo</b>	<b>q<sub>max</sub> (kPa)</b>	<b>Succión (kPa)</b>	<b>Humedad gravimétrica %</b>
<i>No.3 C1</i>	4784.35	1176	27
<i>No.3 S1</i>	4405.00	1176	27
<i>No.3 S2</i>	4002.50	1176	27

#### 4.1.7 Ensayos de corte directo suelo natural

Para poder verificar la capacidad portante en los suelos parcialmente saturados y utilizar las ecuaciones de resistencia al corte propuestas por Fredlund (D G Fredlund et al., 1978) e introducirlas en la ecuación de capacidad portante propuestas por Oloo (S. Oloo, 1994) se necesita calcular  $\Phi^b$ . Para esto se realizaron ensayos de corte directo en suelos parcialmente saturados. Estos ensayos se realizan con las mismas muestras utilizadas para los ensayos nombrados en el capítulo 4.1.6 y con muestras inalteradas extraídas en moldes CBR. Los ensayos se realizaron en las muestras con diferentes contenidos de humedad, en la etapa de consolidación se realiza aplicando incrementos de carga según la norma INV-154-13 (Ensayo de corte directo en condición consolidada drenado). Se agregó aceite en las paredes del molde donde se ubica la muestra para evitar la fricción entre la cámara y la muestra. Como se mencionó anteriormente, el ensayo se realizó con una velocidad alta para asegurar que no se disipa el exceso de presión de poros generado, obteniendo un comportamiento no drenado.

Se realizaron 4 ensayos representativos para diferentes contenidos de humedad como se muestra en la Figura 29, se escoge como esfuerzo ultimo el máximo esfuerzo cortante. Se puede observar en la gráfica que las muestras con mayor succión presentan un comportamiento dilatante y las muestras con menor succión un comportamiento contractil, estos resultados son consistentes con los resultados experimentales obtenidos por (Cui, et al., 2005; Ng & Zhou, 2005).



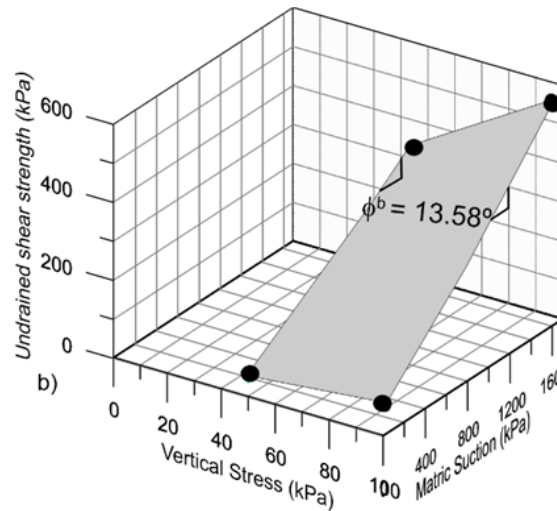
**Figura 29** Resultados de ensayos de corte directo a diferentes succiones suelo natural.

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de corte directo, como era de esperarse se evidencia un aumento en la resistencia al corte por la disminución del contenido de agua, también se observa que la resistencia al corte aumenta por el aumento del esfuerzo normal.

**Tabla 15** Resultados de corte directo muestra natural.

$\sigma$ normal (kPa)	Succión (kPa)	$\tau_{umax}$ (kPa)	Humedad gravimétrica (%)
50	236	55	49
50	1506	314	24
100	236	76	49
100	1569	474	23

Para determinar el parámetro  $\phi^b$  se sigue la metodología propuesta por (Gan & Fredlund, 1988), para esto se graficaron los resultados de la Tabla 15 en el espacio  $(\sigma, \tau_u, s)$ .  $\phi^b$  corresponde a la pendiente de la curva en el espacio  $(s - \tau_u)$ . En la Figura 30 se observa la envolvente de resistencia de Mohr Coulomb modificada para suelos parcialmente saturados, el parámetro obtenido corresponde a  $\phi_b = 13.58^\circ$ .



**Figura 30** Envolvente de resistencia al corte en el espacio ( $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $s$ ) suelo natural

#### 4.1.7.1 Influencia de la Anisotropía en los resultados de corte directo

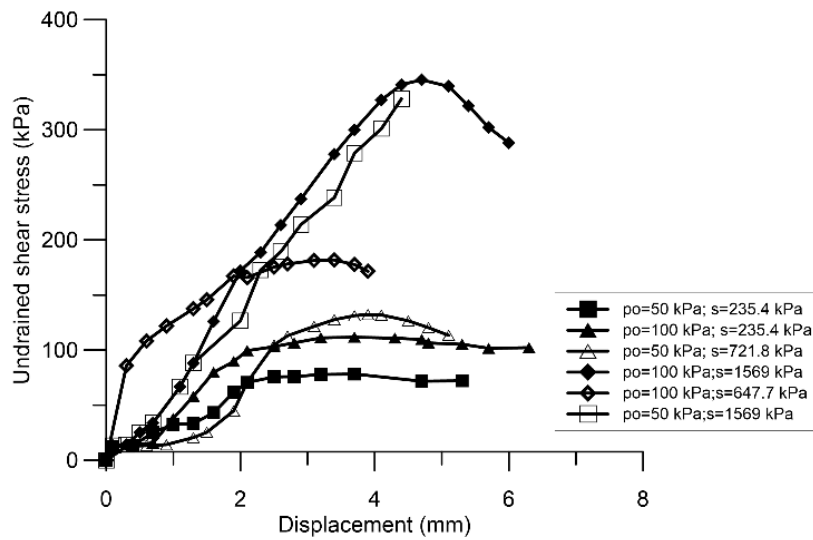
La influencia de la orientación de las partículas en el comportamiento constitutivo ha sido reconocido desde hace mucho tiempo, en donde la relación esfuerzo-deformación y la resistencia al corte dependen de la dirección de carga respecto a la orientación de las partículas (Anandarajah & Kuganenthira, 1995).

Para verificar si la resistencia al corte puede estar afectada por la anisotropía se realizaron ensayos de corte en muestras de suelo inalterado extraídos en moldes CBR. Se siguió el mismo procedimiento que en el ensayo anterior, pero se cortaron las muestras perpendicularmente a la dirección de sedimentación.

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de corte directo, se realizaron 6 ensayos a diferentes contenidos de humedad, donde la máxima succión fue de 1569 kPa. En la Figura 31 se observan los esfuerzos cortantes máximos obtenidos para diferentes succiones, estos resultados muestran un comportamiento muy semejante a los ensayos mostrados en la Figura 29.

**Tabla 16** Resultados de corte directo perpendicular a la sedimentación.

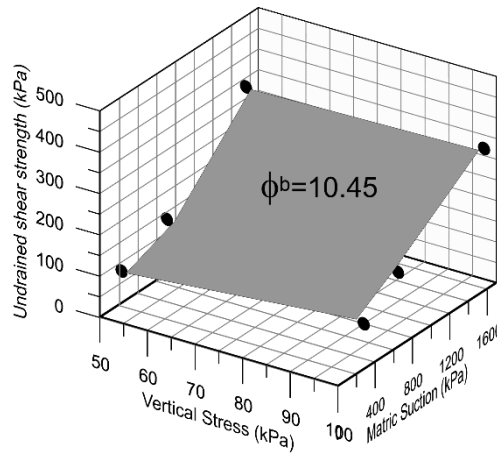
$\sigma_{normal}$ (kPa)	Succión (kPa)	$\tau_{max}$ (kPa)	Humedad gravimétrica (%)
50	245	78	48
100	280	111	45
50	722	132	35
100	648	182	36
50	1569	328	23
100	1569	345	23



**Figura 31** Ensayos de corte directo perpendicular a la sedimentación a diferentes succiones

En el espacio ( $\sigma$ ,  $\tau_u$ , s) mostrado en la Figura 32, se obtiene el parámetro promedio  $\phi_b = 10.45^\circ$ . En esta grafica se muestra lo observado por (Sáez & Escario, 1986) en donde se evidencia que la envolvente en el espacio ( $\tau_u$ , s) se comporta como una curva, sin embargo en este trabajo, se toma un ángulo promedio.





**Figura 32** Envolvente de resistencia al corte perpendicular a la sedimentación en el espacio ( $\sigma$ ,  $\tau_u$ ,  $s$ )

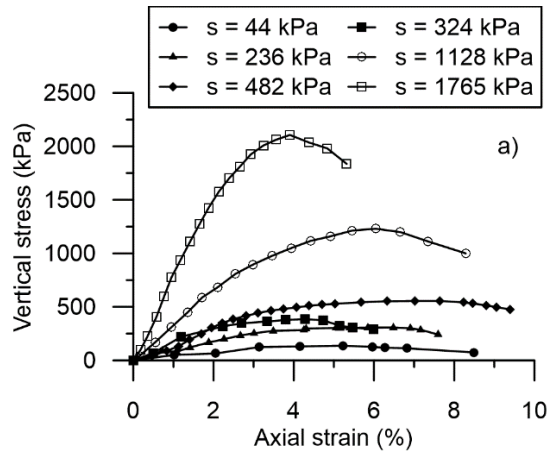
#### 4.1.8 Ensayos de compresión inconfiada en muestra natural.

Para calcular la capacidad portante en suelos saturados en condiciones no drenadas es mundialmente aceptada la ecuación propuesta por Prandtl (Prandtl, 1920), donde la capacidad portante depende la resistencia al corte no drenada. Se realizaron ensayos de compresión inconfiada para diferentes contenidos de agua y se obtuvo la resistencia al corte no drenado para diferentes grados de saturación. Como se muestra en la Figura 33 las muestras se someten a un proceso de desecación a temperatura y humedad ambiente en el laboratorio.



**Figura 33** Probetas a diferentes contenidos de humedad para ensayo de compresión inconfiada. Se ensayaron 7 muestras en la máquina de compresión inconfiada a una velocidad de 1.04 mm/min. Los ensayos se realizaron con rangos de succión similares a los obtenidos en los ensayos de capacidad portante. En la Figura 34 se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores de succión, se puede observar que los valores de

esfuerzo vertical, a medida que aumenta la succión, alcanzan valores muy elevados en comparación con la condición saturada



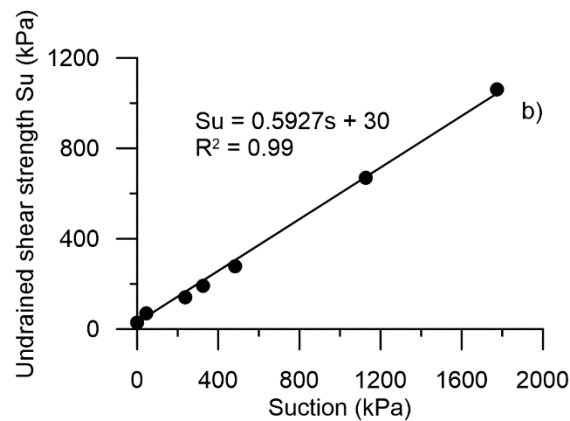
**Figura 34** Resultados de ensayos de compresión confinada a diferentes contenidos de humedad suelo natural

En la Tabla 17 se muestra el contenido de humedad gravimétrica, la succión y el valor de resistencia al corte no drenada obtenido en el ensayo de compresión confinada. Se puede observar que la resistencia al corte de los ensayos de compresión confinada es mucho más alta que la obtenida en el ensayo de corte directo para los mismos niveles de succión.

**Tabla 17** Resultados de compresión confinada suelo natural

<i>Su (kPa)</i>	Humedad gravimétrica (%)	Succión (kPa)
69	54	44
142	50	236
193	44	324
278	41	482
372	36	726
676	27	1147
1099	23	1864

La Figura 35 muestra la resistencia al corte no drenada vs la succión, se realizó una regresión lineal para obtener una correlación de estas dos variables, en efecto, el valor del coeficiente de correlación es  $R^2 = 0.99$ , indicando una buena correlación de los datos.



**Figura 35** Correlación de resistencia al corte no drenado vs Succión suelo natural

#### 4.1.9 Modelación numérica suelo natural

La modelación numérica es una herramienta útil para estudiar el comportamiento del suelo al ser sometido a diferentes estados de esfuerzos, deformaciones, presiones, fuerzas y momentos. El modelo constitutivo más utilizado en los softwares de elementos finitos es el Mohr-Coulomb el cual es un modelo elástico perfectamente plástico, donde la parte elástica se basa en la ley de elasticidad isotrópica de Hooke.

En este trabajo se realizaron modelos numéricos para las tres muestras en el software Plaxis 2D, las modelaciones se realizan en condición no drenada. Los parámetros de entrada se obtuvieron de la parte experimental como se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18** Parámetros de entrada de modelación en Plaxis 2D muestra natural

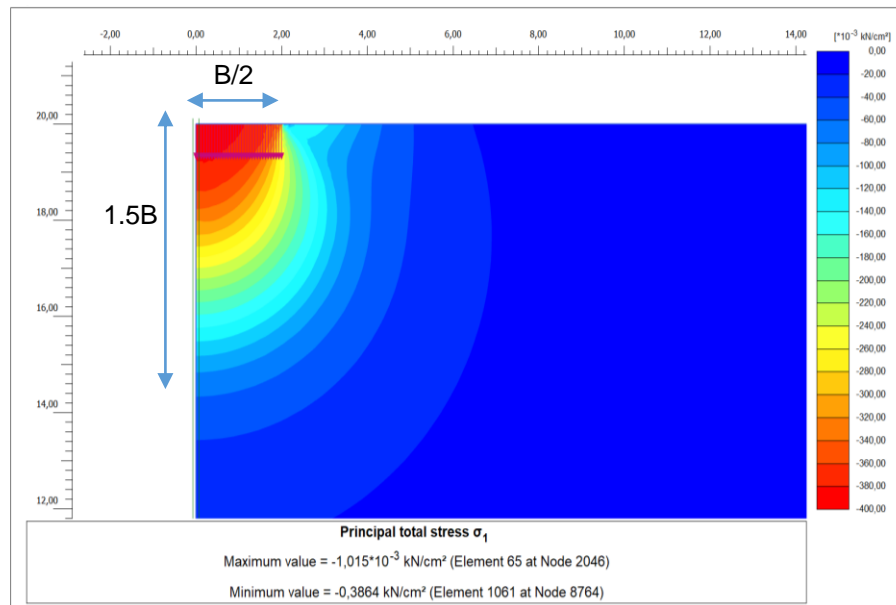
<i>Ensayo</i>	<b>E (MPa)</b>	<b>γ (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>e inicial</b>
<i>No.1 C1</i>	22	17	1,37
<i>No.1 C2</i>	44	17	1,37
<i>No.1 S1</i>	13	17	1,37
<i>No.2 C1</i>	114	19	0,69
<i>No.2 S1</i>	119	19	0,69
<i>No.3 C1</i>	80	18	0,83
<i>No.3 S1</i>	80	18	0,83
<i>No.3 S2</i>	70	18	0,83

El módulo de elasticidad se calculó a partir de la Figura 25, Figura 26 y Figura 28 utilizando la teoría de elasticidad (Timoshenko and Goodier 1951) mediante la siguiente

expresión:

$$E_{sat} = \frac{1.5}{(\Delta\delta/\Delta q_p)} B_p \quad [4.3]$$

Donde  $\Delta\delta$  es el valor del asentamiento y  $\Delta q_p$  el valor del esfuerzo vertical en la zona elástica y  $B_p$  es la base de la cimentación. En la Figura 36 se ilustra el modelo realizado en elementos finitos, para esto se aplicó una carga que produce un desplazamiento del 10% de la base de la cimentación, además las modelaciones fueron realizadas con una condición de simetría axial para poder utilizar la ecuación 4.3. El módulo de Poisson utilizado fue de 0.3 y el modelo se realizó con las dimensiones del molde.



**Figura 36** Modelo en Plaxis 2D ensayo No 3 S2

El efecto de la succión en la resistencia al corte no drenado se incluye en el modelo numérico imponiendo una resistencia no drenada calculada mediante la ecuación obtenida experimentalmente con el ensayo de compresión inconfiada:

$$S_{u\text{ unsat}} = 0.5927 * (u_a - u_w) + S_{usat} \quad [4.4]$$

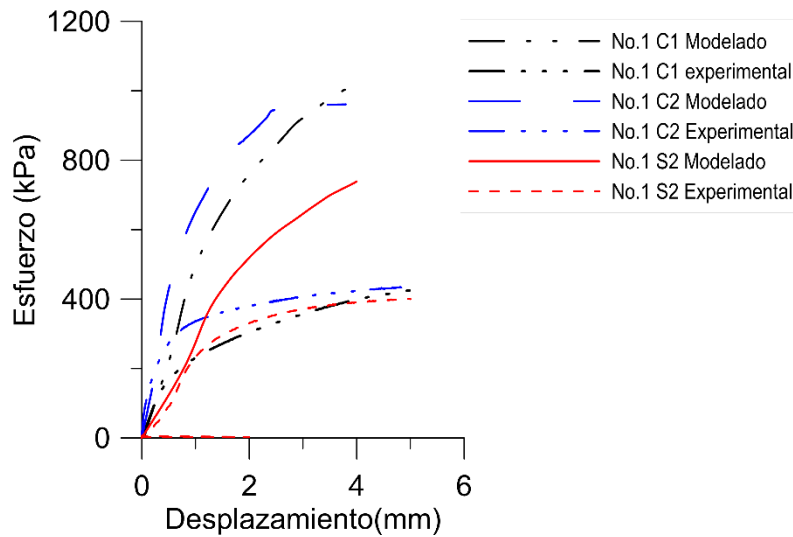
El valor de resistencia al corte no drenada para cada modelo se muestra en la Tabla 19.

**Tabla 19** Resultados de resistencia al corte no drenado a partir de la succión para suelo natural

<i>Ensayo</i>	$(u_a - u_w)$	$S_u$ (kPa)
No.1	236	167
No.2	1764	1075
No.3	1176	728

**Modelo numérico No 1: Muestra No 1.**

Los ensayos de capacidad portante realizados en la muestra No 1 se modelaron numéricamente con los parámetros descritos anteriormente y la resistencia al corte obtenida en la Tabla 19 (ver Figura 37). En esta figura se observa que la capacidad de carga modelada numéricamente es mucho más alta que la obtenida experimentalmente.



**Figura 37** Resultados de la modelación en Plaxis 2D ensayo No.1

Para lograr un mejor ajuste del modelo numérico con el resultado experimental se varió la resistencia al corte no drenado de cada modelo hasta obtener unos resultados numéricos similares a los resultados experimentales. En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos de los modelos numéricos obtenidos con la ecuación 4.4 (modelados) y con el ajuste de la resistencia no drenada (calibrados).

La mayor diferencia obtenida entre los resultados modelados y calibrados fue de 65%.

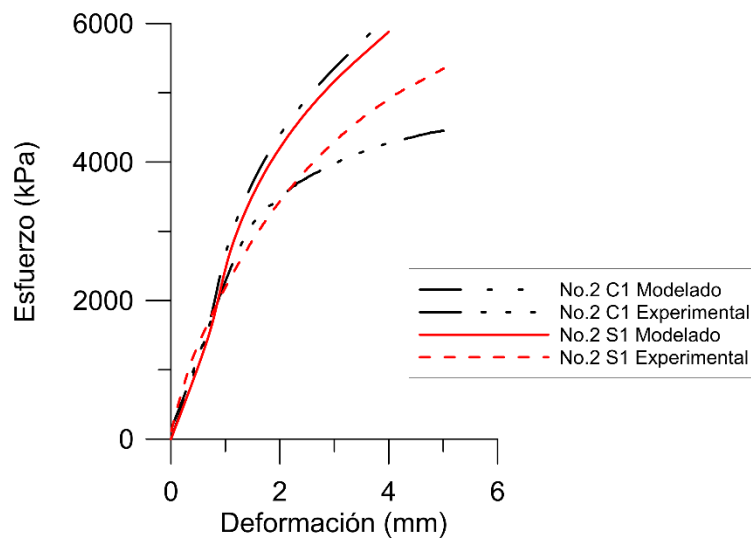
**Tabla 20** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 1

	$Q_u$ (kPa)	$S_u$ (kPa)
No.1 C1 Experimental	391	170
No.1 C1 Modelado	1013	170
No.1 C1 Calibrado	390	58

<i>No.1 C2 Experimental</i>	421	170
<i>No.1 C2 Modelado</i>	1149	170
<i>No.1 C1 Calibrado</i>	422	62
<i>No.1 S2 Experimental</i>	390	170
<i>No.1 S2 Modelado</i>	739	170
<i>No.1 S2 Calibrado</i>	390	75

### **Modelo numérico No 2: Muestra No 2.**

Las modelaciones obtenidas para la muestra No 2 se observan en la Figura 38, estas muestran un mejor comportamiento aunque igualmente los resultados sobrestiman la capacidad portante del suelo de estudio.



**Figura 38** Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 2

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos de las modelaciones, donde la mayor diferencia obtenida entre los resultados modelados y calibrados es del 20%. En esta muestra, solo se tiene en cuenta el ensayo realizado en la cimentación cuadrada, se considera que este ensayo representa el comportamiento del suelo al contenido de humedad al que se encontraba.

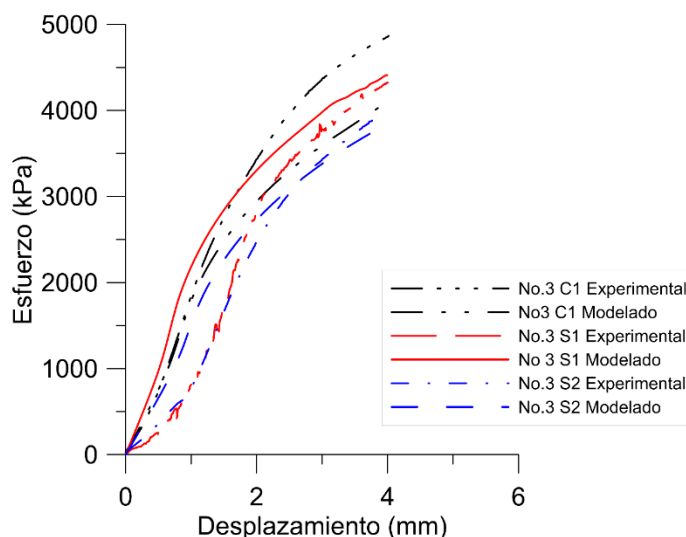
**Tabla 21** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 2

	<b>qu (kPa)</b>	<b>Su (kPa)</b>
<i>No.2 C1 Experimental</i>	4226	1076
<i>No.2 C1 Modelado</i>	5970	1076
<i>No.2 C1 Calibrado</i>	4267	680
<i>No.2 S1 Experimental</i>	4906	1076
<i>No.2 S1 Modelado</i>	5880	1076

No.2 S2 Experimental	5041	850
----------------------	------	-----

### **Modelo numérico No 3: Muestra No 3.**

Las modelaciones numéricas realizadas en el suelo de la muestra No 3 se ilustran en la Figura 39. Los resultados de la modelación numérica muestran una buena relación con los resultados experimentales, se estima que no hay una variación muy grande en los ensayos realizados con las cimentaciones cuadradas y el ensayo No.3 C1 la tendencia elástica es igual a la de las cimentaciones cuadradas.



**Figura 39** Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 3

En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos en las modelaciones, donde la mayor diferencia obtenida entre los resultados modelados y calibrados es del 11%, no se calibra el ensayo No.3 S1 ya que el comportamiento elástico no es lineal.

**Tabla 22** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 3

	<b>Qu (kPa)</b>	<b>Su (kPa)</b>
<i>No.3 C1 Experimental</i>	4784	728
<i>No.3 C1 Modelado</i>	4420	728
<i>No.3 C1 Calibrado</i>	4783	815
<i>No.3 S1 Experimental</i>	4323	728
<i>No.3 S1 Modelado</i>	4411	728
<i>No.3 S2 Experimental</i>	4003	728
<i>No.3 S2 Modelado</i>	3849	728
<i>No.3 S2 Calibrado</i>	3954	650

## **4.2. Influencia de la succión en la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelo reconstituido.**

## 4.2.1 Reconstitución de la muestra

### 4.2.1.1 Clasificación del suelo

En la elaboración de la modelación física es muy bien sabido que existen técnicas para replicar suelos, ya que los suelos naturales son muy heterogéneos, anisotrópicos y plásticos. En este estudio se decide realizar la reconstitución de la muestra para estudiar si es posible hacer una buena comparación entre las muestras naturales y reconstituidas y de esta manera simular el comportamiento del suelo de Bogotá en el laboratorio sin necesidad de extraer muestras de suelo.

