

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES.  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL.**



# **Trabajo de Diploma**

**Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos  
parcialmente saturados en Cuba. Aplicaciones al cálculo de las  
deformaciones de las bases de las cimentaciones**

**Autor: Liudys Y. López Martín**

**Tutor: Dr. Cs. Gilberto J. Quevedo Sotolongo**

**Ing. Claudia M. Rodríguez Rodríguez**

**Curso-2015-2016**

*A todos aquellos que forman parte de mi vida, esas personas importantes a las que amo y sé que me aman también. A mi familia, especialmente a mis padres y los que son como si lo fueran, a mi hermana, a mi sobrino, mis tíos y abuelos.*

*A una persona que con solo una mirada me hace sentir especial, y está compartiendo su vida con la mía como si fuese solo una.*

A mi **mamá**, que más que eso es mi amiga, porque mami: como tú nadie me ha entendido, nadie me ha mirado, nadie me ha querido... porque sin ti no hubiese logrado este sueño; porque tus manos sanan y tus palabras reaniman, porque tú eres tú.

A mi **papá**, porque como ese no hay otro, porque no tengo palabras para decirte lo mucho que te quiero, porque sé que estás orgulloso de mí.

A mi compañero incansable, que me quiere, me anima y me consiente.

**Talá**: Gracias por escucharme, entenderme, y comprenderme, por todo el tiempo que me has dedicado y sobre todo por la paciencia que me tienes y tu apoyo incondicional.

A mi **hermana** que me ha cuidado desde pequeñas, que me ayudo junto a su esposo Joel lo que no se imaginan en la tesis.

A mi **sobrino** que lo adoro y espero ser un ejemplo para él.

A los **abuelos** que no conocí y a los viejitos resabiosos que todavía están conmigo.

A mis **tíos** en especial **Normita** que ha cargado conmigo en estos tiempos que mi mamá no ha estado y **Martica** que lo hizo en las mismas condiciones unos años atrás, a mis primos y mis vecinos.

A mi tutora **Claudia María** porque si ella hubiese estado perdida, por su tiempo, dedicación y paciencia, porque a pesar de su juventud no dudó nunca.

A mi tutor **Quevedo** ser un profe ejemplar, por el esfuerzo que ha hecho para atendernos a todos.

A todos los **profesores** de la facultad que a lo largo de estos 5 años hicieron de mí a una ingeniera.

Al personal del laboratorio de materiales y del laboratorio de la facultad de química en especial a **Idolina** y **Ángel** por su ayuda desinteresada.

A **Jenny** que ha sido clave en esta investigación y me ha dedicado un tiempo valioso.

A **Mary** y **Yordy**, por todos los momentos vividos juntas, por ayudarme y compartir conmigo los momentos más difíciles, por estar siempre ahí cuando las he necesitado.

A las muchachitas del cuarto, a **Arasay, Denis, Jaime, Yoana, Yanet** (...) ese grupo grande con el que compartí estos años que nunca olvidare.

Al grupo de **5<sup>to</sup> año de Ingeniería Civil** por todos los buenos y malos momentos que compartimos y superamos juntos.

A **Yanlier**, mi tutor del cayo, que fue maravilloso y y con el que aprendí más cosas de las que él se imagina.

A **Laura M, Ivis L, Dayenis, Dairelys, Diana, Leidys**, (...) y todas esas amistades que nunca han dejado de serlo, a quienes están ahora en mi vida y a los que ya no forman parte de ella, con quienes compartí momentos maravillosos que aunque terminaron nunca los voy a olvidar.

A los profesores que nunca dudaron de mí en especial a **Idalmis, Glenda, Libia, María Eloina, Esnel y Owen**.

A **Victoria** mi segunda mamá, que siempre ha estado ahí cuando es necesario.

A todos los que pusieron su granito de arena ya sea en la tesis o en toda mi vida de estudiante, a los que supieron animarme cuando más lo necesité; y a quienes sin querer olvidé, pero también se merecen este agradecimiento, a todos los que fueron parte de la investigación y me ayudaron de una forma u otra a lo largo de mi formación como ingeniera.

A todos...

**Mil gracias.**

## **Resumen**

La necesidad de profundizar en el estudio de los suelos parcialmente saturados ha aumentado en la actualidad, analizando tendencias actuales sobre la modelación y diseño de cimentaciones superficiales apoyadas sobre estos suelos y adaptarlas a condiciones cubanas.

En este trabajo se presenta la obtención y simulación de las curvas de compresibilidad ( $e$  vs  $\sigma$ ) y de las curvas de retención de agua del suelo Ciego de Ávila. Se realiza una caracterización de los suelos Villa Clara y Ciego de Ávila, mediante el empleo de ensayos de laboratorios siguiendo las especificaciones de las normas correspondientes. La simulación de la curva de compresibilidad del suelo se realizó utilizando un modelo que parte de considerar la curva de retención del suelo y dicha curva en condiciones saturadas, obteniéndose de las mismas las succiones y los coeficientes  $\kappa$  (comportamiento elástico) y  $\lambda$  (comportamiento plástico), que nos permitieron obtener el asentamiento que ocurre en los suelos parcialmente saturados. Se obtiene la curva característica empleando el ensayo del papel de filtro, y la simulación se realizará mediante la utilización de los modelos empíricos de Van Genuchten (1980), Fredlund and Xing (1994) y Gallipoli (2003).

Se pretende transitar a través del proceso de modelación de un cimiento superficial bajo carga axial, se describen los factores que influyen en el diseño de los cimientos superficiales apoyados en suelos parcialmente saturados. Con los resultados obtenidos se estudió la influencia de la succión para el diseño y determinación de los asentamientos en suelos parcialmente saturados en Cuba.

## **Abstract**

The need for further study of the partially saturated soil has increased currently analyzing current trends about the modeling and design of shallow foundations resting on these soils and adapt to the conditions of Cuba. In this work the production and simulation curves compressibility ( $e$  vs  $\sigma$ ) and curves of soil water retention of Ciego de Avila soils is presented. A characterization of the Villa Clara and Ciego de Avila soils was conducted by using physical-mechanical following the specifications of the relevant standards. The simulation curve compressibility partially saturated soil was conducted using a model by considering the curve soil retention and curve compressibility in saturated conditions, obtaining the same suctions and coefficients  $\kappa$  (elastic behavior) and  $\lambda$  (plastic behavior) model Rojas and Alanis, allowing us to get the settlement that occurs in partially saturated soils. the characteristic curve was obtained using the assay laboratory with filter paper, and the simulation was performed using methods of Van Genuchten (1980), Fredlund and Xing (1994) and Gallipoli (2003), which are empirical models. It is intended to move through the process of modeling a surface foundation under axial load. Initially the factors that influence the design of surface foundations supported in partially saturated soils. With the results the influence of suction for the design and determination of settlements in unsaturated soils studied in Cuba.

# Índice

Introducción.....	1
Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional. ....	8
1.1    Mecánica de Suelos saturados .....	8
1.2    Generalidades de la Mecánica de Suelos suelos no saturados .....	9
1.2.1    Fases de los suelos.....	10
1.3    Estudios tenso-deformacionales de suelos parcialmente saturados.....	12
1.3.1    Técnicas para medir succión en el laboratorio.....	15
1.3.1.1    Técnicas directas.....	15
1.3.1.2    Técnicas indirectas.....	17
1.3.2    Efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados. ....	19
1.3.2.1    Curva característica.....	20
1.3.1.3    Histéresis de la curva característica suelo-agua.....	25
1.3.3    Teorías sobre el comportamiento tenso-deformacional. ....	27
1.4    Métodos generales para el cálculo de asentamientos de los suelos parcialmente saturados.....	30
1.5    Conclusiones parciales .....	34
Capítulo II: toma de muestras y ensayos de laboratorio realizados. ....	36
2.1    Muestreo .....	37
2.2    Caracterización y clasificación de los suelos utilizados en la investigación. ....	38
2.2.1    Granulometría. ....	39
2.2.2    Límites de consistencia y Peso específico .....	39
2.2.3    Ensayo de compactación .....	40
2.2.4    Succión con papel de filtro .....	41
2.3    Ensayo de corte directo.....	44
2.4    Ensayo de consolidación de suelos saturados.....	46
2.5    Conclusiones parciales. ....	47
Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos. ....	49
3.1    Ajuste de las curvas de retención del suelo .....	50
3.2    Formulación plateada por Rojas y Alanís para la obtención de la curva $e$ vs $\sigma$ para diferentes grados de saturaciones.....	52
3.3    Obtención de la curva de compresibilidad ( $e$ vs $\sigma$ ) .....	54

3.4	Obtención de la tensión límite de linealidad .....	56
3.5	Obtención de los asentamientos. Método de la Sumatoria de Capas (NC, 2007).....	60
3.6	Conclusiones parciales. ....	62
	Conclusiones y recomendaciones.....	64
	Referencias Bibliográficas .....	67
	Anexos .....	72
	Anexo 2.1 Resultados de las Granulometría de los suelos objeto de estudio.....	73
	Anexo 2.2. Resultados de los Límites de consistencia de los suelos objeto de estudio.....	79
	Anexo 2.3 Resultados del peso específico de los suelos objeto de estudio. ....	83
	Anexo 2.4 Resultados del Proctor Estándar de los suelos objeto de estudio. ....	86
	Anexo 2.5 Resultados experimentales del ensayo de succión .....	88
	Anexo 2.6 Resultados del Ensayo de Corte Directo .....	93
	Anexo 2.7 Resultados del Ensayo de Consolidación .....	107
	Anexo 3.1. Ajuste de las curvas características .....	109
	Anexo 3.2. Obtención de las curvas edométricas del consolidómetro tradicional (e vs $\sigma$ ).....	111

Introducción

## **Introducción**

El suelo es el material más viejo de construcción que existe y a la vez uno de los más complejos debido a la variación de sus propiedades y a su gran diversidad. El conocimiento de las propiedades y características de los suelos son muy importante para el desarrollo y diseño de un proyecto de construcción, debido a que en su mayoría estos proyectos deben contar con suelos que soporten variedades de cargas. Los suelos pueden ser utilizados en su estado natural o pueden ser tratados para mejorarlos y que satisfagan las necesidades que el proyecto requiera.

El comportamiento geotécnico de los suelos que se ha estudiado es cuando estos se encuentran secos o saturados. De las formaciones geológicas del planeta, gran parte están formadas por suelos parcialmente saturados, **(Fredlund & Rahardjo, 1993), (Fredlund, 2002) y (Barrera y Garnica, 2002)**, existiendo problemas geotécnicos importantes donde el estudio de la saturación parcial es fundamental, como es el caso de los expansivos, los colapsables y los residuales, debido a que estos experimentan cambios de volúmenes ante la presencia de humedad, ya sea natural o provocada por el hombre, lo cual causa deformaciones y variaciones de la resistencia de los mismos. De igual forma el comportamiento tenso-deformacional de los suelos parcialmente saturados se diferencia del de los suelos saturados, teniendo influencia en la determinación de las deformaciones de las bases de las cimentaciones. Por tanto preciso conocer el comportamiento de los suelos parcialmente saturados para prevenir cualquier tipo de problemas que puedan ocurrir.

Aproximadamente el 20 % de las publicaciones de los últimos años en revistas geotécnicas y de geotecnia ambiental están directa o indirectamente relacionadas con la investigación en el ámbito de los suelos parcialmente saturados, **(Vanapalli et al. 2008)**. Son referencias fundamentales en el tratamiento de los suelos parcialmente saturados principalmente los trabajos de investigación del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, del Departamento de ingeniería civil de la Universidad de Ottawa (Canadá) y de la Universidad de Saskatchewan (Canadá), **(Asanza 2009, Vanapalli et al. 2008)**

Particularmente en Cuba este ha sido un tema poco tratado, aunque existen autores que han estudiado el tema de los suelos parcialmente saturados pero enfocándose en el comportamiento de los suelos expansivos, **(Monzón 1976)**, **(Ábalo y Moya 1982)**, **(Quevedo et al. 1982)**, **(Quevedo y Lima 1988)**, **(Lima y Marrero 1995)**, **(Delgado 2003)** y **(Tristá et al. 2013)**, pero en realidad la bibliografía que existe del tema generada por autores cubanos en relación con los problemas que presenta el país es poca.

En los diseños geotécnicos actuales se supone que el suelo está saturado pues se consideran las condiciones más críticas; pero existen fenómenos en la geotecnia que relacionan los cambios de humedad, lo cual solo se considera en el análisis de los suelos parcialmente saturados, de ahí la importancia del estudio de este tipo de suelo.

Debido a las problemáticas existentes en el país actualmente, ha aumentado la necesidad de profundizar en el conocimiento de los suelos parcialmente saturados, teniendo en las cuenta nuevas tecnologías que permitan un conocimiento más profundo del comportamiento tenso-deformacional de los mismos desde un punto de vista experimental.

### **Situación Problémica**

Los suelos parcialmente saturados no se han estudiado a profundidad en Cuba, el análisis siempre se realiza con la condición de que el suelo se encuentre saturado que es la más crítica pero esta condición no es la que presentan los suelos la mayoría del tiempo, por lo que es necesario analizar el comportamiento de los mismo dentro de la Mecánica de suelos no saturados. El efecto de la succión y la consolidación marcan el comportamiento volumétrico, de manera significativa, de los suelos parcialmente saturados. En Cuba se desarrollan nuevas técnicas para el estudio del fenómeno de la determinación de asentamientos en estos suelos, con el estudio de la succión mediante la obtención de la curve característica.

### **Problema científico:**

¿Cómo determinar el comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados, con técnicas desarrolladas en Cuba, y cuál es su influencia en la determinación de las deformaciones de las bases de las cimentaciones?

### **Hipótesis**

Con la realización de ensayos de laboratorios factibles en las condiciones de Cuba para el estudio de los suelos parcialmente saturados, es posible establecer el comportamiento tenso-deformacional de los mismos y, con ello llegar a procedimientos para la determinación de las deformaciones de las bases de las cimentaciones

**Objetivo general:**

Realizar el estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados, mediante el empleo de la curva característica con técnicas desarrolladas en Cuba, aplicándolas al cálculo de las deformaciones de las bases de las cimentaciones.

**Objetivos específicos**

1. Analizar el estado actual del conocimiento sobre los suelos parcialmente saturados a nivel nacional e internacional.
2. Realizar ensayos para la caracterización de los suelos parcialmente saturados, empleados en la investigación, con las técnicas existentes en el país.
3. Analizar la aplicación de la curva de retención en el análisis de los asentamientos en los suelos parcialmente saturados.
4. Aplicación del procedimiento desarrollado al cálculo de deformaciones en las bases de las cimentaciones.

**Tareas a ejecutar:**

1. Conformación del estado del arte y el resto de la información.
2. Determinación de las consideraciones teórico - metodológicas sobre la Mecánica de Suelos parcialmente saturados.
3. Realización ensayos de caracterización de los suelos parcialmente saturados, empleados en la investigación con técnicas desarrolladas en Cuba.
4. Determinación del comportamiento tenso deformacional en suelos parcialmente saturados mediante el empleo de la curva característica.
5. Obtención de deformaciones en bases de cimentaciones a partir de la curva característica.
6. Evaluación de los resultados obtenidos.

**Objeto de investigación**

Los suelos parcialmente saturados en Cuba.

### **Actualidad del tema de la investigación**

Los suelos parcialmente saturados presentan mayor complejidad por las variaciones que pueden sufrir su resistencia y su deformación al experimentar cambios de volumen en presencia de humedad, fenómenos que solo se considera en el análisis de este tipo de suelo, y como resultados del presente trabajo se espera obtener herramientas que faciliten el análisis de los mismos, para satisfacer la necesidad de potenciar la productividad y eficiencia en el empleo de los recursos materiales en el sector de la construcción.

### **Novedad científica de la investigación**

La definición de un procedimiento para el caracterización de los problemas tenso-deformacionales de los suelos parcialmente saturados en las condiciones de Cuba, y partir de la misma su utilización para la determinación de las deformaciones de las bases de las cimentaciones.

### **Justificación y uso de los resultados**

Muchos problemas de la geotecnia corresponden a condiciones del suelo en saturación parcial relacionados con esfuerzos, deformación y flujo. Cuando un suelo se encuentra en esta condición sus propiedades no son constantes, sino que varían, y debido a esto se hizo necesario realizar un estudio del comportamiento tenso-deformacional de estos suelos así realizar diseños más económicos y menos conservadores de las deformaciones en cada una de las estructuras a diseñar.

### **Valor teórico**

El aporte de la presente investigación radica en la influencia de estado de saturación parcial en el cálculo de las deformaciones de las bases de las cimentaciones.

### **Valor práctico**

Se realiza la caracterización de los suelos parcialmente saturados y se brindan recomendaciones para el análisis en este tipo de suelo, posibilitando la realización de diseños más seguros y menos costosos

### **Métodos y técnicas**

Se emplearon métodos de nivel teórico, como el hipotético-deductivo y el análisis-síntesis, para el estudio de investigaciones precedentes tanto en Cuba como en el extranjero y para la definición concreta del problema científico y de la hipótesis. También se emplearon métodos de nivel empírico, como el

experimental, la observación y el análisis de documentos, y de nivel matemático o estadístico, como el estadístico-descriptivo y el cálculo porcentual, durante la ejecución de ensayos que permiten determinar el comportamiento de los suelos parcialmente saturados y su aplicación al cálculo de las deformaciones en las bases de las cimentaciones.

### **Beneficios sociales, ambientales o económicos del resultado obtenido**

Con la realización de un estudio en el que se defina el comportamiento tenso-deformacional de los suelos parcialmente saturados, se obtendrán beneficios sociales y económicos en estructuras edificadas sobre este tipo de suelo que en la actualidad presentan numerosas patologías relacionadas a un estudio incorrecto de su comportamiento o disminuyendo el costo de las mismas porque se tomará en cuenta el comportamiento real de los suelos.

### **Estructura de la tesis**

La tesis se encuentra estructurada de la siguiente forma:

- ✓ Introducción. Diseño metodológico.
- ✓ Capítulo I. Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.
- ✓ Capítulo II. Estudio experimental de los suelos parcialmente saturados en Cuba.
- ✓ Capítulo III. Simulación de las curvas de retención, las curvas de compresibilidad convencional, bajo succión controlada, para el cálculo de asentamientos.
- ✓ Conclusiones y Recomendaciones.
- ✓ Referencias Bibliográficas.
- ✓ Anexos

Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos  
parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.

Capítulo I: Estado actual del conocimiento de  
los suelos parcialmente saturados y su  
comportamiento tenso-deformacional.

## **Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.**

### **1.1 Mecánica de Suelos saturados**

(Terzaghi, 1943) define la Mecánica de Suelos como la aplicación de las leyes de la Mecánica y la Hidráulica a los problemas de ingeniería, relacionados con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producto de la sedimentación química y mecánica de las rocas, independientemente de que tengan o no materia orgánica. Esta es la rama que trata la acción de las fuerzas sobre la masa de los suelos.

Inicialmente la Mecánica de Suelos se desarrolla en situaciones extremas encontrándose los suelos en estado seco o saturado, y en ambas el suelo es considerado como un sistema donde solo interactúan dos fases. La condición saturada se presenta en suelos situados por debajo del nivel freático y la condición seca se encuentra en suelos por encima del nivel de agua o donde no existe nivel freático, (Pérez, 2014) citado por (Lambe & Whitman, 1991).

La presión en cualquier punto de una sección de una masa de suelo puede calcularse a partir de las tensiones principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , que actúan en este punto. Si los vacíos del suelo están llenos de agua con una presión  $\mu$ , la presión principal total se compone de dos partes: una parte  $\mu$ , actúa en sobre el agua y otra sobre el sólido en todas las direcciones con igual intensidad. Un cambio en la presión neutra prácticamente no produce cambios en el volumen y casi no tiene influencias en las condiciones de falla. Todos los efectos notables de un cambio de presión, como la compresión, distorsión y cambios en la resistencia al corte, están exclusivamente ligadas a cambios en las tensiones efectivas  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , (Terzaghi, 1936 y Simons and Menzies, 2001).

(Terzaghi, 1936), y posteriormente (Jennings and Burland, 1962) y (Bishop and Blight, 1963) consideraron que las tensiones efectivas influyen en los parámetros mecánicos de un suelo, y estas, a su vez, están determinadas por las tensiones por carga impuesta y las tensiones intersticiales o neutras:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad \text{(Ecuación 1.1)}$$

Donde:

u: presión neutra o presión en el fluido intersticial

$\sigma$ : tensión total proveniente de la fuerza o sistema de fuerzas externas aplicadas

$\sigma'$ : la tensión efectiva de las fuerzas inter- granulares.

Además, (**Bishop, 1960**) utilizaba la expresión de Coulomb para la resistencia al corte y la definía como:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{(Ecuación 1.2)}$$

Esta expresión es generalmente conocida como el principio de falla de Mohr-Coulomb. El valor de los parámetros de resistencia es obtenido generalmente mediante ensayos de laboratorio sencillos como el ensayo de corte directo y la prueba triaxial (**Das, 2007**).

La mecánica de suelo se desarrolla en la condición más crítica de diseño que es la saturada, en la cual el suelo presenta mayor densidad y peso específico, los espacios de vacío se encuentran totalmente llenos de agua y es donde ocurren los mayores cambios en las partículas del suelo. Dichos cambios en las partículas se determinan a través de las tensiones, estas aumentan provocando que la resistencia a cortante, es decir, la fricción y la cohesión varíen, de forma tal el comportamiento de estos suelos se haga más grave, y por eso se estudie la mecánica de suelo saturada.

## 1.2 Generalidades de la Mecánica de Suelos suelos no saturados

Según su origen, los suelos parcialmente saturados (SPS) pueden clasificarse como naturales o artificiales. Naturales pueden considerarse aquellos de origen sedimentario (aluviales, eólicos, etc.) o bien los lateríticos y saprolíticos originados debido a las condiciones ambientales en las que ocurre la descomposición de la roca matriz y artificiales aquellos compactados utilizados ampliamente en obras de tierra como presas y terraplenes, los cuales por su naturaleza, no son saturados y según algunas características es razonable aceptar ciertas similitudes de comportamiento entre los suelos compactados y los suelos naturales desecados, (**Simons and Menzies, 2001**).

Las deformaciones volumétricas que ocurren al modificar el grado de saturación de los suelos parcialmente saturados se relacionan con los fenómenos más característicos en el comportamiento de los estos suelos. Estos pueden ser tanto colapsos como expansiones los cuales se consideran como procesos de inestabilidad estructural, ya que sin modificar el estado de

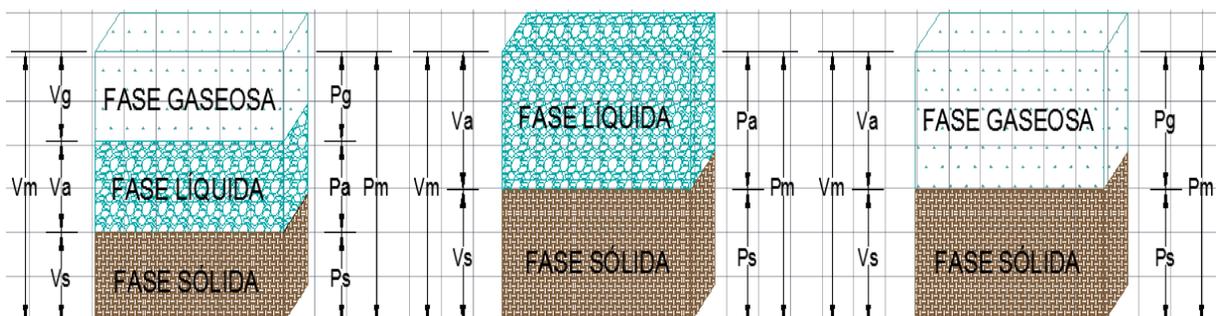
esfuerzo exterior producen discontinuidades en el comportamiento deformacional del suelo al variar las condiciones ambientales como la humedad **(Barrera y Garnica, 2002)**.

Lo comentado anteriormente a cerca de la condición más crítica en los suelos saturados no siempre se cumple, ya que la mayor parte de los suelos no se encuentran en este estado, por lo que a veces se realizan diseños irracionales al no tener en cuenta el verdadero comportamiento del suelos, debido a que en su estudio no se analizan los cambios de humedad los cuales son responsables de inestabilidades estructurales. Por esta razón se estudiará en este trabajo el comportamiento tenso-deformacional de los suelos no saturados.

### 1.2.1 Fases de los suelos.

De acuerdo a las diferentes fases por las que están formados los suelos es que se definen los estados de los mismos. Los suelos saturados al igual que los secos presentan dos fases, en el primero se encuentra las fases sólidas y agua y en el segundo las fases sólidas y aire, pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases: sólidas, líquida y gaseosa. La fase sólida está compuesta por las partículas sólidas del suelo y el agua higroscópica, la fase líquida está formada por el agua libre (agua que se mueve por la acción de la fuerza gravitacional), el aire y sales disueltas y la fase gaseosa es la que ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupado por la fase líquida integrada por el aire libre, el vapor de agua y otros, es decir, los vacíos existentes entre las partículas sólidas del suelo parcialmente saturado son ocupados por las fases líquida y gaseosa, **(Fredlund D. G., 2000)**

A continuación se observan los esquemas de las fases por las que están formados los suelos en la Figura 1.1

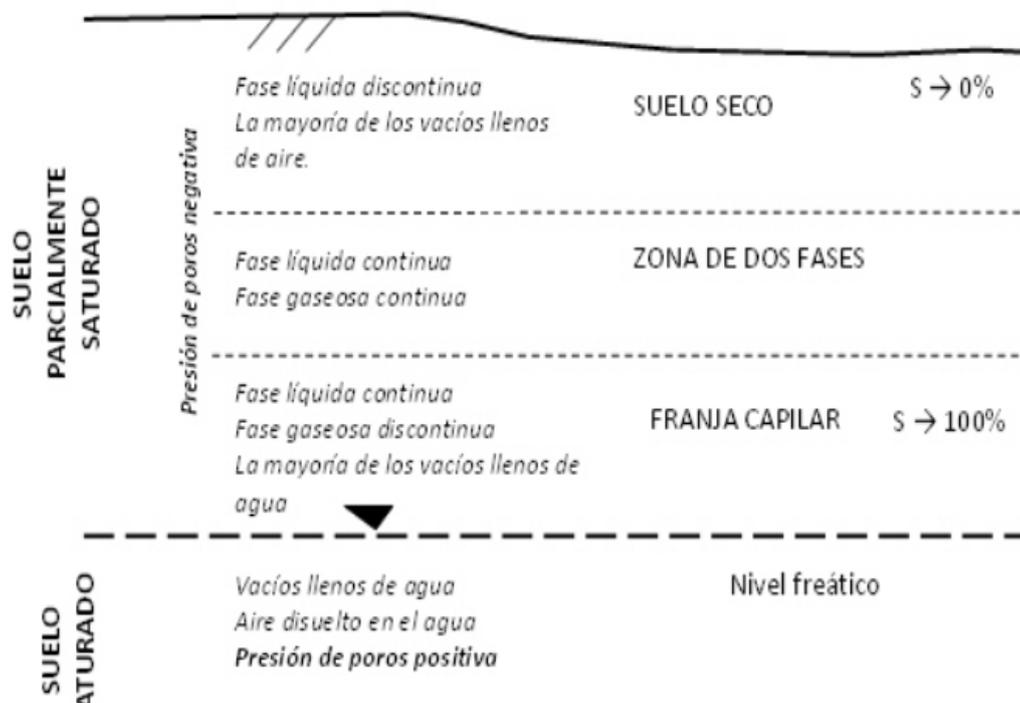


Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.

**Figura 1.1** Diagrama de fases: a) suelo no saturado, b) suelo saturado, c) suelo seco, (Fredlund y Rahardjo 1993), (Alanis 2012).

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático (NF) pueden estar en estado seco cuando se encuentra más cercano a la superficie del terreno y en estado parcialmente saturado cuando se encuentra más cercano a la franja de nivel freático (NF), el nivel freático es la línea divisoria entre los suelos en estado saturado y suelos parcialmente saturados, (Fredlund D. G., 2000)

La Figura 1.2 muestra el esquema planteado por Fredlund para representar los estados del suelo dependiendo de las fases presentes.



**Figura 1.2** Estados del suelo dependiendo de las fases presentes, (Fredlund D. G., 2000)

Los suelos saturados se encuentran por debajo del nivel freático (NF), sus poros están ocupados completamente por agua encontrándose a una presión positiva, la cual se conoce como presión hidráulica ( $u_w$ ) que es mayor que cero, para un  $S=100\%$ , (Fredlund D. G., 2000)

En la zona de suelo seco la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire, existiendo una posibilidad de fase líquida pero en estado discontinuo como pequeñas gotas de agua aisladas. En este caso el grado de saturación del suelo seco es  $S=0\%$ , (Fredlund D. G., 2000).

En los suelos parcialmente saturados la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, pero puede existir una fase

gaseosa discontinua. En este caso el grado de saturación es cercano al 100%, pero no se considera saturado y a diferencia de este, el agua que ocupa los vacíos se encuentra a una presión negativa, es decir, las presiones son menores que cero y se rige por el fenómeno de capilaridad, **(Fredlund D. G., 2000)**.

Los suelos que se encuentran tanto en la condición saturada como en la condición seca están formados por dos fases, el primero por la fase sólida y líquida, es decir, los espacios vacíos del suelo solo se encuentran ocupados por agua, el segundo por la fase sólida y gaseosa, es decir, los espacios vacíos del suelo están ocupados principalmente por aire, porque el agua que puede existir no ejerce influencia en el comportamiento del suelo y se van a estudiar en este trabajo a los suelos parcialmente saturados que están formados por tres fases: sólida líquida y gaseosa, es decir, los espacios vacíos del suelo están ocupados por agua y aire.

### **1.3 Estudios tenso-deformacionales de suelos parcialmente saturados.**

Los esfuerzos efectivos se pueden definir como aquellas funciones de los esfuerzos totales y de las presiones intersticiales que controlan todas las relaciones esfuerzo-deformación del suelo **(Terzaghi, 1936)**, y según él las relaciones esfuerzo-deformación del suelo dependen exclusivamente del exceso de las presiones totales sobre la presión intersticial. Dos aspectos del principio de Terzaghi son de gran importancia:

- La presión de poro del agua actúa en el agua y en el sólido en cada dirección.
- Únicamente los cambios en el esfuerzo efectivo explican los cambios en el estado del suelo.

En el caso de un suelo saturado, dicha tensión está descrita en la (Ecuación 1.3):

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{(Ecuación 1.3)}$$

Para los suelos parcialmente saturados también se han intentado proponer expresiones que definan un único esfuerzo efectivo que controle el comportamiento del suelo en lo que se refiere tanto a su deformación volumétrica como a su resistencia al corte, **(Fredlund and Rahardjo, 1993)**.

Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.

En la Tabla 1.1 se resumen de las expresiones más comunes que han sido propuestas para determinar el esfuerzo efectivo para suelos no saturados.

**Tabla 1.1** Expresiones de esfuerzos efectivos para suelos no saturados presentados por diversos autores (**Fredlund and Rahardjo, 1993**).

Expresión	Componentes	Referencia
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$	$\chi$ : parámetro relacionado con el Sr $u$ : presión de gas y fase de vapor	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\beta$ : factor de unión	Croney (1958)
$\sigma' = \sigma u_m + u_a a_a + u_w a_w + R - A$	$a_a$ : fracción del área total que está en contacto con el aire	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma + \Psi p''$	$\Psi$ : parámetro de cero a uno $p''$ : presión poro-agua negativa	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	$\beta$ : factor estadístico	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a)$ $h_s + u_a$	$\chi_m$ : parámetro esfuerzo efectivo ( $s_m$ ) $h_m$ : succión matricial $\chi_s$ : parámetro esfuerzo efectivo ( $s_s$ ) $h_s$ : succión soluto	Richards (1966)

Diversos autores como (**Coleman, 1962**); (**Bishop y Blight, 1963**); (**Matyas y Radhakrisna, 1968**) y (**Fredlund y Morgenstren, 1977**) abandonan el concepto de tensión efectiva en suelos parcialmente saturados y utilizan dos variables para determinar completamente el estado de tensiones.

En la Tabla 1.2 se resumen las posibles variaciones de estado de tensiones para un suelo no saturado según (**Fredlund and Rahardjo, 1993**).

**Tabla 1.2** Posibles combinaciones de variables de estados de tensiones según, (**Fredlund and Rahardjo, 1993**).

Presión de referencia	Estado de tensiones variables
Aire ( $u_a$ )	$(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$
Agua ( $u_w$ )	$(\sigma - u_w)$ y $(u_a - u_w)$
Total ( $\sigma$ )	$(\sigma - u_a)$ y $(\sigma - u_w)$

Con esta combinación de variables los efectos de un cambio en la tensión neta total, induciendo cambios sobre las fuerzas de contacto entre agregados, pueden ser separados de los efectos de la succión matricial actuando sobre las interfaces, **(Fredlund and Rahardjo, 1993)**.

El suelo por encima del nivel freático tiene presiones de poro de agua negativas y el suelo debajo de este tiene efectos de presiones positivas de agua intersticial. En la mecánica de suelos saturados se aplican los conceptos al suelo debajo de la superficie freática y de la mecánica de suelos no saturados se aplican los conceptos por encima de la línea freática. La variable de estado de tensiones asociado con el suelo saturado es el esfuerzo de los efectivos,  $(\sigma - u_w)$ , donde  $(\sigma)$  tensiones normales totales, y  $(u_w)$  la presión del agua intersticial. Los efectos del cambio de tensión total y los cambios de presiones de agua deben ser tratados de forma independiente para un suelo parcialmente saturado. Por lo tanto,  $(\sigma - u_a)$  se define como la tensión neta total donde  $(u_a)$  presión de aire, y  $(u_a - u_w)$  se define como la succión matricial del suelo. El estado de tensión que se produce por la presión de agua se utiliza como la delimitación entre la mecánica de suelos saturados y no saturados. **(Fredlund and Rahardjo, 1993)**

El cambio de volumen global de una muestra de suelo debe ser igual a la suma de los cambios parciales de volumen de cada fase, este es el principio de continuidad. Como las partículas sólidas y el agua son fundamentalmente incompresibles los cambios globales de volumen se deben a que el agua entra o sale de la muestra. **(Barrera et al. 2004)**

Para un suelo bajo mismas condiciones de carga, con una estructura suelta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, para el mismo suelo y condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir una expansión al mojarlo, **(Barrera et al. 2004)**

En la mecánica de suelos saturados se desarrollan los conceptos de los suelos debajo del nivel freático y en la mecánica de suelos no saturados los conceptos que se emplean son los de los suelos por encima del este. Los suelos por debajo del nivel freático tienen presiones de agua intersticial positivas y los suelos por encima de este tienen presiones de poros de agua negativas. En este trabajo consideraremos el efecto de la succión matricial y la

tensión neta como los factores para la determinación de las tensiones, utilizando el estado de tensiones que se produce en el suelo por la presión de agua para la delimitación entre la mecánica de suelos saturados y no saturados.

### **1.3.1 Técnicas para medir succión en el laboratorio.**

Para la obtención de las succiones se pueden utilizar distintos métodos y procedimientos que se dividen en directos e indirectos. El intervalo de medida de las succiones está en relación al tipo de equipo utilizado, al contenido de humedad presente, o si son utilizadas muestran inalteradas o remoldadas durante el ensayo. Dichos intervalos puede ser: bajo (de 0 a 100 kPa), de gama media (de 100 kPa a 1 MPa) y alto (de 1 hasta 10 MPa).

Los procedimientos utilizados no son solo para medir la succión de los suelos, sino también pueden controlarla durante un ensayo, por ejemplo corte directo o triaxial de succión controlada, el edómetro, el desecador de vacío, entre otros.

#### **1.3.1.1 Técnicas directas.**

##### **- Tensiómetro**

Se emplea para la succión matricial cuyo intervalo se encuentra entre 0 - 1,50 MPa y mide la presión negativa del agua intersticial en un suelo. Dentro de los tensiómetros se pueden encontrar el Jet Fill que es un modelo mejorado del tensiómetro tradicional que se le incorporó un depósito de agua para eliminar las burbujas de aire que se tengan durante el ensayo, también se encuentra el tensiómetro de HCT que obtiene presiones negativas de agua en un intervalo de 0 – 1500 kPa.

##### **- Técnica de traslación de ejes**

Mediante esta técnica se realiza la medición de la succión matricial, su intervalo se encuentra entre 0 – 1,5 MPa. Consiste en evaluar la succión que se produce en un medio poroso con presión inicial atmosférica y en el que se coloca un tubo capilar por el que el agua asciende, creando un diferencial de presión. La succión en el medio poroso es equivalente a la presión de aire inducida en el tubo capilar para mantener el agua en su posición inicial, considerando a las paredes del capilar suficientemente rígidas e incompresibles, y que la curvatura

Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos  
parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.

de la interfaz de menisco no está significativamente alterada. En tales condiciones ideales es aplicable la relación  $(u_a - u_w) = Sm$  (succión matricial). Existen factores determinantes para su éxito como la saturación adecuada de los discos de cerámica porosa. Los intervalos de medidas de este método para medir o controlar la succión matricial están limitados por dos factores:

1. La máxima presión de aire que puede imponerse al sistema.
2. El valor de la entrada de aire del filtro de cerámica. (Tabla 1.1)

**Tabla 1.1** Discos de alta entrada de aire manufacturados por Soilmoisture Equipment Corporation. (Cortez 2011)

Tipos de discos	Diámetro de poro aproximado (mm)	Valor de entrada de aire (kPa)
1/2 bar alto flujo	0,006	48 - 62
1 bar	0,0021	138 - 207
1 bar alto flujo	0,0025	131 - 193
2 bar	0,0012	241 - 310
3 bar	0,0008	317 - 483
4 bar	0,0005	> 550
15 bar	0,00016	> 1520

- Columna de agua negativa

Es una técnica que mide la succión matricial, cuyo intervalo viene dado entre 0,02 – 0,05 MPa, (Padilla 2010). La succión máxima obtenida con esta técnica es muy limitada, su intervalo de valores es de 20 a 30 kPa, pero se puede tener una precisión de 0,01 kPa. Debido a este beneficio esta técnica se utiliza para investigar la retención de agua de suelos de grano grueso que drenan rápidamente a muy baja succión.

- Desecador de vacío

Es un método directo de control de succión total cuyo intervalo viene dado entre 0 - 150 MPa. Esta técnica fue creada por (Tessier 1984) y posteriormente se siguieron realizando investigación por diferentes autores como (Delage et al. 1998), (Romero 1999), (Delage y Cui 2000), (Villar 2000) y (Tang y Cui 2005).

La presión parcial de vapor resultante en el desecador es directamente una función de la concentración de la solución, que se encuentra en el inferior del recipiente. La humedad se controla mediante disoluciones acuosas, utilizando disoluciones salinas o disoluciones de ácidos. Pequeñas variaciones de la

temperatura ambiente de  $\pm 0,5$  °C a presión de vapor constante, inducen variaciones de humedad relativa del orden de  $\pm 0.03$  (o cambios equivalentes en la succión total de aproximadamente  $\pm 4$  MPa). **(Barrera y Garnica 2002)**

- La Placa de succión

**(Asanza, 2009)** plantea que es la técnica más antigua de las empleadas en la mecánica de suelos. Esta mide la succión matricial y su intervalo viene dado entre 0 - 1,5 MPa. La placa de succión consiste en un disco plano de cerámica porosa saturado, que separa a la muestra de suelo del depósito de agua y del manómetro de mercurio. El suelo que presenta succión, depende de que el agua sea tomada del disco poroso, causando un descenso en la presión de agua en el depósito que se mide con el manómetro.

Para el uso de las técnicas directas es necesario el empleo de equipos muy costosos, que en Cuba no tenemos la posibilidad de adquirirlos.

#### **1.3.1.2 Técnicas indirectas.**

Los métodos indirectos para obtener la succión miden las condiciones de equilibrio de humedad del suelo en lugar de la succión. Los equipos utilizados para esta técnica son los equipos de presión de vapor, psicrómetro termopar, psicrómetro transistor y psicrómetro chilled-mirror. Estos métodos presentan dos dificultades, la primera: la humedad relativa en la fase de aire del suelo cambia sólo una pequeña cantidad dentro del intervalo típico de interés de succión y la segunda: los cambios menores de temperatura pueden dar lugar a grandes errores en la determinación de la succión total.

- Papel de Filtro

Entre todos los métodos conocidos para medir la succión, el del papel de filtro es el único que mide la succión total y matricial, cuyo intervalo viene dado entre 0,05 – 30,0 MPa, **(Fredlund y Rahardjo, 1993); (Padilla, 2010) y (Fattah et al. 2014)**. En este método se determina el potencial del agua en el suelo por medio del potencial del agua retenida en un medio poroso llamado papel de filtro.

Utilizando este método, la muestra de suelo y el papel de filtro son presentados a la humedad en equilibrio ya sea en contacto directo (succión matricial) o en contacto indirecto (succión total) en un ambiente a temperatura constante de

20°C ± 5°C. Los papel de filtro comúnmente utilizados son los de Whatman N ° 42 y Schleicher & Schuell N ° 589-WH.

En este método, un filtro de papel con características de retención conocidas es colocado en un recipiente hermético junto con una muestra de suelo. Al alcanzar las muestras de suelo el equilibrio en la humedad, se tendrá que el potencial de la humedad en el filtro es igual al potencial de la humedad del suelo. El contacto directo entre el papel de filtro y el suelo, permite que el agua en fase líquida y los solutos se puedan intercambiar de manera libre, mientras que la separación entre el filtro de papel y el suelo hay una barrera de vapor de agua, que evita el movimiento del soluto.

- Porosimetría

Las técnicas de intrusión de mercurio (MIP) se emplean para medir el tamaño y distribución de los poros. Es aceptado que la intrusión de mercurio en un medio poroso deshidratado es un proceso similar a la inyección de aire durante el proceso de secado en la curva de retención de agua del suelo. **(Mascarenha et al. 2011)** citado por **(Otálvaro, 2013)**

La porosimetría se basa en la ley capilar, en el caso de un líquido no-mojante como el mercurio puede ser expresada por la ecuación de Washburn para poros cilíndricos, por medio de la ecuación 1.4, permitiendo transformar la succión matricial en presión de intrusión de mercurio. **(Diamond, 1970)** citado por **(Otálvaro, 2013)**

$$p \approx 5.102 (u_a - u_w) \quad \text{(Ecuación 1.4)}$$

En esta investigación se emplea el método del papel de filtro para determinar la succión matricial experimentada por los suelos parcialmente saturados estudiados.

De las técnicas para medir la succión en el laboratorio, las directas tienen elevado nivel de precisión, pero son complejas de realizar y requieren elevada tecnología en comparación con las indirectas, que se realizan de forma más sencilla y podemos obtener buenos resultados, esta investigación se desarrollará con la técnica indirecta del Papel de filtro, se selecciona esta debido a que es el único que mide la succión total y matricial y es posible su aplicación en las condiciones cubanas y además por su realización con relativa facilidad.