Como primer paso, se verifica si el proceso de secado al cual se sometería un suelo reconstituido tiene afectación en su composición y clasificación. Para esto una muestra de suelo se somete a varios ciclos de secado, posteriormente se clasifica el suelo en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

El procedimiento que siguió fue el siguiente:

- Se sometió una muestra natural a los ensayos INV-125 y 126 (límites de Atteberg) por el método húmedo.
- Posteriormente se dejó secar la muestra en un horno de tiro forzado a 60° C hasta alcanzar una masa constante.
- Inmediatamente se trituraron los granos hasta que pasaran el tamiz No .200 (75  $\mu$ m).
- Finalmente se repitió el proceso varias veces para diferentes tiempos de secado en el horno.

En la Tabla 23 se muestran los resultados obtenidos.

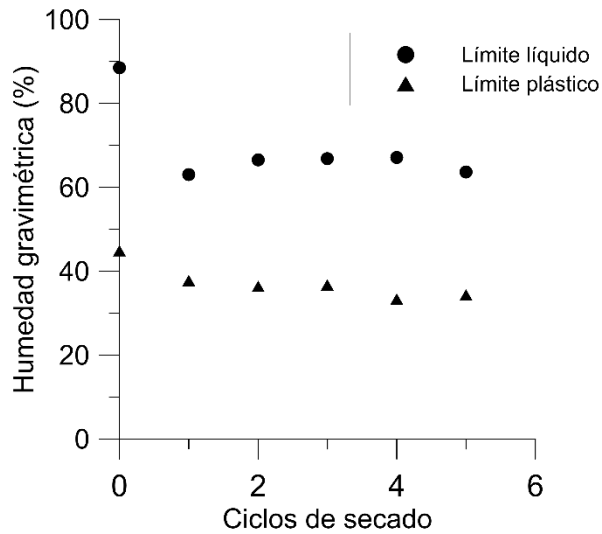
**Tabla 23** Resultados obtenidos de diferentes LL y LP

<i>tiempo (DÍAS)</i>	<b>Ciclos de secado</b>	<b>Límite líquido (LL)</b>	<b>Limite PLÁSTICO (LP)</b>	<b>ÍNDICE de plasticidad (IP)</b>
1	0	88,5	44,9	43,60
3	1	63,03	37,74	25,29
3	2	66,56	36,41	30,16
4	3	66,84	36,73	30,11
9	4	67,14	33,34	33,81



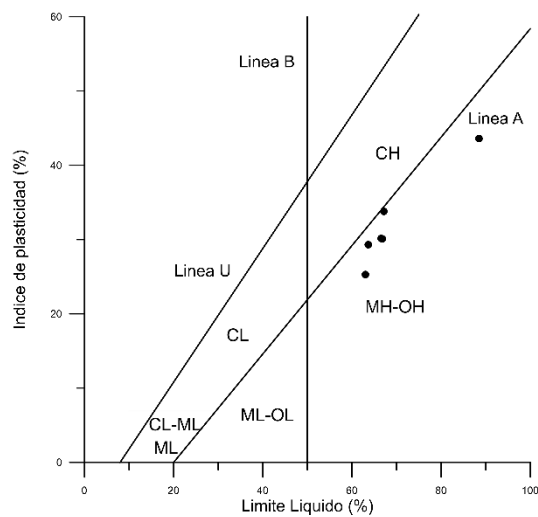
3	5	63,65	34,33	29,33
---	---	-------	-------	-------

En la Figura 40 se muestran los cambios de límite líquido y plástico del suelo al ser secado varias veces.



**Figura 40** Cambios en límite líquido y plástico a diferentes ciclos de reconstitución

Se clasifica el suelo según la carta de plasticidad de Casagrande como se muestra en la Figura 41, donde se observa que el suelo no sufre cambios en su clasificación a si sea sometido a varios ciclos, el primer ciclo muestra unas plasticidad más alta debido a la cantidad de materia orgánica.



**Figura 41** Carta de plasticidad con los diferentes ciclos de reconstituido.

#### 4.2.1.2 Compactación de suelo reconstituido

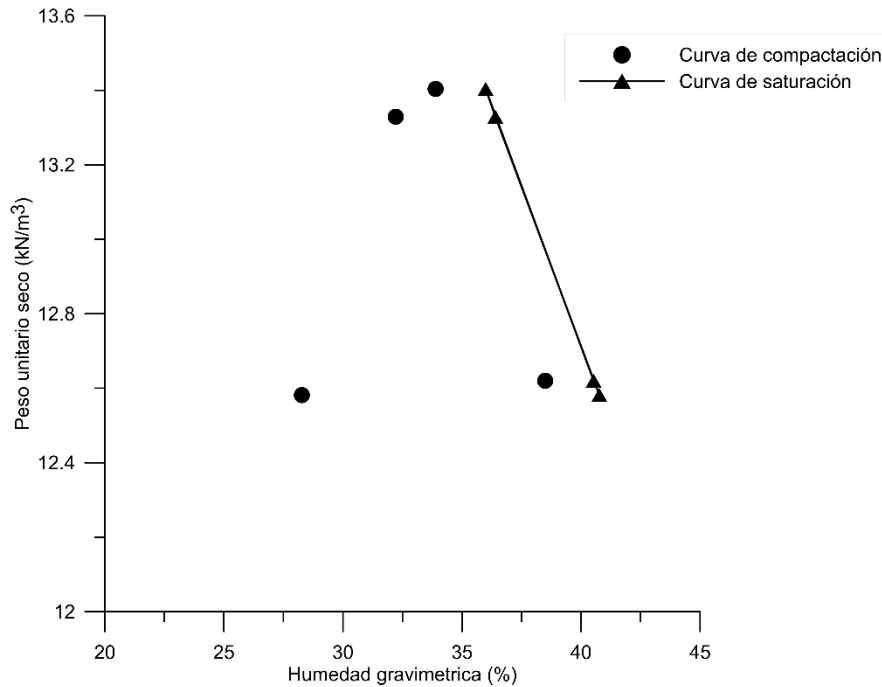
Para reconstituir las muestras de suelo, se siguió un proceso de compactación mecánica debido al menor tiempo de preparación de las muestras con respecto a un proceso de consolidación en el laboratorio. Adicionalmente, para el molde usado en este trabajo, en el laboratorio no se cuenta con un equipo que permita simular el proceso de consolidación de la muestra. En trabajos como el de Lozada et al (2016) que usaron este molde en suelo arcilloso se encontró un tiempo de consolidación de mes para cada muestra.

La compactación en el proceso de elaboración del suelo es de suma importancia ya que precisa la estructura interna del suelo. El comportamiento mecánico de los suelos compactados se puede asociar a dos niveles, el primer nivel a la disposición de las partículas del suelo (Mitchel, 1976) (mineralogía, forma, tamaño de las partículas y la química del agua que se encuentra en los poros) y el segundo nivel al método y a la energía de compactación (Vanapalli, 1999). Proctor (1993) asocia la compactación con cuatro diferentes variables que son, energía de compactación, densidad seca, contenido de agua y tipo de suelo, estas variables se relacionan en la curva de compactación que se puede determinar a partir de la metodología INV E 141-13 (Relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos).

Se sigue el mismo procedimiento nombrado en el capítulo 4.2.1.1 para elaborar la mezcla suelo-agua, como no se tienen datos de la humedad óptima del limo arcilloso de Bogotá, se utiliza la ecuación propuesta por (Fleureau, Verbrugge, Huergo, Gomes Correia, & Kheirbek-Saoud, 2002), donde mediante el límite líquido se puede determinar la humedad óptima, la expresión es la siguiente:

$$w_{opt} = 1,99 + 0,46LL - 0,0012LL^2 \quad [4.5]$$

Como resultado de calcular la humedad óptima a un límite líquido de 89 %, la humedad inicial que se tomó fue de 34%, adicionalmente se tomaron tres humedades 28%, 32% y 38%. En la Figura 42 se ilustra la curva de compactación, se determinó que la humedad óptima es del 34% y la densidad seca de 13.40 kN/cm<sup>3</sup>.



**Figura 42** Curva de compactación del Limo Arcilloso de Bogotá

#### 4.2.1.3 Procedimiento para elaboración de suelo reconstituido

Después de obtener la humedad óptima y verificar que el suelo a ensayar no cambia por los procesos de secado, se siguieron los siguientes pasos:

- Se introdujo el suelo natural al horno a 50° C hasta alcanzar una masa constante, se verificó pesando diariamente la muestra. Esta temperatura se seleccionó para evitar cambios en la composición mineralógica.
- Consecutivamente se trituro la muestra en un molino, para obtener un material homogéneo (esta debe ser suficiente para llenar el molde).
- Posteriormente se mezcló el material hasta alcanzar la humedad óptima, según el ensayo de compactación normal realizado en el limo arcilloso la humedad óptima es de 34% (Densidad seca de 13.40 kN). Para poder llegar a esta humedad y que la muestra quedara lo más homogénea posible se escogió 500 g de suelo completamente seco-triturado y se adicionó 170 g de agua (se pesó estos materiales en una balanza con aproximación de 0.1 g). Mediante un envase plástico con splash se mezcló cuidadosamente eliminando la mayor parte de grumos posibles; se repitió este proceso hasta alcanzar 25.25 kg.
- Se dejó una semana en bolsas de plástico según procedimiento indicado por Vanapalli (Vanapalli, 2008) para equilibrar la humedad.

- Después de esperar una semana se llevó la muestra a la prensa universal del laboratorio de estructuras como se muestra en la Figura 43, se insertó un disco metálico que ocupara el diámetro del molde. Se compactó en tres capas cada una de 6.50 cm, donde se le aplicó una fuerza de 100 kN (hasta alcanzar la densidad óptima en cada capa) con una velocidad de 5 mm/s.



**Figura 43** Compactación de muestra en el Laboratorio de Estructuras

#### 4.2.2 Acondicionamiento

Al igual que el ensayo en muestras naturales se pretende determinar la capacidad portante para diferentes niveles de succión, en consecuencia, se sometió el suelo a un proceso de secado a temperatura ambiente como se muestra en la Tabla 24 . La primera muestra se ensayó a humedad de compactación, la muestra No.2 se dejó secando por un periodo de 15 días y la muestra No.3 se dejó secando un periodo de 35 días, estas muestras al igual que las muestras naturales se dejan con una probeta de agua para mantener constante el nivel del agua.

**Tabla 24** Descripción de humedad y tiempo de secado para muestra remodelada

<i>Suelos ensayados</i>	<i>Tiempo de secado del suelo (días)</i>	<i>Contenido final de humedad gravimétrica (%)</i>
<i>Ensayo No. 1 R</i>	0	34
<i>Ensayo No. 2 R</i>	15	27
<i>Ensayo No. 3 R</i>	35	19

#### 4.2.3 Curva de retención de humedad en suelo reconstituido

Al igual que en el capítulo 4.1.4 se determinó la curva de retención de humedad para el suelo reconstituido, para el cálculo de esta se decide adoptar solo una técnica de

medición que cumpla con todos los rangos. Se utiliza la metodología propuesta por la norma INV E 159-13 (determinación de la succión de un suelo usando papel filtro), donde la muestra se somete a secado en condiciones ambientales. Se obtienen 7 puntos como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25** Medidas de  $\theta$  vs succión para curva SWCC suelo reconstituido

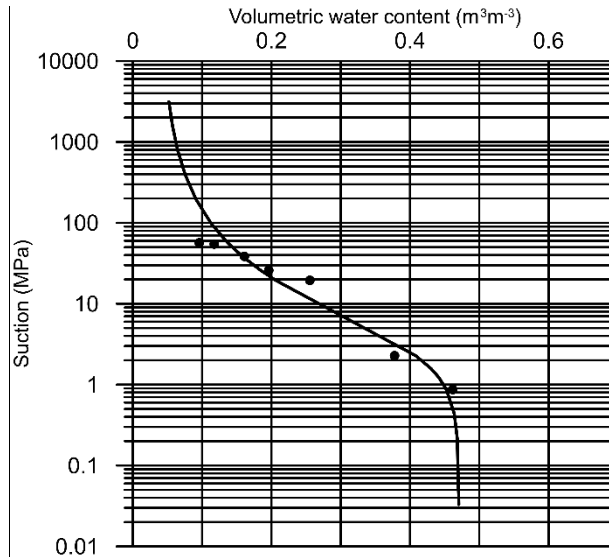
$\Theta$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Suc. (kPa)	h (m)
0,0958	56717	5784
0,1175	54590	5567
0,1610	38468	3923
0,1962	25933	2645
0,2554	19473	1986
0,3778	2281	233
0,4617	869	89
0,4706	0,1	0,01

Siguiendo la metodología de Van Genuchten-Mualem, se determinaron los parámetros de  $\theta_s$  y  $\theta_r$ . El parámetro saturado se obtuvo de la Figura 42 de la curva de compactación; el parámetro de humedad residual del suelo se calculó mediante un procedimiento gráfico dibujando una línea tangente en el punto de inflexión de la curva SWCC y una línea que se extiende en la parte recta desde 1.000.000 kPa. Se ingresaron los valores al programa RECT y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 26.

**Tabla 26** Parámetros obtenidos del software RECT suelo reconstituido

No	Parámetro	
-	Nombre	Valor inicial
1	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,0400
2	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,4706
3	$\alpha$	0,003
4	$\eta$	1,5208
5	l	0,5000

En la Figura 44 se muestra la curva SWCC, para el suelo limo arcilloso reconstituido de la ciudad de Bogotá. El intervalo de succiones que se obtuvieron está entre 1073 kPa y 3621 kPa, en la fase de compactación el suelo se encuentra parcialmente saturado y se genera una succión de alrededor de 830 kPa.



**Figura 44** Curva de retención de humedad para limo arcilloso reconstituida

#### 4.2.4 Ensayos de capacidad portante suelo reconstituido

Se realizaron doce ensayos de capacidad portante en tres muestras de suelo con diferentes contenidos de humedad, se sigue la misma metodología propuesta en el capítulo 4.1.6. La nomenclatura que se va utilizar para describir los ensayo es la siguiente:

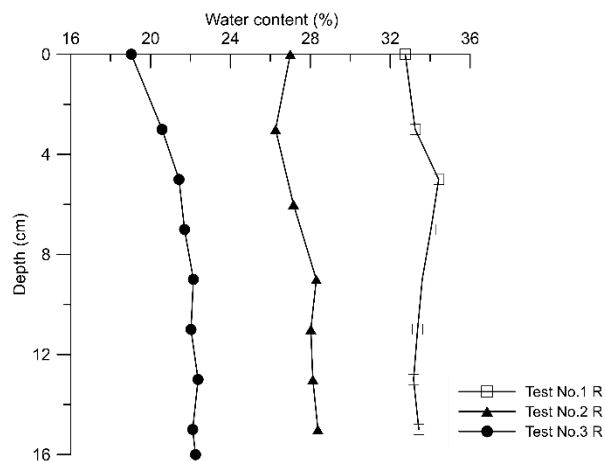
**Tabla 27** Descripción de ensayos de capacidad portante suelo reconstituido

<i>Muestra</i>	Tipo de cimentación	Humedad gravimétrica (%)	Nomenclatura
1	S (cuadrada)	33	No.1 R S1
1	S (cuadrada)	33	No.1 R S1
1	C (circular)	33	No.1 R C1
1	C (circular)	33	No.1 R C2
2	S (cuadrada)	27	No.2 R S1
2	S (cuadrada)	27	No.2 R S2
2	C (circular)	27	No.2 R C1
2	C (circular)	27	No.2 R C1
3	S (cuadrada)	19	No.3 R S1

3	S (cuadrada)	19	No.3 R S2
3	C (circular)	19	No.3 R C1
3	C (circular)	19	No.3 R C1

### **Perfil de humedad de muestra de suelo reconstituida**

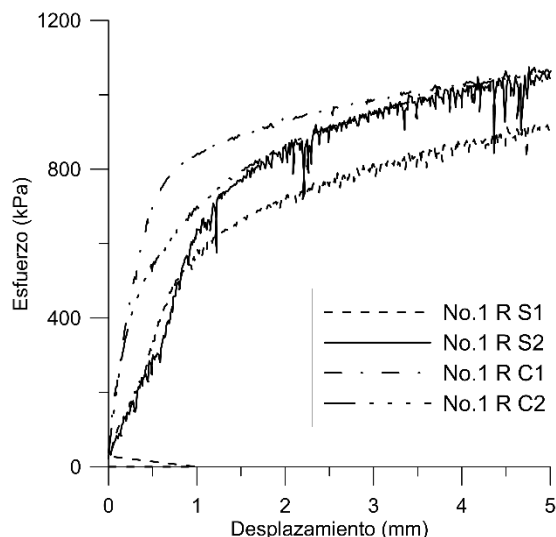
La muestra No. 1R se realizó con la humedad óptima, después de compactar el material se dejó 5 días en una bolsa plástica para equilibrar la humedad. En la Figura 45 se muestra el perfil de humedad gravimétrica de las muestras de suelo. La humedad en la superficie es del 33% y la variación de la humedad en la zona de influencia es del 1%. Se tomaron los valores de la humedad en la superficie para calcular la succión, por consiguiente, la succión calculada con la Figura 44 fue de 528 kPa para la muestra No 1R.



**Figura 45** Perfil de humedad de los ensayo de capacidad portante suelo reconstituido

### **Resultados capacidad portante muestra No 1R**

Los resultados obtenidos para la muestra de suelo No.1 R se ilustran en la Figura 46, se pudo realizar los cuatro ensayos previstos. Se puede observar que la capacidad portante de los S2, C1 y C2 están muy cercanas. Sin embargo, la parte elástica del ensayo se ve influenciada por el tipo de zapata.



**Figura 46** Ensayo No.1 R humedad gravimétrica del 34%, succión de 1034 kPa

Tomando el mismo criterio de falla que para los suelos naturales del 10% desplazamiento respecto al ancho de la cimentación, en la Tabla 28 se ilustran los resultados obtenidos de capacidad portante, donde la desviación estándar es de 67 kPa.

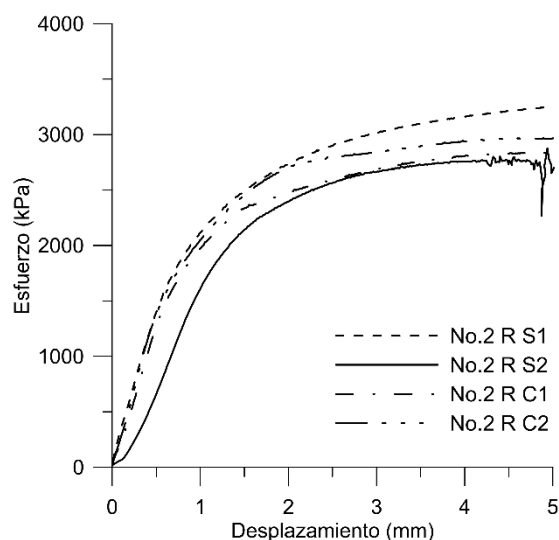
**Tabla 28** Resultados de capacidad portante para el ensayo No.1 R

	$q_{max}$ (kPa)	Succión (kPa)	Humedad gravimétrica (%)
No.1 R C1	1019	528	33
No.1 R C2	1007	528	33
No.1 R S1	870	528	33
No.1 R S2	974	528	33

### **Resultados capacidad portante muestra No 2 R**

Para la muestra No 2 R se obtiene de la curva SWCC una succión de 2149 kPa, para una humedad gravimétrica del 27%. En la Figura 47 se muestran los ensayos realizados, donde no se evidencian muchos cambios en la curva y los cambios en la capacidad última pueden estar afectados por cambios en la succión.





**Figura 47** Ensayo No.2 R humedad gravimétrica del 27%, succión de 1607 kPa

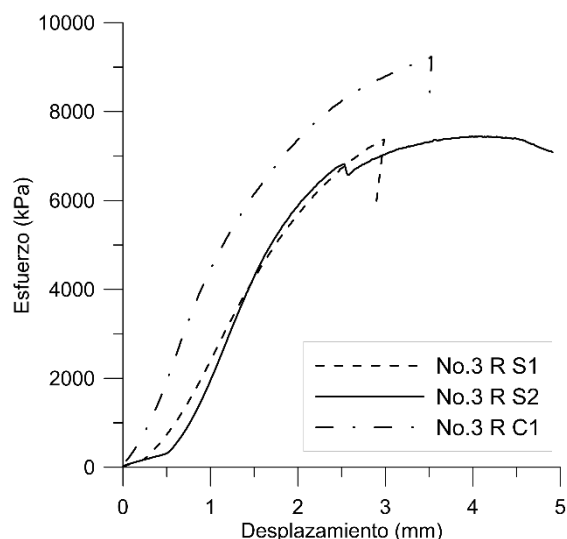
Para estos ensayos la desviación estándar fue más alta de 183 kPa, los resultados se pueden visualizar en la Tabla 29, donde la capacidad portante promedio fue de 2908 kPa aumentando la capacidad un 200% con respecto a la muestra No.1 R.

**Tabla 29** Resultados de capacidad portante para el ensayo No.2 R

	$q_{\max}$ (kPa)	Succión (kPa)	Humedad gravimétrica %
No.2 R C1	2793	2149	27
No.2 R C2	2922	2149	27
No.2 R S1	3162	2149	27
No.2 R S2	2755	2149	27

### **Resultados capacidad portante muestra No 3R**

En la muestra No.3 R el tiempo de acondicionamiento fue el más largo de las muestras reconstituidas obteniendo una humedad gravimétrica en la superficie del 19%. Para esta muestra la variación del perfil de humedad mostrado en la Figura 45, alcanza a ser del 2.3 % de humedad hasta la zona de influencia, sin embargo, se toma el valor de la superficie ya que los resultados de los ensayos son afectados por succiones altas. En la Figura 48 se observa que el esfuerzo máximo en el ensayo C1 y S1 no alcanza el 10% de desplazamiento respecto a la base, por tal motivo se tomara el máximo esfuerzo aplicado como la capacidad de soporte del suelo.



**Figura 48** Ensayo No.3 R humedad gravimétrica del 19%, succión de 3621 kPa.

Los resultados obtenidos de la muestra No. 3 R se muestran en la Tabla 30, donde se puede observar que la capacidad portante para los dos ensayos realizados en las zapatas cuadradas tiene las mismas tendencias, el único ensayo que alcanzó el 10% de deformación fue el No.3 S2.

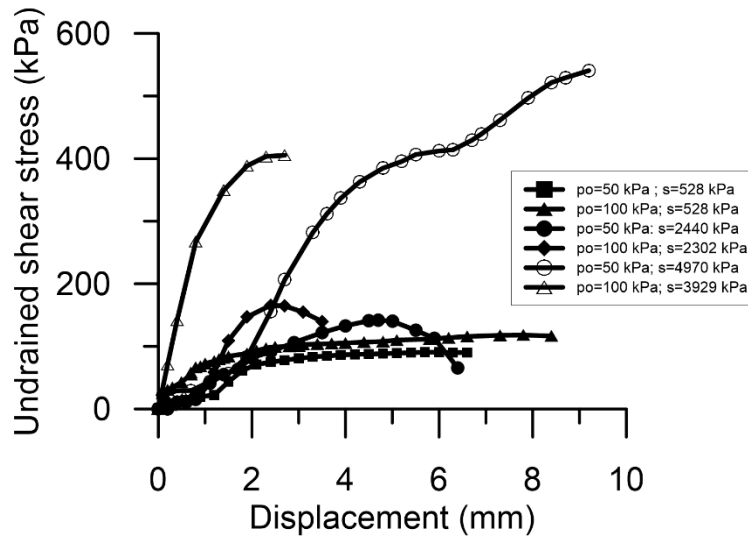
**Tabla 30** Resultados de capacidad portante para el Ensayo No.3 R

	$q_{max}$ (kPa)	Succión (kPa)	Humedad gravimétrica (%)
No.3 R C1	9235	5577	19
No.3 R S1	7374	5577	19
No.3 R S2	7436	5577	19

#### 4.2.5 Ensayos de corte directo suelo reconstituido

Después de realizar los ensayos de capacidad portante en las muestras remodeladas, se procedió a extraer las muestras para realizar los ensayos de corte directo. Estos ensayos solo se realizaron en muestras elaboradas en el laboratorio, ya que si se utilizaba la metodología del Proctor podrían estar influenciados por el tamaño del molde y el diámetro del pistón de compactación (Fleureau et al., 2002).