### 1.3.2 Efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados.

Un suelo parcialmente saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación. Si el suelo tiene un grado de saturación determinado se requiere de cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el mismo lo que puede explicarse mediante el proceso de succión, que puede ser de dos formas, capilar o absorbente. La succión absorbente depende de la composición mineralógica de la fase sólida y de la composición química de la fase líquida, y la succión capilar está en función de la distribución de los poros así como de su tamaño, **(Bönsch y Lempp, 2007)**.

La succión puede sufrir variaciones por diversas causas, entre ellas están las variaciones climáticas estacionales, la acción aislante de las construcciones, la adición de agua al terreno, el calentamiento del terreno, la presencia de vegetación, la modificación del nivel freático o de las condiciones hidrológicas generales del terreno, la construcción de rellenos o terraplenes con humedad distinta a la de equilibrio, entre otras. **(Jimenez Salas y Justo, 1975), (Monzón, 1976); (Ábalo y Moya, 1982), (Pousada, 1984)**.

La succión en un suelo parcialmente saturado se compone de dos sumandos **(ecuación 1.5)** y sus magnitudes varían desde 0 kPa a 1 GPa, cuando el efecto provocado por esta es referido a la energía de adsorción provocando un aumento de la resistencia por el efecto cohesivo, **(Barrera y Garnica, 2002), (Chae et al. 2010) y (Alanis, 2012)**. Por otra parte **(Standing, 2011)** refiere que la succión es la presión isotrópica que impone el agua que está ocupando los poros del suelo al absorber más agua.

$$S = S_m + S_o \quad \text{(Ecuación 1.5)}$$

$S_m$ : Succión matricial, es la presión negativa de agua intersticial, su valor depende de la tensión superficial y el radio de curvatura del menisco. Está directamente relacionada con el estado de esfuerzo derivado de los fenómenos de superficie y gravitatorios (es decir,  $(u_a - u_w)$ , donde:  $u_a$  es la presión de poros de aire y  $u_w$  es la presión del agua intersticial).

$S_o$ : Succión osmótica, es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter una masa de agua con la misma composición que la intersticial, para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable. Está relacionada

con la presión osmótica derivada de la composición del agua. **(Sreedeeep y Singh, 2006)**

**S:** Succión total, es la suma de la succión matricial y la succión osmótica del suelo.

Para un mismo índice de poros cuanto mayor o menor sea la humedad o el grado de saturación, menor o mayor será la succión, pues esta tiene directa relación con lo que se podría denominar mayor o menor tendencia del suelo a absorber agua.

Autores como, **(Fredlund, 1979)**, **(Edil y Motan, 1984)**, **(Alonso et al. 1987)** y **(Barrera y Garnica, 2002)** consideran a la succión matricial suficiente para describir el comportamiento del suelo, sin embargo, otros como **(Jimenez Salas et al. 1973)**, **(Reginatto y Ferrero, 1973)**, **(Morgenstern y Balasubramanian, 1980)**, **(Pile 1984)** y **(Richards, Peter, y Martin, 1984)** plantean que al variar la succión osmótica se observan variaciones de volumen. La dificultad de en diferenciar el efecto de esta se corresponde a los cambios de humedad inducidos por gradientes de concentración de solutos. La succión total que se experimente en los suelos parcialmente saturados es igual a la succión matricial, **(Fredlund, 1979)**, **(Edil y Motan, 1984)**, **(Alonso et al. 1987)** y **(Barrera y Garnica, 2002)**.

Hasta el momento, la succión en los suelos de Cuba ha sido un tema poco estudiado, por lo que es necesario profundizar en el mismo debido a su influencia de manera directa en los cambios tenso-deformacionales que experimentan los suelos parcialmente saturados, siendo pues, un valor que es necesario conocer en detalle; especialmente si la estabilidad de un talud, estructura de tierras o cimentación depende de la ella para funcionar adecuadamente y ser duradera.

#### **1.3.2.1 Curva característica**

Se denomina curva característica de un suelo a la relación entre la succión impuesta y la humedad de equilibrio. Dicha relación puede llamarse también: relación succión-humedad, curva de retención, y según **(Fredlund, 2001)**, se puede denominar a la misma como:

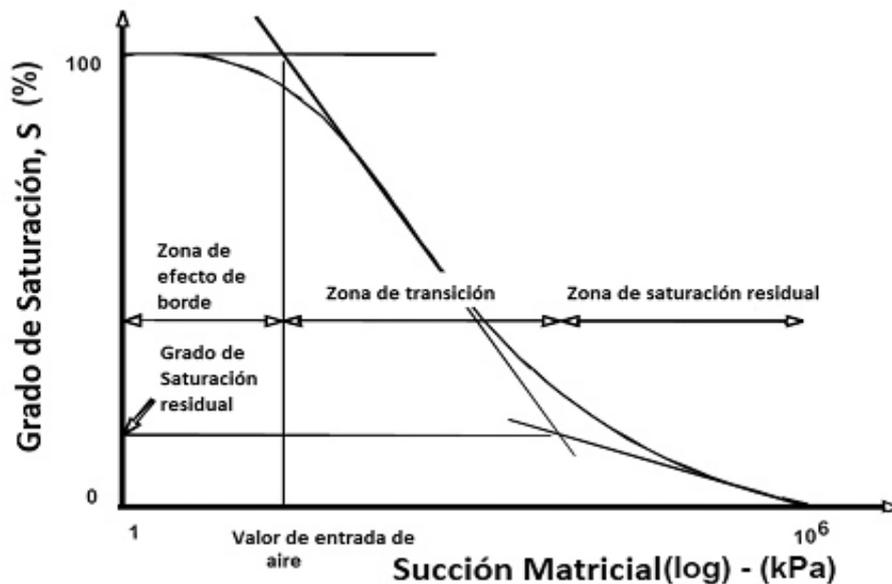
- Curva característica suelo – agua.
- Relación entre el contenido de succión – agua.

- Curvas de retención de humedad.

El contenido de agua de remoldeo inicial y la historia tensional tienen más influencia en la estructura del suelo, **(Vanapalli et al. 1999)**. La representación matemática que constituye la curva es usualmente de tipo hiperbólica, **(Van Genuchten, 1980)** y **(Fredlund & XING, 1994)** citado por **(Otálvaro, 2013)**.

Dentro de las formulaciones para estimar la curva de retención de agua o curva característica de retención de agua de los suelos se encuentran los métodos de Fredlund y Xing (1994), Método de Brooks y Corey (1964), Método de Van Genuchten (1980), Método de Williams (1983), Método de Gallipoli (2003), **(Trista, 2015)**.

Según **(Fredlund & XING, 1994)** se puede definir a la curva de retención como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo. Los valores corresponden al tipo de suelo, con una determinada densidad, y la naturaleza de esa relación está directamente asociada a la granulometría y mineralogía del suelo. De una forma general, la geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción fina son determinantes en la posición relativa, forma e inclinación de la curva. Por lo tanto la Curva Característica de Succión en el suelo (SWCC) no es única para un suelo, su forma y posición varía para trayectorias de humedecimiento y para trayectorias de secado del suelo.

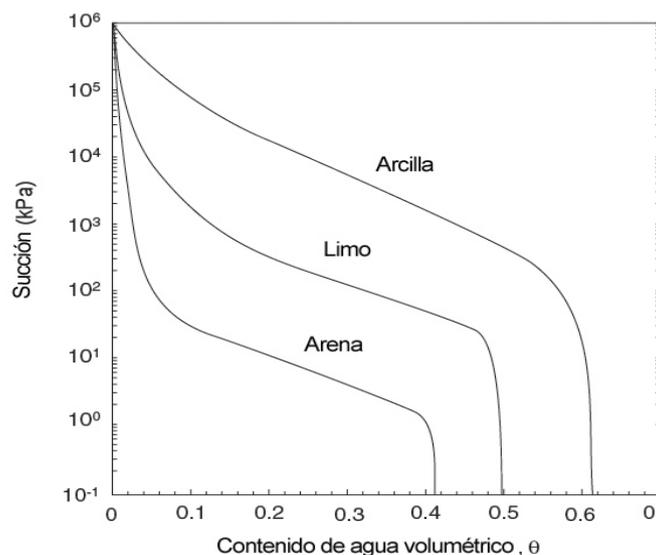


**Figura 1.3** Curva Característica de Succión en el suelo (SWCC),

En la Curva Característica de Succión en el suelo, en términos del grado de saturación, existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 1.3, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, existiendo dos puntos característicos limitando cada etapa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual, **(Meza Ochoa, 2012)**.

En la zona de efecto de borde, la gráfica es inicialmente horizontal, es decir, el suelo permanece saturado. El valor de entrada de aire, es la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la pérdida de saturación. En este punto se inicia la zona de transición, en la cual existe una interface aire-agua, donde el agua se encuentra de manera continua. Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona pérdida de saturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire, **(Meza Ochoa, 2012)**.

En la Figura 1.4 se muestran curvas características representativas de arenas, limos y arcillas donde se observa que la forma de la curva está asociada al tipo de suelo, que indica de forma indirecta la influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros.



**Figura 1.4** Curvas Características de Succión (SWCC) representativas para arenas, limos y arcillas. **(Ning and Li Kos, 2004)**

Debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la de saturación del suelo, el valor de entrada de aire de los suelos friccionales es menor que para los suelos cohesivos, ya que está influenciado por la distribución de los tamaños de poros, de los tamaños de las partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo, **(Ning and Li Kos, 2004)**

**(Cronney & Coleman, 1961)**, plantean que para el caso de una arcilla la curva de retención depende de la granulometría y la naturaleza de las partículas, de su densidad (índice de poros) y de su compresibilidad (posibles variaciones del índice de poros durante el ensayo). En suelos compresibles es posible la variación de succión sin variación de humedad, **(Barrera y Garnica, 2002)**.

El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la de saturación del suelo, **(Barrera y Garnica, 2002)**.

Existen modelos de ajuste de la curva característica o ecuaciones estrictamente matemáticas que tienen como objetivo capturar las particularidades de la curva de retención de agua de los suelos (Figura 1.4), incluyendo su forma. La representación matemática que constituye la curva de retención de agua es usualmente de tipo hiperbólica a continuación se explican los modelos de ajuste que se emplearan en la investigación:

#### **Método de Van Genuchten (1980)**

El modelo de Van Genuchten supone que las curvas de retención principales en secado y humedecimiento pueden ser descritos con precisión por la expresión **(Van Genuchten, 1980)**, **(Chae et al. 2010)** y **(Krishnapillai y Ravichandran, 2011)**

$$S_r = (|1 + |\alpha S|^\eta)^{-m}, \quad S < 0 \text{ y } S_r = 1, \quad S \geq 0 \quad \text{(Ecuación 1.6)}$$

Donde,  $S_r$  es el grado de saturación,  $S$  es la succión total de la muestra,  $\alpha$  y  $\eta$  representan los parámetros de ajuste del método y  $m=1-1/\eta$ . (La ecuación de **(Van Genuchten, 1980)** se puede plantear empleando el contenido normalizado de agua, es decir,  $\Theta = (\omega - \omega_r)/(\omega_s - \omega_r)$ , donde  $\omega_s$  es contenido de agua en la zona de saturación y  $\omega_r$  es contenido de agua residual).

### **Método de Fredlund y Xing (1994)**

Una ecuación de ajuste fue propuesta por **(Fredlund y Xing, 1994)** para la obtención de las curvas de retención principales de secado y humedecimiento descritos por la expresión:

$$\Theta = C(S) \frac{\theta_s}{[\ln[e+(S/a)^\eta]]^m} \quad \text{(Ecuación 1.7)}$$

Donde el parámetro  $\Theta$  representa el contenido normalizado de agua, ( $\Theta = (\omega - \omega_r)/(\omega_s - \omega_r)$ ), donde  $\omega_s$  es contenido de agua en la zona de saturación y  $\omega_r$  es contenido de agua residual),  $S$  es la succión total experimentada por el suelo,  $a, m, \eta$  son parámetros de ajuste del modelo y  $e$  es el número natural Euler; 2,71828. El valor del parámetro ( $S$ ) se puede obtener por medio de la ecuación siguiente, siendo  $S_r$  la succión correspondiente al contenido de agua residual.

$$C(S) = \frac{\ln(1+S/S_{re})}{\ln[1+(1000000/S_{re})]} \quad \text{(Ecuación 1.8)}$$

### **Método de Gallipoli (2003)**

El modelo de ajuste de **(Gallipoli et al. 2003)** de la curva de retención de agua del suelo propone una modificación a la expresión planteada por **(Van Genuchten, 1980)**, en la cual el grado de saturación no depende solo de la succión sino también del volumen unitario del suelo.

$$S_r = \{1 + [\phi(v - 1)^\psi * s]^n\}^{-m} \quad \text{(Ecuación 1.9)}$$

Donde,  $S$  es la succión total experimentada por el suelo,  $\phi$ , y  $m$  son parámetros de ajuste del modelo y  $v$  es el volumen específico del suelo que es igual a  $v=1+e$ , siendo  $e$  la relación de vacío.

Con la obtención de la curva característica de un suelo estamos determinando la relación entre la succión impuesta y la humedad, presentando la misma dos ramas una en humedecimiento y otra en secado, por lo que esta no es única para un suelo, su forma y posición varía para cada una de las ramas mencionadas, en este trabajo llegaremos a la obtención de la misma en suelos finos ya sean limos o arcillas.

La estimación de los asentamientos de cimentaciones superficiales mediante la Mecánica de Suelos convencionales para suelos no saturados puede subestimar los valores de los mismos a pesar que en estudios se demuestra

que el diseño queda decidido por asentamientos. Tomado de (Trista, 2015) citado por (Fathi M.O. Mohamed, 2007)

Vanapalli lleva a cabo un modelo de equilibrio realizando pruebas en un suelo parcialmente saturado cohesivo puro para cinco valores diferentes de succión matricial, (Venapalli & Mohamed, 2007). Para el caso de los suelos cohesivos las propiedades físico mecánicas del suelo quedan determinadas por la siguiente formulación:

$$C_u(unsat) = \frac{q_u(unsat)}{2} \quad \text{(Ecuación 1.10)}$$

$$C_u(unsat) = C_u(sat) \left[ 1 + \frac{u_a - u_w}{P_a/100} \frac{(S_r)^v}{\mu} \right] \quad \text{(Ecuación 1.11)}$$

Donde  $C_u(sat)$  y  $C_u(unsat)$  es resistencia a compresión bajo condición saturada y no saturada respectivamente,  $P_a$  es la presión atmosférica siendo igual a 101,3 kPa,  $S_r$  es el grado de saturación y  $v, \mu$

Son parámetros de ajustes.

$$v = 2$$

$$\mu = 9 \quad \text{Para } 8,0 \leq I_p (\%) \leq 15,5$$

$$\mu = 2.10880 e^{0.0903(I_p)} \quad \text{Para } 15,5 < I_p (\%) < 60,0 \quad \text{(Ecuación 1.12)}$$

Para suelos  $c - \phi$  y  $\phi$  se realiza un ajuste de la ecuación para suelos parcialmente saturados queda de la siguiente forma.

$$\Psi = 1.0 + 0.34(I_p) - 0.0031(I_p^2) \quad \text{(Ecuación 1.13)}$$

$$\phi_{unsat} = \phi_{sat} + \Psi_d \quad \text{(Ecuación 1.14)}$$

El ajuste del  $\Psi$  se realiza por medio de la ecuación 1.21, dicho ajuste fue plateado por (Venapalli & Mohamed, 2007). Tomado de (Trista, 2015).

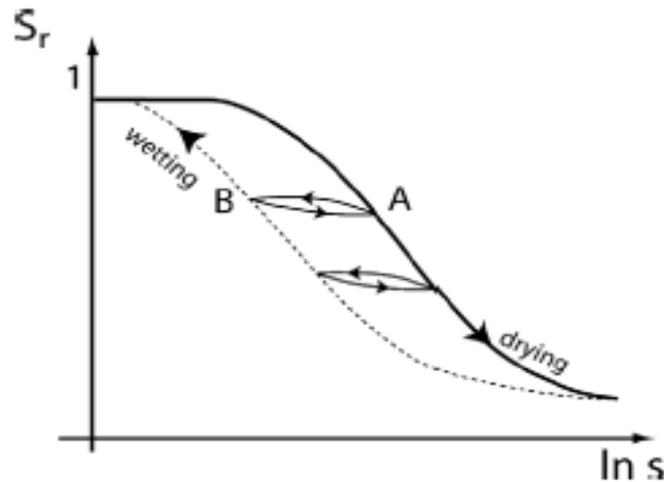
### 1.3.1.3 Histéresis de la curva característica suelo-agua.

La histéresis asociada con el secado y humedecimiento de un suelo demuestra que no existe una única Curva Característica de Retención de Suelo-Agua (Haines, 1930), (Hillel, 1998), (Fredlund, 2000). La relación que existe entre el potencial matricial y la humedad del suelo puede obtenerse de dos formas (Hillel, 1998):

- Secado: Iniciando con una muestra de suelo saturada, aplicar un incremento de succión de manera gradual, esperando a que se seque poco a poco el suelo mientras se están tomando mediciones sucesivas de la humedad contra la succión.

- Humedecimiento: Comenzando a humedecer una muestra de suelo seco, mientras disminuye la succión.

Siguiendo trayectorias de secado y de humedecimiento en un mismo suelo, las curvas obtenidas por lo general no son idénticas. La humedad de equilibrio para un determinado valor de succión es mayor en trayectorias de secado. Esta dependencia del contenido de humedad y del estado suelo – agua sobre una dirección de proceso que conduce a ella se denomina histéresis (**Haines, 1930**).



**Figura 1.5** Representación de la histéresis en la curva característica de los suelos.

El efecto de histéresis se puede atribuir a varias causas (**Hillel, 1998**):

- La falta de uniformidad geométrica de los poros individuales.
- El efecto de ángulo de contacto.
- La encapsulación de los poros de aire "sin salida", lo que reduce el contenido de humedad de un suelo recién humedecido.
- El cambio de volumen del suelo debido al historial, ya sea, expansión, o retracción.

En la forma, inclinación y posición relativa de la curva característica influyen la granulometría y mineralogía del suelo. La histéresis asociada con el secado y humedecimiento de un suelo demuestra que no existe una única curva característica de succión en el suelo, su forma y posición varía para estas

trayectorias. La relativa facilidad de obtención de esta curva con buenas estimaciones de parámetros fundamentales de los suelos no saturados, que son más difíciles de obtener en el laboratorio, evidencia la importancia de la misma.

### 1.3.3 Teorías sobre el comportamiento tenso-deformacional.

(Alonso y Lloret, 1985), plantean una formulación para determinar relación de vacíos para intervalos de esfuerzos totales, teniendo las siguientes particularidades: que dependen del tipo de suelo, ( $\sigma$ ) las tensiones normales totales, ( $u_w$ ) la presión del agua, ( $u_a$ ) la presión de aire y ( $u_a - u_w$ ) la succión matricial del suelo.

Si el grado de correlación entre los resultados es muy alto, se puede deber a que el intervalo de succión empleada en el ensayo de laboratorio no haya sido muy elevado.

Se puede emplear la ecuación 1.6 para estudiar la deformación volumétrica inducida por cambios en la saturación del suelo, a partir del estado inicial ( $e_0$ ) y otro final saturado ( $e$ ), (Alonso y Lloret, 1985)

$$e_v = \frac{(e_0 - e)}{(1 + e_0)} \quad \text{(Ecuación 1.15)}$$

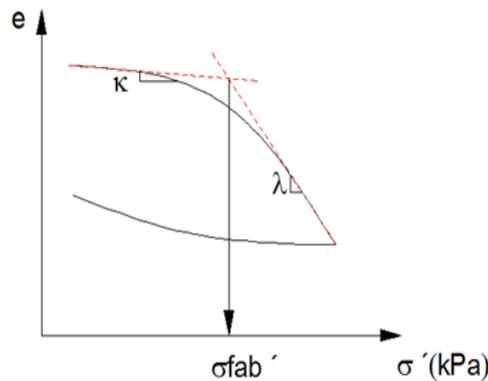
Otro Método para calcular los cambios volumétricos experimentados por un suelo parcialmente saturado, definido por cambios en la relación de vacíos en respuesta a variaciones en el estado tensional es planteado por (Fredlund, 2002); (Alanis, 2012) y (Rojas, 2013) formulan un nuevo modelo que parte de las siguientes consideraciones:

1) El modelo de proporcionalidad natural se utilizara no en términos de volumen específico si no en términos de la relación de vacíos  $e = \frac{V_v}{V_s}$ , ya que la relación de vacíos está en función del volumen de vacíos y el volumen de sólidos no cambiará ya que ese espacio no puede desaparecer o variar, será siempre el mismo.

2) Para tomar en cuenta el comportamiento elástico y plástico del material parcialmente saturado, se tomaran en cuenta los factores  $\kappa$  y  $\lambda$ , los cuales serán tomados de la curva de compresibilidad del material saturado en su tramo virgen de carga y de descarga respectivamente.

Si el material vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa se dice que el material ha sufrido una deformación elástica y si el material es deformado hasta el punto que no pueden recuperar su posición original, se dice que ha experimentado una deformación plástica.

Para el cálculo del coeficiente  $\kappa$  y  $\lambda$  correspondiente a su comportamiento elástico y plástico se utiliza la curva de compresibilidad del suelo saturado (Figura 1.6) empleándose las siguientes ecuaciones:



$$k = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \quad \text{(Ecuación 1.161)}$$

$$\lambda = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \quad \text{(Ecuación 1.17)}$$

**Figura 1.1.** Curva de compresibilidad del suelo saturado, donde se obtienen los coeficientes  $k$ ,  $\lambda$  y  $\sigma'_{fab}$ . (Alanis 2012).

3) Cuando la muestra es compactada se tomará un esfuerzo de prefabricación  $\sigma_{fab}$  el cual se añadirá para calcular los esfuerzos efectivos. Este esfuerzo de prefabricación se obtiene de la curva de compresibilidad saturada trazando dos líneas rectas en los cambios de pendiente en la zona virgen como

se puede apreciar en la figura 1.6. El esfuerzo de fabricación sería el esfuerzo de preconsolidación para el caso de muestras inalteradas, cuando las muestras son remodeladas o compactadas no se considera el esfuerzo de preconsolidación pero hay que considerar el esfuerzo que se le introduce a las muestras en el proceso de remodelado de las misma, ambos esfuerzos se obtiene de la mismo forma pero uno de la curva de compresibilidad de la muestra remodelada y el otro en la curva de compresibilidad para las muestras inalteradas.

El esfuerzo de prefabricación es aquel esfuerzo que se genera a la hora de remodelar o prefabricar una muestra tratando de simular sus propiedades naturales por medio de compresión o de aplicación de energías dinámicas o estáticas, en donde al comprimir el suelo su parte solida sufre un reacomodo entre sus sólidos y llega un momento en que puede ser que sus partículas sólidas se empotren unas con otras si son partículas semi-blandas o que puedan romper su estructura superficialmente ocasionando un esfuerzo adicional entre ellas, así que se debe de tomar en cuenta este nuevo fenómeno a la hora de remodelar o reconstruir cualquier tipo de muestra. **(Alanis, 2012) y (Rojas, 2013)**

La ecuación para determinar la relación de vacíos son las siguientes, **(Alanis, 2012) y (Rojas, 2013)**

Comportamiento elástico

$$e = e_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0} \right)^{-k} \quad \text{(Ecuación 1.18)}$$

Comportamiento elastoplástico

$$e = e_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0} \right)^{-\lambda} \quad \text{(Ecuación 1.19)}$$

La formulación considera que:

$$\sigma' = \sigma - \chi (u_a - u_w) \quad \text{(Ecuación 1.20)}$$

Donde:

$(\sigma')$ : son las tensiones efectivas

$(\sigma)$  : son las tensiones normales totales

$(u_w)$ : Es la presión del agua,

$(u_a)$ : Es la presión de aire,

$(u_a - u_w)$ : Se define como la succión matricial del suelo

$\chi$ : Parámetro que va a tener el mismo valor que el grado de saturación presente en las muestras.

Hay que considerar el esfuerzo de fabricación antes mencionado en el valor final.

La formulación del comportamiento volumétrico de los suelos parcialmente saturado, donde se obtiene el módulo de deformación del suelo bajo condiciones de saturación parcial es planteado por **(Vanapalli y Taek, 2010)**.

De los modelos de cambio volumétricos emplearemos el modelo de **(Rojas y Alanís, 2012)** para la descripción del comportamiento elástico y plástico de los suelos investigados y para la obtención del asentamiento en la condición de saturación parcial.

#### **1.4 Métodos generales para el cálculo de asentamientos de los suelos parcialmente saturados.**

Para el cálculo de asentamientos en los suelos existen varios métodos los cuales se dividen en métodos generales y específicos, **(Pérez, 2014)**. Los que más se aproximan a las condiciones existentes en nuestro país son los métodos generales. **(Trista, 2015)**.

##### **Métodos generales:**

##### **- Método edométrico de Terzaghi**

Para suelos con comportamiento tenso-deformacional lineal, el asentamiento se calcula de la siguiente forma:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i \cdot H_i}{1 + e_{o_i}} \quad \text{(Ecuación 1.21)}$$

Siendo  $\Delta e = e_o - e_f$

Donde:

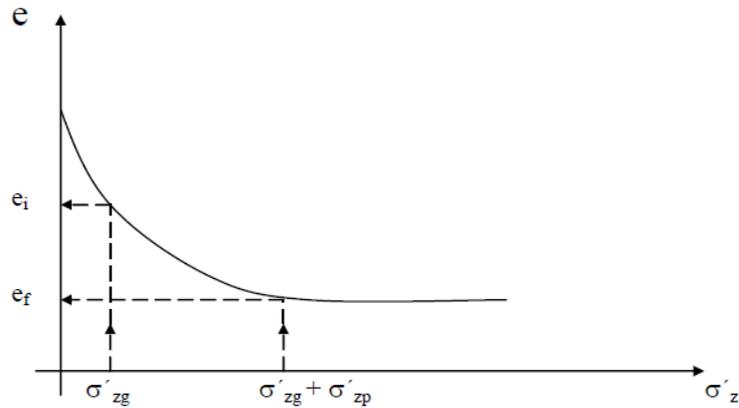
$H_i$  = espesor de los estratos

$e_o$  = índice de poros inicial del suelo (punto medio de 1 subestrato) correspondiente a la presión.

$e_f$  = índice de poro final que se halla por el incremento de presión por carga impuesta.

El suelo se divide en subestratos de 0.4B o 1m para el cálculo de los asentamientos y así alcanzar resultados más reales del suelo. Se calcula la

tensión por carga impuesta, por estrato en cualquier punto y después se calculan las tensiones por peso propio para "eo" y para "ef" por el incremento de presión por carga impuesta  $\sigma_{zg}' + \sigma_{zp}'$ , esto se realiza a través de la curva en la Figura 1.7.



**Figura 1.7** Curva para el cálculo del asentamiento en el método edométrico de Terzaghi

#### - Método de SKEMTON-BJERRUM

Este método constituyó el primer paso de avance en el cálculo de los asientos, desde que Terzaghi en 1923 propuso el ensayo edométrico y postuló la teoría de la consolidación ya que no solo elimina algunas de las inexactitudes del ensayo edométrico, sino que tiene en cuenta el llamado asiento de deformación, factor poco atendido en el método tradicional de Terzaghi.

De acuerdo a la teoría de la elasticidad los asientos están dados por la siguiente expresión clásica:

$$S = \Delta Y 1. b. \frac{1-\nu^2}{E} . ic \quad \text{(Ecuación 1.22)}$$

Donde:

$\Delta Y 1$ = presión neta de contacto

b= ancho de área cargada

$\nu$ = módulo de Poisson

E= módulo de Young

ic= factor de influencia que depende del área cargada y de la profundidad del estrato de arcilla

Como no se tiene en cuenta que habrá cambios de volumen mientras no comience la disipación de la presión de poros, se supone  $\nu=0.5$  y la expresión

(1) se reduce a:

$$S = \Delta Y 1. b. \frac{3}{4E} \cdot ic \quad \text{(Ecuación 1.23)}$$

Donde E se halla de la curva tensión-deformación obtenida del ensayo triaxial no drenado.

**- Método de la Capa Equivalente de Tsitovich**

Este método se fundamenta en la teoría del medio linealmente deformable. Al utilizarlo, el cálculo de los desplazamientos verticales de la cimentación en condiciones de un problema plano o volumétrico, se reduce a la deformación del asiento para el caso de un problema unidimensional.

Se puede determinar la potencia equivalente partiendo de la condición de que el valor del asiento calculado para un problema plano o volumétrico ( $S_p$ ) es igual al valor del asiento provocado por la compresión unidimensional ( $S_u$ ).

$$S_u = \epsilon_z \cdot h_e \quad \text{(Ecuación 1.24)}$$

Siendo  $\epsilon_z$  compresión relativa

$$\epsilon_z = \frac{p}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) \quad \text{(Ecuación 1.25)}$$

Ecuación de Schleicher-Polshin para el asiento en el caso de compresión de dos o tres dimensiones es:

$$S_p = \frac{w_p \cdot b(1-\nu^2)}{E} \quad \text{(Ecuación 1.26)}$$

Luego de realizar una serie de simplificaciones algebraicas la expresión para calcular la potencia de la capa equivalente es:

$$h_e = A \cdot w \cdot b \quad \text{(Ecuación 1.27)}$$

Finalmente siendo w un coeficiente de influencia e incorporando A= coeficiente constante de la potencia de la capa equivalente, se obtiene la expresión para el cálculo del asiento en dicha capa como se muestra a continuación:

$$S = m_v \cdot p \cdot h_e \quad \text{(Ecuación 1.28)}$$

Donde  $m_v$ = coeficiente de compresibilidad volumétrica

Conociendo que  $H_a=2h_e$  y que la tensión media del centro de cada capa está definida por la siguiente expresión:

$$p_i = \frac{p \cdot z_i}{2h_e} \quad \text{(Ecuación 1.29)}$$

Donde:

$p$ = presión de la solera de la cimentación

$z_i$ = distancia desde el punto correspondiente a la zona activa hasta el centro de la capa sometida a examen.

Se puede obtener el valor del asentamiento total del cimiento efectuando la suma de cada uno de ellos.

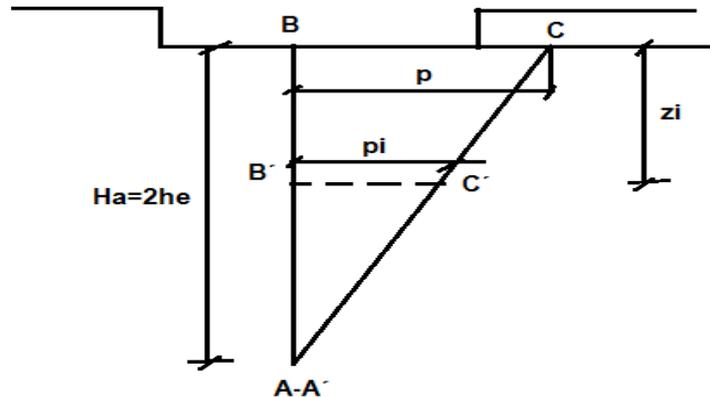


Figura 1.8 Representación del método de la Capa Equivalente

- **Método de la sumatoria de capas para el cálculo de asentamientos absolutos (2004)**

Para la determinación del asentamiento absoluto en los puntos característicos de la base de un cimiento se puede emplear el método de sumatoria de capas utilizando la siguiente expresión:

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{6} (\epsilon_{is} + \epsilon_{ic} + \epsilon_{ii}) \quad \text{(Ecuación 1.30)}$$

Dónde:

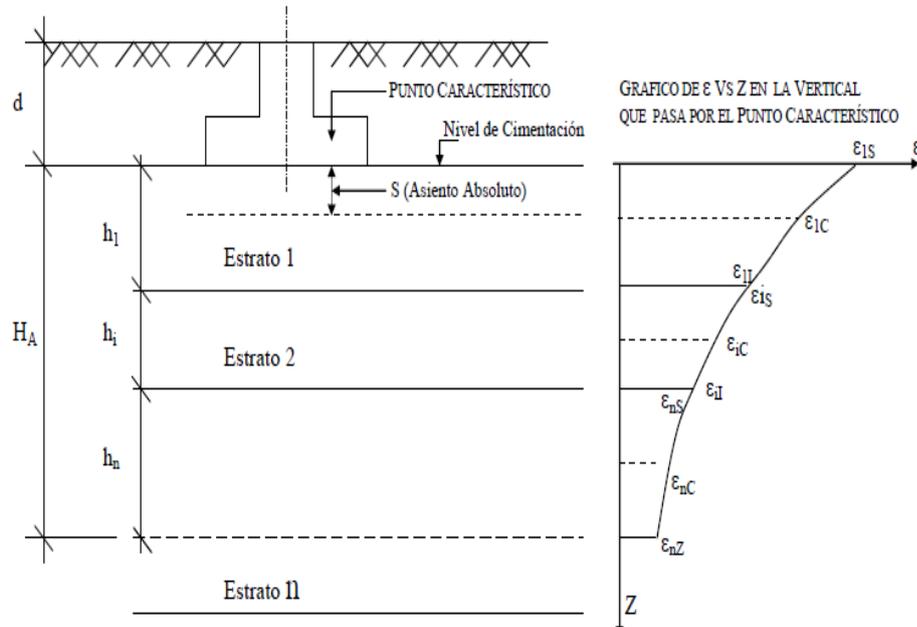
$n$ = cantidad de estratos por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la potencia activa.

$H_i$ = espesor del estrato (i) existente por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la potencia activa.

$\epsilon_{is}$ = variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior (i) y calculado en una vertical que pase por el punto característico del cimiento donde se calculará el asiento absoluto.

$\epsilon_{ic}$ = ídem para el punto centro del estrato (i)

$\epsilon_{ii}$ = ídem para la frontera inferior (i)



**Figura 1.9** Método de la sumatoria de capas para el cálculo de asentamientos absolutos.

Para la obtención del asentamiento en los suelos parcialmente saturados empleados en la investigación, de los métodos generales mencionados anteriormente para el cálculo del mismo, se empleará el método de la Sumatoria de Capas para el cálculo de asentamientos absolutos o método de la Norma Cubana, en el cual se trabaja con la variación del índice de poros y se realiza el cálculo de las tensiones en la masa de suelo por estratos.

### 1.5 Conclusiones parciales

1. La Mecánica de Suelos Tradicional se basa en el estudio de los suelos en estado saturado o seco, donde solo intervienen dos fases, dejando a un lado el estudio de los suelos no saturados, con la presencia de tres fases y en los cuales el análisis de sus propiedades y comportamiento como material estructural resultan más complejos. Hoy en día el estudio de estos se está desarrollando debido a que en gran parte del planeta los primeros metros del subsuelo se encuentran parcialmente saturados y las cimentaciones se realizan sobre estos.

2. En el estudio de suelos parcialmente saturados aparece el concepto de “succión”, asociado a las fuerzas capilares existentes en el suelo, que afectan considerablemente su comportamiento y cuya solución es compleja, con la misma podemos llegar a describir el estado tensional de un suelo parcialmente saturado.

Capítulo I: Estado actual del conocimiento de los suelos parcialmente saturados y su comportamiento tenso-deformacional.

3. Existen varias técnicas tanto directas como indirectas para la obtención de los parámetros deformacionales de los suelos parcialmente saturados, se recomienda la utilización del método de Rojas y Alanís que emplea dentro de su formulación la curva característica de retención de agua y la curva de compresibilidad del suelo en condiciones saturadas, para obtener la curva de compresibilidad para un suelo parcialmente saturado ( $e$  vs  $\sigma$ ) y por lo sencillo que resulta la obtención de los mismos bajo las condiciones cubanas .

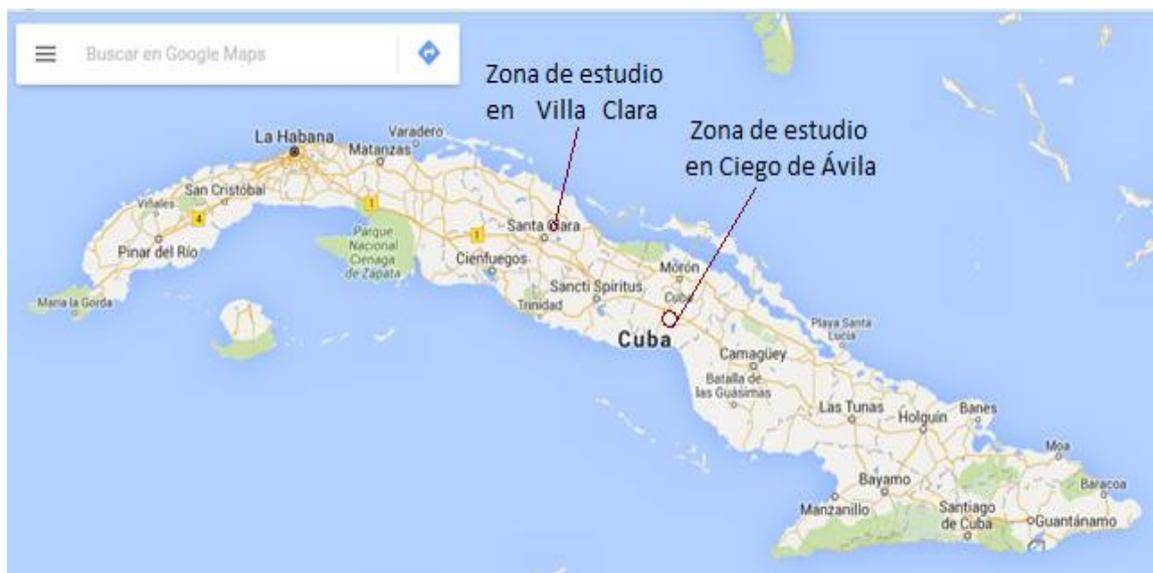
4. En el cálculo de las deformaciones en los suelos parcialmente saturados la determinación de la curva característica de los suelos es fundamental debido a que evidencia la relación existente entre la succión y el grado de saturación, parámetros que resultan de fácil obtención, bajo las condiciones de los suelos cubanos, en los laboratorios

Capítulo II: toma de muestras y ensayos de laboratorio realizados.

## **Capítulo II: Toma de muestras y ensayos de laboratorio realizados.**

En el presente capítulo se realiza la caracterización de dos suelos parcialmente saturados, pertenecientes a la laguna de Oxidación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Santa Clara, Villa Clara y al poblado Venezuela, Ciego de Ávila. Dentro de los ensayos a realizar se encuentran la granulometría, límites de consistencia, peso específico, compactación y Proctor Estándar; a partir de las características de compactación son definidas las condiciones de las muestras de suelo a ensayar. Se obtiene la curva de retención de agua de suelo ( $S_r$  vs  $S$ ), se realiza el ensayo de consolidación clásico, y se obtienen los parámetros de los suelos en condiciones saturadas empleando el ensayo de corte directo. Adicionalmente, se describe el ensayo de succión con papel de filtro utilizado en el estudio experimental.

### **2.1 Muestreo**



**Figura 2.1.** Localización geográfica de las zonas de estudio en Google Maps.

En la presente investigación se emplearon muestras de dos suelos parcialmente saturados, uno correspondiente a la laguna de Oxidación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en una zona cercana a la UCLV, específicamente al norte de esta, geográficamente situado en las coordenadas 613 200 E – 291 850 N de la hoja carta # 4283-III, (Santa Clara, Villa Clara), escala 1:10 000 ICGC. 1980, la zona es llana hidrogeológicamente presenta horizontes acuíferos de rocas ígneas ultrabásicas y geológicamente formada por serpentinitas crisotílicas y peridotitas. El otro suelo pertenece a un tramo

del Canal Magistral (CM) Zaza -Ciego de Ávila que se encuentra aproximadamente a 2,7 km del asentamiento rural La Ofelia en el poblado Venezuela, situado entre las coordenadas geográficas según el sistema de proyección Cuba Norte: E: 721000; N: 213000 y E: 724000; N: 215000, hoja cartográfica 4481-III-d (Venezuela) a escala 1:25 000 en la provincia Ciego de Ávila, geológicamente, y de gran importancia, tiene amplias manifestaciones de carso y otro fenómeno que es la meteorización de la roca fresca.

Para estos trabajos en el caso del primer suelo se tomaron 12 sacos de 10 kg de masa del material acopiado en diferentes puntos de la zona de la cantera, indicándose y realizándose 11 ensayos de laboratorio, descripción tacto visual de los materiales, clasificación SUCS y HRB así como recomendación de parámetros del préstamo para el Proyecto de Investigación y en el caso del segundo suelo se realizaron 15 calas para un total 100.50 m lineales, 7 calas dentro del área del embalse regulador, 2 en el canal magistral y 6 en la zona de préstamo, la perforación de las calas fue ejecutada con una máquina UGB 1BC, de fabricación soviética, con avance rotativo a columna y recuperación de testigos, empleando agua como líquido de enfriamiento. La perforación nos permitió la descripción de los materiales y su muestreo, alterado y semi-inalterado a través de la toma de 15 bolsas, 14 pomos y 4 testigos de roca, base sobre la cual se realizaron los ensayos para describir el comportamiento físico mecánico y de compactación de suelo, también se le realizaron pruebas hidrogeológicas en calas a través del método de vertimientos exprés con un total de 6, con el cual se pudo determinar el coeficiente de filtración de las diferentes capas.

## **2.2 Caracterización y clasificación de los suelos utilizados en la investigación.**

Para obtener las características del suelo se realizaron los ensayos correspondientes a granulometría, plasticidad, peso específico, compactación, succión por el método del papel de filtro y consolidación saturada cuyos resultados se mostrarán a continuación.

El trabajo de laboratorio involucró la utilización de equipos existentes en los laboratorios de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), de la

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (IPH) así como de la UCLV.

### 2.2.1 Granulometría.

Para la realización de estos ensayos se siguieron las orientaciones de la norma **(NC-20. 1999)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos”. Los resultados de la granulometría de las muestras de suelo empleados en la investigación aparecen en la figura 2.2, donde se presentan las curvas granulométricas correspondientes a cada uno. (Anexo 2.1)

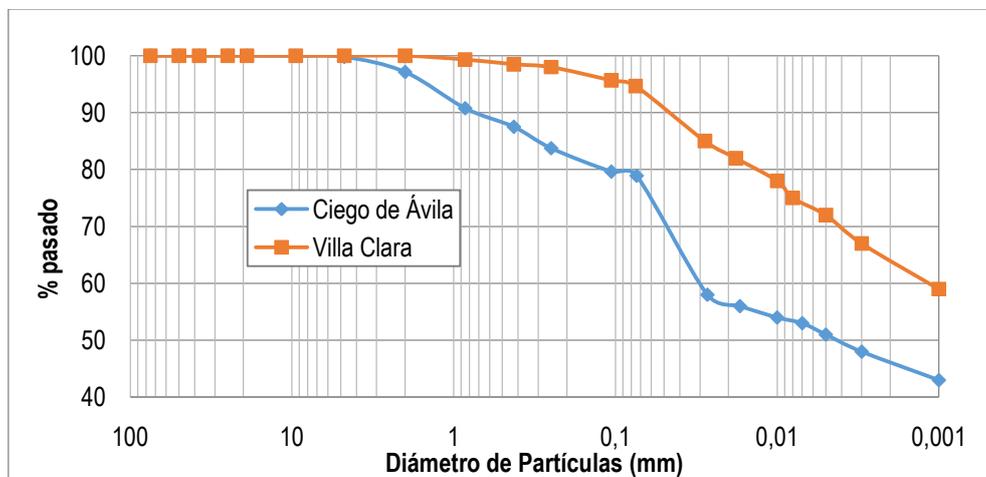


Figura 2.1. Curvas granulométricas promedio de las muestras de los suelos estudiados.