Se realizaron 6 ensayos con diferentes contenidos de agua, a esfuerzos normales de 50 kPa y 100 kPa. En la Figura 49, se observan los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo para las diferentes succiones, en donde al igual que en las muestras naturales se observa un comportamiento dilatante para altos valores de succión.

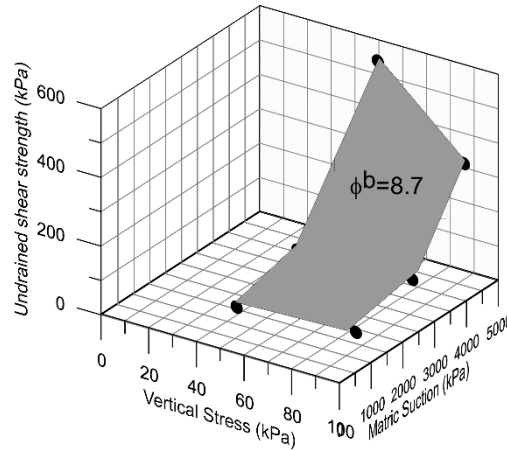


**Figura 49** Resultados de ensayos de corte directo a diferentes succiones muestras remodeladas.

La resistencia al corte no drenada obtenida en los ensayos se puede observar en la Tabla 31. Las muestras con 26% y 34% de contenido de humedad gravimétrica no tiene grandes cambios en la resistencia, debido a eso el valor de  $\Phi^b$  es bajo para estos niveles de succión. Por lo tanto, se calculó  $\Phi^b$  para los valores de succión en el rango de 2302 kPa a 4970 kPa. En la Figura 50 se observa que para los ensayos realizados a bajas succiones la pendiente de la curva en el espacio  $s - \tau_u$  es casi una recta, por esa razón solo se toman los valores de succión de 2302 kPa a 4970 kPa, dando como resultado  $\Phi^b = 8.7^\circ$

**Tabla 31** Resultados de corte directo muestra reconstituida

$\sigma$ normal (kPa)	Succión (kPa)	$\tau_{umax}$ (kPa)	Humedad gravimétrica (%)
50	528	91	34
100	528	118	34
50	2440	142	26
100	2302	166	26
50	4970	540	20
100	3929	405	22

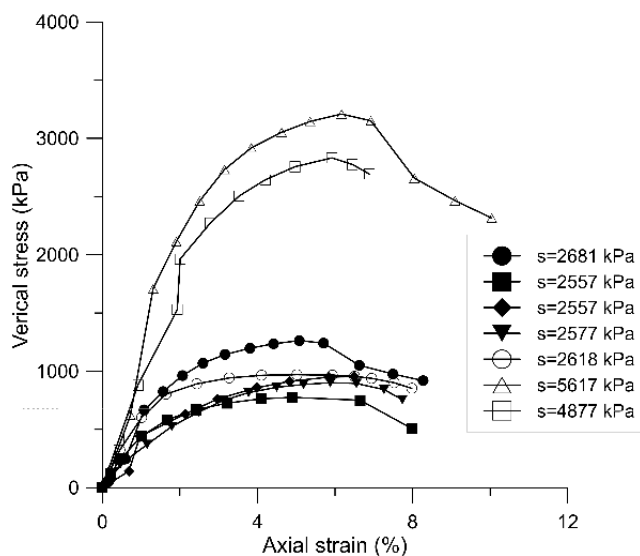


**Figura 50** Envoltente de resistencia al corte suelo reconstituido en el espacio ( $\sigma$ ,  $\tau_u$ ,  $s$ )

No se calcula la anisotropía ya que la disposición de las partículas en el suelo es horizontal por la elaboración del suelo.

#### 4.2.6 Ensayos de compresión inconfiada suelo reconstituido

Siguiendo la misma metodología que en el capítulo 4.1.8, las muestras reconstituidas fueron obtenidas de las muestras utilizadas para el ensayo de capacidad portante. En la Figura 51 se muestra las curvas esfuerzo vertical vs deformación unitaria axial, donde al igual que en la muestra natural hay incrementos significativos para varios contenidos de humedad. Se realizaron ensayos para las muestras No.2 R y No.3 R, no se pudieron obtener muestras representativas para el ensayo No.1 R. En la Tabla 32 se muestra la resistencia al corte no drenado de los ensayos realizados, se alcanzan niveles de succiones entre los rangos de los ensayos realizados de capacidad portante.

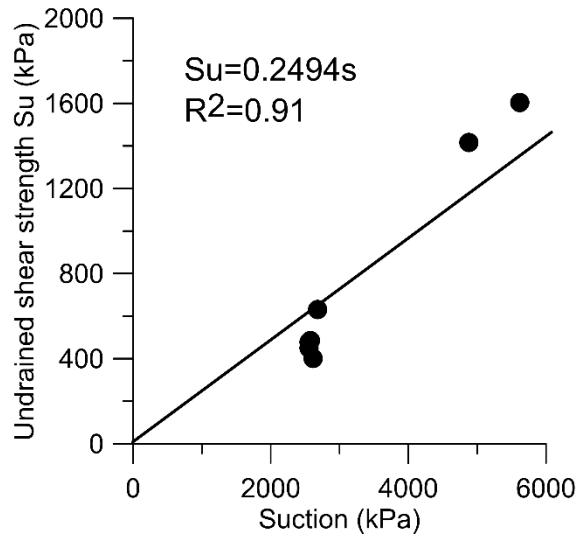


**Figura 51** Resultados de ensayos de compresión inconfiada a diferentes contenidos de humedad muestras reconstituidas

**Tabla 32** Resultados de compresión inconfiada suelo reconstituido

<i>Su</i> (kPa)	Humedad gravimétrica (kPa)	Succión (kPa)
631	25	2680
478	26	2557
450	26	2557
485	25	2577
401	25	2618
1604	19	2635
1416	20	5617

Después de obtener los resultados de resistencia al corte no drenada y calcular la succión de los ensayos de compresión inconfiada, se realizó una regresión lineal para relacionar la succión y la resistencia al corte no drenada, en la Figura 52 se muestra el valor de la correlación obtenida al realizar una regresión lineal entre estas dos variables, el valor del coeficiente de correlación al cuadrado es 0.91, este valor es mucho más bajo que para la muestra natural ya que se tuvo que tomar el origen 0.0.



**Figura 52** Correlación de resistencia al corte no drenado vs Succión suelo reconstituida

#### 4.2.7 Modelación numérica suelos reconstituidos

Se realizaron modelos numéricos para las tres nuestras experimentales reconstituidas en PLAXIS 2D, las modelaciones se realizaron en condición no drenada. Los parámetros de entrada se obtuvieron de los resultados experimental como se muestra en la Tabla 33. Igual que las modelaciones en el suelo natural se calculó el módulo de elasticidad mediante la ecuación 4.3. Se observa una variación en los módulos de elasticidad ya que los ensayos no siguen el mismo comportamiento elástico como se ilustra en el capítulo 4.2.4

**Tabla 33** Parámetros de entrada modelación en Plaxis 2D muestra reconstituida

<i>Ensayo</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>γ (kN/m³)</i>	<i>e inicial</i>
No.1 R C1	81	18	0,96
No.1 R C2	52	18	0,96
No.1 R S1	38	18	0,96
No.1 R S2	35	18	0,96
No.2 R C1	127	19	0,70
No.2 R C2	130	19	0,70
No.2 R S1	133	19	0,70
No.2 R S2	92	19	0,70
No.3 R C1	238	20	0,57
No.3 R S1	200	20	0,57
No.3 R S2	169	20	0,57

La resistencia al corte no drenada ingresada en los modelos numéricos fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$S_{u\text{ unsat}} = 0.2494 * (u_a - u_w) \quad [4.5]$$

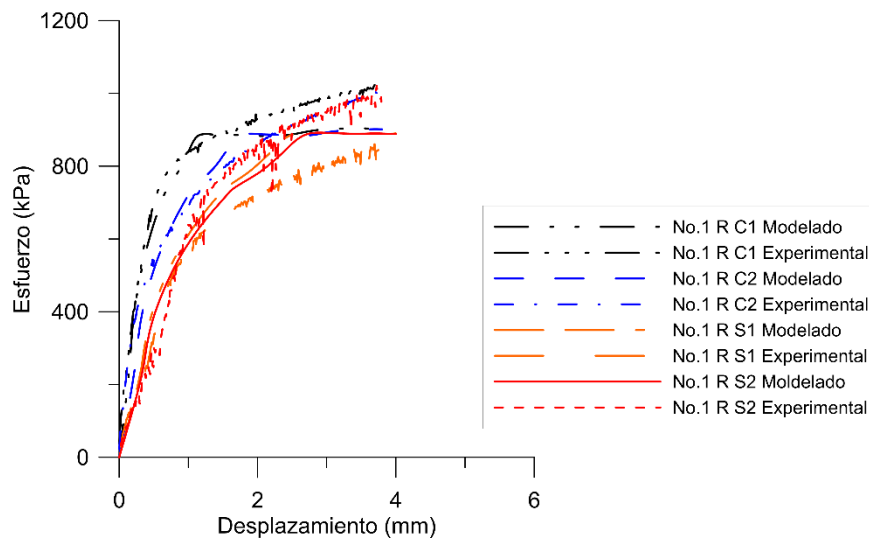
Los valores obtenidos al aplicar la ecuación se muestran en la Tabla 34, donde la succión obtenida de la curva SWCC es mucho mayor que para los suelos naturales, pero la resistencia al corte es menor.

**Tabla 34** Resultados de resistencia al corte no drenada a partir de la succión para suelo reconstituido

<i>Ensayo</i>	$(u_a - u_w)$	$S_u$ (kPa)
No.1 R	528	132
No.2 R	2149	538
No.3 R	5577	1390

### **Modelación numérica No.1: Muestra No.1 R**

La modelación de los ensayos realizados en la Muestra No 1 se muestra en la Figura 53, donde se observa que la modelaciones realizadas resultan similares a los resultados experimentales .



**Figura 53** Resultados de la modelación en Plaxis 2D ensayo No.1 R

En la Tabla 35 se muestran los resultados obtenidos en las modelaciones, donde estos son muy prometedores ya que la diferencia máxima de la resistencia al corte no drenada obtenida entre los resultados modelados y calibrados fue de 17 kPa. Algunos resultados calibrados de capacidad máxima no son los mismos que los obtenidos en la parte experimental, ya que si se mantenida el mismo valor de capacidad portante ultima la trayectoria de esfuerzo no es equivalente.

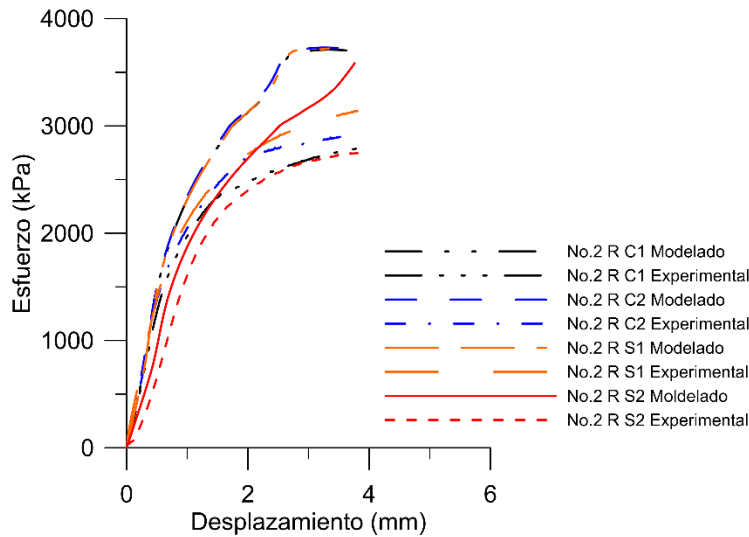
**Tabla 35** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 1 R

	<b>q<sub>u</sub> (kPa)</b>	<b>Su (kPa)</b>
<i>No.1 R C1 Experimental</i>	1019	132
<i>No.1 R C1 Modelado</i>	903	132
<i>No.1 R C1 Calibrado</i>	1021	140
<i>No.1 R C2 Experimental</i>	1007	132
<i>No.1 R C2 Modelado</i>	901	132
<i>No.1 R C1 Calibrado</i>	959	141
<i>No.1 S1 R Experimental</i>	872	132
<i>No.1 R S1 Modelado</i>	890	132
<i>No.1 R S1 Calibrado</i>	845	125
<i>No.1 R S2 Experimental</i>	872	132
<i>No.1 R S2 Modelado</i>	889	132
<i>No.1 R S2 Calibrado</i>	863	115

### **Modelación numérica No.2: Muestra No.3 R**

Las modelaciones obtenidas para la muestra No.2 se observan en la Figura 54, donde se puede observar que la resistencia al corte estimada en la modelación es más alta que la experimental. Sin embargo, en este ensayo el comportamiento elástico tiene una poca variación para los ensayos C1 R, C2 R y S1 R; por lo tanto poca variación en el módulo elástico estimado.





**Figura 54** Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 2 R

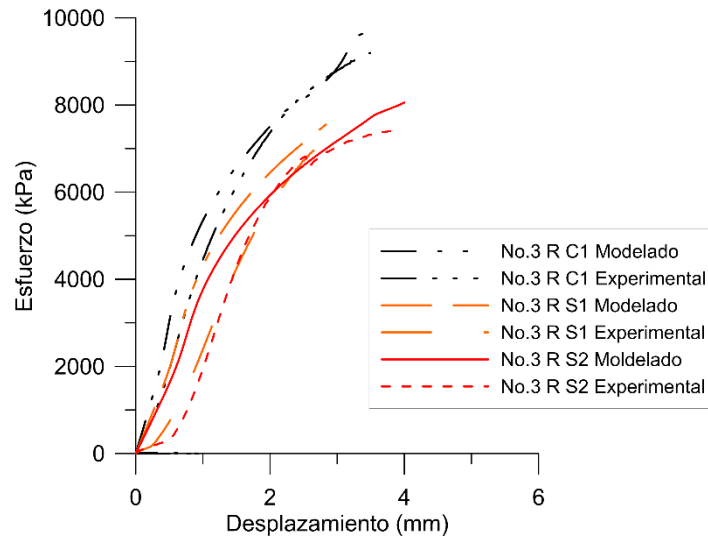
En la Tabla 36, se observan los resultados obtenidos de las modelaciones, donde la diferencia obtenida entre los resultados modelados y calibrados fue de 34%, para los ensayos No.2 R se obtuvieron valores de capacidad portante más bajos de los esperados.

**Tabla 36** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 2 R

	<b>qu (kPa)</b>	<b>Su (kPa)</b>
<i>No.2 R C1 Experimental</i>	2793	536
<i>No.2 R C1 Modelado</i>	3710	536
<i>No.2 R C1 Calibrado</i>	2721	398
<i>No.2 R C2 Experimental</i>	2939	536
<i>No.2 R C2 Modelado</i>	3705	536
<i>No.2 R C1 Calibrado</i>	2942	430
<i>No.2 S1 R Experimental</i>	3162	536
<i>No.2 R S1 Modelado</i>	3796	536
<i>No.2 R S1 Calibrado</i>	3168	445
<i>No.2 R S2 Experimental</i>	2755	536
<i>No.2 R S2 Modelado</i>	3699	536
<i>No.2 R S2 Calibrado</i>	2760	400

### **Modelación numérica No.1: Muestra No.1 R**

En la muestra No.3 R se alcanzó la mayor succión registrada en este trabajo, como se observa en la Figura 55 la capacidad portante es alrededor de 9 MPa para el ensayo No.3 C1, la modelación muestra un buen comportamiento.



**Figura 55** Resultados obtenidos de la modelación en Plaxis 2D ensayo No 3 R

En la Tabla 37 se muestra los resultados obtenidos de las modelaciones, donde la diferencia obtenida entre los resultados modelados y calibrados de la resistencia al corte no drenado máxima es del 11%, no se calibra el ensayo No.3 S1 ya que el comportamiento elástico no es lineal.

**Tabla 37** Resultados obtenidos modelación Plaxis 2D Ensayo 3 R

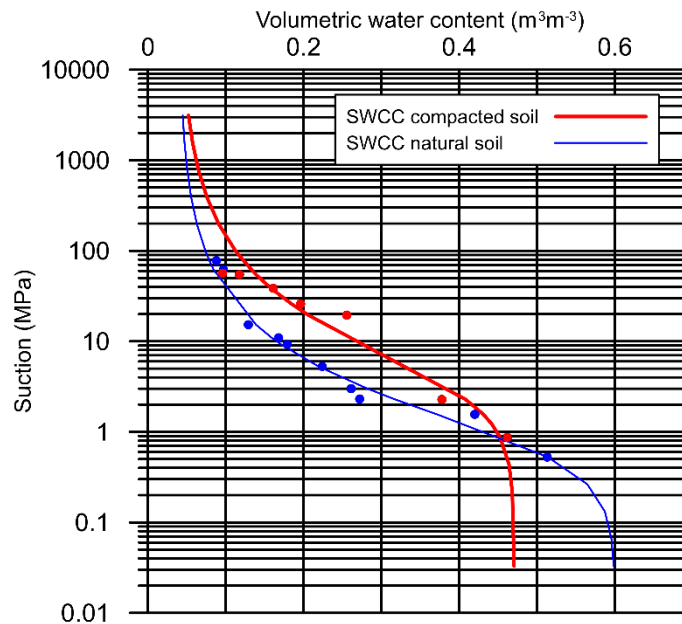
	<b>qu (kPa)</b>	<b>Su (kPa)</b>
<i>No.3 R C1 Experimental</i>	9277	1390
<i>No.3 R C1 Modelado</i>	8979	1390
<i>No.3 R C1 Calibrado</i>	9242	1500
<i>No.3 S1 R Experimental</i>	7374	1390
<i>No.3 R S1 Modelado</i>	7613	1390
<i>No.3 R S1 Calibrado</i>	7365	1310
<i>No.3 R S2 Experimental</i>	7435	1390
<i>No.3 R S2 Modelado</i>	8057	1390
<i>No.3 R S2 Calibrado</i>	7701	1347

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Curva de retención de humedad suelo natural y suelo reconstituido

La curva de retención de humedad es de bastante interés en el estudio del comportamiento del suelo parcialmente saturado. Como se señaló en el capítulo 3.3, la curva de retención de humedad relaciona la cantidad de agua en el suelo y la succión matricial. El presente trabajo nos muestra que la relación entre los suelos naturales y los

suelos reconstituidos se puede analizar desde un enfoque hidromecánico. En la Figura 56 se observa las curvas obtenidas en camino de secado después de procesar los datos en el programa RECT, estas curvas nos muestran varias propiedades de los suelos naturales y los suelos reconstituidos. Como se observa en la figura, los datos obtenidos con el WP4 para el suelo natural tienden a tener una menor dispersión con la curva ajustada por el programa.



**Figura 56** Curvas SWCC para suelo natural y suelo reconstituido

De acuerdo con las curvas obtenidas, se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Se observa que el suelo natural tiene una transición de desaturación más progresiva que el suelo reconstituido, y tiende a desaturarse en niveles altos de succión.
- El valor de entrada del aire de la muestra natural es de 743 kPa y la de la muestra reconstituida aumenta a 3270 kPa, esto se debe que la muestra natural tiene macro-poros más grandes (Liu, Buzzi, Yuan, Mendes, & Fityus, 2016).
- En la curva del suelo reconstituido antes de la entrada del aire se muestra una pendiente mucho mayor que la del suelo natural, demostrando que este necesita perder menos agua para comenzar a desaturarse. Se ha demostrado que en este punto de inflexión se presentan la mayor parte de cambios de volumen y que la estructura natural es la que domina los procesos de retención. Por lo tanto, en el

suelo natural antes del 51% de humedad volumétrica las propiedades hidromecánicas estarán afectadas por la estructura del suelo, la densidad y la porosidad.

- Después de la entrada del aire se observa en la zona de transición, donde adsorción del agua tiende a tomar importancia en el comportamiento de retención del suelo y los mecanismos capilares comienzan a influir menos (Or & Tuller, 1999), por esta razón, se observa que mientras baja el contenido de agua las dos curvas convergen en la zona residual, sin embargo, los datos experimentales muestran que este fenómeno puede suceder antes de la transición a la zona residual, en consecuencia la estructura natural comienzan a influir poco y la superficie específica, la mineralogía y el contenido de materia orgánica tiende a manejar la retención del agua. Como se nombró la sensibilidad de la curva puede estar afectada por la mineralogía, sin embargo, la actividad calculada fue de 4.24 y este limo arcilloso puede estar dominada por minerales de capa 2:1, donde los minerales tienen afectación en la capacidad de retención (Tessier, Lajudie, & Petit, 1992). Aunque no se calculó la cantidad de materia orgánica, el suelo al ser superficial puede tener una cantidad de materia orgánica significativa, también se puede observar en Figura 40 que el límite líquido tiene una disminución después del secado en el horno por presencia de materia orgánica, en consecuencia el suelo natural por presencia de materia orgánica tiene un mayor contenido de agua en todas las succiones (Rawls, Pachepsky, Ritchie, Sobecki, & Bloodworth, 2003).
- Finalmente la zona residual de las curvas, demuestran lo observado por (Romero, Della Vecchia, & Jommi, 2011) que a valores altos de succión la influencia de la relación de vacíos es insignificante en las propiedades de retención y la fábrica primaria del suelo reconstituido solo tiene influencia a altos contenidos de agua. Esto se observa en la figura, donde para una humedad volumétrica del 10% las succiones del suelo reconstituido tomada experimentalmente comienzan a igualarse a las del suelo natural.

## **5.2. Capacidad portante suelo natural y reconstituido**

### **5.2.1. Capacidad portante en suelo natural**

Los ensayos de capacidad portante demostraron que al disminuir el contenido de humedad de los suelos la resistencia al corte aumenta drásticamente y la influencia de la succión toma importancia. Se realizaron tres metodologías para determinar la capacidad portante de los suelos parcialmente saturados. La primera aproximación fue calculada mediante la ecuación 3.22 propuesta por (S. Y. Oloo et al., 1997), donde se incluye el ángulo de fricción con respecto a los cambios de succión  $\phi^b=13.58^\circ$  y la resistencia al corte no drenado saturada de 30 kPa. La expresión es la siguiente:

$$qf = [Su + (u_a - u_w) * \tan \phi^b] * N_c \quad [3.22]$$

La segunda aproximación se realizó por lo propuesto por (Oh & Vanapalli, 2013), donde se introduce la resistencia al corte no saturada como variable. La ecuación es la siguiente:

$$q_{ult(unsat)} = \left[ \frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] N_c \quad [5.1]$$

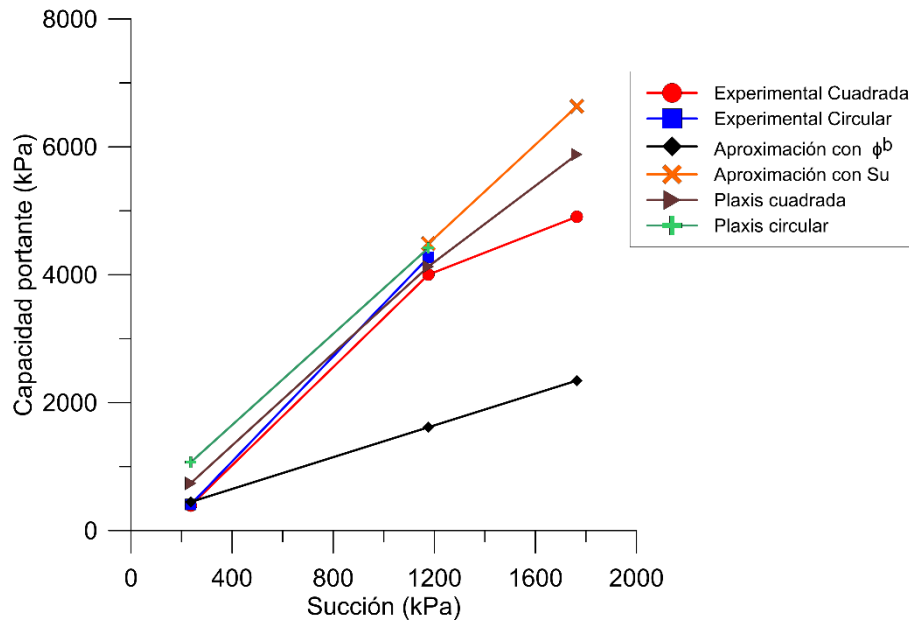
Donde  $q_{u(unsat)}$ = Resistencia a la compresión inconfiada no saturada

$N_c$ =Factor de capacidad portante

Para calcular la resistencia al corte no drenada e introducirla en la ecuación 5.1, se calculó mediante a la ecuación 4.4:

$$S_{u\ unsat} = 0.5927 * (u_a - u_w) + S_{usat} \quad [4.4]$$

La última aproximación se realizó mediante el programa de elementos finitos, una solución numérica utilizando el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Los resultados obtenidos para el suelo natural se observan en la Figura 57.