### 2.2.2 Límites de consistencia y Peso específico

Para la determinación de la plasticidad de los suelos objeto de estudio, se tuvo en cuenta la norma cubana **(NC-58. 2000)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos”. Los resultados de los límites de consistencia de las muestras de suelo se presentan en la tabla 2.1. (Anexo 2.2)

La determinación del peso específico se realiza teniendo en cuenta la norma **(NC-19. 1999)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación del peso específico de los suelos”. Los valores obtenidos, se muestran en la tabla 2.1. (Anexo 2.3)

**Tabla 2.1.** Límites de consistencia y Peso específico de las muestras de suelo estudiadas

Parámetros	Villa Clara	Ciego de Ávila
Límite Líquido	93	51.8
Límite Plástico	29	25.3
Índice de Plasticidad	64	26.4
Peso específico relativo (Gs)	2,60	2,82

A partir de los resultados obtenidos en la granulometría y límites de consistencia de los suelos estudiados, se clasifican estos siguiendo las orientaciones de la norma **(NC-59. 2000)** correspondiente a “Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos”, la misma se puede apreciar en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Clasificación de los suelos estudiados.

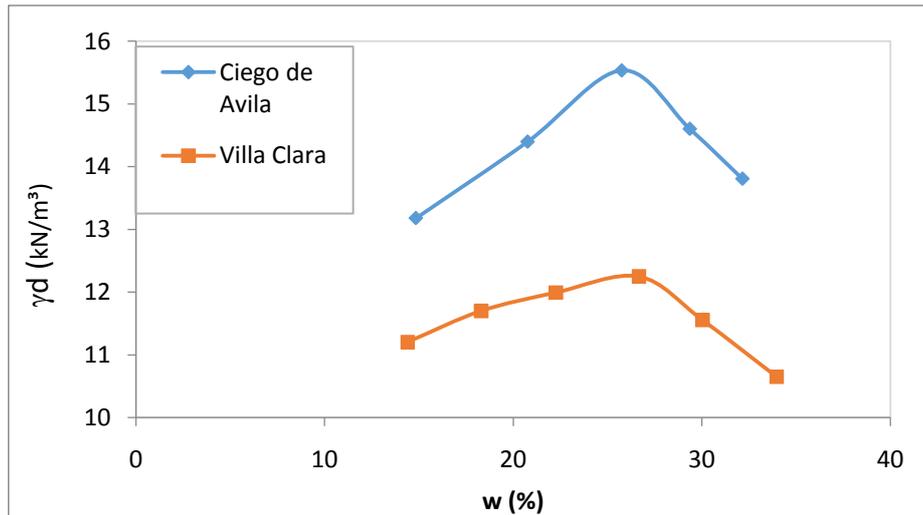
Método de Clasificación	Villa Clara	Ciego de Ávila
SUCS	CH (Arcilla alta compresibilidad)	CH (Arcilla alta compresibilidad)
AASHTO	A – 7 – 6 (82)	A – 7 – 6 (22)

### 2.2.3 Ensayo de compactación

Durante el proceso de compactación, el suelo fue inicialmente humedecido a partir de la condición de secado al aire libre, y compactado usando la energía del Proctor Estándar con el objetivo de obtener los valores de peso específico seco máximo y la humedad óptima, para tener un parámetro de referencia con que remodelar las muestras ya que no se pudo obtener muestras inalteradas. Este ensayo se realiza teniendo en cuenta la norma **(NC-054-141. 1978)** correspondiente a: “Geotecnia. Proctor Estándar y Proctor Modificado”. En la figura 2.3 y en la tabla 2.3 se presentan los resultados de la compactación del Proctor Estándar.

**Tabla 2.2.** Valores de  $\omega_{\text{óptima}}$  y  $\gamma_{d-\text{máx}}$  de los suelos empleados en la investigación.

Suelos	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	$\gamma_{d-\text{máx}}$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )
Villa Clara	23.5	12.15
Ciego de Ávila	24.7	15.64



**Figura 2.2.** Curvas de ( $\gamma_d$  vs  $\omega$ ) promedio, para la energía Proctor estándar de las muestras de los suelos estudiados.

#### 2.2.4 Succión con papel de filtro

Se decidió emplear la técnica del papel de filtro para la determinación de la curva de retención de agua del suelo en esta investigación, porque dentro de los métodos existentes para medir la succión, el del papel de filtro es el único que mide la succión total y matricial y que además es posible realizar en las condiciones cubanas. En este método se determina el potencial del agua en el suelo por medio del potencial del agua retenida en un medio poroso llamado papel de filtro. Se determina la succión matricial porque es válido considerar que la succión total es igual a la succión matricial según lo planteado por **(Fredlund 1979)**, **(Edil y Motan 1984)**, **(Alonso et al. 1987)** y **(Barrera y Garnica 2002)**.

Utilizando este método con una humedad en equilibrio se puede obtener la succión ya sea en contacto (succión matricial) o no en contacto directo (succión total) en un ambiente a temperatura constante. La cantidad de agua que fluye en fase de vapor hacia el papel de filtro, por ser muy pequeña, no causa modificaciones significativas en las condiciones naturales de la muestra, siendo válido considerar solamente la succión matricial en el análisis tenso-deformacional de los suelos.

Para la determinación de la succión, se tomó como base la norma **(ASTM: D 5298 – 10)** correspondiente a: "Determinación de la Succión en los suelos". Los resultados experimentales de las succiones de las muestras de suelo empleados en la investigación aparecen en las figura 2.6, 2.7 y 2.8.

Las muestras fueron remoldeadas empleando energía estática, siguiendo lo recomendado en la norma **(NC-54-142 1985)** correspondiente a: “Compactación estática”.

Después de conformadas las muestras, la mitad fueron saturadas por capilaridad por un período mínimo de 24h, cuando estas no presentaban variación de masa, se inició la trayectoria de secado para obtener la curva de retención de agua. Con la otra mitad de las muestras se hizo la trayectoria de humedecimiento que fue preparada aplicando directamente agua con la ayuda de un gotero después de la saturación y secado. Durante los procesos de secado y humedecimiento las muestras de suelo se mantuvieron dentro de los anillos.

El papel de filtro utilizado fue el Whatman 42, el cual se seca a una temperatura de  $(110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C})$  en la estufa por un periodo de h y luego se enfría en el desecador por 15 min. Los papeles de filtro secos se pesan y se colocan en el recipiente. Las muestras de suelo se pesan y se colocan en el recipiente que se sella con papel celofán y se almacenan por 10 días a una temperatura constante de  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 2.3.** Características adoptadas en la técnica del papel filtro.

<b>Características</b>	<b>Procedimiento adoptado</b>
<b>Tipo de Papel</b>	Whatman 42
<b>Tipo de succión medida</b>	Succión Matricial
<b>Volumen de la muestra</b>	48,5 cm <sup>3</sup>
<b>Tamaño de papel</b>	5,5 cm
<b>Temperatura del ensayo</b>	20°C ± 5°C
<b>Tiempo de equilibrio</b>	10 días

Mediante el método del papel filtro se estima la succión del suelo midiendo indirectamente la cantidad de agua transferida por el espécimen de suelo parcialmente saturado a un papel de filtro inicialmente seco. El contenido de agua del papel de filtro en equilibrio se mide gravimétricamente y relaciona la succión del suelo a través de una curva de calibración predeterminada para un tipo de papel filtro en particular. (Figura 2.5)

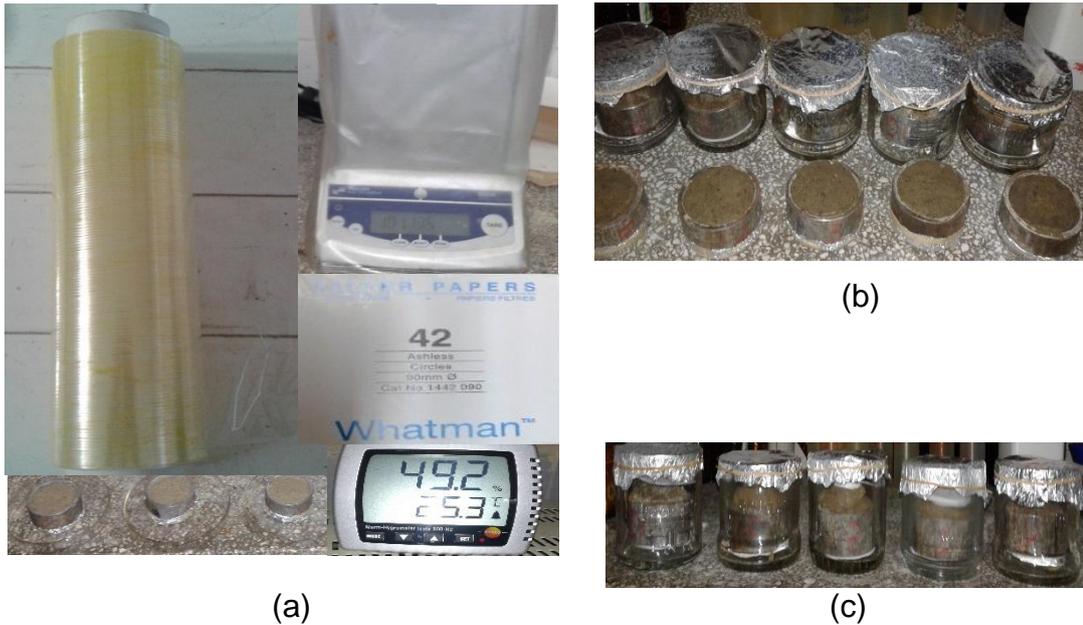


Figura 2.3. (a) Utensilios empleados para medir la succión en el laboratorio con papel de filtro; (b) Muestras de suelo montadas y (c) muestras en contacto directo (succión matricial)

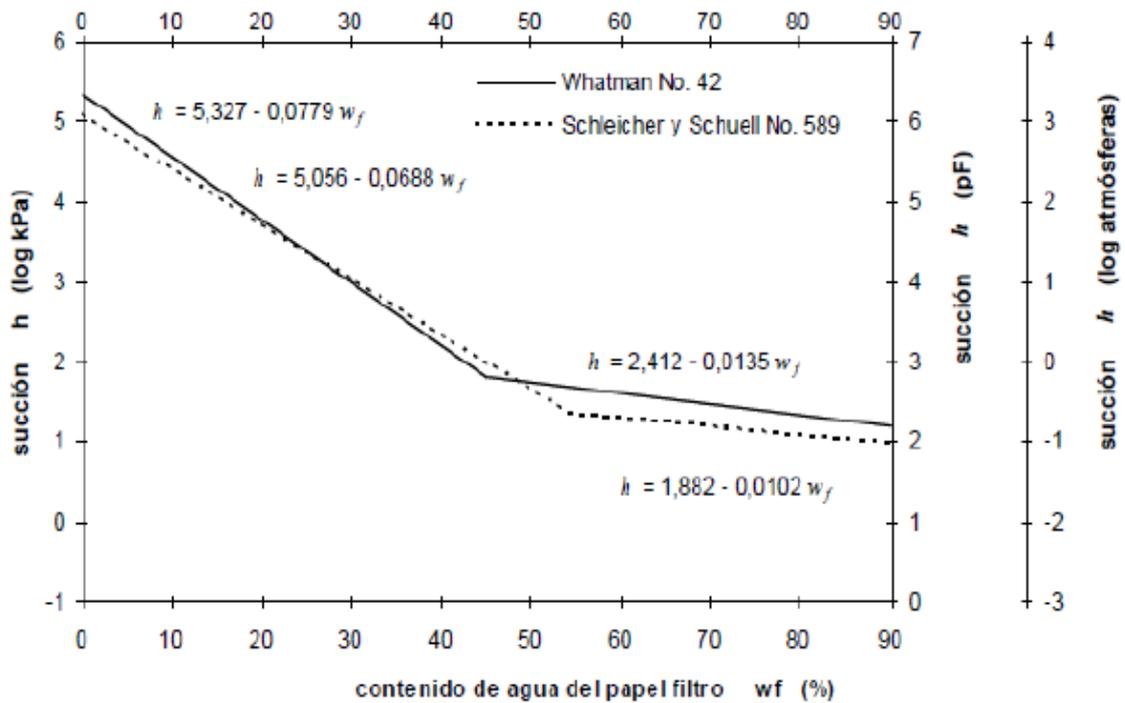


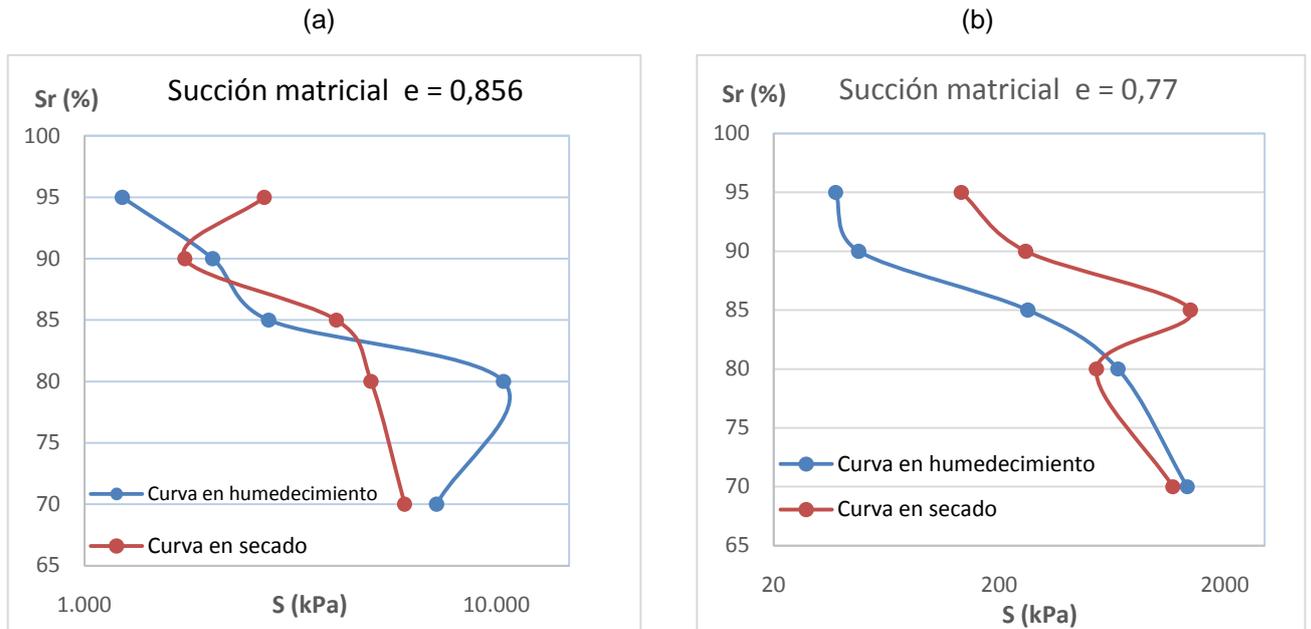
Figura 2.4. Curva de calibración del papel filtro (curva tomada de la norma (ASTM: D 5298 – 10))

Se puede obtener una curva de calibración siguiendo las especificaciones de la norma o trabajar con la planteada por Fredlund, en el caso de esta investigación se empleará la curva de calibración obtenida en el laboratorio para el papel de filtro utilizado, el parámetro “x” representa el contenido de humedad del papel de filtro y el parámetro “y” representa el valor de la succión de la muestra analizada. (Anexo 2.6)

$$y = -0,1002x + 5,0124 \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

La curva de retención de agua del suelo presenta histéresis para todos los puntos estudiados, fenómeno que tiene lugar debido a la naturaleza del ensayo ya que depende de la trayectoria de secado y de humedecimiento de las muestras de suelo. **(Mitchell y Soga 2005)** citado por **(Otálvaro 2013)**.

Las curvas de retención obtenidas para los dos suelos estudiados, con grados de compactación ( $G_c$ ) de 100% son las siguientes:



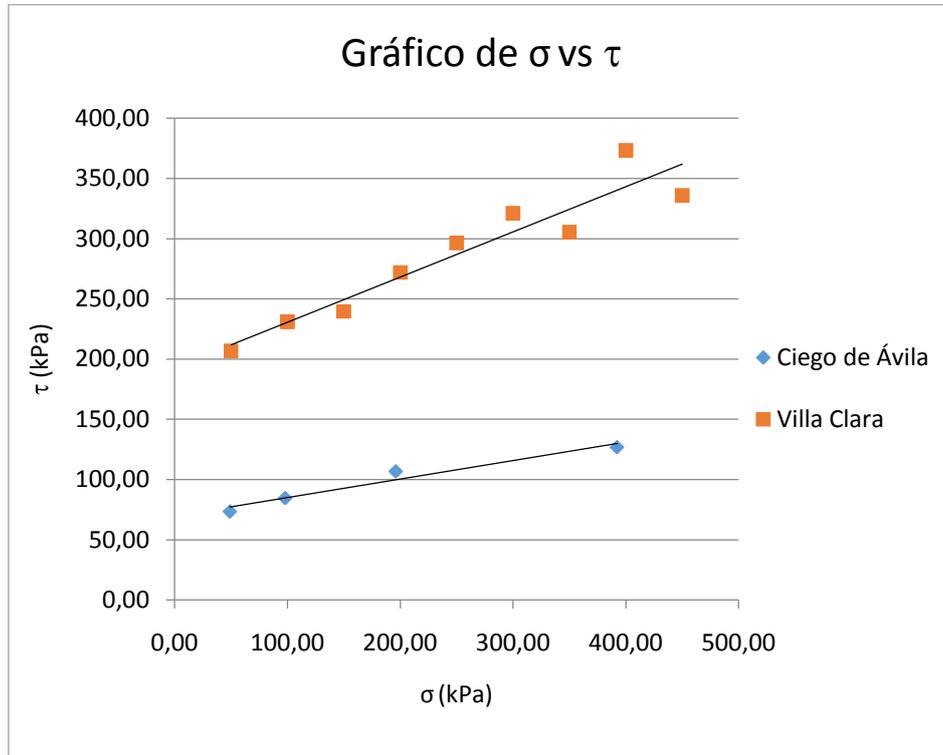
**Figura 2.5.** Curvas de retención de agua del suelo para la Succión Matricial, (a) suelo Villa Clara y (b) suelo Ciego de Ávila.

Como se aprecia en las curvas de ( $S_r$  vs  $S$ ) el suelo de Villa Clara presenta elevados valores de succión debido a las altas tensiones que se desarrollan en el suelo por la expansión que presenta con las saturaciones estudiadas.

### 2.3 Ensayo de corte directo.

Este ensayo se realiza con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia del suelo ( $c$  y  $\phi$ ), teniendo en cuenta la norma **(NC-325. 2004)** correspondiente a: "Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)". Para la realización de este ensayo se realizaron muestras compactadas con la energía del Proctor Estándar. A cada una de las muestras se le aplicó una carga vertical de 50, 100, 200 y 400 kPa para ambos suelos.

Como resultado de los esfuerzos máximos de las muestras de suelo ensayadas, en la figura 2.10 se representa la curva de  $\sigma$  vs  $\tau_{\text{máx}}$ .



**Figura 2.7.** Gráficos de  $\sigma$  vs  $\tau_{\text{máx}}$  de los suelos estudiados.



**Figura 2.8.** Equipo de Cortante Directo (a) ENIA y (b) IPH.

Como resultado del gráfico se tiene que los parámetros de resistencia para los suelos se muestran en las tablas A 2.6 y anexo 2.6. El ensayo se realizó con muestras de suelos saturadas, por medio de la inundación de la caja de corte.

**Tabla 2.4.** Parámetros de resistencia de los suelos objetos de estudio.

Parámetros	Villa Clara	Ciego de Ávila
Cohesión (kPa), C	60	49.56
Ángulo de fricción interna $\phi^0$	20.7	14.53

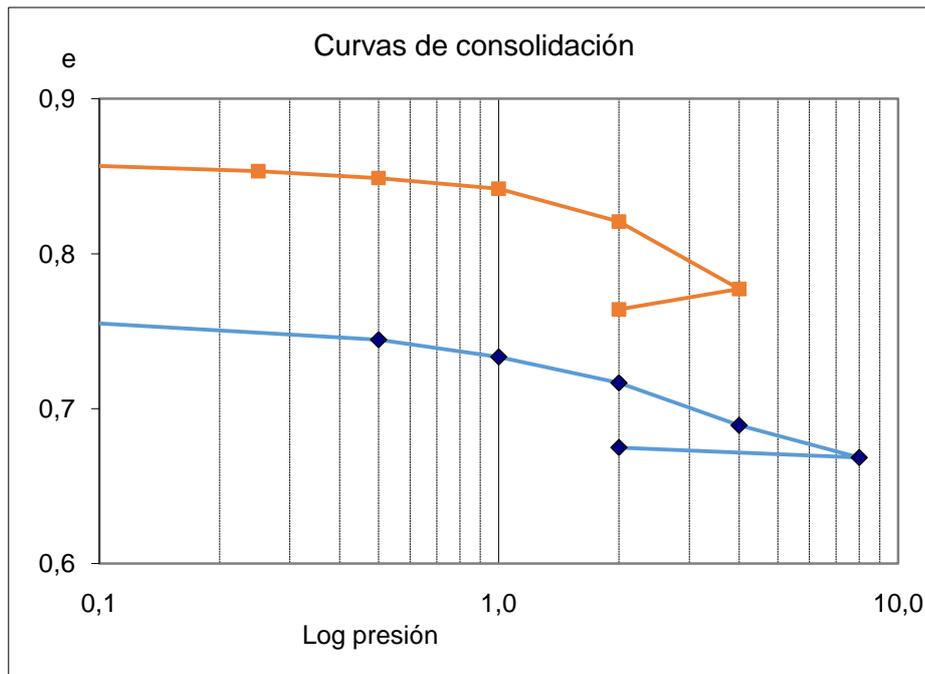
#### **2.4 Ensayo de consolidación de suelos saturados.**

Se realiza el ensayo de consolidación a las muestras de suelos remoldeadas haciendo uso del consolidómetro, para ello se tuvo en cuenta lo planteado en la norma cubana, **(NC 2006)** “Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos”. Durante el ensayo de consolidación, el espécimen de suelo se restringe lateralmente y se carga axialmente con incrementos de esfuerzo totales. Cada incremento de esfuerzo se mantiene hasta que se disipan totalmente las presiones de exceso de agua en los poros. Durante el proceso de consolidación se realizan mediciones del cambio en la altura del espécimen y estos datos se utilizan para determinar la relación que existe entre el esfuerzo efectivo, la relación de vacío o deformación y la velocidad en que ocurre la consolidación, mediante la evaluación del coeficiente de consolidación.