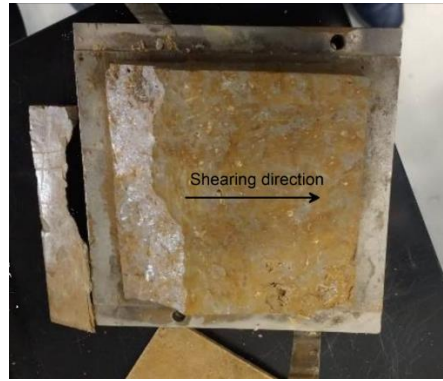


**Figura 57** Resultados de capacidad portante vs succión suelos naturales

Los resultados muestran una clara tendencia lineal para los valores de succión entre 236 kPa y 1176 kPa, donde la capacidad aumenta un 300%. Para la succión más baja las aproximaciones sobrestiman la capacidad de soporte del suelo, donde el suelo está influenciado por un mecanismo capilar (Sáez & Escario, 1986), y la cantidad de agua almacenada es capaz de llenar los macro-poros posiblemente generando que la succión disminuya. La única aproximación que se acerca al valor real es la ecuación 3.22.

Los ensayos realizados a una humedad gravimétrica del 27% fueron los más prometedores, donde se observa que al aplicar la ecuación 5.3 el valor obtenido se acerca a los datos experimentales. Demostrando que se puede utilizar una ecuación en el marco de la mecánica del suelo saturado.

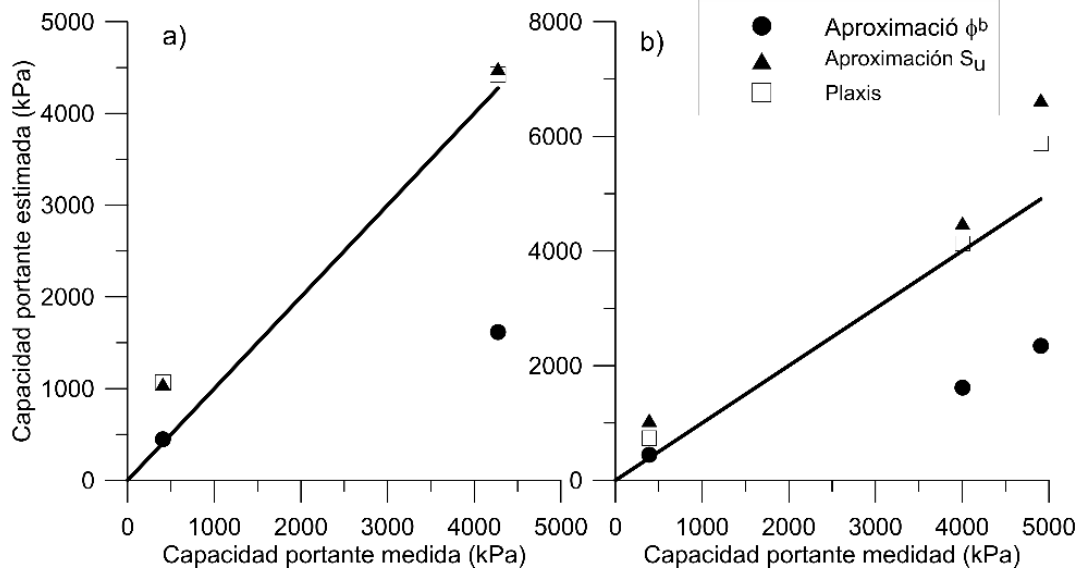
Sin embargo, la ecuación 3.22 resulta ser muy conservadora, una posible causa de lo anterior es que los ensayos realizados muestran un problema de concentración de esfuerzos como se puede observar en la Figura 58, impidiendo que la superficie de falla se genere y la resistencia al corte sea mucho menor que la real.



**Figura 58** Concentración de esfuerzos ensayo de corte directo

Finalmente, para una succión de 1764 kPa los resultados obtenidos al emplear la ecuación 5.1 y la modelación numérica sobrestiman la capacidad portante un 35% y un 19% respectivamente. Se esperaban resultados experimentales mucho más altos, ya que al realizar la modelación en elementos finitos la capacidad portante es más alta.

En la Figura 59 se ilustra la comparación entre la capacidad experimental de los suelos naturales y la estimada por las tres formulaciones planteadas en este trabajo, se observa que la ecuación 5.3 siempre es muy conservadora y demuestra lo obtenido por (costa, 2003), mientras que la ecuación 5,1 muestra una aproximación mucho más acertada y real. Sin embargo, los resultados sobrestiman la capacidad debido que en el ensayo de compresión inconfiada puede tener un proceso de disminución de volumen, es decir una disminución del espacio ocupado por la presión de poros, lo que resulta un aumento en la resistencia a la compresión inconfiada (Vanapalli, 2013).



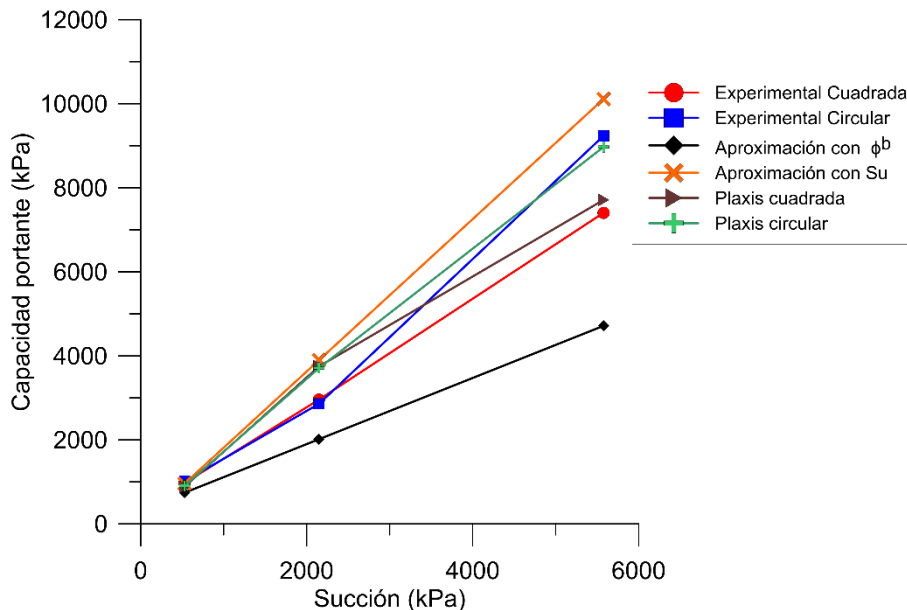
**Figura 59** Comparación entre la capacidad portante suelo natural medida y calculada por lo métodos de estimación a) zapatas circulares b) zapatas cuadradas

### 5.2.2. Capacidad Portante en suelos reconstituidos

Se elaboró el mismo análisis para los suelos reconstituidos, donde el suelo es sometido a desecación por un periodo de tiempo y parte desde la humedad óptima. Los suelos reconstituidos muestran mejores resultados al aplicar las ecuaciones analíticas, esto se puede atribuir a que la distribución es tamaño es bimodal y la fábrica está dominada por un modo de poro único (Romero et al., 2011), además, el método de elaboración del suelo no tiene efectos de anisotropía, ya que la orientación de las partículas están definidas por la forma de compactación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 60, estos se realizaron a un rango de succiones del orden de 536 kPa a 5577 kPa. Al igual que para el suelo natural se calculó  $\phi^b=8.7^\circ$  y la resistencia al corte no drenada saturada fue de 63 kPa (esta se calculó a partir de los ensayos de corte directo).

Para calcular la resistencia a corte no drenada se utiliza la ecuación de 4.5.

$$S_{u \text{ unsat}} = 0.2494 * (u_a - u_w) \quad [4.5]$$



**Figura 60** Resultados de capacidad portante vs succión suelo reconstituido

De la Figura 60 se pueden resaltar los siguientes aspectos:

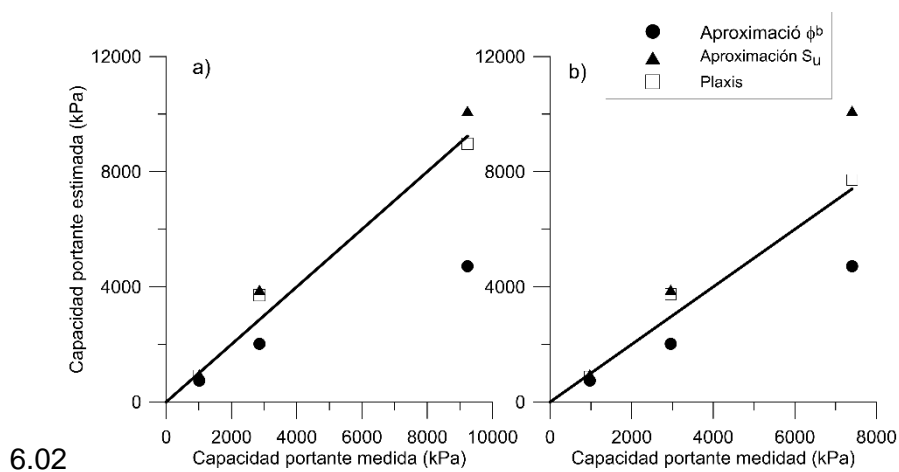
- La primera muestra se realiza a la humedad óptima muy cerca a la saturación total, como se observa en la figura las ecuaciones muestran muy buenos resultados, en donde la ecuación 5.1 y los resultados con elementos finitos caen en el mismo punto de los resultados experimentales.



- La segunda muestra se observa una dispersión mucho mayor sobrestimando de la capacidad en un 32% para la ecuación 5.1 y subestimando un 30% con la ecuación 3,22; este ensayo se realizó en una zona cercana a la entrada del aire, se podría suponer que esta puede estar influenciada con parámetros tales como la capacidad de intercambio catiónico y la superficie total (Liu et al., 2016).
- La ultima muestra se realizó a una humedad gravimétrica de 19%, donde se genera una succión de 5557 kPa esta succión es la más alta registrada, el ensayo en la zapata circular muestra una mejor relación con los datos obtenidos. La modelación numérica muestra una buena relación sobrestimándola capacidad un 2%. La ecuación 5.1 muestra una tendencia a subestimar la capacidad portante del suelo

En la Figura 61 se muestra la comparación entre la capacidad experimental de los suelos reconstituidos y la estimada por las tres formulaciones. Para el suelo reconstituido se muestra una mejor tendencia para todas las aproximaciones utilizadas, donde al ser un suelo fabricado, es homogéneo, la fuerza de compactación es las misma y no se tienen problemas de materia orgánica; variables que puedan afectar la capacidad de retención de agua y la resistencia al corte.

Los resultados para la zapata circular Figura 61 a son muy prometedores ya que son muy próximos a los obtenidos en la parte experimental. Como era de esperarse ecuación 3.22 resulta muy conservadora y la ecuación 5.1 sobreestima la capacidad de soporte del suelo.



**Figura 61** Comparación entre la capacidad portante suelo reconstituido medido y calculada por lo métodos de estimación a) zapatas circulares b) zapatas cuadradas

## 6. Conclusiones

El propósito de este trabajo fue obtener resultados experimentales sobre los efectos de la saturación parcial del limo arcilloso de la ciudad de Bogotá y la influencia en las cimentaciones superficiales, los resultados obtenidos son los siguientes:

- Los resultados obtenidos en los ensayos a escala reducida muestran un claro aumento de la capacidad portante con la disminución del contenido de humedad del suelo. Este efecto se puede cuantificar de forma correcta al tener en cuenta la succión como variable que describe el comportamiento de los suelos parcialmente saturados.
- En este trabajo se reconstituyó el limo arcilloso de Bogotá para estudiar este suelo como alternativa para la modelación física en el laboratorio. Como resultado se encontró que el comportamiento hidromecánico de los suelos y la capacidad de retención de agua están influenciados por la macroestructura en la zona de desaturación, obteniendo resultados muy diferentes para los dos suelos. La resistencia al corte no drenada es el doble en el suelo natural comparada con la muestra reconstituida para cualquier rango de succión.
- La formulación teórica que utiliza la resistencia al corte no drenada a partir del ensayo de compresión inconfiada describe mejor la capacidad portante del suelo. Sin embargo, los cambios internos de la presión de poros y de la succión matricial en la etapa de carga no se pueden medir siendo posible un cambio en la succión durante los ensayos. Por lo tanto, al tener incertidumbre de los cambios de la succión matricial existe igualmente incertidumbre en los resultados de capacidad portante. Aunque se podría utilizar un factor de reducción que pueda mejorar la aproximación.
- La formulación teórica que utiliza el ángulo de fricción con respecto a los cambios de succión (obtenida del ensayo de corte directo), es bastante conservadora y si se desea utilizar se deberá emplear un equipo donde se pueda controlar y medir la succión para obtener mejores resultados experimentales.

## 7. Referencias

- Anandarajah, A., & Kuganenthira, N. (1995). Some aspects of fabric anisotropy of soil. *Geotechnique*, 45(1), 69–81. <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.69>
- Berry, P., & Reid, D. (1996). *Mecánica De Suelos - Peter L. Berry & David Reid.pdf* (pp. 181–183). pp. 181–183. McGraw-Hill Companies.
- Bulut, R., & Leong, E. C. (2009). Indirect measurement of suction. *Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils*, 21–32. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8819-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8819-3_3)
- C. J. Phene, G. J. Hoffman, A. S. L. R. (1971). *Measuring. Soil Matric Potential in situ by Sensing Heat Dissipation within a Porous Body: I. Theory and Sensor Construction*.
- Chung, S. F., Randolph, M. F., & Schneider, J. A. (2006). Effect of Penetration Rate on Penetrometer Resistance in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1188–1196. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:9\(1188\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:9(1188))
- Costa, Y. D., Cintra, J. C., & Zornberg, J. G. (2003). Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a lateritic soil deposit. *Geotechnical Testing Journal*, 26(2), 219–227. <https://doi.org/10.1520/GTJ11326J>
- Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Gomes Correia, A., & Kheirbek-Saoud, S. (2002). Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), 1341–1357. <https://doi.org/10.1139/t02-100>
- Fredlund, D. G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 121–139. <https://doi.org/10.1139/t79-011>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Fredlund, D.G., & Rahardjo, H. (1987). Soil Mechanics Principles for Highway Engineering in Arid Regions. *Transportation Research Record*, 0(1137), 1–11.
- Fredlund, D.G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533–546. <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- Fredlund, D G, Morgenstern, N. R., & Widger, R. a. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Revue Canadienne*, 321, 313–321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>

- Fredlund, Delwyn G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Saturated and Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical Division*, Vol. 103, pp. 447–466. [https://doi.org/doi:10.1061/40802\(189\)202](https://doi.org/doi:10.1061/40802(189)202)
- Fredlund, M. D. (1997). Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1103. <https://doi.org/10.1139/t02-049>
- Gan, J., & Fredlund, D. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical*, (1963).
- Garven, E. ., & Vanapalli, S. K. (2006). *Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils*. 2186–2197.
- House, A. R., Oliveira, J. R. M., & Randolph, M. F. (2001). Evaluating the coefficient of consolidation using penetration tests. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 1(3), 17–26.
- K. E. Saxton, W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. P. (1986). *Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture*. 1031–1036.
- Liu, X., Buzzi, O., Yuan, S., Mendes, J., & Fityus, S. (2016). Multi-scale characterization of retention and shrinkage behaviour of four Australian clayey soils. In *Canadian Geotechnical Journal* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0145>
- Lourenço, S. D. N., Gallipoli, D., Toll, D. G., & Evans, F. D. (2006). *Use of Tensiometers for the Measurement of Soil Suction*. Retrieved from <http://eprints.gla.ac.uk/56968/>
- Lozada, C. (2016). *Study of the soil atmosphere interaction and bearing capacity of a soil under desiccation*. Universidad de los Andes.
- Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46(5), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2009WR008646>
- Lu, N., & Likos, W. J. (2006). Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 131–142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(131))
- McQueen, I. S., & Miller, R. F. (1968). Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress. *Soil Science*, Vol. 106, pp. 225–231. <https://doi.org/10.1097/00010694-196809000-00012>
- Meyerhof, G. G. (1951). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Géotechnique*, 2(4), 301–332. <https://doi.org/10.1680/geot.1951.2.4.301>
- Meyerhof, G. G. (1955). Influence of Roughness of Base and Ground-Water Conditions

- On The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Géotechnique*, 5(3), 227–242.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.3.227>
- Meyerhof, G. G. (1963). Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16–26. <https://doi.org/10.1139/t63-003>
- Ogata, L. A. R. and G. (1958). *Thermocouple for Vapor Pressure Measurement in Biological and Soil Systems at High Humidity*. 320(5883), 1599–1600.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2013). Interpretation of the bearing capacity of unsaturated fine-grained soil using the modified effective and the modified total stress approaches. *International Journal of Geomechanics*, 13(6), 769–778.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000263](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000263)
- Oloo, S. (1994). *A bearing capacity approach to the design of low-volume traffic roads* (Vol. 33, pp. 83–92). Vol. 33, pp. 83–92. <https://doi.org/10.1108/eb050773>
- Oloo, S. Y., Fredlund, D. G., & Gan, J. K.-M. (1997). Bearing capacity of unpaved roads. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1981), 398–407. <https://doi.org/10.1139/t96-084>
- Or, D., & Tuller, M. (1999). *model*. 35(12), 3591–3605.
- Orozco R, L. F. (2006). *Asentamientos de Fundaciones en la Arcilla Bogotá*.
- Peck, A. J., & Rabbidge, R. M. (1969). Design and Performance of an Osmotic Tensiometer for Measuring Capillary Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 33(2), 196–202. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300020013x>
- Prandtl, L. (1920). Hauptaufsätze: Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 1(1), 15–20.  
<https://doi.org/10.1002/zamm.19210010102>
- Rankine, M. W. J. (1856). On the Stability of Loose Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147(January), 1–19.  
<https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0003>
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1–2), 61–76.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Richards, L. A., & Gardner, W. (1936). Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. *Journal of the American Society of Agronomy*, 28(5), 352–358.
- Richards, S. J. (1965). Soil suction measurements with tensiometers. *Methods of Soil Analysis. Part 1 No.9 in the Agronomy Series*, 153–163.  
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c9>

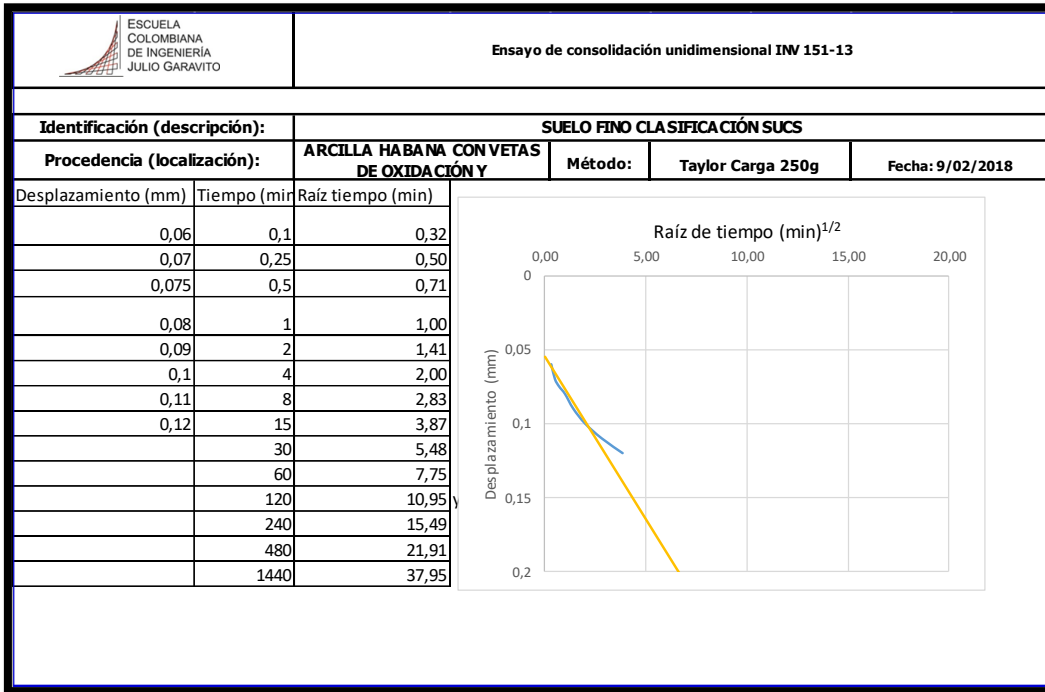
- Ridley, a. M., & Burland, J. B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2), 321–324. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.321>
- Ridley, A., & Burland, J. (1995). Measurement of suction in materials which swell. *Applied Mechanics Reviews*, 48(10), 727. <https://doi.org/10.1115/1.3005055>
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Geotechnique*, 61(4), 313–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.4.313>
- S. Al-khafaf and r. J. Hanks. (1974). *Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential*.
- Sáez, J., & Escario, V. (1986). The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique*, 36(3), 453–456. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.453>
- Shukla, R. L. and M. K. (2004). *Principle of soil physics* (I. MARCEL DEKKER, Ed.). NEW YORK • BASEL.
- Skempton, A. W. S. (1951). The Bearing Capacity of Clays. *Building Research Congress*.
- Spanner, D. C. (1951). The peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Journal of Experimental Botany*, 2(2), 145–168. <https://doi.org/10.1093/jxb/2.2.145>
- Stannard. (1986). *Theory, construction and operation of simple tensiometers.Pdf*.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil Mechanics. In *Jhon Wiley and sons,INC*.
- Terzaghi, K. (1945). *Theoretical Soil Mechanics (1945)*. (Chapter 4).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (pp. 1–529). pp. 1–529.
- Tessier, D., Lajudie, A., & Petit, J. C. (1992). Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. *Applied Geochemistry*, 7(1), 151–161. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(09\)80071-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(09)80071-1)
- Tu, H., & Vanapalli, S. K. (2016). Prediction of the variation of swelling pressure and one-dimensional heave of expansive soils with respect to suction using the soil-water retention curve as a tool. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(8), 1213–1234. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0222>
- Vahedifard, F., Asce, M., Robinson, J. D., & Asce, S. M. (2016). *Unified Method for Estimating the Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations in Variably Saturated Soils under Steady Flow*. 142(1977), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001445](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001445).

- Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 379–392. <https://doi.org/10.1139/t96-060>
- Vanapalli, S. K., & Mohamed, F. M. O. (2007). Bearing capacity of model footings in unsaturated soils. *In Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, 483–493.
- Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 99, pp. 45–73. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)93043-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)93043-5)
- Wheeler, S. J., & Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique*, 45(1), 35–53. <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.35>
- Y. Y. Perera, C. E. Zapata, W. N. Houston, and S. L. H. (2005). *GSP 130 Advances in Pavement Engineering*. 1–14.
- Zakaria, I. (1994). Yielding of unsaturated soil. *Chemistry & ...*, (October), 162. Retrieved from 7
- Zhan, L., Chen, P., & Ng, C. W. W. (2007). Effect of suction change on water content and total volume of an expansive clay. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 8(5), 699–706. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A0699>

## 8. Anexos

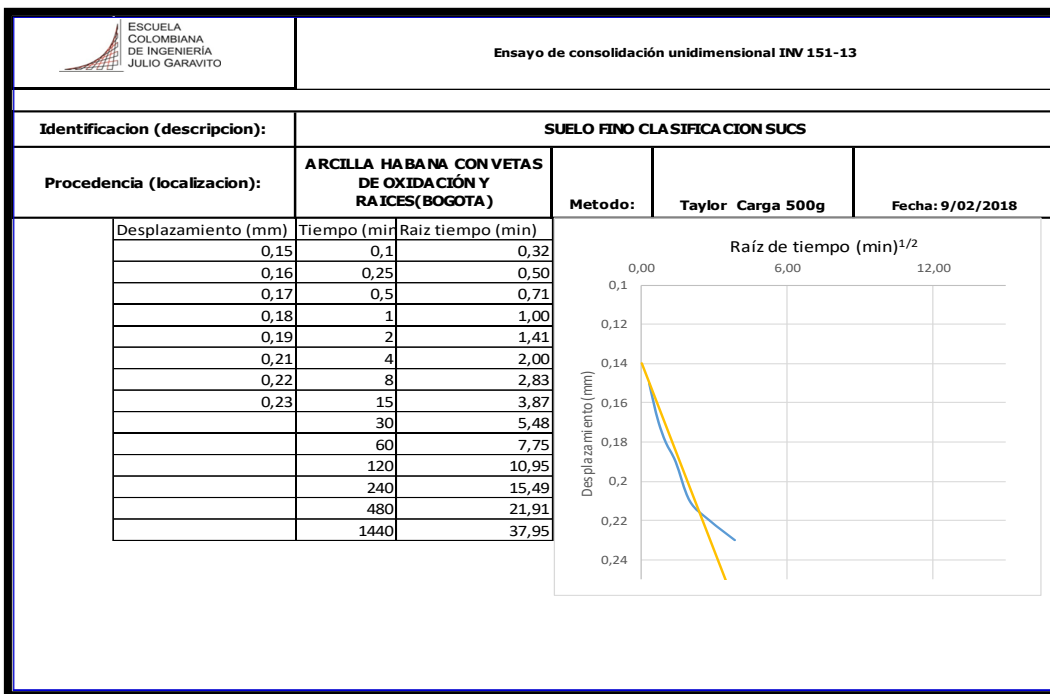
### 8.1 Consolidación

#### 8.1.1 Carga de 250 g

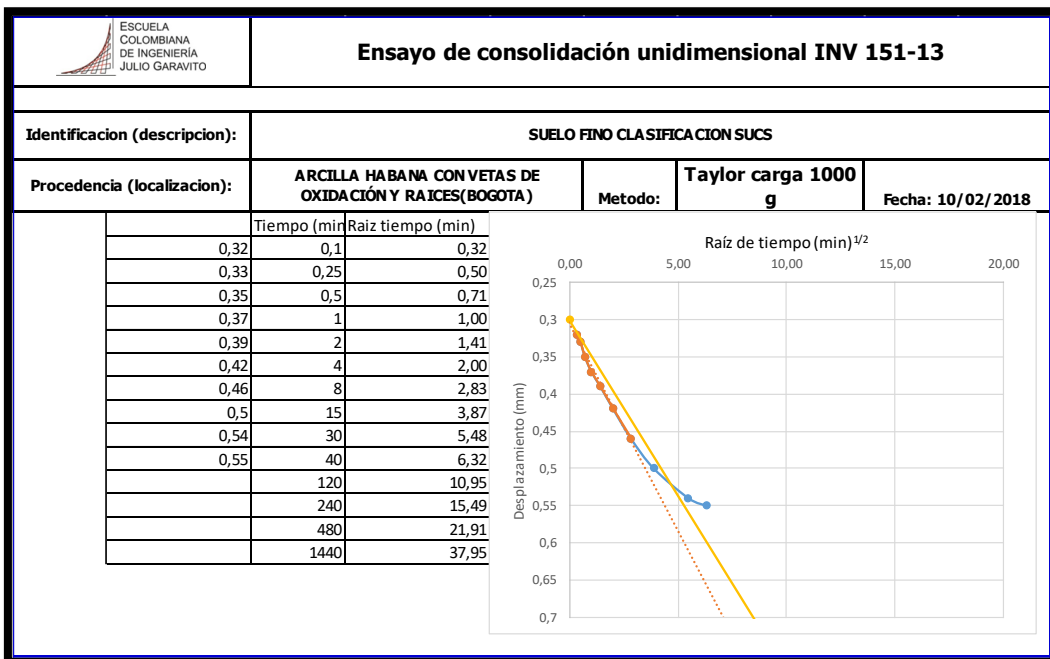




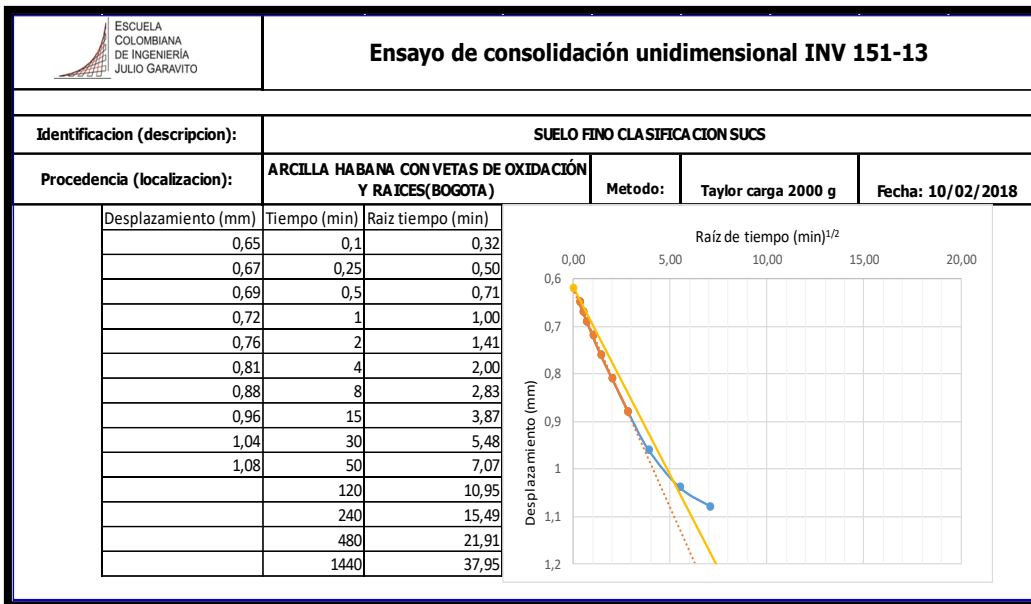
### 8.1.2 Carga de 500 g



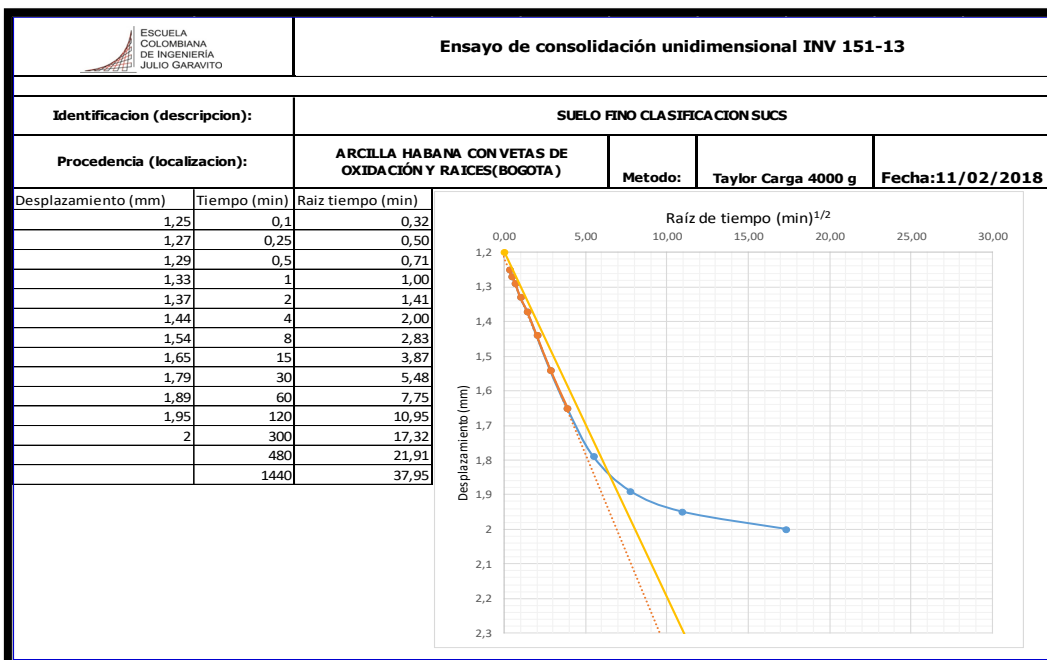
### 8.1.3 Carga de 1000 g



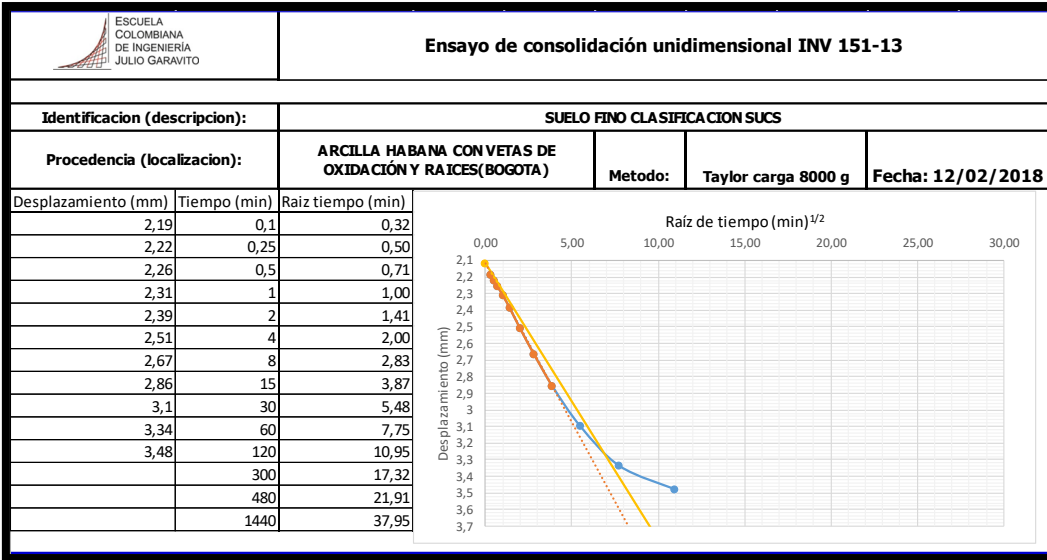
### 8.1.4 Carga de 2000 g



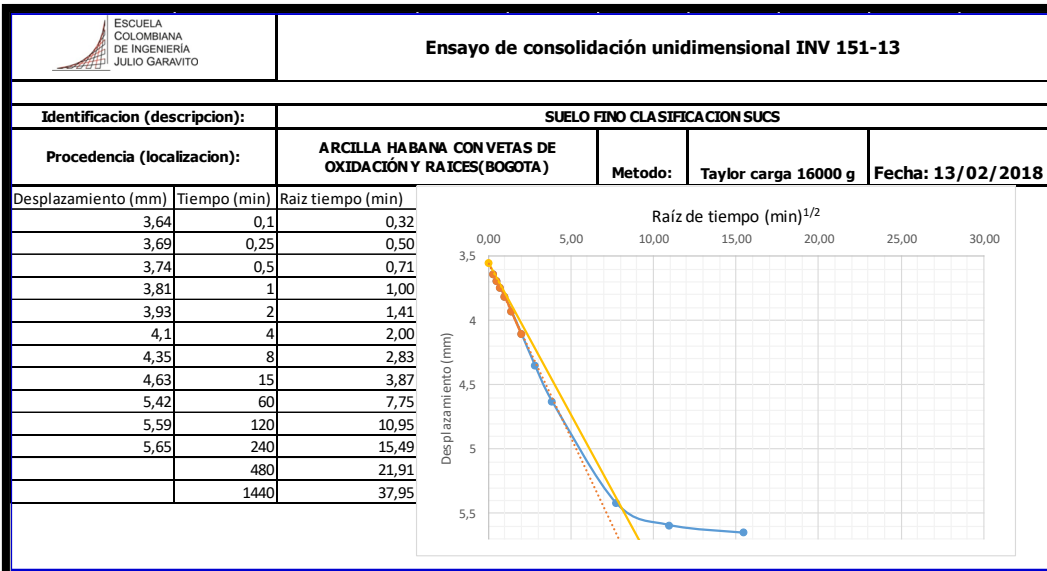
### 8.1.5 Carga de 4000 g



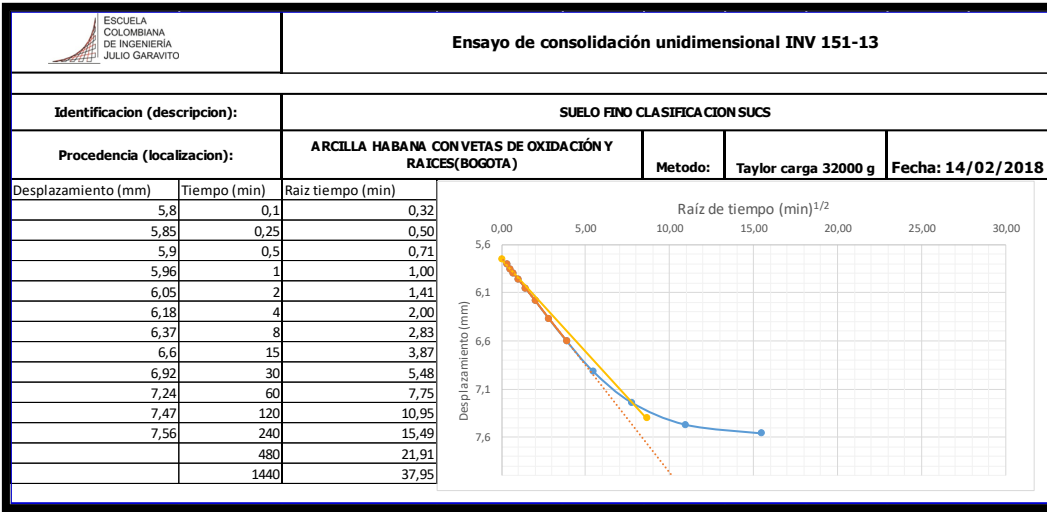
### 8.1.6 Carga de 8000 g



### 8.1.7 Carga de 16000 g



### 8.1.8 Carga de 32000 g

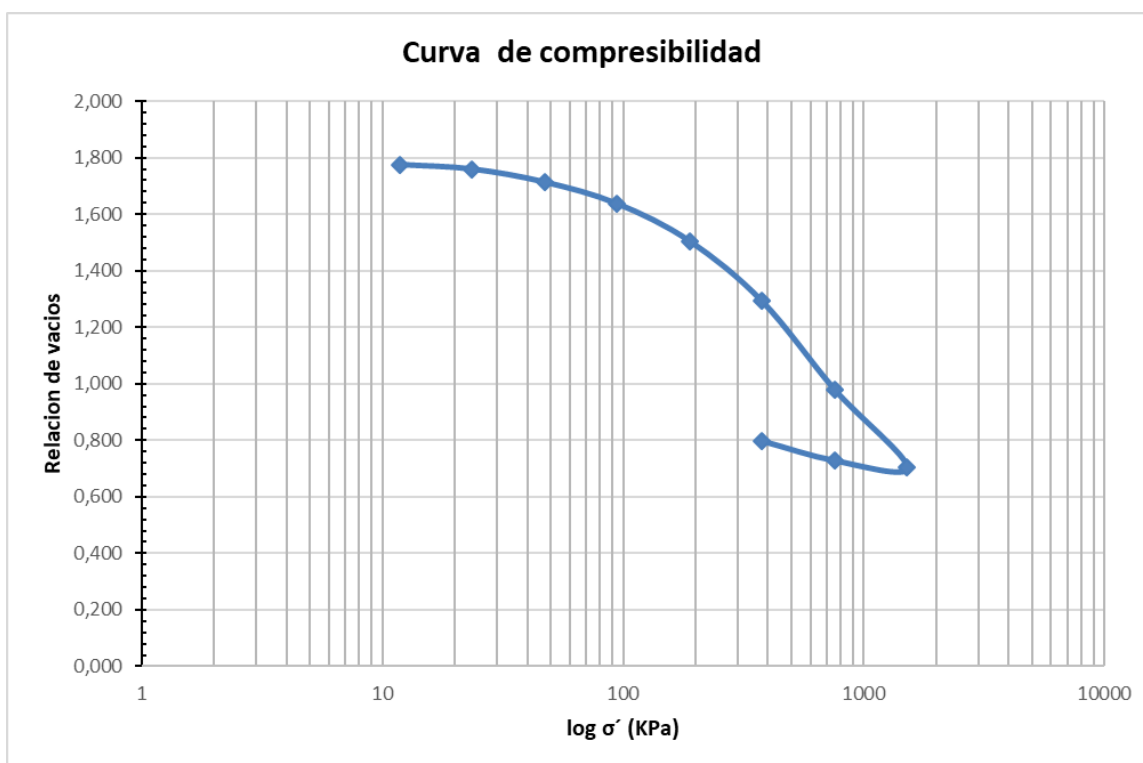


### 8.1.9 Curva de compresibilidad

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>CURVA DE COMPRESIBILIDAD</b>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------

<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Material arcilloso</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniera</b>	<b>Fecha:</b>	<b>16/02/2018</b>

Esfuerzo Kgf/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kPa	Esfuerzo Log kPa	D h mm	Altura mm	Vt cm <sup>3</sup>	Vv cm <sup>3</sup>	e
0	1	0	0	19,41	40,35	25,91	1,79
0,12	12	1,1	0,12	19,29	40,10	25,66	1,78
0,24	24	1,4	0,23	19,18	39,88	25,43	1,76
0,48	47	1,7	0,55	18,86	39,21	24,76	1,71
0,96	94	2,0	1,08	18,33	38,11	23,66	1,64
1,92	189	2,3	2	17,41	36,20	21,75	1,51
3,85	377	2,6	3,48	15,93	33,12	18,67	1,29
7,70	755	2,9	5,65	13,76	28,61	14,16	0,98
15,39	1510	3,2	7,56	11,85	24,64	10,19	0,71
7,70	755	2,9	7,39	12,02	24,99	10,54	0,73
3,85	377	2,6	6,91	12,50	25,99	11,54	0,80

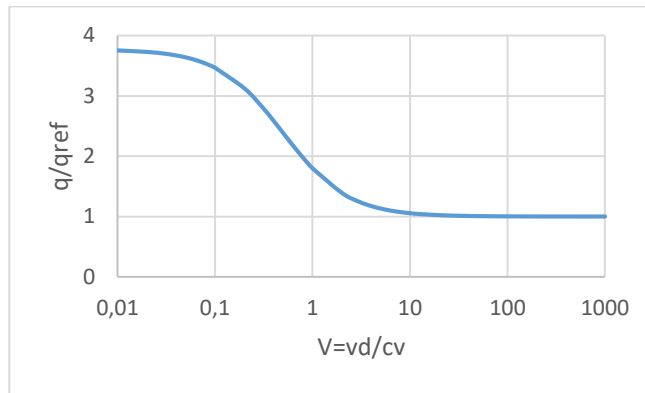


## 8.2 Velocidad de penetración

<b>Identificación (descripción):</b>	<b>velocidad de penetración del ensayo</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES(BOGOTÁ)</b>	<b>Fecha</b>	<b>19/04/2018</b>

Parámetros de ajuste de curva

<b>a</b>	1
<b>b</b>	2,77
<b>c</b>	2,47
<b>d</b>	1,3




<b>Incremento</b>	<b>Cv (cm<sup>2</sup>/s)</b>
250 g	0,0098640
500 g	0,0020678
1000 g	0,0004645
2000 g	0,0011139
4000 g	0,0007436
8000 g	0,0005692
16000 g	0,0004479
32000 g	0,0008296

<b>Diámetro (mm)</b>	40
----------------------	----

<b>incremento</b>	500 g	1000 g	2000 g	4000 g	8000 g	16000 g	32000 g
<b>Cv(mm/s)</b>	0,2067795	0,046454	0,111388058	0,07435955	0,05691944	0,04479054	0,08295712
	0,0413559	0,009291	0,022277612	0,01487191	0,01138389	0,00895811	0,01659142
	0,0465254	0,010452	0,025062313	0,0167309	0,01280688	0,01007787	0,01866535
	0,0516949	0,011613	0,027847015	0,01858989	0,01422986	0,01119763	0,02073928
	0,0646186	0,014517	0,034808768	0,02323736	0,01778733	0,01399704	0,0259241
	0,1033898	0,023227	0,055694029	0,03717978	0,02845972	0,02239527	0,04147856
	0,1550846	0,03484	0,083541044	0,05576966	0,04268958	0,0335929	0,06221784
	0,2067795	0,046454	0,111388058	0,07435955	0,05691944	0,04479054	0,08295712
	0,2584744	0,058067	0,139235073	0,09294944	0,07114931	0,05598817	0,1036964
	0,3101693	0,069681	0,167082087	0,11153933	0,08537917	0,0671858	0,12443568
	0,3618641	0,081294	0,194929102	0,13012922	0,09960903	0,07838344	0,14517496
	0,413559	0,092908	0,222776116	0,1487191	0,11383889	0,08958107	0,16591424
	0,4652539	0,104521	0,250623131	0,16730899	0,12806875	0,10077871	0,18665352
	0,5169488	0,116135	0,278470146	0,18589888	0,14229861	0,11197634	0,2073928
	1,0338975	0,23227	0,556940291	0,37179776	0,28459722	0,22395268	0,41478559
	1,5508463	0,348404	0,835410437	0,55769664	0,42689584	0,33592902	0,62217839
	2,067795	0,464539	1,113880582	0,74359552	0,56919445	0,44790536	0,82957118
	2,5847438	0,580674	1,392350728	0,9294944	0,71149306	0,5598817	1,03696398
	3,1016925	0,696809	1,670820874	1,11539328	0,85379167	0,67185804	1,24435678

### 8.3 Ensayos de corte directo suelo natural

#### 8.3.1 Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 236 kPa


 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>24/04/2018</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6		
Humedad %	50%	longitud inicial (li) (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Ancho inicial (ai) (mm)	100
		Espesor de la cámara (mm)	30


Esfuerzo normal de 50 kPa											
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * ec$ Kg	Fuerza Horizontal (p) Kn	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T" Cortante" kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2	24	17	0,000	0,7	0,24	7,24	0,07	99,76	0,0998	0,0100	7,12
1	38	25	0,000	1,1	0,38	9,70	0,10	99,62	0,0996	0,0100	9,54
-4	43	80	-0,001	1,3	0,43	26,57	0,26	99,57	0,0996	0,0100	26,17
26	65	95	0,005	2,0	0,65	31,17	0,31	99,35	0,0994	0,0099	30,77
23	90	111	0,005	2,7	0,90	36,08	0,35	99,10	0,0991	0,0099	35,70
27	110	130	0,005	3,4	1,10	41,91	0,41	98,90	0,0989	0,0099	41,56
28	133	143	0,006	4,0	1,33	45,90	0,45	98,67	0,0987	0,0099	45,62
24	155	154	0,005	4,7	1,55	49,27	0,48	98,45	0,0985	0,0098	49,08
16	180	158	0,003	5,4	1,80	50,50	0,50	98,20	0,0982	0,0098	50,43
6	208	164	0,001	6,3	2,08	52,34	0,51	97,92	0,0979	0,0098	52,42
-44	233	166	-0,009	6,9	2,33	52,95	0,52	97,67	0,0977	0,0098	53,17
-13	260	168	-0,003	7,8	2,60	53,57	0,53	97,40	0,0974	0,0097	53,93
-25	296	169	-0,005	8,8	2,96	53,87	0,53	97,04	0,0970	0,0097	54,44
-36	318	169	-0,007	9,5	3,18	53,87	0,53	96,82	0,0968	0,0097	54,57
-56	345	169	-0,011	10,2	3,45	53,87	0,53	96,55	0,0966	0,0097	54,72
-65	376	168	-0,013	11,2	3,76	53,57	0,53	96,24	0,0962	0,0096	54,58
-83	405	166	-0,017	12,0	4,05	52,95	0,52	95,95	0,0960	0,0096	54,12
-102	435	164	-0,020	12,9	4,35	52,34	0,51	95,65	0,0957	0,0096	53,66
-123	465	158	-0,025	13,7	4,65	50,50	0,50	95,35	0,0954	0,0095	51,94