A continuación se muestran las curvas de compresibilidad de los suelos (Figura 2.8 y Tabla 2.7)

**Tabla 2.5.** Datos iniciales de las muestras de suelos empleadas en el ensayo de consolidación.

Datos iniciales del ensayo de consolidación	Villa Clara	Ciego de Ávila
Índice de poros inicial (e) (cm)	0,856	0,744
Grado de saturación inicial ( $Sr_{-inic}$ ) (%)	93	86,6
Peso específico seco inicial ( $\gamma_{d-inic}$ ) ( $kN/m^3$ )	13.99	14,37



**Figura 2.8.** Curva de (e vs  $\sigma$ ) para 100% de grado de saturación.

De las muestras de suelos ensayadas se obtuvo la curva de compresibilidad en carga y descarga para un 100% de grado de saturación, con el objetivo de obtener los valores de los parámetros  $k$  y  $\lambda$  en su tramo virgen, que son empleados por el modelo de Rojas y Alanís en la obtención de la curva de compresibilidad para los suelos parcialmente saturados.

### **2.5 Conclusiones parciales.**

1. Mediante los ensayos de Granulometría, hidrómetro e índices de plasticidad se llega a la clasificación de los suelos en estudio: el suelo Villa Clara es una arcilla de alta compresibilidad (CH) y Ciego de Ávila como arcilla alta compresibilidad (CH) también.

2. Del ensayo de compactación con la energía del Proctor Estándar se obtuvo que para el suelo Villa Clara el  $\gamma_{d-m\acute{a}x}$  es de  $12,15 \text{ kN/m}^3$  y la humedad óptima fue de 23,5% y para el suelo Sagua la Grand Ciego de Ávila el  $\gamma_{d-m\acute{a}x}$  es de  $15,64 \text{ kN/m}^3$  y la humedad óptima fue de 24,7%.

3. El fenómeno de la histéresis es característico en los suelos parcialmente saturados como se planteó (Hillel 1998), y en esta investigación se evidencia en la curva de retención de agua ( $S_r$  vs  $S$ ) este fenómeno, entre la rama en secado y la rama en humedecimiento.

4. La fricción interna del suelo de Villa Clara ( $\phi$ ) tiene un valor de  $20.7^{\circ}$  y la cohesión(c) es de 60kPa y en el suelo de Ciego de Ávila la fricción interna ( $\phi$ ) tiene un valor de  $14.53^{\circ}$  y la cohesión(c) es de 49.56 kPa, estos parámetros de resistencia del suelo fueron obtenidos del ensayo de resistencia a cortante para un 100% de grado de saturación.

5. Las curvas de compresibilidad de los suelos se obtuvieron con el objetivo calcular los parámetros  $k$  y  $\lambda$ , para emplearlos en la simulación de la curva de compresibilidad ( $e$  vs  $\sigma$ ) para suelos con comportamiento parcialmente saturado. Los parámetros  $k$  y  $\lambda$  son constantes para un mismo suelo y van a depender de la relación de vacíos inicial que tenga el suelos ensayado.

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

### **Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.**

En Cuba ensayos precedentes han demostrado que los valores de los grados de saturación se encuentran entre 100% y 70%. En el desarrollo de este capítulo se tratan los aspectos concernientes a la obtención del asentamiento de una cimentación superficial aislada sometida a carga axial, apoyada en el suelo Ciego de Ávila, empleando métodos analíticos mediante el software DGCIM, con la utilización de la curva  $e$  vs  $\sigma$  para el estado de saturación parcial del suelo.

En el capítulo anterior se realizó la caracterización de los suelos Ciego de Ávila y Villa Clara, este último presenta elevados valores de succión debido a las altas tensiones que se desarrollan en el suelo por la expansión que presenta, por tanto se realizarán los diseños y el estudio de asentamiento solamente en el suelo Ciego de Ávila.

Se realizará la simulación de las curvas de retención de agua por los métodos de ajustes empíricos siguientes: Van Genuchten, Fredlund y Gallipoli, así como la simulación de las curvas de compresibilidad convencionales empleando la formulación planteada por Rojas y Alanís en el 2012.

#### **3.1 Ajuste de las curvas de retención del suelo**

El ajuste de las curvas de retención de agua de los suelos de la investigación se realizó empleando los métodos empíricos de (Van Genuchten 1980), (Fredlund et al. 1994) y (Gallipoli et al. 2003). Los modelos empíricos o ecuaciones matemáticas tienen como objetivo capturar las particularidades de la curva de retención de agua de los suelos, incluyendo su forma.

Para el caso de Cuba es válido el empleo de las simulaciones anteriormente planteadas ya que se pueden obtener las curvas de retención de agua de los suelos partiendo de 4 o 5 puntos experimentales solamente.

En la tabla 3.1 y 3.2 se muestran los valores de los parámetros de ajuste de los modelos empleados en la investigación para el suelo Ciego de Ávila.

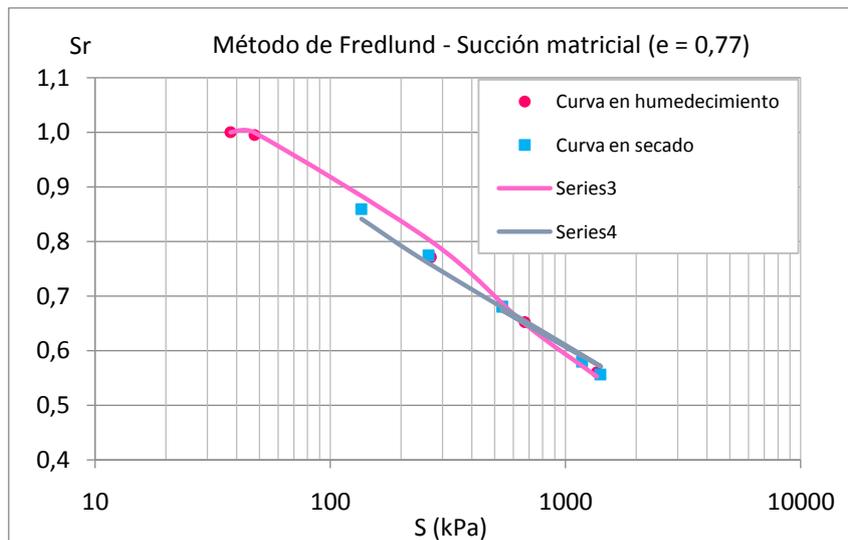
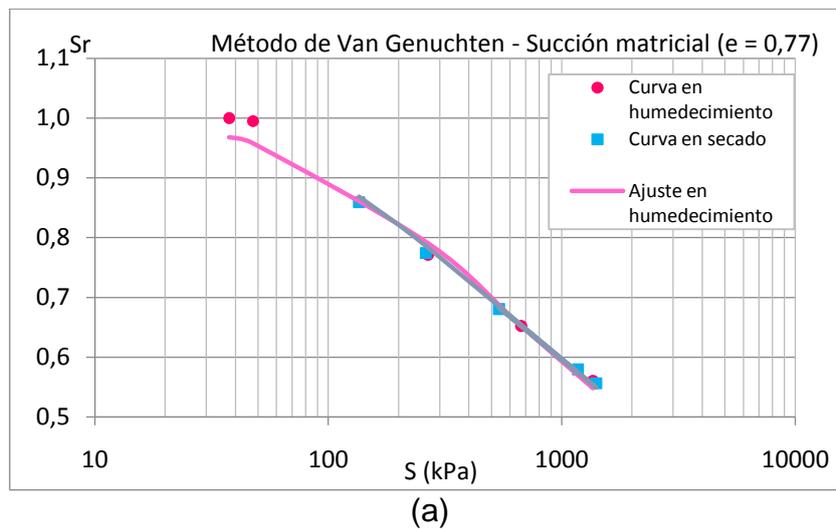
Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

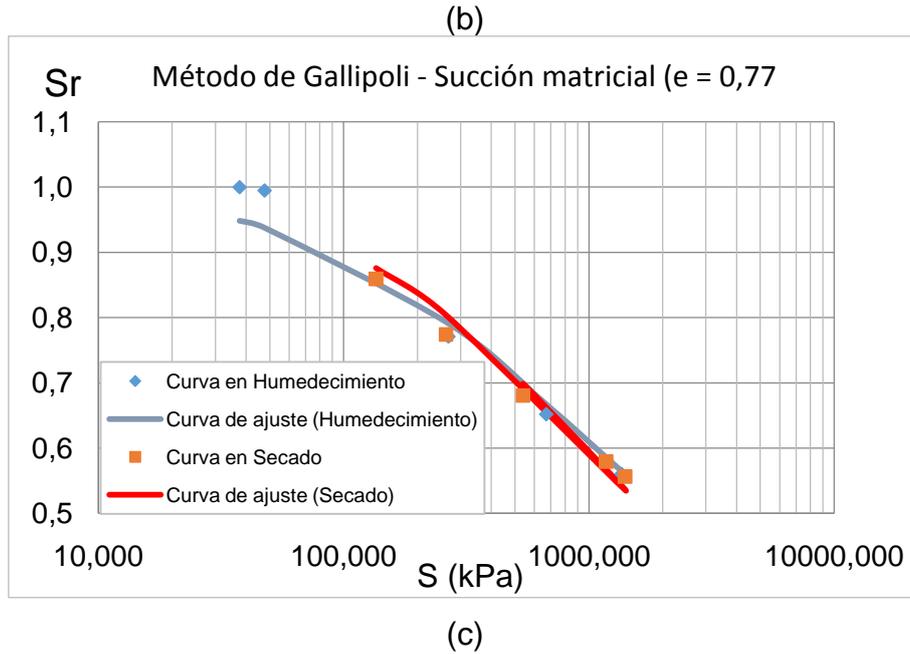
**Tabla 3.1.** Parámetros de ajustes de los modelo para el suelo Ciego de Ávila, curva en humedecimiento.

Suelo Ciego de Ávila, Valores de ajustes en humedecimiento									
Van Genuchten			Fredlund			Gallipoli			
$\alpha$	m	$\eta$	$\alpha$	m	$\eta$	$\psi$	$\phi$	$\eta$	m
0,0065	0.213	1.27	1	5.25	0.0435	60	100	0.9	0.35

**Tabla 3.2.** Parámetros de ajustes de los modelo para el suelo Ciego de Ávila, curva en secado.

Suelo Ciego de Ávila, Valores de ajustes en secado									
Van Genuchten			Fredlund			Gallipoli			
$\alpha$	m	$\eta$	$\alpha$	m	$\eta$	$\psi$	$\phi$	$\eta$	m
0,0075	0.2	1.25	0.542	1.81	0.095	50	10	0.9	0,5





**Figura 3.1.** Curvas de retención de agua de los valores experimentales y las curvas de ajustes del suelo Capdevila. (a) Van Genuchten, (b) Fredlund y (c) Gallipoli.

La representación matemática que constituye la curva de retención de agua es usualmente de tipo hiperbólica, (**Van Genuchten 1980**) y (**Fredlund et al. 1994**) citado por (**Otálvaro 2013**) como se aprecia en las curvas de la Figura 1.3, donde se aprecia que los valores de histéresis en el suelo son pequeños debido a la granulometría del mismo y los modelos de ajuste son adecuados para el mismo, pues las curvas obtenidas responden a leyes de métodos que han sido demostrados para lograr extender la curva.

### 3.2 Formulación planteada por Rojas y Alanís para la obtención de la curva $e$ vs $\sigma$ para diferentes grados de saturaciones.

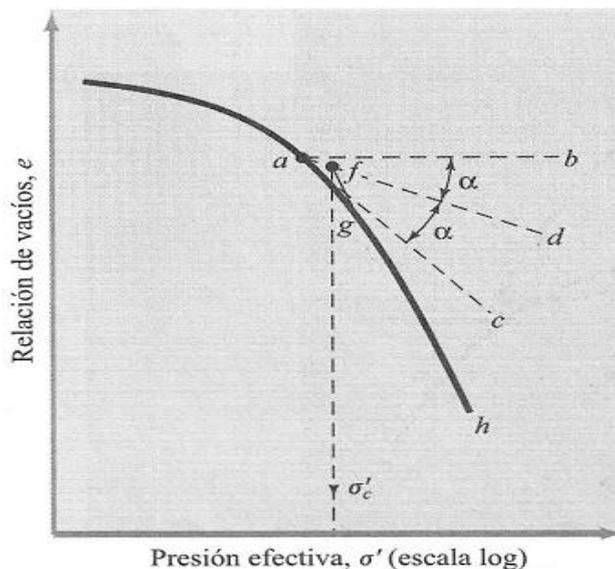
A partir de la curva de compresibilidad ( $e$  vs  $\sigma$ ) para un 100% de saturación se calculan los valores de  $K$  y  $\lambda$ , para cada valor de succión obtenida en el laboratorio con los diferentes grados de saturación, empleando para ello las ecuaciones propuestas por Rojas y Alanís (2012).

$$k = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \qquad \lambda = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)}$$

De la Figura 3.2 se obtiene la tensión de preconsolidación, que no es más que la presión efectiva máxima en el pasado, para el suelo de Ciego de Ávila. La presión efectiva en el pasado no se determina explícitamente porque es

usualmente una función de procesos geológicos y, en consecuencia, debe ser inferida de los resultados de pruebas de laboratorio, (Das, 2007). Es importante su obtención para dividir en dos ramas la curva de compresibilidad donde quedan definidos los coeficientes  $K$  y  $\lambda$  para cada una de las ramas de la curva. (Das, 2007), Casagrande sugirió una simple construcción grafica para determinarla presión de preconsolidación  $\sigma'_c$  a partir de la gráfica de laboratorio ( $e$  vs  $\log \sigma'$ ) El procedimiento es el siguiente:

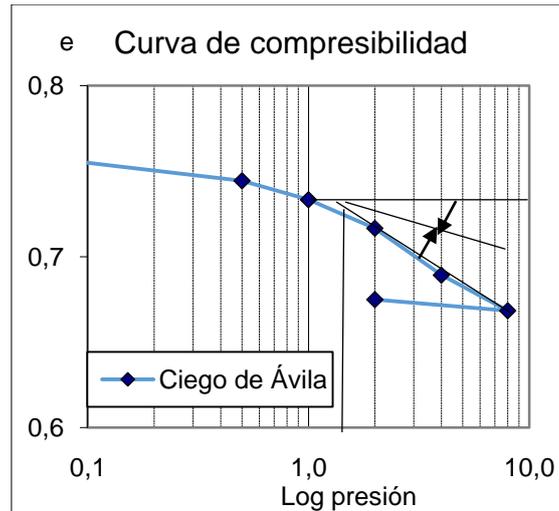
1. Por observación visual, establezca un punto  $a$  donde la gráfica  $e$  vs  $\log \sigma'$  tenga un radio de curvatura mínimo.
2. Dibuje una línea horizontal  $ab$ .
3. Dibuje la línea  $ac$  tangente en  $a$ .
4. Dibuje la línea  $ad$ , bisectriz del Angulo  $bac$ .
5. Proyecte la porción recta  $gh$  de la gráfica  $e$  vs  $\log \sigma'$  hacia atrás para intersecar  $ad$  en  $f$ . La abscisa del punto  $f$  es la presión de



preconsolidación.

**Figura 3.2** Procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación.

Los resultados de la simulación de la curva de compresibilidad ( $e$  vs  $\sigma$ ) para el suelo Ciego de Ávila aparece reflejado en la figura 3.3. En el anexo 3.1 se muestra el análisis de los valores experimentales obtenidos de las curvas edométricas del consolidómetro tradicional.



**Figura 3.3.** Curvas de compresibilidad con  $S = 100$  kPa suelo Ciego de Ávila.

Con los resultados obtenidos se determinan los parámetros en la zona de comportamiento elástico y plástico del suelo mediante las curvas ( $e$  vs  $\sigma$ ) del ensayo tradicional reflejando los resultados en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Parámetros de los suelos parcialmente saturados

Parámetros del suelo para $S = 100\%$	Ciego de Ávila
Zona elástica $\kappa$	-0.038
Zona plástica $\lambda$	-0.231
Relación de vacío inicial $e_0$	0.77
$\sigma$ adicional de fabricación $\sigma_{fab}$ (kPa)	150

### 3.3 Obtención de la curva de compresibilidad ( $e$ vs $\sigma$ )

A partir de los resultados del epígrafe anterior se simula la curva de  $e$  vs  $\sigma'$  para los diferentes valores de succiones y saturaciones en cada uno de los suelos analizados, para ello se emplearán las ecuaciones:

$$\text{Comportamiento elástico: } e = e_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^{-k} \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

$$\text{Comportamiento elasto-plástico: } e = e_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^{-\lambda} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

$$\text{La formulación considera que: } \sigma' = \sigma - \chi (u_a - u_w) \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Donde:

$\sigma'$ : tensiones efectivas

$\sigma$ : tensiones normales totales

(Hay que considerar el esfuerzo de fabricación antes mencionado)

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

$u_w$ : presión del agua

$u_a$ : presión del aire

$(u_w - u_a)$ : succión matricial del suelo

$\chi$ : Grado de saturación

En la tabla 3.4 se realiza un resumen de los valores de  $K$  y  $\lambda$  para las succiones obtenidas con el método del papel de filtro y para los diferentes grados de saturaciones estudiadas.

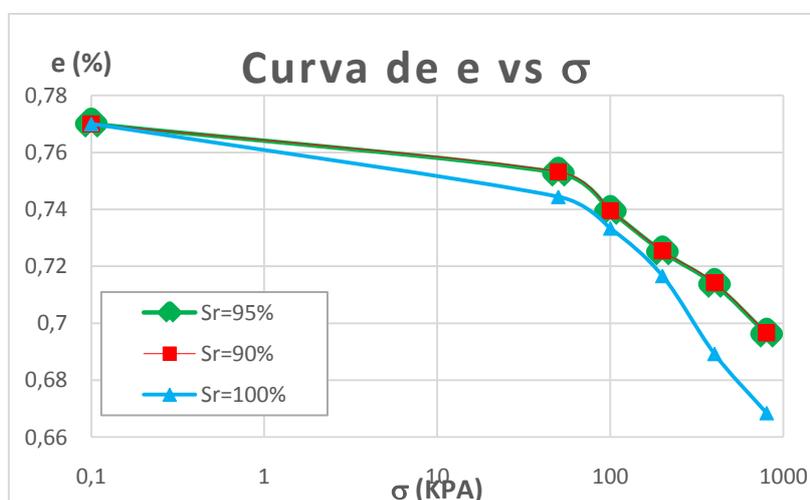
**Tabla 3.4.** Parámetros del suelo parcialmente saturado para la simulación, Ciego de Ávila.

	Succión S=37 kPa	Succión S=47 kPa
Zona elástica $k$	-0.031	-0.031
Zona plástica $\lambda$	-0.071	-0.071
Aprox $S_r \chi$	0.95	0.90
Índice de poros inicial $e_0$	0.77	0.77
$\sigma$ de fabricación $\sigma_{fab}$	150 kPa	150 kPa

Para cada valor de succión se obtuvieron los valores de índice de poro para el grado de saturación correspondiente como se observa en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Valores de índice de poro para cada grado de saturación.

$\sigma$ (kPa)	S=0kPa y $S_r=100\%$ e	S=37kPa y $S_r=95\%$ e	S=47kPa y $S_r=90\%$ e
0,1	0,7700	0,7700	0,7700
50	0,7444	0,7528	0,7532
100	0,7333	0,7393	0,7396
200	0,7166	0,7251	0,7254
400	0,6892	0,7137	0,7142
800	0,6684	0,6963	0,6966



**Figura 3.4.** Simulación de la curva de compresibilidad de Ciego de Ávila con  $e = 0.77$ .

Se realiza solo el análisis para saturaciones de 100%, 95% y 90%, como se muestra en la gráfica de la figura 3.4, debido a que para menores valores de las mismas se necesita una sobrecarga a partir de la tensión de preconsolidación para contrarrestar los efectos de expansión que sufre la arcilla, esto se realiza con el objetivo de disminuir las tensiones que aparecen en el suelo producto de la expansión.