### 8.3.2 Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 236 kPa

		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>										
<b>Identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>										
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>							<b>Fecha:</b>		<b>24/04/2018</b>	
<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>												
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e_c$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T" Cortante" kPa	
4	0	36	0,001	0,008	0,00	13,07	0,13	100,00	0,100	0,0100	12,82	
4	1	41	0,001	0,038	0,01	14,60	0,14	99,99	0,100	0,0100	14,32	
7	16	42	0,001	0,494	0,16	14,91	0,15	99,84	0,100	0,0100	14,65	
9	20	62	0,002	0,618	0,20	21,05	0,21	99,80	0,100	0,0100	20,68	
10	36	80	0,002	1,100	0,36	26,57	0,26	99,64	0,100	0,0100	26,15	
14	40	116	0,003	1,228	0,40	37,61	0,37	99,60	0,100	0,0100	37,04	
29	65	158	0,006	2,008	0,65	50,50	0,50	99,35	0,099	0,0099	49,85	
36	80	172	0,007	2,471	0,80	54,80	0,54	99,20	0,099	0,0099	54,17	
43	95	183	0,009	2,935	0,95	58,17	0,57	99,05	0,099	0,0099	57,59	
47	110	192	0,009	3,393	1,10	60,93	0,60	98,90	0,099	0,0099	60,42	
49	118	202	0,010	3,637	1,18	64,00	0,63	98,82	0,099	0,0099	63,51	
50	142	209	0,010	4,359	1,42	66,15	0,65	98,58	0,099	0,0099	65,80	
52	160	215	0,010	4,902	1,60	67,99	0,67	98,40	0,098	0,0098	67,76	
53	175	221	0,011	5,354	1,75	69,83	0,68	98,25	0,098	0,0098	69,70	
54	194	228	0,011	5,926	1,94	71,98	0,71	98,06	0,098	0,0098	71,98	
54	210	232	0,011	6,406	2,10	73,20	0,72	97,90	0,098	0,0098	73,33	
55	242	236	0,011	7,367	2,42	74,43	0,73	97,58	0,098	0,0098	74,80	
56	258	238	0,011	7,849	2,58	75,04	0,74	97,42	0,097	0,0097	75,54	
57	280	238	0,011	8,511	2,80	75,04	0,74	97,20	0,097	0,0097	75,71	
60	302	236	0,012	9,176	3,02	74,43	0,73	96,98	0,097	0,0097	75,26	
64	315	232	0,013	9,574	3,15	73,20	0,72	96,85	0,097	0,0097	74,12	



### 8.3.3 Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 1506 kPa


	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	Muestra tomada de la escuela	<b>Fecha:</b>	<b>30/11/2018</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,066	longitud inicial (li) (mm)	100
Humedad %	24%	Ancho inicial (ai) (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Espesor de la cámara (mm)	30


Esfuerzo normal de 50 kPa											
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * ec$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante" kPa
93	21	1	0,019	0,816	0,21	4,34	0,04	99,79	0,0998	0,00998	4
93	44	1	0,019	1,505	0,44	4,34	0,04	99,56	0,0996	0,00996	4
93	53	2	0,019	1,775	0,53	5,15	0,05	99,47	0,0995	0,00995	5
93	55	13	0,019	1,835	0,55	13,98	0,14	99,45	0,0995	0,00995	14
93	64	30	0,019	2,105	0,64	27,64	0,27	99,36	0,0994	0,00994	27
99	82	50	0,020	2,656	0,82	43,71	0,43	99,18	0,0992	0,00992	43
98	101	62	0,020	3,224	1,01	53,35	0,52	98,99	0,0990	0,00990	53
96	125	75	0,019	3,940	1,25	63,79	0,63	98,75	0,0988	0,00988	63
94	146	90	0,019	4,565	1,46	75,84	0,74	98,54	0,0985	0,00985	75
89	152	102	0,018	4,735	1,52	85,48	0,84	98,48	0,0985	0,00985	85
75	185	114	0,015	5,697	1,85	95,12	0,93	98,15	0,0982	0,00982	95
92	200	130	0,018	6,180	2,00	107,98	1,06	98,00	0,0980	0,00980	108
48	215	149	0,010	6,544	2,15	123,24	1,21	97,85	0,0979	0,00979	124
33	230	166	0,007	6,964	2,30	136,90	1,34	97,70	0,0977	0,00977	137
5	245	195	-0,002	7,330	2,45	160,19	1,57	97,55	0,0976	0,00976	161
-10	255	209	-0,005	7,603	2,55	171,44	1,68	97,45	0,0975	0,00975	173
-24	262	230	-0,010	7,763	2,62	188,31	1,85	97,38	0,0974	0,00974	190
-50	275	255	-0,013	8,124	2,75	208,40	2,04	97,25	0,0973	0,00973	210
-65	285	278	-0,016	8,391	2,85	226,87	2,22	97,15	0,0972	0,00972	229
-82	298	300	-0,019	8,754	2,98	244,55	2,40	97,02	0,0970	0,00970	247
-96	315	322	-0,022	9,237	3,15	262,22	2,57	96,85	0,0969	0,00969	266
-110	332	348	-0,025	9,718	3,32	283,11	2,78	96,68	0,0967	0,00967	287
-125	358	368	-0,028	10,474	3,58	299,18	2,93	96,42	0,0964	0,00964	304
-138	388	379	-0,032	11,332	3,88	308,01	3,02	96,12	0,0961	0,00961	314
-160	464	360	-0,033	13,605	4,64	292,75	2,87	95,36	0,0954	0,00954	301
-165	530	319	-0,044	15,483	5,30	259,81	2,55	94,70	0,0947	0,00947	269
-220	565	318	-0,052	16,459	5,65	259,01	2,54	94,35	0,0944	0,00944	269
-260	590	318	-0,064	17,098	5,90	259,01	2,54	94,10	0,0941	0,00941	270
-320	620	314	-0,081	17,840	6,20	255,79	2,51	93,80	0,0938	0,00938	267
-405	660	290	0,000	19,800	6,60	236,51	2,32	93,40	0,0934	0,00934	248

### 8.3.4 Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 1569 kPa

		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>									
<b>identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>									
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>					<b>Fecha:</b>	<b>30/11/2018</b>			
Humedad %		23%									
<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>											
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e_c$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l <sub>1</sub> (mm)	l <sub>1</sub> (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>"Cortante"</sup> kPa
1	6	1	0,000	0,182	0,06	4,3	0,04	99,94	0,0999	0,0100	4
8	60	20	0,002	1,816	0,60	19,6	0,19	99,40	0,0994	0,0099	19
12	82	25	0,002	2,484	0,82	23,6	0,23	99,18	0,0992	0,0099	23
14	110	41	0,003	3,328	1,10	36,5	0,36	98,90	0,0989	0,0099	36
8	119	61	0,002	3,586	1,19	52,5	0,52	98,81	0,0988	0,0099	52
-4	130	80	-0,001	3,892	1,30	67,8	0,66	98,70	0,0987	0,0099	67
-28	145	106	-0,006	4,295	1,45	88,7	0,87	98,55	0,0986	0,0099	88
-54	155	130	-0,011	4,544	1,55	108,0	1,06	98,45	0,0985	0,0098	108
-88	170	171	-0,018	4,927	1,70	140,9	1,38	98,30	0,0983	0,0098	141
-125	180	200	-0,025	5,154	1,80	164,2	1,61	98,20	0,0982	0,0098	164
-178	188	234	-0,036	5,291	1,88	191,5	1,88	98,12	0,0981	0,0098	191
-268	207	300	-0,054	5,685	2,07	244,5	2,40	97,93	0,0979	0,0098	245
-298	211	323	-0,060	5,747	2,11	263,0	2,58	97,89	0,0979	0,0098	263
-325	225	350	-0,065	6,115	2,25	284,7	2,79	97,75	0,0978	0,0098	286
-370	238	380	-0,074	6,418	2,38	308,8	3,03	97,62	0,0976	0,0098	310
-420	248	400	-0,084	6,621	2,48	324,9	3,19	97,52	0,0975	0,0098	327
-448	261	418	-0,090	6,957	2,61	339,3	3,33	97,39	0,0974	0,0097	342
-448	280	440	-0,090	7,529	2,80	357,0	3,50	97,20	0,0972	0,0097	360
-449	298	460	-0,090	8,069	2,98	373,1	3,66	97,02	0,0970	0,0097	377
-450	320	480	-0,090	8,729	3,20	389,2	3,82	96,80	0,0968	0,0097	394
-451	336	490	-0,090	9,208	3,36	397,2	3,90	96,64	0,0966	0,0097	403
-454	358	514	-0,091	9,865	3,58	416,5	4,08	96,42	0,0964	0,0096	424
-458	378	525	-0,092	10,459	3,78	425,3	4,17	96,22	0,0962	0,0096	433
-462	410	540	-0,092	11,414	4,10	437,4	4,29	95,90	0,0959	0,0096	447
-465	423	555	-0,093	11,799	4,23	449,4	4,41	95,77	0,0958	0,0096	460
-468	446	565	-0,094	12,486	4,46	457,4	4,49	95,54	0,0955	0,0096	470
-472	475	569	-0,094	13,351	4,75	460,6	4,52	95,25	0,0953	0,0095	474
-472	506	560	-0,094	14,284	5,06	453,4	4,45	94,94	0,0949	0,0095	468
-528	602	560	-0,106	17,068	6,02	453,4	4,45	93,98	0,0940	0,0094	473
-530	625	450	-0,106	17,756	6,25	365,1	3,58	93,75	0,0938	0,0094	382
-542	668	465	-0,108	19,028	6,68	377,1	3,70	93,32	0,0933	0,0093	396
-548	690	480	-0,110	19,680	6,90	389,2	3,82	93,10	0,0931	0,0093	410
-554	705	490	-0,111	20,120	7,05	397,2	3,90	92,95	0,0930	0,0093	419
-562	745	502	-0,112	21,310	7,45	406,8	3,99	92,55	0,0926	0,0093	431
-570	774	518	-0,114	22,168	7,74	419,7	4,12	92,26	0,0923	0,0092	446
-585	814	520	-0,117	23,345	8,14	421,3	4,13	91,86	0,0919	0,0092	450

## 8.4 Ensayos de corte directo suelo natural influencia de la anisotropía

### 8.4.1 Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 245 kPa

	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>29/06/2019</b>

#### Parámetros iniciales

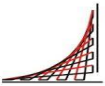
Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad %	48%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm3)	300	Espesor de la cámara (mm)	30

Esfuerzo normal de 50 kPa										
ξH	ξanillo	ξv	Cambio volumétrico (cm3)	Deformación horizontal ξH*0,01 mm	Fuerza Horizontal (p) ξanillo *ec Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m2)	T <sup>o</sup> Cortante kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00000	0
10	17	1,190	12,2	0,10	12,74	0,1249	99,90	0,0999	0,00999	13
40	18	1,190	13,1	0,40	13,54	0,1328	99,60	0,0996	0,00996	13
70	33	1,190	13,9	0,70	25,59	0,2509	99,30	0,0993	0,00993	25
100	42	1,18	14,9	1,00	32,81	0,3218	99,00	0,0990	0,00990	33
130	43	1,200	15,6	1,30	33,61	0,3296	98,70	0,0987	0,00987	33
160	55	1,190	16,2	1,60	43,24	0,4241	98,40	0,0984	0,00984	43
190	78	1,160	16,7	1,90	61,68	0,6049	98,10	0,0981	0,00981	62
210	89	1,120	17,0	2,10	70,50	0,6914	97,90	0,0979	0,00979	71
250	95	1,090	17,9	2,50	75,31	0,7385	97,50	0,0975	0,00975	76
280	95	1,070	18,6	2,80	75,31	0,7385	97,20	0,0972	0,00972	76
320	97	1,050	19,3	3,20	76,91	0,7542	96,80	0,0968	0,00968	78
370	97	1,000	19,4	3,70	76,91	0,7542	96,30	0,0963	0,00963	78
470	88	0,860	21,4	4,70	69,70	0,6835	95,30	0,0953	0,00953	72
530	88	0,770	15,9	5,30	69,70	0,6835	94,70	0,0947	0,00947	72

### 8.4.2 Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 280 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>								
<b>Identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>								
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>			<b>Fecha:</b>		<b>29/06/2019</b>			
Humedad		45%								
<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>										
$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v$	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H \cdot 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} \cdot e_c$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante" kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	18	2,040	20,680	0,10	13,54	0,1328153	99,90	0,100	0,0100	13
40	19	2,040	21,518	0,40	14,35	0,1406921	99,60	0,100	0,0100	14
70	21	2,050	22,457	0,70	15,95	0,1564448	99,30	0,099	0,0099	16
100	21	2,050	23,295	1,00	38,43	0,3768629	99,00	0,099	0,0099	38
130	49	2,050	24,035	1,30	58,48	0,5734751	98,70	0,099	0,0099	58
160	74	2,040	24,677	1,60	80,11	0,7856153	98,40	0,098	0,0098	80
190	101	2,020	25,320	1,90	89,72	0,8798328	98,10	0,098	0,0098	90
210	113	2,000	25,684	2,10	99,32	0,9740091	97,90	0,098	0,0098	99
250	125	1,980	26,610	2,50	102,52	1,0053921	97,50	0,098	0,0098	103
280	129	1,960	27,257	2,80	105,72	1,0367704	97,20	0,097	0,0097	107
320	133	1,940	27,992	3,20	109,72	1,075987	96,80	0,097	0,0097	111
370	138	1,900	29,012	3,70	109,72	1,075987	96,30	0,096	0,0096	112
430	138	1,860	30,317	4,30	108,12	1,0603012	95,70	0,096	0,0096	111
470	136	1,820	31,254	4,70	106,52	1,0446143	95,30	0,095	0,0095	110
480	134	1,800	31,155	4,80	103,32	1,0132371	95,20	0,095	0,0095	106
530	130	1,760	32,094	5,30	101,72	0,9975468	94,70	0,095	0,0095	105
570	128	1,710	32,188	5,70	97,72	0,958316	94,30	0,094	0,0094	102
630	123	1,600	18,900	6,30	97,72	0,958316	93,70	0,094	0,0094	102

### 8.4.3 Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 772 kPa

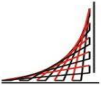
 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>30/06/2019</b>

#### Parámetros iniciales


Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad	35%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Espesor de la cámara (mm)	30

Esfuerzo normal de 50 kPa										
$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v$	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * ec$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) Kn	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante Kpa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	17	1,78	18,65	0,30	12,74	0,125	99,70	0,0997	0,0100	13
60	18	1,78	19,49	0,60	13,54	0,133	99,40	0,0994	0,0099	13
90	19	1,78	20,34	0,90	14,35	0,141	99,10	0,0991	0,0099	14
130	27	1,78	21,47	1,30	20,77	0,204	98,70	0,0987	0,0099	21
150	33	1,78	22,03	1,50	25,59	0,251	98,50	0,0985	0,0099	25
190	57	1,76	22,97	1,90	44,85	0,440	98,10	0,0981	0,0098	45
210	89	1,70	22,94	2,10	70,50	0,691	97,90	0,0979	0,0098	71
250	131	1,61	23,20	2,50	104,12	1,021	97,50	0,0975	0,0098	105
270	141	1,58	23,47	2,70	112,12	1,100	97,30	0,0973	0,0097	113
310	151	1,55	24,32	3,10	120,11	1,178	96,90	0,0969	0,0097	122
340	158	1,53	24,98	3,40	125,71	1,233	96,60	0,0966	0,0097	128
370	162	1,51	25,64	3,70	128,91	1,264	96,30	0,0963	0,0096	131
390	163	1,50	26,12	3,90	129,70	1,272	96,10	0,0961	0,0096	132
410	162	1,49	26,59	4,10	128,91	1,264	95,90	0,0959	0,0096	132
450	155	1,45	27,35	4,50	123,31	1,209	95,50	0,0955	0,0096	127
480	147	1,40	27,73	4,80	116,92	1,147	95,20	0,0952	0,0095	120
510	138	1,34	28,02	5,10	109,72	1,076	94,90	0,0949	0,0095	113

#### 8.4.4 Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 648 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO			<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>								
<b>Identificación (descripción):</b>			<b>Muestra arcillosa</b>								
<b>Procedencia (localización):</b>			<b>Muestra tomada de la escuela</b>				<b>Fecha:</b>	<b>30/06/2019</b>			
Humedad		36%									
<b>Esfuerzo normal de 100 kpa</b>											
ξH	ξanillo	ξv	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal ξH*0,01 mm	Fuerza Horizontal (p) ξanillo*ec Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante" Kpa	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	110	1,390	14,76	0,30	87,3	0,86	99,7	0,100	0,0100	86	
60	138	1,330	15,02	0,60	109,7	1,08	99,4	0,099	0,0099	108	
90	155	1,31	15,68	0,90	123,3	1,21	99,1	0,099	0,0099	122	
130	174	1,280	16,53	1,30	138,5	1,36	98,7	0,099	0,0099	138	
150	184	1,260	16,91	1,50	146,5	1,44	98,5	0,099	0,0099	146	
190	210	1,220	17,67	1,90	167,2	1,64	98,1	0,098	0,0098	167	
210	208	1,190	17,95	2,10	165,6	1,62	97,9	0,098	0,0098	166	
250	219	1,150	18,71	2,50	174,4	1,71	97,5	0,098	0,0098	175	
270	222	1,130	19,09	2,70	176,8	1,73	97,3	0,097	0,0097	178	
310	225	1,080	19,77	3,10	179,2	1,76	96,9	0,097	0,0097	181	
340	225	1,030	20,15	3,40	179,2	1,76	96,6	0,097	0,0097	182	
370	219	0,990	20,63	3,70	174,4	1,71	96,3	0,096	0,0096	178	
390	211	0,950	20,83	3,90	168,0	1,65	96,1	0,096	0,0096	171	

### 8.4.5 Ensayo 5 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 1569 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>01/07/2019</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad %	23%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Espesor de la cámara (mm)	30

Esfuerzo normal de 50 kPa										
ξH	ξanillo	ξv	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal ξH*0,01 mm	Fuerza Horizontal (p) ξanillo*ec Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante" Kpa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	19	0,89	9,19	0,10	13,54	0,13	99,90	0,100	0,0100	13
30	19	0,89	9,77	0,30	14,35	0,14	99,70	0,100	0,0100	14
50	19	0,89	10,36	0,50	25,59	0,25	99,50	0,100	0,0100	25
70	20	0,89	10,94	0,70	34,42	0,34	99,30	0,099	0,0099	34
110	46	0,91	12,30	1,10	67,29	0,66	98,90	0,099	0,0099	67
130	46	0,94	13,18	1,30	88,92	0,87	98,70	0,099	0,0099	88
200	52	0,96	15,41	2,00	126,51	1,24	98,00	0,098	0,0098	127
230	95	0,91	15,79	2,30	172,01	1,69	97,70	0,098	0,0098	173
260	139	0,69	14,52	2,60	187,95	1,84	97,40	0,097	0,0097	189
290	182	0,56	14,14	2,90	211,85	2,08	97,10	0,097	0,0097	214
340	252	0,39	13,97	3,40	234,92	2,30	96,60	0,097	0,0097	238
370	308	0,20	13,03	3,70	273,84	2,69	96,30	0,096	0,0096	279
410	363	0,02	12,49	4,10	294,47	2,89	95,90	0,096	0,0096	301
440	390	0,03	13,49	4,40	319,83	3,14	95,60	0,096	0,0096	328

### 8.4.6 Ensayo 5 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 1569 kPa

			<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>							
<b>Identificación (descripción):</b>			<b>Muestra arcillosa</b>							
<b>Procedencia (localización):</b>			<b>Muestra tomada de la escuela</b>			<b>Fecha:</b>		<b>01/07/2019</b>		
Humedad			23%							
<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>										
ξH	ξanillo	ξv	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal ξH*0,01 mm	Fuerza Horizontal (p) ξanillo*ec Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante <sup>o</sup> Kpa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	18	1,790	18,182	0,10	13,54	0,13	99,9	0,100	0,0100	13
30	19	1,790	18,746	0,30	14,35	0,14	99,7	0,100	0,0100	14
50	33	1,790	19,311	0,50	25,59	0,25	99,5	0,100	0,0100	25
70	44	1,790	19,875	0,70	34,42	0,34	99,3	0,099	0,0099	34
110	85	1,800	21,102	1,10	67,29	0,66	98,9	0,099	0,0099	67
130	112	1,790	21,567	1,30	88,92	0,87	98,7	0,099	0,0099	88
160	159	1,720	21,725	1,60	126,51	1,24	98,4	0,098	0,0098	126
200	216	1,570	21,386	2,00	172,01	1,69	98,0	0,098	0,0098	172
230	236	1,480	21,360	2,30	187,95	1,84	97,7	0,098	0,0098	189
260	266	1,390	21,339	2,60	211,85	2,08	97,4	0,097	0,0097	213
290	295	1,260	20,935	2,90	234,92	2,30	97,1	0,097	0,0097	237
340	344	1,110	20,923	3,40	273,84	2,69	96,6	0,097	0,0097	278
370	370	1,010	20,826	3,70	294,47	2,89	96,3	0,096	0,0096	300
410	402	0,880	20,739	4,10	319,83	3,14	95,9	0,096	0,0096	327
440	418	0,760	20,466	4,40	332,50	3,26	95,6	0,096	0,0096	341
470	422	0,660	20,390	4,70	335,66	3,29	95,3	0,095	0,0095	345
510	413	0,540	20,425	5,10	328,54	3,22	94,9	0,095	0,0095	340
540	390	0,470	20,646	5,40	310,32	3,04	94,6	0,095	0,0095	322
570	365	0,370	20,589	5,70	290,50	2,85	94,3	0,094	0,0094	302
600	347	0,200	19,880	6,00	276,22	2,71	94,0	0,094	0,0094	288



## 8.5 Ensayos de compresión inconfiada

### 8.5.1 Ensayo 1 Succión 44 kPa


 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Identificación (descripción):</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha: 27/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,70
Humedad %	54%
Área(cm <sup>3</sup> )	9,90
Volumen (cm <sup>3</sup> )	59,73
Masa húmeda (g)	101,45
Masa seca (g)	66
Masa se agua (g)	36

	Altura (mm)	Diámetro (mm)
	59,89	36,83
	61,45	36,32
	59,67	33,36
Promedio	6,03	3,55

deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgff)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,61	16	5,14	1,010993868	10,00	50
1,24	21	6,68	2,055135075	10,11	65
1,89	41	12,86	3,132423623	10,22	123
2,51	44	13,79	4,159991161	10,33	131
3,15	47	14,71	5,220706038	10,45	138
3,60	43	13,48	5,966521187	10,53	126
3,78	41	12,86	6,264847246	10,56	119
4,12	39	12,24	6,828352025	10,63	113
5,12	26	8,23	8,485719021	10,82	75

## 8.5.2 Ensayo 2 Succión 236 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>27/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,71
Humedad %	50%
Área(cm <sup>3</sup> )	10,98
Volumen (cm <sup>3</sup> )	80,70
Masa húmeda (g)	138
Masa seca (g)	92
Masa se agua (g)	46

	Altura (mm)	Diámetro (mm)
	73,91	38,59
	73,45	36,61
	73,16	36,96
Promedio	7,35	3,74

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (kgf)	$\xi$ (%)	A corregida (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,49	26	8,23	0	0,00	73,0
0,73	26	8,23	0,667	11,05	80,7
0,96	40	12,55	0,993	10,00	122,7
1,27	55	17,18	1,306	10,03	167,3
1,53	66	20,58	1,728	10,07	199,6
1,81	78	24,28	2,081	10,11	234,6
2,04	85	26,44	2,462	10,15	254,6
2,36	93	28,90	2,775	10,18	277,1
2,88	96	29,83	3,211	10,23	283,9
2,92	101	31,37	3,918	10,30	298,4
3,42	104	32,30	3,972	10,31	305,0
3,65	105	32,60	4,653	10,38	306,9
3,96	106	32,91	4,966	10,42	308,4
4,39	107	33,22	5,387	10,46	309,4
4,67	105	32,60	5,972	10,53	302,4
4,85	100	31,06	6,353	10,57	287,4
5,14	85	26,44	6,598	10,60	243,6

### 8.5.3 Ensayo 3 Succión 324 kPa

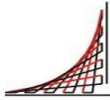
 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Identificación (descripción): Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
	<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,81
Humedad %	44%
Área(cm <sup>2</sup> )	8,91
Volumen (cm <sup>3</sup> )	55,23
Masa húmeda (g)	100
Masa seca (g)	69
Masa se agua (g)	31

	Altura (mm)	Diámetro (mm)
	61,93	33,47
	62,01	33,65
	61,98	33,94
Promedio (cm)	6,20	3,37