### 3.4 Obtención de la tensión límite de linealidad

La tensión límite de linealidad del suelo es la tensión hasta la cual el suelo desde el punto de vista práctico puede tener un comportamiento lineal entre tensiones y deformaciones, hace falta hacerlo porque cuando cumple la base de la cimentación para las combinaciones de carga del 2do Estado Límite se utiliza el método de cálculo de asentamiento lineal.

Esta condición puede considerarse cumplida si se garantiza que las tensiones actuantes no sobrepasen el valor de la presión del límite de linealidad del suelo ( $R'$ ) es decir:

$$p \leq R' \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Donde:

$$p = N/b$$

Las presiones actuantes se determinan teniendo siempre presente que las mismas están en función de la combinación de carga para el diseño por deformación con sus valores característicos. La presión del Límite de Linealidad del suelo  $R'$  está en función de las características físico-mecánicas del suelo, determinadas para una probabilidad de diseño  $\alpha$  del 85%.

El valor de la presión límite de linealidad del suelo parcialmente saturado  $R'$  según varios autores (Trista, 2015). (Vanapalli, 2007) se determina a partir de:

$$R' = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{K} [M_{\gamma'} \cdot K_z \cdot b \cdot \gamma_2^* + M'_{q'} \cdot q^* + M_{c'} \cdot (c^* + (u_a - u_w)_b (\tan \phi_{sat} - \text{Sr} \psi \tan \phi_{sat} + u_a - u_w) \text{AVR} \text{Sr} \psi \tan \phi_{sat})] \quad \text{(Ecuación 3.5)}$$

Donde:

$\gamma_{c1}$  y  $\gamma_{c2}$  – son respectivamente los coeficientes de las condiciones de trabajo del suelo y tipo de estructura según la NC-2014

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

K – coeficiente de fiabilidad que depende del método para la determinación de las características de cálculo del suelo. Su valor es 1, si se realizan ensayos de campo o laboratorio, y 1.1 si dichas características se obtienen de tablas.

$K_z$  – coeficiente que toma en cuenta en cierta medida la influencia de la longitud de la cimentación.

b–ancho de la cimentación.

$M_\gamma'$ ,  $M'_q$  y  $M'_c$  – coeficientes que dependen del ángulo de fricción interna del suelo.

$(u_a - u_w)$  – succión matricial.

$(u_a - u_w)_b$  – valor de entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo.

$(u_a - u_w)_{AVR}$  – media del valor de entrada de aire.

$\phi_{sat}$  – ángulo de fricción efectiva.

$S_r$  – grado de saturación.

$\psi$  – parámetro de ajuste del modelo.

Se trabaja con una hoja de cálculo en el programa Mathcad, para el diseño de las bases de cimentaciones para el suelo de Ciego de Ávila con diferentes condiciones.

Para el análisis de los asentamientos de la cimentación se tomaron como datos iniciales las características y propiedades físico-mecánicas representadas en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Propiedades de los suelos para el cual se realiza el diseño teórico.

Suelo	C(kPa)	$\phi^0$	$\Psi_d^0$	Ip (%)	Peso específico húmedo $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )
<b>Ciego de Ávila</b>	49.56	14.53	1.1	26.4	19.50

Para el cálculo de la tensión límite de linealidad de suelos parcialmente saturados, se utiliza la norma **(NC-XX, 2004)** para la obtención de los factores de corrección correspondientes. Los valores obtenidos para los diseños por linealidad se muestran en las siguientes tablas los cuales fueron determinados por las expresiones planteadas por Vanapalli como se observa en la ecuación 1.11 de capítulo 1.

**Tabla 3.7.** Cálculo de la tensión límite de linealidad

$(u_a - u_w)_{AVR}$ (kPa)	$S_r$ (%)	$(u_a - u_w)_b$ (kPa)	$\gamma^*$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^*_{uns}$ (°)	$C^*_{uns}$ (kPa)
0	100	0	19.28	15.63	49.56
37	95	5	19.13	15.63	122,21
47	90	7	19.01	15.63	132,01

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

Del cálculo de la tensión límite de linealidad se obtienen las dimensiones de área de la base del cimiento debido a que el área por capacidad de carga no es determinante en el diseño para suelos parcialmente saturados como (Trista, 2015); (Vanapalli, 2007) y (Anaisy, 2015) han demostrado.

**Tabla 3.8** Resultados del diseño teórico, suelo Ciego de Ávila, saturado.

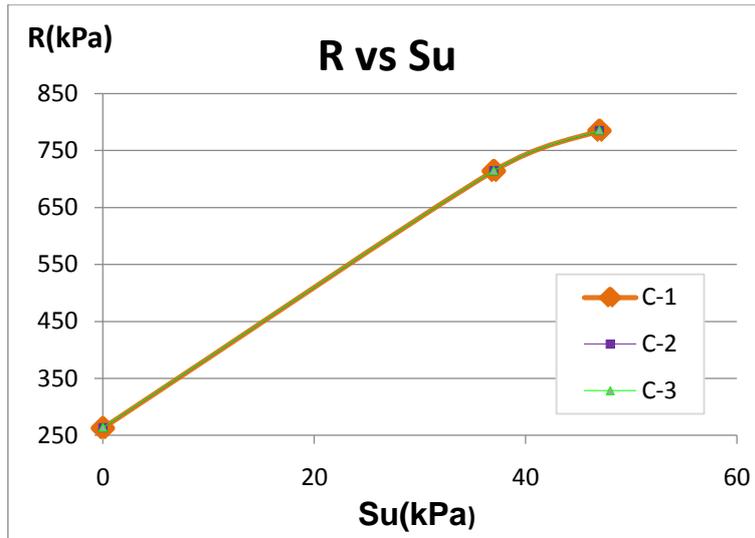
<b>Su=0kPa, Sr=100%, <math>(u_a-u_w)_{AVR}=0kPa</math></b>				
<b>Carga muerta</b>	<b>CV larga duración</b>	<b>Saturado</b>		
		<b>b=l(m)</b>	<b>R(kPa)</b>	<b>P(kPa)</b>
400	100	1.5	262.705	252.22
500	100	1.65	263.21	250.386
600	100	1.8	263.71	246.049

**Tabla 3.9** Resultados del diseño teórico suelo, Ciego de Ávila, 95% de saturación.

<b>Su=37kPa, Sr=95%, <math>(u_a-u_w)_{AVR}=5kPa</math></b>				
<b>Carga muerta</b>	<b>CV larga duración</b>	<b>No Saturado</b>		
		<b>b=l(m)</b>	<b>R(kPa)</b>	<b>P(kPa)</b>
400	100	0.9	714.133	647.284
500	100	0.95	714.392	694.82
600	100	1.05	714.755	702.818

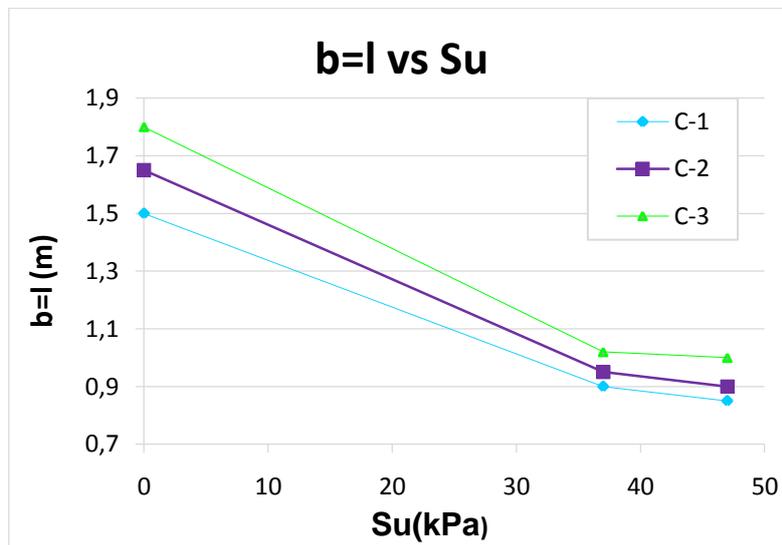
**Tabla 3.10** Resultados del diseño teórico suelo, Ciego de Ávila, 90% de saturación.

<b>Su=47kPa, Sr=90%, <math>(u_a-u_w)_b=7kPa</math></b>				
<b>Carga muerta</b>	<b>CV larga duración</b>	<b>No Saturado</b>		
		<b>b=l(m)</b>	<b>R(kPa)</b>	<b>P(kPa)</b>
400	100	0.85	784.822	722.042
500	100	0.9	785.14	770.741
600	100	1	785.78	730.00



**Figura 3.5.** Curva de tensión límite de linealidad vs succión, suelo Ciego de Ávila.

Como se aprecia en la figura 3.5 con el aumento de la succión aumenta la tensión límite de linealidad. Para el caso de estudio, el aumento de los valores de la tensión límite de linealidad están alrededor del 60% para una succión de  $S_u=37\text{kPa}$  y 65% para una succión de  $S_u=47\text{kPa}$  con respecto al valor de  $R$  del suelo saturado. Se debe utilizar el área de la base del diseño por linealidad para la determinación de los asentamientos en el segundo estado límite.



**Figura 3.6.** Curva de  $b=l$  vs succión, suelo Ciego de Ávila.

Se trabajó hasta donde se cumple el criterio de linealidad del suelo, como se observa en la gráfica de la figura 3.6, con el aumento de la succión disminuyen los valores del área de la base de la cimentación, en el tramo de  $S_u=0\text{ kPa}$  hasta  $S_u=37\text{ kPa}$  existe un cambio en el área de la base de 40%, y en la rama

de  $S_u=37\text{kPa}$  hasta  $S_u=47\text{kPa}$  ocurre un cambio en la pendiente de la recta en menor medida, 5%.

### 3.5 Obtención de los asentamientos. Método de la Sumatoria de Capas (NC, 2007).

Se estudiará una cimentación superficial cuadrada de rectangularidad  $b/l=1$ , con profundidad de cimentación de 1,5m y profundidad de penetración en el estrato resistente  $D=0\text{m}$ . La cimentación estará apoyada sobre el suelo Ciego de Ávila donde se analizará el asentamiento cuando ocurran variaciones del grado de saturación en el mismo.

Para la determinación del asentamiento absoluto en los puntos característicos da la base de un cimiento se puede emplear el Método de Sumatoria de Capas usando la siguiente expresión:

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{6} (\epsilon_{is} + \epsilon_{ic} + \epsilon_{ii}) \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

Donde:

$n$ = cantidad de estratos por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la Potencia Activa

$H_i$ = espesor del estrato (i) existente por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la Potencia Activa

$\epsilon_{is}$ = variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior (i) y calculado en una vertical que pase por el punto característico del cimiento donde se calculará el asiento absoluto

$\epsilon_{ic}$ = ídem para el punto centro del estrato (i)

$\epsilon_{ii}$ = ídem para la frontera inferior (i)

Para el cálculo de los asentamientos de la cimentación antes descrita se utiliza el programa DGCIM (Ibañez, Cueto, Broche, & Ernesto Chagoyén, 2007), el cual tiene como entrada de datos la curva  $e$  vs  $\sigma$ , dicha curva es la que se propone que sea empleada en el cálculo de los asentamientos para suelos parcialmente saturados. Se tomaron como datos iniciales las características planteadas en la tabla 3.7.

**Tabla 3.11** Resultados del asentamiento suelo de Ciego de Ávila para  $S_u=0\text{kPa}$

Cargas Muerta	CV larga duración	S(cm)	b=l(m)
400	100	3.87	1.5

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

500	100	4.07	1.65
600	100	4.23	1.8

**Tabla 3.12** Resultados del asentamiento suelo de Ciego de Ávila para  $S_u=37\text{kPa}$

<b>Cargas Muerta</b>	<b>CV larga duración</b>	<b>S(cm)</b>	<b>b=l(m)</b>
400	100	4.17	0.9
500	100	4.52	0.95
600	100	4.77	1.05

**Tabla 3.13** Resultados del asentamiento suelo de Ciego de Ávila para  $S_u=47\text{kPa}$

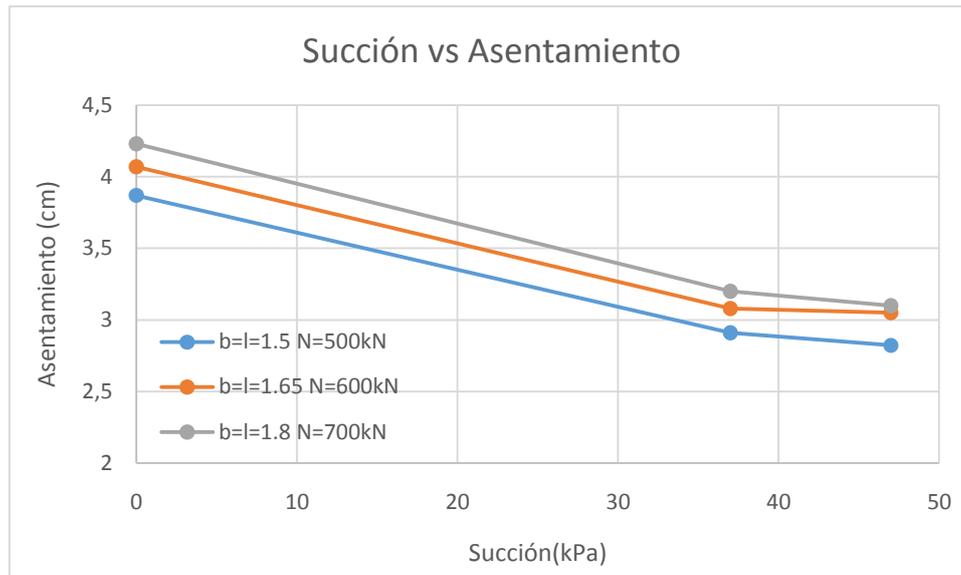
<b>Cargas Muerta</b>	<b>CV larga duración</b>	<b>S(cm)</b>	<b>b=l(m)</b>
400	200	4.28	0.85
500	200	4.65	0.9
600	200	4.81	1

En las tablas 3.11 - 3.13 se evidencia que a medida que aumenta la succión disminuye el área de cimentación para el mismo valor de carga actuante en un intervalo de 40% a 45% y al ser menor el área aumentan los valores de asentamientos en un intervalo del 7% al 12% pero se mantienen siendo permisibles por lo que resulta favorable disminuir el área de la cimentación.

De forma general en la tabla 3.15 se realiza el resumen de la variación de los asentamientos manteniendo el área de la base y determinando los mismos para las cargas hasta donde el suelo tiene comportamiento lineal.

**Tabla 3.15** Resumen de los asentamientos para el comportamiento de  $S_u$  (kPa) vs  $b=l$  (m)

<b><math>S_u(\text{kPa})/b=l(\text{m})</math></b>	<b>0</b>	<b>37</b>	<b>47</b>
	<b>Sr 100%</b>	<b>Sr 95%</b>	<b>Sr 90%</b>
<b>1.5</b>	3.87	2.91	2.822
<b>1.65</b>	4.07	3.08	3.05
<b>1.8</b>	4.23	3.2	3.1



**Figura 3.7.** Curva de asentamiento vs succión, suelo Ciego de Ávila.

En la gráfica de asentamiento contra succión de la figura 3.7 se evidencia que cuando las succiones aumentan los asentamientos disminuyen, esto ocurre en un 25% para cambios de saturaciones de 100% a 95% y en un 28% para cambios de saturaciones de 100% a 90%, aunque como se aprecia en el intervalo de 95% a 90% el cambio no es representativo.

### **3.6 Conclusiones parciales.**

1. La estimación de la curva característica del suelo se hace imprescindible en la obtención de varios parámetros que se emplean para la descripción de los suelos no saturados. El ajuste de la curva de retención del suelo para suelos parcialmente saturado es planteado por las ecuaciones de Van Genuchten, Fredlund y Gallipoli y se formulan con el objetivo capturar las particularidades de la curva de retención de agua de los suelos, incluyendo su forma, en el caso de estudio las curvas obtenidas se ajustan como se esperaba pues responden a leyes de métodos que han sido demostrados para lograr extender la curva.
2. La resistencia al cortante así como el comportamiento volumétrico son propiedades que se ven afectadas por la variación de la succión y que pueden afectar directamente a los proyectos de edificaciones en la obtención de los asentamientos producidos en cimentaciones edificadas en estos suelos.
3. Se demostró que al aumentar la succión, aumenta la tensión límite de linealidad en aproximadamente 60% para suelos predominantemente

Capítulo III: Simulación de las curvas de retención y de compresibilidad convencional para el cálculo de asentamientos.

cohesivos por lo que se realiza el diseño por la condición de linealidad para la determinación de los asentamientos en el segundo estado límite.

4. Se determinó que el área final obtenida en el diseño geotécnico para suelos parcialmente saturados es menor que para suelos saturados aproximadamente un 40%, lo que provoca el aumento de los asentamientos pero dentro de valores permisibles.
5. En cuanto al asentamiento obtenido en el diseño para suelos parcialmente saturados, se demuestra que este es menor que para suelos saturados aproximadamente un 25% aunque como se aprecia en el intervalo de 95% a 90% disminuyen en 3%.

*Conclusiones y recomendaciones*

## **Conclusiones**

1. En Cuba, las teorías para el diseño de cimentaciones superficiales sobre suelos parcialmente saturados, se han utilizado a pesar de las grandes dificultades que posee la implementación de la Mecánica de estos suelos, partiendo de técnicas factibles en nuestras condiciones, debido a que el diseño en el estado de saturación parcial conduce a soluciones más racionales y menos conservadoras.
2. La caracterización de los suelos estudiados se realizó teniendo como base la mecánica de suelos tradicional, a través de ensayos físico-mecánicos con los que se obtuvo la curva de compresibilidad; y a partir del ensayo del papel de filtro se obtuvo la curva característica de succión del suelo que fue ajustada por los métodos de Van Genuchten, Fredlund y Gallipoli, lo cual permitió la aplicación del modelo de Rojas y Alanís para la obtención de la curva de compresibilidad para suelos parcialmente saturados.
3. Para determinar la tensión límite de linealidad en el suelo no saturado, se utilizaron las correcciones de los parámetros Morh Coulomb ( $c$  y  $\phi$ ) hechas por Vanapalli para suelos no saturados, demostrando que al aumentar la succión aumenta la tensión límite de linealidad en aproximadamente un 60%; por lo que se realizó el diseño por la condición de linealidad para la determinación de los asentamientos en el segundo estado límite.
4. Las variables que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el diseño de las cimentaciones superficiales en suelos parcialmente saturados fueron: tipo de suelo, succión, grado de saturación, linealidad y deformación, donde el área final obtenida para el suelo Ciego de Ávila es menor que para suelos saturados aproximadamente un 40%.
5. Se realizó el estudio de la variación de los asentamientos con el área de la base y las cargas determinadas por la condición de linealidad, donde se evidencia que cuando las succiones aumentan los asentamientos disminuyen en un 25%.

### **Recomendaciones**

Continuar profundizando en el estudio de los suelos parcialmente saturados en Cuba e incorporando la curva de succión vs grado de saturación en los diseños geotécnicos, haciendo énfasis en los suelos con elevado índice de plasticidad y expansiones considerables.

Analizar la aplicación de la influencia de la succión en otros casos de estudio además de las cimentaciones superficiales como en estabilidad de taludes y cimentaciones profundas o balsas.

.