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (kgf)	$\xi$ (%)	A corregida (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,31	20	6,37	0,50	8,96	70
0,74	65	20,27	1,19	9,02	220
1,38	95	29,52	2,23	9,12	318
1,67	104	32,30	2,69	9,16	346
2,07	110	34,14	3,34	9,22	363
2,36	115	35,68	3,81	9,27	378
2,65	118	36,61	4,28	9,31	386
2,93	115	35,68	4,73	9,35	374
3,19	100	31,06	5,15	9,40	324
3,39	95	29,52	5,47	9,43	307
3,71	90	27,98	5,99	9,48	289

### 8.5.4 Ensayo 4 Succión 482 kPa

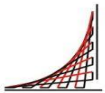
 <b>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</b>	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,80
Humedad %	44%
Área(cm <sup>3</sup> )	18,73
Volumen (cm <sup>3</sup> )	166,69
Masa húmeda (g)	300
Masa seca (g)	208
Masa se agua (g)	92

	Altura (mm)	Diámetro (mm)
	88,29	48,04
	88,84	48,61
	89,789	49,87
Promedio (cm)	8,90	4,88

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,42	25	7,92	0,5	18,82	41
0,74	55	17,18	0,8	18,89	89
1,01	83	25,82	1,1	18,95	134
1,25	121	37,53	1,4	19,00	194
1,51	155	48,00	1,7	19,06	247
1,74	193	59,69	2,0	19,11	306
1,97	220	67,99	2,2	19,16	348
2,21	245	75,67	2,5	19,21	386
2,50	265	81,80	2,8	19,28	416
2,77	283	87,33	3,1	19,34	443
3,05	298	91,92	3,4	19,40	465
3,33	310	95,60	3,7	19,46	482
3,62	320	98,67	4,1	19,53	495
3,90	330	101,73	4,4	19,59	509
4,19	339	104,48	4,7	19,66	521
4,48	345	106,32	5,0	19,73	528
5,05	357	109,99	5,7	19,86	543
5,63	366	112,75	6,3	20,00	553
6,25	371	114,28	7,0	20,15	556
6,8	373	114,89	7,6	20,28	555
7,33	366	112,75	8,2	20,42	542
7,53	360	110,91	8,5	20,47	531
7,83	350	107,85	8,8	20,54	515
8,06	340	104,79	9,1	20,60	499
8,36	325	100,20	9,4	20,68	475


### 8.5.5 Ensayo 5 Succión 726 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>1/06/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,82	89,81	46,79
Humedad %	36%	90,89	46,68
Área(cm <sup>3</sup> )	17	90,66	47,61
Volumen (cm <sup>3</sup> )	157	Promedio (cm)	9,05
Masa húmeda (g)	286		4,70
Masa seca (g)	211		
Masa se agua (g)	75		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,36	20	6,37	0	0	0
0,66	51	15,95	0,40	17,4	36
0,92	78	24,28	0,73	17,5	89
1,17	115	35,68	1,02	17,5	136
1,38	155	48,00	1,29	17,6	199
1,59	195	60,31	1,53	17,6	267
1,81	235	72,60	1,76	17,7	334
2,07	275	84,87	2,00	17,7	402
2,30	300	92,54	2,29	17,8	468
2,55	325	100,20	2,54	17,8	509
2,82	346	106,63	2,82	17,9	550
3,09	365	112,44	3,12	17,9	583
3,33	380	117,03	3,42	18,0	613
3,63	395	121,62	3,68	18,0	636
3,93	410	126,20	4,01	18,1	659
4,17	420	129,25	4,34	18,2	682
4,46	430	132,31	4,61	18,2	696
4,97	445	136,89	4,93	18,3	710
5,6	457	140,55	5,49	18,4	730
5,89	455	139,94	6,19	18,5	744
5,89	456	140,25	6,51	18,6	739
6,14	457	140,55	6,51	18,6	740
6,7	445	136,89	6,79	18,6	740
7,21	445	136,89	7,41	18,8	716
7,75	425	130,78	7,97	18,9	711


### 8.5.6 Ensayo 6 Succión 1147 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>1/06/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,83	59,46	37,3
Humedad %	27%	60,75	38,55
Área(cm <sup>3</sup> )	12	59,07	39,11
Volumen (cm <sup>3</sup> )	69	Promedio (cm)	5,98
Masa húmeda (g)	127		3,83
Masa seca (g)	98		
Masa se agua (g)	29		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	$\xi$ (%)	A corregida	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,0	0	0	0
0,35	18	5,8	0,59	11,60	49
0,65	57	17,8	1,09	11,66	150
0,92	109	33,8	1,54	11,71	283
1,15	151	46,8	1,92	11,76	390
1,40	206	63,7	2,34	11,81	529
1,62	249	76,9	2,71	11,85	636
1,88	290	89,5	3,15	11,91	737
2,15	315	97,1	3,60	11,96	796
2,43	350	107,9	4,07	12,02	880
2,67	372	114,6	4,47	12,07	931
2,97	402	123,8	4,97	12,14	1000
3,24	428	131,7	5,42	12,19	1059
3,51	455	139,9	5,87	12,25	1120
3,78	480	147,6	6,33	12,31	1175
4,05	502	154,3	6,78	12,37	1223
4,33	515	158,2	7,25	12,43	1248
4,62	548	168,3	7,73	12,50	1320
4,91	562	172,5	8,22	12,57	1347
5,22	568	174,4	8,73	12,64	1353
5,59	562	172,5	9,35	12,72	1330
5,98	530	162,8	10,01	12,82	1246
6,41	480	147,6	10,73	12,92	1120

### 8.5.7 Ensayo 7 Succión 1864 kPa


 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Identificación (descripción):</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>			<b>Fecha:</b>
Escuela Colombiana de Ingeniería		3/06/2019	

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,040	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,97	87,82	37,84
Humedad %	23%	86,1	38,78
Área(cm <sup>3</sup> )	13	86,21	37,49
Volumen (cm <sup>3</sup> )	114	Promedio (cm)	8,67
Masa húmeda (g)	225		4,10
Masa seca (g)	183		
Masa se agua (g)	42		

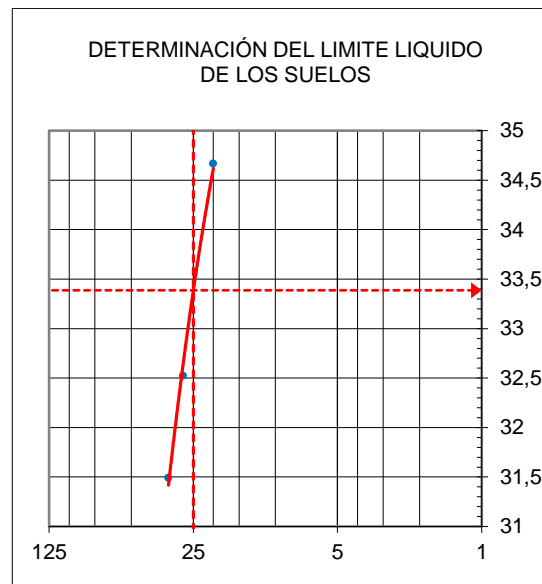
Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida	Esfuerzo
0,00	0	0,00	0,00	0,0	0
0,16	48	15,02	0,18	13,2	111
0,38	110	34,14	0,44	13,3	252
0,61	168	52,00	0,70	13,3	384
0,82	228	70,45	0,95	13,3	518
1,01	290	89,47	1,16	13,4	657
1,22	342	105,40	1,41	13,4	772
1,42	397	122,23	1,64	13,4	893
1,65	452	139,02	1,90	13,5	1013
1,88	501	153,97	2,17	13,5	1119
2,11	501	153,97	2,43	13,5	1116
2,30	555	170,41	2,65	13,6	1232
2,51	605	185,61	2,89	13,6	1339
2,71	657	201,40	3,13	13,6	1449
2,95	707	216,56	3,40	13,7	1554
3,16	752	230,18	3,64	13,7	1647
3,39	796	243,49	3,91	13,7	1738
3,65	839	256,47	4,21	13,8	1825
3,89	878	268,23	4,49	13,8	1903
4,16	910	277,88	4,80	13,9	1965
4,41	946	288,71	5,09	13,9	2035
4,68	975	297,43	5,40	14,0	2090
4,93	1000	304,94	5,69	14,0	2136
5,22	1020	310,95	6,02	14,0	2171
5,55	1036	315,75	6,40	14,1	2195
5,89	1042	317,55	6,79	14,2	2198
6,26	1039	316,65	7,22	14,2	2182
6,93	1030	313,95	7,99	14,3	2145

## 8.6 Clasificación del suelo reconstituido

### 8.6.1 Límite líquido y límite plástico Secado 0


	<b>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126</b>		
	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES(BOGOTÁ)</b>	<b>Método:</b>	<b>A Fecha: 2/03/2018</b>

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	19	2	L20
Golpes	33	30	24
Peso tara	7,27	6,79	7,67
Peso tara +material húmedo	17,39	14,94	19,71
Peso tara +material seca	12,7	11,19	14,03
Peso del agua	4,68	3,75	5,68
Peso material seco	5,44	4,4	6,36
% de humedad	86,03	85,23	89,31
DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	19	B5	
Peso tara	7,12	6,62	
Peso tara +material húmedo	11	11	
Peso tara +material seca	9,8	9,64	
Peso del agua	1,2	1,36	
Peso material seco	2,68	3,02	
% de humedad	44,78	45,03	
Humedad natural (Wn) %	60		
Limite liquido (LL)	88,5	Limite Plástico (LP)	44,9
			Índice de plasticidad (IP)
			43,6

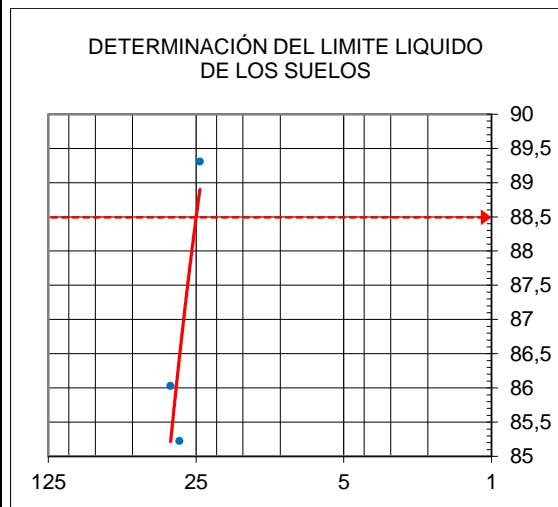





## 8.6.2 Límite líquido y límite plástico Secado 1

	<b>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125</b> <b>LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126</b>			
	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>			
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES(BOGOTÁ)</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES(BOGOTÁ)</b>	<b>Método:</b>	<b>A</b>	<b>Fecha: 22/02/2018</b>

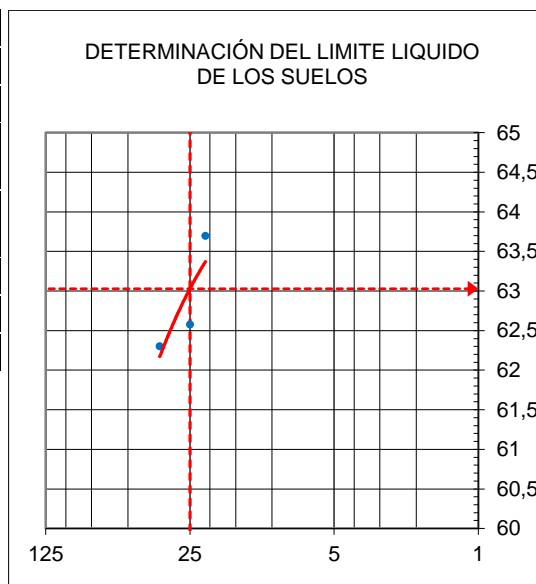
DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	19	94	119
Golpes	35	25	21
Peso tara	7,33	3,75	7,11
Peso tara +material húmedo	18,48	11,96	14,46
Peso tara +material seca	14,2	8,8	11,6
Peso del agua	4,28	3,16	2,86
Peso material seco	6,87	5,05	4,49
% de humedad	62,30	62,57	63,70
DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	L26	B5	
Peso tara	7,65	6,62	
Peso tara +material húmedo	13,97	13,15	
Peso tara +material seca	12,22	11,38	
Peso del agua	1,75	1,77	
Peso material seco	4,57	4,76	
% de humedad	38,29	37,18	
Humedad natural (Wn) %	2,4		
Limite líquido (LL)	63,0	Limite Plástico (LP)	37,7
		Índice de plasticidad (IP)	25,3



### 8.6.3 Límite líquido y límite plástico Secado 2

	<b>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125</b> <b>LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126</b>			
	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>			
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES(BOGOTÁ)</b>	<b>Método:</b>	<b>A</b>	<b>Fecha: 2/03/2018</b>


DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	19	94	119
Golpes	35	25	21
Peso tara	7,33	3,75	7,11
Peso tara +material húmedo	18,48	11,96	14,46
Peso tara +material seca	14,2	8,8	11,6
Peso del agua	4,28	3,16	2,86
Peso material seco	6,87	5,05	4,49
% de humedad	62,30	62,57	63,70



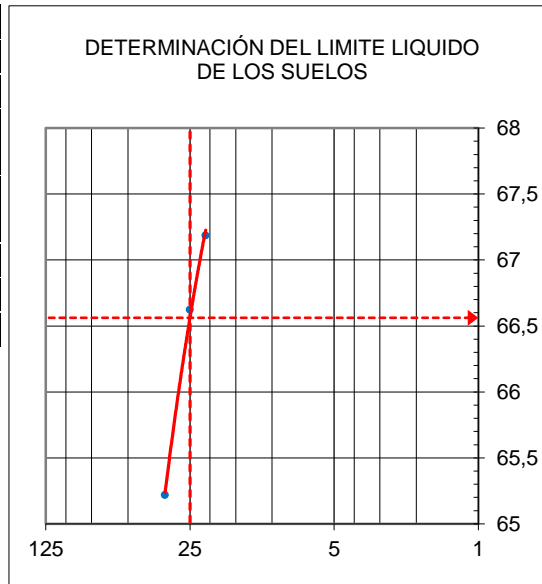
DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	L26	B5	
Peso tara	7,65	6,62	
Peso tara +material húmedo	13,97	13,15	
Peso tara +material seca	12,22	11,38	
Peso del agua	1,75	1,77	
Peso material seco	4,57	4,76	
% de humedad	38,29	37,18	

<i>Humedad natural (W<sub>n</sub>)</i> %	<b>2,4</b>			
<i>Límite líquido (LL)</i>	<b>88,5</b>	<i>Límite Plástico (LP)</i>	<b>37,7</b>	<i>Índice de plasticidad (IP)</i>
				<b>50,8</b>


### 8.6.4 Límite líquido y límite plástico Secado 3

	<b>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126</b>		
	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Arcilla habana con vetas de oxidación y raíces</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Método:</b>	<b>A</b>	<b>Fecha:</b> 5/03/2018

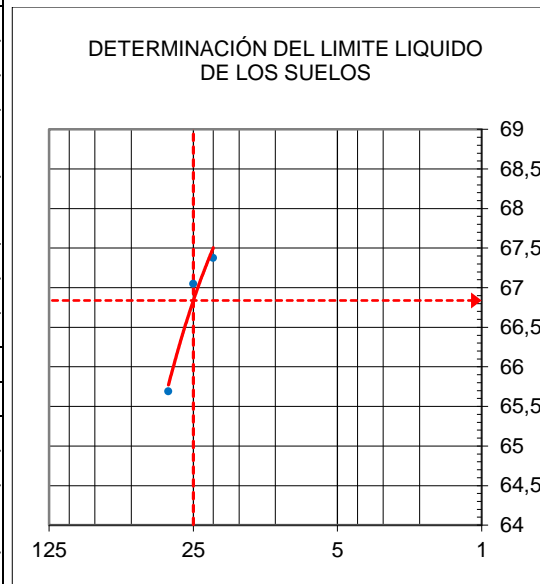
DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	A9	C3	71
Golpes	33	25	21
Peso tara	7,54	6,85	7,63
Peso tara +material húmedo	18,18	19,43	22,66
Peso tara +material seca	13,98	14,4	16,62
Peso del agua	4,20	5,03	6,04
Peso material seco	6,44	7,55	8,99
% de humedad	65,22	66,62	67,19
DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	59	C4	
Peso tara	11,38	6,79	
Peso tara +material húmedo	17,18	11,85	
Peso tara +material seca	15,62	10,51	
Peso del agua	1,56	1,34	
Peso material seco	4,24	3,72	
% de humedad	36,79	36,02	
Humedad natural (W <sub>n</sub> ) %	<b>60</b>		
Límite líquido (LL)	<b>66,6</b>	Límite Plástico (LP)	<b>36,4</b>
		Índice de plasticidad (IP)	<b>30,2</b>



### 8.6.5 Límite líquido y límite plástico Secado 4

	<b>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125</b> <b>LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126</b>			
	<b>Identificación (descripción): SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>			
	<b>Procedencia (localización):</b> arcilla habana con vetas de oxidación y raíces	<b>Método:</b> A	<b>Fecha:</b> 6/03/2018	

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	A9	C3	71
Golpes	33	25	20
Peso tara	7,54	6,78	7,58
Peso tara +material húmedo	18,84	18,39	20,97
Peso tara +material seca	14,36	13,73	15,58
Peso del agua	4,48	4,66	5,39
Peso material seco	6,82	6,95	8
% de humedad	65,69	67,05	67,38



DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	59	C4	
Peso tara	11,38	6,79	
Peso tara +material húmedo	17,09	12,84	
Peso tara +material seca	15,57	11,2	
Peso del agua	1,52	1,64	
Peso material seco	4,19	4,41	
% de humedad	36,28	37,19	

Humedad natural (W <sub>n</sub> ) %	60			
Límite líquido (LL)	66,8	Límite Plástico (LP)	36,7	Índice de plasticidad (IP)
				30,1

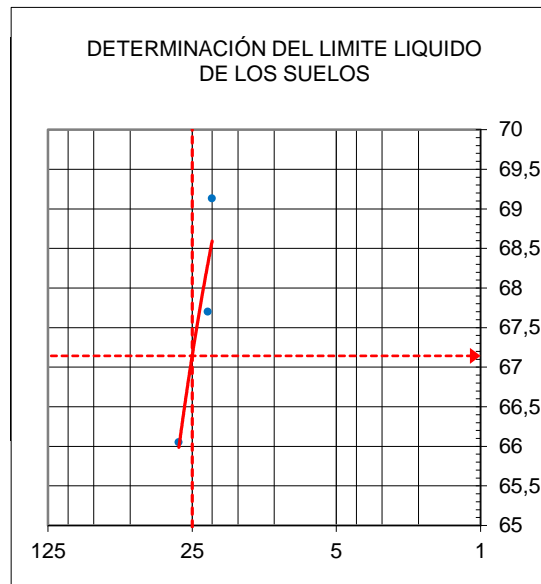
### 8.6.6 Límite líquido y límite plástico Secado 5



#### DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO INV E 125 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS INV E 126


<b>Identificación (descripción):</b>	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>arcilla habana con vetas de oxidación y raíces</b>	<b>Método:</b>	<b>A</b>	<b>Fecha:</b> 16/03/2018

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS			
	61	17	74
<b>Golpes</b>	29	21	20
<b>Peso tara</b>	10,57	7,02	11,23
<b>Peso tara +material húmedo</b>	21,38	21,09	26,79
<b>Peso tara +material seca</b>	17,08	15,41	20,43
<b>Peso del agua</b>	4,30	5,68	6,36
<b>Peso material seco</b>	6,51	8,39	9,2
<b>% de humedad</b>	<b>66,05</b>	<b>67,70</b>	<b>69,13</b>
DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS			
	54	11	
<b>Peso tara</b>	10,66	7,19	
<b>Peso tara +material húmedo</b>	16,08	12,65	
<b>Peso tara +material seca</b>	14,71	11,3	
<b>Peso del agua</b>	1,37	1,35	
<b>Peso material seco</b>	4,05	4,11	
<b>% de humedad</b>	<b>33,83</b>	<b>32,85</b>	
<b>Humedad natural (W<sub>n</sub>) %</b>	<b>2,4</b>		
<b>Limite liquido (LL)</b>	<b>67,1</b>	<b>Limite Plástico (LP)</b>	<b>33,3</b>
		<b>Índice de plasticidad (IP)</b>	<b>33,8</b>



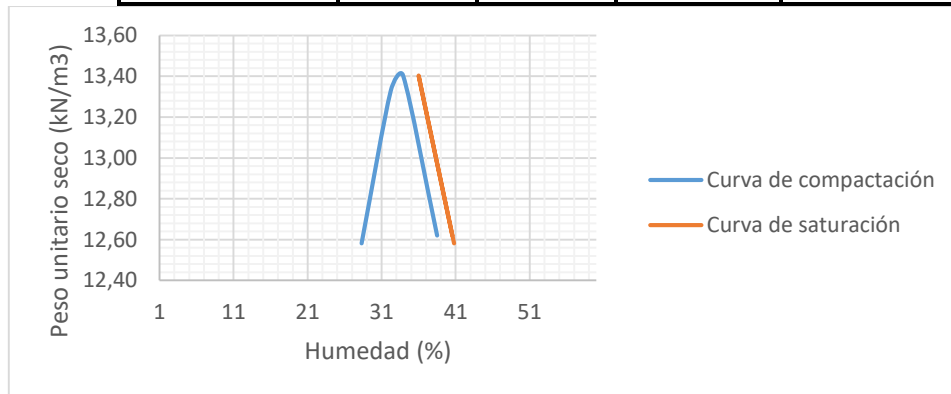
## 8.7 Compactación de suelo reconstituido

### 8.7.1 Curva Proctor

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<b>ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN PROCTOR( RELACIÓN HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS) INV-E-141-13</b>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------


<b>Identificación (descripción):</b>	<b>SUELO FINO CLASIFICACIÓN SUCS</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>ARCILLA HABANA CON VETAS DE OXIDACIÓN Y RAÍCES (BOGOTÁ)</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>Fecha: 5/04/2018</b>

<b>Molde</b>		<b>MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Peso (g)</b>	3719,8	<b>Wm+ molde(g)</b>	5275	5412	5396	5404
<b>Diámetro(cm)</b>	10,16	<b>W muestra(g)</b>	1555,20	1698,2	1682,2	1684,2
<b>Altura (cm)</b>	11,16	<b>YT(g/cm3)</b>	1,65	1,80	1,83	1,78
<b>Volumen C (cm3)</b>	945	<b>Yd(g/cm3)</b>	1,28	1,36	1,37	1,29
<b>Yw(KN/m3)</b>	9,789	<b>Yd(KN/m3)</b>	12,58	13,33	13,40	12,62
<b>Gs</b>	2,70	<b>W recipiente(g)</b>	118,00	119,8	90,3	123,1
		<b>W m+r seca(g)</b>	1330,40	1404,2	1346,7	1339,2
		<b>W m seca(g)</b>	1212,40	1284,40	1256,40	1216,1
		<b>humedad</b>	28	32	34	38
		<b>w saturado</b>	40,77	36,41	36,00	40,53




## 8.8 Curva de retención de humedad suelo reconstituido

### 8.8.1 Punto 1

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>23/07/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	28,3215	26,5865
Recipiente para papel +papel húmedo	M1 (g)	28,3726	26,7067
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	28,358	26,676
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	28,3208	26,584
Masa papel seco	Mf (g)	0,0372	0,092
Masa de agua	Mw (g)	0,0139	0,0282
	Wf	37,37%	30,65%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log Kpa)	2,416	2,939	
h (Kpa)	260,748	869,352	-608,604

## 8.8.2 Punto 2

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>	
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>	
	<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de ingeniería      Fecha: 30/07/2019</b>

		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	28,3692	26,6111
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	28,4823	26,7256
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	28,4604	26,7005
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	28,3704	26,6091


Masa papel seco	Mf (g)	0,09	0,0914
Masa de agua	Mw (g)	0,0231	0,0231
	Wf	25,67%	25,27%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log Kpa)	3,328	3,358	
h (Kpa)	2126,017	2281,353	-155,337

Datos iniciales	
Peso suelo 1 (g)	144,1742
Peso suelo 2 (g)	183,8134
Peso solidos (g)	265,7900
humedad (%)	0,23



### 8.8.3 Punto 3

	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniera</b>	<b>Fecha:</b>	<b>06/08/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	27,7598	25,2774
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	27,8656	25,3846
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	27,8462	25,3678
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	27,7528	25,2732

Masa papel seco	Mf (g)	0,0934	0,0946
Masa de agua	Mw (g)	0,0124	0,0126
	Wf	13,28%	13,32%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log Kpa)	4,293	4,289	
h (Kpa)	19623,731	19472,929	150,802


<b>Datos iniciales del suelo</b>	
----------------------------------	--

Peso suelo 1 (g)	133,4581
Peso suelo 2 (g)	169,1152
Peso solidos (g)	265,7900

<b>humedad</b>	
----------------	--

humedad (%)	0,14
-------------	------

### 8.8.4 Punto 4

	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>13/08/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	27,7587	25,2791
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	27,866	25,3868
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	27,848	25,3693
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	27,7517	25,2729


Masa papel seco	Mf (g)	0,0963	0,0964
Masa de agua	Mw (g)	0,011	0,0113
	Wf	11,42%	11,72%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log kPa)	4,437	4,414	
h (kPa)	27363,808	25933,244	1430,564

Datos iniciales suelo	
Peso suelo 1 (g)	129,4732
Peso suelo 2 (g)	163,2566
Peso solidos (g)	265,79

humedad	
humedad (%)	10%

### 8.8.5 Punto 5

	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>20/08/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	25,2764	27,7554
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	25,3775	27,8589
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	25,365	27,8491
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	25,2734	27,7546


Masa papel seco	Mf (g)	0,0916	0,0945
Masa de agua	Mw (g)	0,0095	0,009
	Wf	10,37%	9,52%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log kPa)	4,519	4,585	
h (kPa)	33043,432	38467,613	-5424,181

<b>Datos iniciales</b>	
Peso suelo 1 (g)	127,2119
Peso suelo 2 (g)	160,1415
Peso solidos (g)	265,7900

<b>humedad</b>	
humedad (%)	8%

### 8.8.6 Punto 6

	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>27/08/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	28,3778	26,6143
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	28,4732	26,7109
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	28,4679	26,7034
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	28,3765	26,6136


Masa papel seco	Mf (g)	0,0914	0,0898
Masa de agua	Mw (g)	0,004	0,0068
	Wf	4,38%	7,57%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log Kpa)	4,986	4,737	
h (Kpa)	96845,838	54589,782	42256,056

Datos iniciales	
Peso suelo 1 (g)	124,5377
Peso suelo 2 (g)	156,5469
Peso solidos (g)	265,7900

humedad	
humedad (%)	6 %

### 8.8.7 Punto 7

	<b>DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO USANDO PAPEL FILTRO INV 159-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería	<b>Fecha:</b>	<b>03/09/2019</b>
		Recipiente 1	Recipiente 2
		Succión Total	Succión Matricial
Recipiente para papel (frio)	Tc (g)	27,7561	25,2771
Recipiente para papel+ papel húmedo	M1 (g)	27,8553	25,3763
Recipiente para papel+ papel seco	M2 (g)	27,8428	25,3647
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	27,7499	25,2723

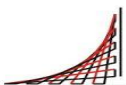
Masa papel seco	Mf (g)	0,0929	0,0924
Masa de agua	Mw (g)	0,0063	0,0068
	Wf	6,78%	7,36%

	Succión Total	Succión Matricial	Succión Osmótica
h (Log kPa)	4,799	4,754	
h (kPa)	62910,376	56716,570	6193,806

Datos iniciales	
Peso suelo 1 (g)	123,2583
Peso suelo 2 (g)	154,8422
Peso solidos (g)	265,790
humedad	
humedad (%)	5%

## 8.9 Ensayos de corte directo suelo reconstituido

### 8.9.1 Ensayo 1 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 528 kPa


 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>25/06/2018</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad %	34%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Espesor de la cámara (mm)	30

Esfuerzo normal de 50 kPa											
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * ec$ Kg	Fuerza Horizontal (p) Kn	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T" Cortante " kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	30	2	0,000	0,896	0,30	5,15	0,05	99,70	0,0997	0,0100	5
-4	60	14	-0,001	1,792	0,60	14,79	0,15	99,40	0,0994	0,0099	15
-5	90	20	-0,001	2,690	0,90	19,61	0,19	99,10	0,0991	0,0099	19
-2	120	24	0,000	3,596	1,20	22,82	0,22	98,80	0,0988	0,0099	23
-15	150	50	-0,003	4,470	1,50	43,71	0,43	98,50	0,0985	0,0099	44
-27	180	72	-0,005	5,347	1,80	61,38	0,60	98,20	0,0982	0,0098	61
-42	210	84	-0,008	6,218	2,10	71,02	0,70	97,90	0,0979	0,0098	71
-45	240	88	-0,009	7,112	2,40	74,24	0,73	97,60	0,0976	0,0098	75
-48	270	92	-0,010	8,007	2,70	77,45	0,76	97,30	0,0973	0,0097	78
-49	300	95	-0,010	8,905	3,00	79,86	0,78	97,00	0,0970	0,0097	81
-51	330	98	-0,010	9,801	3,30	82,27	0,81	96,70	0,0967	0,0097	83
-54	360	99	-0,011	10,696	3,60	83,07	0,81	96,40	0,0964	0,0096	85
-57	390	101	-0,011	11,590	3,90	84,68	0,83	96,10	0,0961	0,0096	86
-60	420	101,5	-0,011	12,491	4,20	85,08	0,83	95,80	0,0958	0,0096	87
-65	450	102	-0,012	13,385	4,50	85,48	0,84	95,50	0,0955	0,0096	88
-64	480	102,5	-0,013	14,276	4,80	85,88	0,84	95,20	0,0952	0,0095	88
-90	510	103	-0,013	15,179	5,10	86,29	0,85	94,90	0,0949	0,0095	89
-95	540	103,5	-0,018	16,030	5,40	86,69	0,85	94,60	0,0946	0,0095	90
-108	570	104	-0,019	16,921	5,70	87,09	0,85	94,30	0,0943	0,0094	91
-123	600	104	-0,022	17,797	6,00	87,09	0,85	94,00	0,0940	0,0094	91
-138	630	103	-0,025	18,669	6,30	86,29	0,85	93,70	0,0937	0,0094	90
-151	660	102	-0,028	19,542	6,60	85,48	0,84	93,40	0,0934	0,0093	90

### 8.9.2 Ensayo 2 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 528 kPa

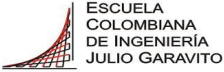
		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha :</b>	<b>25/06/2018</b>

Humedad

34%

<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>											
$\xi_v$	$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal al $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e$ c Kg	Fuerza Horizontal (p) Kn	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante " kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	28	0,001	0,31	0,10	26	0,26	99,90	0,0999	0,010	26
11	20	34	0,002	0,62	0,20	31	0,30	99,80	0,0998	0,00998	30
11	30	39	0,002	0,92	0,30	35	0,34	99,70	0,0997	0,00997	34
16	50	50	0,003	1,53	0,50	44	0,43	99,50	0,0995	0,00995	43
19	70	65	0,004	2,14	0,70	56	0,55	99,30	0,0993	0,00993	55
20	80	69	0,004	2,14	0,70	59	0,58	99,30	0,0993	0,00993	58
20	90	79	0,004	2,44	0,80	67	0,66	99,20	0,0992	0,00992	66
19	100	81	0,004	2,74	0,90	69	0,67	99,10	0,0991	0,00991	68
15	120	87	0,004	3,04	1,00	73	0,72	99,00	0,0990	0,00990	73
10	130	91	0,003	3,63	1,20	77	0,75	98,80	0,0988	0,00988	76
7	140	95	0,002	3,92	1,30	80	0,78	98,70	0,0987	0,00987	79
0	150	98	0,001	4,21	1,40	82	0,81	98,60	0,0986	0,00986	82
-2	190	101	0,000	4,50	1,50	85	0,83	98,50	0,0985	0,00985	84
-15	210	106	0,000	5,70	1,90	89	0,87	98,10	0,0981	0,00981	89
-25	230	111	0,000	6,30	2,10	93	0,91	97,90	0,0979	0,00979	93
-31	250	116	-0,003	6,87	2,30	97	0,95	97,70	0,0977	0,00977	97
-42	280	118	-0,005	7,45	2,50	98	0,96	97,50	0,0975	0,00975	99
-50	300	119	-0,006	8,34	2,80	99	0,97	97,20	0,0972	0,00972	100
-54	310	120	-0,008	8,92	3,00	100	0,98	97,00	0,0970	0,00970	101
-64	340	122	-0,010	9,20	3,10	102	1,00	96,90	0,0969	0,00969	103
-74	370	122,5	-0,011	10,10	3,40	102	1,00	96,60	0,0966	0,00966	103
-85	400	123	-0,013	10,98	3,70	102	1,00	96,30	0,0963	0,00963	104
-98	440	124	-0,015	11,86	4,00	103	1,01	96,00	0,0960	0,00960	105
-104	480	125	-0,017	13,04	4,40	104	1,02	95,60	0,0956	0,00956	107
-136	510	126	-0,020	14,21	4,80	105	1,03	95,20	0,0952	0,00952	108
150	580	128	-0,021	15,10	5,10	106	1,04	94,90	0,0949	0,00949	110
-165	620	129	-0,027	17,14	5,80	107	1,05	94,20	0,0942	0,00942	112
-180	660	131	0,030	18,88	6,20	109	1,07	93,80	0,0938	0,00938	114
-207	730	133	-0,033	19,49	6,60	110	1,08	93,40	0,0934	0,00934	116
-225	780	134	-0,036	21,57	7,30	111	1,09	92,70	0,0927	0,00927	118
-249	840	134	-0,041	23,02	7,80	111	1,09	92,20	0,0922	0,00922	118

### 8.9.3 Ensayo 3 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 2446 kPa

	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>24/04/2019</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad %	25%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm3)	300	Espesor de la cámara (mm)	30

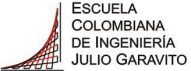
<b>Esfuerzo normal de 50 kPa</b>										
$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm3)	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e_c$ Kg	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m2)	T" Cortante" kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,940	10,0	0,20	0,19	0,00	99,8	0,0998	0,0100	0
40	35	0,950	10,7	0,40	11	0,11	99,6	0,0996	0,0100	11
60	35	0,960	11,3	0,60	11	0,11	99,4	0,0994	0,0099	11
80	50	0,970	12,0	0,80	16	0,15	99,2	0,0992	0,0099	15
110	134	0,970	12,9	1,10	42	0,41	98,9	0,0989	0,0099	41
140	178	0,950	13,6	1,40	55	0,54	98,6	0,0986	0,0099	55
170	206	0,970	14,6	1,70	64	0,62	98,3	0,0983	0,0098	64
200	265	0,900	14,8	2,00	82	0,80	98,0	0,0980	0,0098	82
240	295	0,870	15,7	2,40	91	0,89	97,6	0,0976	0,0098	91
290	342	0,840	16,9	2,90	105	1,03	97,1	0,0971	0,0097	106
350	389	0,810	18,3	3,50	120	1,17	96,5	0,0965	0,0097	122
400	423	0,750	19,2	4,00	130	1,28	96,0	0,0960	0,0096	133
450	446	0,700	20,2	4,50	137	1,35	95,5	0,0955	0,0096	141
470	449	0,670	20,5	4,70	138	1,35	95,3	0,0953	0,0095	142
500	442	0,620	20,9	5,00	136	1,33	95,0	0,0950	0,0095	140
550	393	0,450	20,8	5,50	121	1,19	94,5	0,0945	0,0095	126
590	351	0,320	20,7	5,90	108	1,06	94,1	0,0941	0,0094	113
640	202	0,100	20,1	6,40	62	0,61	93,6	0,0936	0,0094	65



### 8.9.4 Ensayo 4 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 2302 kPa

		<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>								
<b>Identificación (descripción):</b>		<b>Muestra arcillosa</b>								
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Muestra tomada de la escuela</b>					<b>Fecha:</b>		<b>24/04/2019</b>	
Humedad %		26%								
<b>Esfuerzo normal de 100 kPa</b>										
ξH	ξanillo	ξv*0,002 mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal ξH*0,01 mm	Fuerza Horizontal (p) ξanillo*ec Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T" Cortante" kPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	16	0,80	8,58	0,20	11,9	0,12	99,8	0,100	0,0100	12
40	16	0,80	9,17	0,40	11,9	0,12	99,6	0,100	0,0100	12
80	30	0,84	10,73	0,80	23,2	0,23	99,2	0,099	0,0099	23
120	75	0,86	12,10	1,20	59,3	0,58	98,8	0,099	0,0099	59
150	138	0,86	12,97	1,50	109,7	1,08	98,5	0,099	0,0099	109
190	185	0,83	13,84	1,90	147,3	1,44	98,1	0,098	0,0098	147
240	207	0,75	14,52	2,40	164,8	1,62	97,6	0,098	0,0098	166
270	205	0,74	15,30	2,70	163,2	1,60	97,3	0,097	0,0097	165
310	192	0,75	16,57	3,10	152,9	1,50	96,9	0,097	0,0097	155
350	173	0,76	17,83	3,50	137,7	1,35	96,5	0,097	0,0097	140

### 8.9.5 Ensayo 5 Esfuerzo vertical 50 kPa y succión 4970 kPa


	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>25/08/2019</b>

#### Parámetros iniciales

Velocidad del ensayo (mm/min)	0,6	longitud inicial (mm)	100
Humedad	20%	Ancho inicial (mm)	100
Volumen (cm <sup>3</sup> )	300	Espesor de la cámara (mm)	30

Esfuerzo normal de 50 kPa										
$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e_c$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l1 (mm)	l1 (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T" Cortante" Kpa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	29	0,6	6,6	0,10	22	0,2	99,9	0,0999	0,0100	22
40	38	0,6	7,5	0,40	30	0,3	99,6	0,0996	0,0100	29
70	38	0,6	8,4	0,70	30	0,3	99,3	0,0993	0,0099	29
110	56	0,6	9,2	1,10	44	0,4	98,9	0,0989	0,0099	44
150	72	0,6	10,1	1,50	57	0,6	98,5	0,0985	0,0099	57
190	105	0,5	10,7	1,90	83	0,8	98,1	0,0981	0,0098	83
240	195	0,4	10,8	2,40	155	1,5	97,6	0,0976	0,0098	156
270	257	0,3	10,9	2,70	205	2,0	97,3	0,0973	0,0097	206
330	349	0,1	10,9	3,30	278	2,7	96,7	0,0967	0,0097	282
360	385	0,0	11,0	3,60	306	3,0	96,4	0,0964	0,0096	312
390	415	0,0	11,8	3,90	330	3,2	96,1	0,0961	0,0096	337
430	445	0,0	12,9	4,30	354	3,5	95,7	0,0957	0,0096	363
480	470	0,0	14,3	4,80	374	3,7	95,2	0,0952	0,0095	385
520	481	0,0	15,3	5,20	382	3,7	94,8	0,0948	0,0095	395
550	493	0,0	16,1	5,50	392	3,8	94,5	0,0945	0,0095	407
600	497	-0,1	17,4	6,00	395	3,9	94,0	0,0940	0,0094	412
630	498	-0,1	18,2	6,30	396	3,9	93,7	0,0937	0,0094	414
670	514	-0,1	19,2	6,70	408	4,0	93,3	0,0933	0,0093	429
690	525	-0,1	19,7	6,90	417	4,1	93,1	0,0931	0,0093	439
730	549	-0,1	20,8	7,30	436	4,3	92,7	0,0927	0,0093	461
790	588	-0,2	22,2	7,90	467	4,6	92,1	0,0921	0,0092	497
840	614	-0,2	23,5	8,40	487	4,8	91,6	0,0916	0,0092	521
870	621	-0,2	24,3	8,70	493	4,8	91,3	0,0913	0,0091	529
920	631	-0,2	25,5	9,20	500	4,9	90,8	0,0908	0,0091	540

### 8.9.6 Ensayo 6 Esfuerzo vertical 100 kPa y succión 3929 kPa

	<b>ENSAYO CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA NO DRENADA (CU)</b>		
	<b>Muestra arcillosa</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Muestra tomada de la escuela</b>	<b>Fecha:</b>	<b>25/08/2019</b>
Humedad	20%		

Esfuerzo normal de 100 kPa										
$\xi_H$	$\xi_{anillo}$	$\xi_v * 0,002$ mm	Cambio volumétrico (cm <sup>3</sup> )	Deformación horizontal $\xi_H * 0,01$ mm	Fuerza Horizontal (p) $\xi_{anillo} * e_c$ Kgf	Fuerza Horizontal (p) kN	l <sub>1</sub> (mm)	l <sub>1</sub> (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	T <sup>o</sup> Cortante" Kpa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	91	0,800	8,6	0,20	72,10	0,7	99,80	0,0998	0,010	71
40	181	0,800	9,2	0,40	144,08	1,4	99,60	0,0996	0,00996	142
80	340	0,840	10,7	0,80	270,67	2,7	99,20	0,0992	0,00992	268
140	442	0,860	12,7	1,40	351,49	3,4	98,60	0,0986	0,00986	350
190	489	0,860	14,1	1,90	388,62	3,8	98,10	0,0981	0,00981	388
230	506	0,830	15,0	2,30	402,04	3,9	97,70	0,0977	0,00977	404
270	506	0,750	15,4	2,70	402,04	3,9	97,30	0,0973	0,00973	405

## 8.10 Ensayos de compresión inconfiada muestra reconstituida


### 8.10.1 Ensayo 1 Succión 2680 kPa

	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,90	103,45	37,43
Humedad %	25%	104,38	37,57
Área(cm <sup>3</sup> )	11	104,11	38,38
Volumen (cm <sup>3</sup> )	117	Promedio (cm)	
Masa húmeda (g)	222	10,40	3,78
Masa seca (g)	177		
Masa se agua (g)	45		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,11	15	5	0,1	11,2	42
0,14	17	5	0,1	11,2	48
0,16	18	6	0,2	11,2	50
0,22	30	9	0,2	11,2	83
0,62	91	28	0,6	11,3	246
1,12	250	77	1,1	11,3	668
1,63	311	96	1,6	11,4	825
2,15	365	112	2,1	11,5	963
2,70	408	126	2,6	11,5	1069
3,29	439	135	3,2	11,6	1143
3,96	463	142	3,8	11,7	1197
4,59	481	148	4,4	11,7	1236
5,28	495	152	5,1	11,8	1262
5,93	490	151	5,7	11,9	1241
6,89	418	129	6,6	12,0	1050
7,79	392	121	7,5	12,1	976
8,60	372	115	8,3	12,2	919

### 8.10.2 Ensayo 2 Succión 2557 kPa


	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,94
Humedad %	26%
Área(cm <sup>3</sup> )	10,80
Volumen (cm <sup>3</sup> )	64,75
Masa húmeda (g)	125,8
Masa seca (g)	100
Masa se agua (g)	26

	Altura (mm)	Diámetro (mm)
	59,62	36,03
	60	38,17
	60,29	37,03
Promedio	6,00	3,71

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	$\xi$ (%)	A corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,41	50	16	0,7	10,9	141
0,58	158	49	1,0	10,9	440
1,28	230	71	2,1	11,0	632
1,78	280	86	3,0	11,1	761
2,39	319	98	4,0	11,2	858
2,90	343	106	4,8	11,3	914
3,50	360	111	5,8	11,5	949
3,89	365	112	6,5	11,5	955

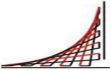
### 8.10.3 Ensayo 3 Succión 2557 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,94	86,13	36,62
Humedad %	26%	86,84	36,06
Área(cm <sup>3</sup> )	10,39	87,21	36,43
Volumen (cm <sup>3</sup> )	90,10	Promedio (cm)	8,67
Masa húmeda (g)	175		3,64
Masa seca (g)	139		
Masa se agua (g)	36		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	$\xi$ (%)	A corregida	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,40	68	21,19	0,5	10,4	199
1,00	128	39,69	1,2	10,5	370
1,55	183	56,62	1,8	10,6	525
2,15	228	70,45	2,5	10,7	648
2,70	265	81,80	3,1	10,7	748
3,27	291	89,78	3,8	10,8	815
3,90	310	95,60	4,5	10,9	862
4,50	321	98,97	5,2	11,0	886
5,10	329	101,42	5,9	11,0	901
5,68	329	101,42	6,5	11,1	895
6,30	312	96,21	7,3	11,2	842
6,71	281	86,71	7,7	11,3	755


### 8.10.4 Ensayo 4 Succión 2618 kPa

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Identificación (descripción):</b>		
<b>Procedencia (localización):</b>		<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b> <b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (cm)	Diámetro (cm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,66	79,82	34,67
Humedad %	25%	80,59	34,64
Área(cm <sup>3</sup> )	9,47	79,9	34,87
Volumen (cm <sup>3</sup> )	75,87	Promedio(cm)	8,01
Masa húmeda (g)	125,8		3,47
Masa seca (g)	100		
Masa se agua (g)	26		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0,0	0,00	0	0	0
0,36	101	31,4	0,4	9,5	323
0,81	190	58,8	1,0	9,6	602
1,31	255	78,7	1,6	9,6	802
1,95	286	88,2	2,4	9,7	891
2,62	305	94,1	3,3	9,8	942
3,29	315	97,1	4,1	9,9	964
4,02	320	98,7	5,0	10,0	970
4,75	322	99,3	5,9	10,1	967
5,21	320	98,7	6,5	10,1	955
5,56	316	97,4	6,9	10,2	939
6,03	305	94,1	7,5	10,2	901
6,39	290	89,5	8,0	10,3	852

### 8.10.5 Ensayo 5 Succión 2635 kPa


 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	2,19	85,6	38,71
Humedad %	19,0%	85,09	37,16
Área(cm <sup>3</sup> )	11	86,21	37,82
Volumen (cm <sup>3</sup> )	97	Promedio (cm)	8,56
Masa húmeda (g)	211		3,79
Masa seca (g)	178		
Masa se agua (g)	34		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	ξ (%)	A corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0	0	0
0,11	15	11,1	0,1	11,3	97
0,14	17	12,7	0,2	11,3	111
0,16	18	13,5	0,2	11,3	118
0,22	30	23,2	0,3	11,3	201
0,62	91	72,1	0,7	11,4	622
1,12	250	199,1	1,3	11,4	1708
1,63	311	247,6	1,9	11,5	2112
2,15	365	290,5	2,5	11,6	2462
2,70	408	324,6	3,2	11,6	2733
3,29	439	349,1	3,8	11,7	2918
3,96	463	368,1	4,6	11,8	3052
4,59	481	382,3	5,4	11,9	3145
5,28	495	393,4	6,2	12,0	3209
5,93	490	389,4	6,9	12,1	3151
6,89	418	332,5	8,0	12,3	2658
7,79	392	311,9	9,1	12,4	2465
8,60	372	296,1	10,0	12,5	2315



### 8.10.6 Ensayo 6 Succión 5617 kPa

	<b>ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA INV 152-13</b>		
	<b>Muestra arcillosa con vetas amarillas</b>		
<b>Identificación (descripción):</b>			
<b>Procedencia (localización):</b>	<b>Escuela Colombiana de Ingeniería</b>	<b>Fecha:</b>	<b>31/05/2019</b>

Velocidad del ensayo (mm/min)	1,04	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Densidad g/cm <sup>3</sup>	2,09	80,53	35,56
Humedad %	20%	80,85	37,39
Área(cm <sup>3</sup> )	10,52	80,85	36,85
Volumen (cm <sup>3</sup> )	84,95	Promedio (cm)	8,07
Masa húmeda (g)	177,38		3,66
Masa seca (g)	147,62		
Masa se agua (g)	29,76		

Deformación(mm)	Lectura del anillo de carga(kgf)	Carga en (Kgf)	$\xi$ (%)	A corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kPa)
0,00	0	0,00	0,0	0,0	0
0,34	56	44,04	0,4	10,6	409
0,74	120	95,32	0,9	10,6	880
1,56	210	167,22	1,9	10,7	1529
1,62	270	215,03	2,0	10,7	1964
2,25	315	250,81	2,8	10,8	2273
2,85	350	278,61	3,5	10,9	2505
3,39	372	296,06	4,2	11,0	2644
4,01	391	311,12	5,0	11,1	2756
4,78	406	323,00	5,9	11,2	2832
5,21	400	318,25	6,5	11,2	2775
5,56	390	310,32	6,9	11,3	2693