## Referencias Bibliográficas

- 054-148, N.-. 1978. "Geotecnia. Proctor estándar".
- ÁBALO & MOYA 1982. *Cimentaciones sobre suelos expansivos, práctica en la región centro-oeste de los E.U.A.* ISPJAE, Facultad de Ingeniería Civil. 11p.
- ALANÍS ARAIZA, A. O. 2012. *Deformación volumétrica de suelos no saturados.* Querétaro, México.
- ALFARO SOTO, M. A. 2008. *GEOTECNIA EN SUELOS NO SATURADOS.*
- ALONSO, E. & LLORET, A. 1985. *Comportamiento de suelos parcialmente saturados.* Revista de Obras Públicas.
- ALONSO, E. E., GENS, A. & HIGHT, D. W. 1987. *Special Problems Soils. General report. Proc. 9th European Conf. Soil Meh. Fdn Engng, Dublin, 3, 1087-1146.*
- ANAISY 2015. *Metodología general de diseño para cimentaciones superficiales sobre suelos parcialmente saturados.* Santa Clara, Cuba.
- ASANZA, E. 2009. "Determinación de las características de fricción en el contacto suelo-geotextil a diferentes succiones, mediante equipos de laboratorio singulares. ,.
- ASTM-D5298 1994. "Determinación Succión en los suelos".
- BARRERA, M., & GARNICA, P. 2002. *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS NO SATURADOS.* Secretaria de comunicaciones y transporte, Sanfandila, Querétaro., 1-155.
- BARRERA, M., GARNICA, P., & MARTÍNEZ, F. 2004. *Influencia de la succión en los cambios volumétricos de un suelo compactado.* Sanfandila, Querétaro: Secretaria de comunicaciones y transporte. , 1-141.
- BISHOP, A. B., G. 1963. *Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils.*
- BÖNSCH , C. & LEMPP, C. 2007. *Shear Strength Affected by Suction Tension in Unsaturated Fine Grained Soils.* Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Berlin, Springer.
- BRAJA, M. D. 2007. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica,* California State University, Sacramento, Thomson-Learning.
- CÉSAR, M. C. J. 2014. *Estudio teórico y experimental de la resistencia al cortante de los suelos no saturados.*
- CIVIL, E. D. C. 2014. *Simulation of the soil-water characteristic curve using laboratory tests and empirical models for Cubans unsaturated soils.* REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN.
- CRONEY, D. & COLEMAN, J. D. 1961. *Pore pressure and suction in soils.* In *Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction uin Soils,* Butterworths, London, 31-37.
- CHAE, J., KIM, B., PARK, S., & KATO, S. 2010. *Effect of Suction on Unconfined Compressive Strength in Partly Saturated Soils, . 14, 281-290. .*

- DELAGE , P. 1998. *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay.*
- DELAGE, P. & CUI, Y. 2000. *L'eau dans les sols nonsature's*, Paris, E'ditions Techniques de l'ingenieur.
- DELGADO, QUEVEDO & ALEJO 2002. *Análisis del comportamiento tenso-deformacional de los suelo preconsolidados y su influencia en el cálculo de los asentamientos.* %to Simposio de Geotecnia, Materiales y Contruccion.
- DIAMOND, S. 1970. *Pore Size Distributions in Clays.* *Clays and Clay Minerals.*, 18(1).
- EDIL, T. B. & MOTAN, E. S. 1984. *Laboratory evaluation of soil suction components.* *Geot. Test. J*, 7, 173 - 181.
- EDWIN. G. A, R. J. C., & SALDARRIAGA. M. J 2012. *SIMULATION OF RAINFALL AND SEEPAGE FLOW ON UNSATURATED SOIL BY A SEEPAGE - DEFORMATION COUPLED METHOD.*
- FATTAH, M. Y., SALIM, N., & MOHSIN, M. 2014. *Behavior of Single Pile in Unsaturated Clayey Soils.* *Eng. & Tech. Journal*, 32(3), 763–787. .
- FREDLUND & XING 1994. *Equation for the soil-water characteristic curve.* *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (3): 521-532.
- FREDLUND, D., MORGENSTERN, N. R. & WIDDGER, R. A. 1978. *The shear strength of unsaturated.* *Canadian Geotechnical Journal.*, 15, No. 3: 313-321.
- FREDLUND, D. & XING, A. H., S. 1994b. *Predicting the permeability functions for insaturated soil using the soil-water characteristic curve. .* *Canadian Geotechnical Journal*, 31., p. 533-546.
- FREDLUND, D. G. 1979. *Appropriate concepts ans technlogy for unsaturated soils.* *Can, Geotechnical Journal* 16, 16, p.121-139.
- FREDLUND, D. G. 2000. *Use of a new thermal conductivity sensor for laboratory suction measurement.* *Proc. 1st Asian Conf, on Unsaturated Soils. Singapore.*
- FREDLUND, D. G. 2001. *Suggestions and recommendations for the interpretation of soil-water characteristic curves.* *14TH SOUTHEAST ASIAN GEOTECH, Conf, Hong Kong. .*
- FREDLUND, D. G. 2002. *Relevance of Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnica Engineering.* *Nationl Conference on Soil Mechanics, Havanna.*
- FREDLUND, D. G. & MORGENSTERN, N. R. 1976. *Constitutive relations for volumen change in unsaturated soils.* *Can. Geot. Jnl.* Vol.13, nº. 3, 261-276.
- FREDLUND, D. G. & MORGENSTERN, N. R. 1977. *Stress state variables for unsaturated soils.* *J. Geotech. Div. A.S.C.E.* 103, v. 103GT5, p.447-466.
- FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils.*
- GALLIPOLI, D., WHEELER, S. J. & KARSTUNEN, M. 2003. *Modeling the varietion of degree of saturation in a deformable unsaturated soil.* *Geotechnique*, 53, 105 - 112.
- GENUCHTEN, V. 2014. *A method for prediction of the water retention curve.* *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 12.

- HAINES, W. 2011. *Studies en the physical properties of soil: V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith.*
- HILLEL, D. 1998. *Introduction to Environmental Soil Physics.* Academic Press.
- IBAÑEZ, L. O., CUETO, A. V. G.-, BROCHE, J. L. & ERNESTO CHAGOYÉN, A. G. Q. 2007. "Sistema de Software DGCim." 1 – 16.
- JAVADI, A. R. E. A. A. 2014. *Roscoe and Hvorslev Surfaces for Unsaturated Silty Soil.* American Society of Civil Engineers.
- JENNING, J. E. B. & BURLAND, J. B. 1962. *Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils.* Géotechnique, 12, No 2: 125-144.
- JIMENEZ SALAS, J. A. & JUSTO, J. L. 1975. *Propiedades de los suelos y de las rocas.* Geotecnia y Cimentaciones, Madrid, Rueda.
- JIMENEZ SALAS, J. A., JUSTO, J. L., ROMANA, M. & FARACO, C. 1973. *Colapso de limos y arcillas yesíferas de baja plasticidad en climas áridos y semi áridos.* 8th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Moscú, 193-199.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. 1991, New York. *Soil mechanics,* Jhon Wiley & Sons Inc.
- LU, N. & LIKOS, W. J. 2004. "Unsaturated Soils Mechanics", New Jersey., Jhon Wiley & Sons Inc.
- MARINHO, F. A. M. O., O. M. 2011. *Mechanical behaviour of an unsaturated compacted residual soil.*
- MASCARENHA, M. M. A., CORDÃO-NETO, M. P., & ROMERO, E. 2011. *Influence of the microstructure on the hydro-mechanical behaviour of a natural silty clay.* PhD thesis, Imperial College, London.
- MCKEE, C. R. & BUMB, A. C. 1984. *The importance of unsaturated flow parameters in desingning a monitoring aystem for hazardous wastes and evironmental emergencies.* In *Proceedings. Hzardous.* Houston, Tex, 50 - 58.
- MEZA OCHOA, V. E. 2012. *Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. . Boletín de Ciencias de la tierra.* Medellín, ISSN0120-3630.
- MONZÓN 1976. *Suelos Expansivos en Voluntad Hidráulica.* 40.
- MORGENSTERN, N. R. & BALASUBRAMANIAN, B. 1980. *Effect of pore fluid on the swelling of clay-shale.* Proc. 4th ICES. Denver, 1, 190 - 205.
- NC-19 1999. "Geotecnia. Determinación del peso específico de los suelos". Oficina Nacional de Normalización, .
- NC-20 1999. "Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos". Oficina Nacional de Normalización.
- NC-054-141 1978. *Geotecnia. Proctor Estándar y Proctor Modificado. . La Habana, Cuba.: Oficina Nacional de Normalización.*
- NC-54-142 1985. *Geotecnia. Compactación Estática.* Oficina Nacional de Normalización,, 1-8.

- NC-58 2000. "Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos". La Habana, Cuba.: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-59 2000. "Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos". La Habana, Cuba.: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-325 2004. Geotecnia. Determinación de la Resistencia al Esfuerzo Cortante Directo. (Aparato de Caja de Corte Pequeño), La Habana, Oficina Nacional de Normalización. ICS: 93.020.
- NC-XX 2004. Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, Santa Clara, UCLV.
- NC. 2006. Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos.(ASTM D 2435:96, MOD).", La Habana, Cuba., Oficina Nacional de Normalización.
- OTÁLVARO 2013. Comportamiento Hidromecánico de un Suelo Tropical Compactado.
- PADILLA, J. I. V. 2012. Ensayos de laboratorio para suelos parcialmente saturados, revisión de técnicas y equipamientos. Tesis de Maestría. Madrid, España.
- PADILLA, R. H. L. M. A. M. G. 2014. Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos. Ciencia y Tecnología, 4.
- PÉREZ, Y. L. 2014. Análisis de las deformaciones en los suelos parcialmente saturados en Cuba., Santa Clara, Cuba.
- PÉREZ. G.N 2008. DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN SUELOS NO SATURADOS CON CELDAS DE PRESIÓN Publicación Técnica, 313, Sanfandila, Qro.
- PERUCHO, M., A. 2008. CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)
- PILE, K. C. 1984. The relation between matrix and solute suction, swelling pressure, and magnitude of swelling in reactive clays. Proc. 5th ICES, Adelaida, 197 - 201.
- POUSADA PRESA, E. 1984. Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succión controlada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- REGINATTO, A. R. & FERRERO, J. C. 1973. Collapse potential of soils and soil water chemistry. Proc. 8th ICSMF, Moscú, 2.2, 177 - 183.
- RICHARDS, B. G., PETER, P. & MARTIN, R. 1984. The determination of volume change properties in expansive soils. Proc. 5th ICES, Adelaida, 179 - 186.
- ROJAS, G., E. 2012. La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados. Santiago de Querétaro, México: Ciencia@UAQ.
- ROMERO, E. 1999. Thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Barcelona: Ph. D. Thesis. Technical University of Catalunya.
- SCHIAVA, R, E. V. 2008. Formulación constitutiva y validación numérica del comportamiento mecánico de suelos no saturados. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.

- SIMMONS, N. M., B. 2001. *A Short Course of Foundation Engineering*. Thomas Telford Publishing, London.
- SREEDEEP, S., & SINGH, D. N. 2006. *Methodology for determination of osmotic suction of soils*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1469–1479. .
- STANDING, J. R. 2011. *The development of unsaturated soil mechanics at Imperial College*. *Theory and Practice 2011*, London 119–138.
- TANG, A. M. & CUI, Y. J. 2005. *Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay*. *Can Geotech J* 42: 287-296.
- TERZAGHI, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*, New York, USA., John Wiley and Sons.
- TESSIER, D. 1984. *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la rehumectation*. Paris, France, Ph.D. thesis, Université de Paris VII.
- TRISTA, J. G. 2015 *Estudio del comportamiento tenso-deformacional y de la capacidad resistente de suelos parcialmente saturados*, La Habana, Cuba.
- VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Science Society of America J.*.
- VANAPALLI, S. K., & TAEK, W. 2010. *A model for predicting the modulus of elasticity of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 425–433.
- VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D., & PUF AHL, D. E. 1999. *The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till*. *Géotechnique*, 49(2), 143 – 159. .
- VILLAR, M. 2000. *Caracterización termo hidro-mecánica de una bentinita de Cabo de Gata*. Madrid, España, Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- WON TAEK OH, A. M. A. S. K. V. 2013. *Interpretation of the Bearing Capacity of Unsaturated Fine-Grained Soil Using the Modified Effective and the Modified Total Stress Approaches*. *American Society of Civil Engineers*.
- ZHANG, H. F. Z. L. M. 2013. *Bimodal Shear-Strength Behavior of Unsaturated Coarse-Grained Soils*.
- ZHANG, H. F. Z. L. M. 2014. *Instability of Saturated and Unsaturated Coarse Granular Soils*.

*Anexos*

## Anexo 2.1 Resultados de las Granulometría de los suelos objeto de estudio Villa Clara (Tamizado)

Tabla A- 1.1.a Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 1

Granulometría # 1				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	44,7	100
2"	50,00	0,00	44,7	100
1.5"	37,50	0,00	44,7	100
1"	25,00	0,00	44,7	100
3/4"	19,00	0,00	44,7	100
3/8"	9,50	0,00	44,7	100
No 4	4,75	0,00	44,7	100
No10	2,00	0,00	44,7	100
No 20	0,85	0,11	44,6	100
No 40	0,43	0,19	44,4	99
No 60	0,25	0,33	44,0	99
No 140	0,11	0,65	43,4	97
No 200	0,074	0,10	43,3	97

Tabla A- 1.1.b Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 2

Granulometría # 2				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	46,0	100
2"	50,00	0,00	46,0	100
1.5"	37,50	0,00	46,0	100
1"	25,00	0,00	46,0	100
3/4"	19,00	0,00	46,0	100
3/8"	9,50	0,00	46,0	100
No 4	4,75	0,00	46,0	100
No10	2,00	0,00	46,0	100
No 20	0,85	0,59	45,4	98,72
No 40	0,43	0,30	45,1	98,06
No 60	0,25	0,40	44,7	97,19
No 140	0,11	0,78	43,9	95,50
No 200	0,074	0,90	43,0	93,54

Tabla A- 1.1.c Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 3

Granulometría # 3				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	44,7	100
2"	50,00	0,00	44,7	100
1.5"	37,50	0,00	44,7	100
1"	25,00	0,00	44,7	100
3/4"	19,00	0,00	44,7	100
3/8"	9,50	0,00	44,7	100
No 4	4,75	0,00	44,7	100
No10	2,00	0,00	44,7	100
No 20	0,85	0,42	44,3	99
No 40	0,43	0,32	44,0	98
No 60	0,25	0,27	43,7	98
No 140	0,11	1,20	42,5	95
No 200	0,074	0,60	41,9	94

Tabla A- 1.1.d Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 4

Granulometría # 4				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	45,4	100
2"	50,00	0,00	45,4	100
1.5"	37,50	0,00	45,4	100
1"	25,00	0,00	45,4	100
3/4"	19,00	0,00	45,4	100
3/8"	9,50	0,00	45,4	100
No 4	4,75	0,00	45,4	100
No10	2,00	0,00	45,4	100
No 20	0,85	0,27	45,1	99
No 40	0,43	0,30	44,8	99
No 60	0,25	0,31	44,5	98
No 140	0,11	0,85	43,7	96
No 200	0,074	0,60	43,1	95

Tabla A- 1.1.e Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 5

Granulometría # 5				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	44,4	100
2"	50,00	0,00	44,4	100
1.5"	37,50	0,00	44,4	100
1"	25,00	0,00	44,4	100
3/4"	19,00	0,00	44,4	100
3/8"	9,50	0,00	44,4	100
No 4	4,75	0,00	44,4	100
No10	2,00	0,00	44,4	100
No 20	0,85	0,12	44,3	100
No 40	0,43	0,15	44,1	99
No 60	0,25	0,35	43,8	99
No 140	0,11	0,97	42,8	96
No 200	0,074	0,57	42,2	95

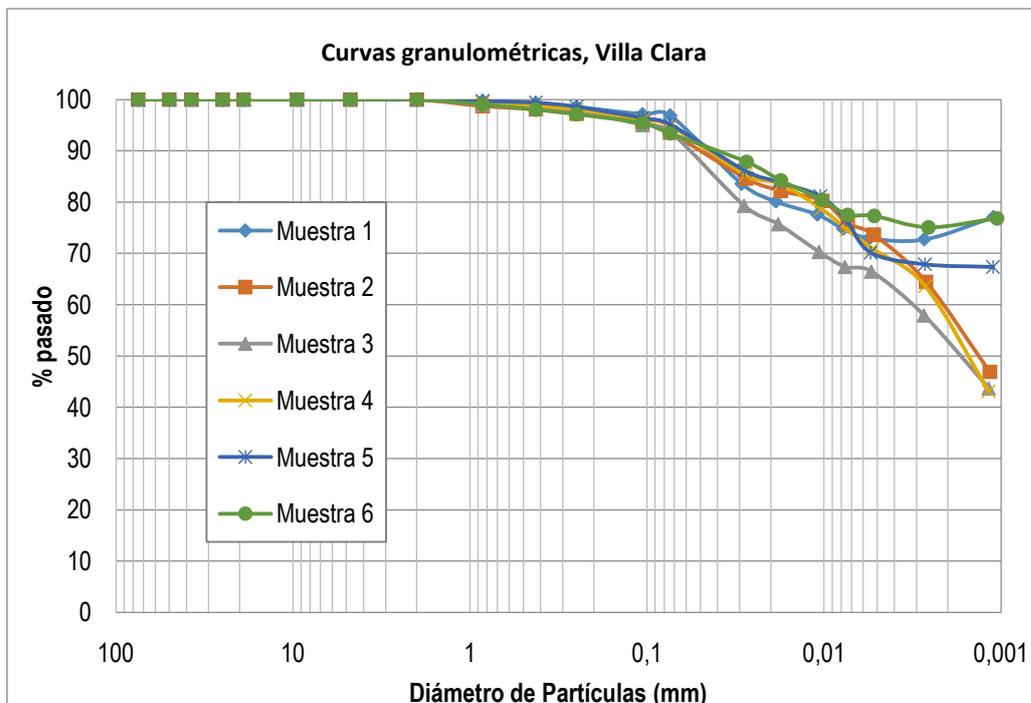
Tabla A- 1.1.f Granulometría del suelo Villa Clara, muestra 6

Granulometría # 6				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	45,0	100
2"	50,00	0,00	45,0	100
1.5"	37,50	0,00	45,0	100
1"	25,00	0,00	45,0	100
3/4"	19,00	0,00	45,0	100
3/8"	9,50	0,00	45,0	100
No 4	4,75	0,00	45,0	100
No10	2,00	0,00	45,0	100
No 20	0,85	0,43	44,5	99,04
No 40	0,43	0,46	44,1	98,02
No 60	0,25	0,40	43,7	97,13
No 140	0,11	0,78	42,9	95,40
No 200	0,074	0,90	42,0	93,39

## Villa Clara (Hidrómetro)

**Tabla A - 1.1.g Hidrómetro del suelo Villa Clara**

Muestra #1		Muestra #2		Muestra #3	
% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)
84	0,02919	85	0,02752	79	0,02832
80	0,01869	82	0,01757	76	0,01815
78	0,01089	80	0,01022	70	0,01068
75	0,00777	76	0,00735	67	0,00763
73	0,00553	74	0,00524	66	0,00541
73	0,00271	64	0,00265	58	0,00272
77	0,00110	47	0,00116	44	0,00117
Muestra #4		Muestra #5		Muestra #6	
% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)
85	0,02765	86	0,02820	88	0,02737
84	0,01761	84	0,01798	84	0,01755
79	0,01036	81	0,01049	80	0,01028
75	0,00743	77	0,00754	78	0,00735
71	0,00533	70	0,00545	77	0,00520
64	0,00268	68	0,00269	75	0,00257
43	0,00118	67	0,00111	77	0,00105



**Figura A - 1.1.a. Curva granulométrica del suelo Villa Clara**

**Ciego de Ávila (Tamizado)**

Tabla B- 1.1.a Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 1

Granulometría # 1				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	473	100
2"	50,00	0,00	473	100
1.5"	37,50	0,00	473	100
1"	25,00	0,00	473	100
3/4"	19,00	0,00	473	100
3/8"	9,50	0,00	473	100
No 4	4,75	0,00	473	100
No10	2,00	4,56	468	99
No 20	0,85	1,07	46	97
No 40	0,43	2,07	44	92
No 60	0,25	2,14	42	88
No 140	0,11	2,26	40	83
No 200	0,074	0,40	39	82

Tabla B- 1.1.b Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 2

Granulometría # 2				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	472	100
2"	50,00	0,00	472	100
1.5"	37,50	0,00	472	100
1"	25,00	0,00	472	100
3/4"	19,00	0,00	472	100
3/8"	9,50	0,00	472	100
No 4	4,75	0,30	472	99,93
No10	2,00	3,35	468	99,22
No 20	0,85	1,30	46	96,49
No 40	0,43	1,38	44	93,59
No 60	0,25	1,44	43	90,56
No 140	0,11	2,41	41	85,49
No 200	0,074	0,73	40	83,95

Tabla B- 1.1.c Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 3

Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	485	100
2"	50,00	0,00	485	100
1.5"	37,50	0,00	485	100
1"	25,00	0,00	485	100
3/4"	19,00	0,00	485	100
3/8"	9,50	0,00	485	100
No 4	4,75	1,28	484	100
No10	2,00	14,31	470	97
No 20	0,85	3,01	45	91
No 40	0,43	1,42	44	88
No 60	0,25	1,53	42	85
No 140	0,11	1,56	41	82
No 200	0,074	0,25	40	81

Tabla B- 1.1.d Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 4

Granulometría # 4				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	490	100
2"	50,00	0,00	490	100
1.5"	37,50	0,00	490	100
1"	25,00	0,00	490	100
3/4"	19,00	0,00	490	100
3/8"	9,50	0,00	490	100
No 4	4,75	2,16	487	100
No10	2,00	21,04	466	95
No 20	0,85	6,00	43	84
No 40	0,43	1,69	41	80
No 60	0,25	1,99	39	76
No 140	0,11	2,02	37	72
No 200	0,074	0,26	37	72

Tabla B- 1.1.e Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 5

Muestra # 5				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	483	100
2"	50,00	0,00	483	100
1.5"	37,50	0,00	483	100
1"	25,00	0,00	483	100
3/4"	19,00	0,00	483	100
3/8"	9,50	1,34	481	100
No 4	4,75	0,90	481	100
No10	2,00	27,08	453	94
No 20	0,85	5,43	43	83
No 40	0,43	1,54	42	80
No 60	0,25	2,00	40	77
No 140	0,11	1,97	38	73
No 200	0,074	0,28	37	72

Tabla B- 1.1.e Granulometría del suelo Ciego de Ávila, muestra 5

Muestra # 6				
Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
3"	75,00	0,00	475	100
2"	50,00	0,00	475	100
1.5"	37,50	0,00	475	100
1"	25,00	0,00	475	100
3/4"	19,00	0,00	475	100
3/8"	9,50	0,00	475	100
No 4	4,75	0,00	475	100
No10	2,00	7,01	468	98,52484
No 20	0,85	2,40	45	93,56682
No 40	0,43	1,54	44	90,38543
No 60	0,25	2,03	42	86,19177
No 140	0,11	1,92	40	82,22536
No 200	0,074	0,21	40	81,79153

## Ciego de Ávila (Hidrómetro)

Tabla B - 1.1.f Hidrómetro del suelo Ciego de Ávila

Muestra #1		Muestra #2		Muestra #3	
% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)
56,44	0,027	57	0,028	60	0,027
54,42	0,017	55	0,018	58	0,017
52,40	0,010	53	0,010	56	0,010
50,38	0,007	52	0,007	55	0,007
47,92	0,005	51	0,005	52	0,005
43,87	0,003	47	0,003	48	0,003
36,93	0,001	42	0,001	43	0,001
Muestra #4		Muestra #5		Muestra #6	
% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)	% Fino real	Diám (mm)
53	0,027	56	0,027	65	0,026
51	0,017	54	0,017	63	0,017
49	0,010	53	0,010	62	0,010
47	0,007	52	0,007	61	0,007
45	0,005	51	0,005	60	0,005
43	0,003	48	0,002	59	0,002
38	0,001	43	0,001	55	0,001

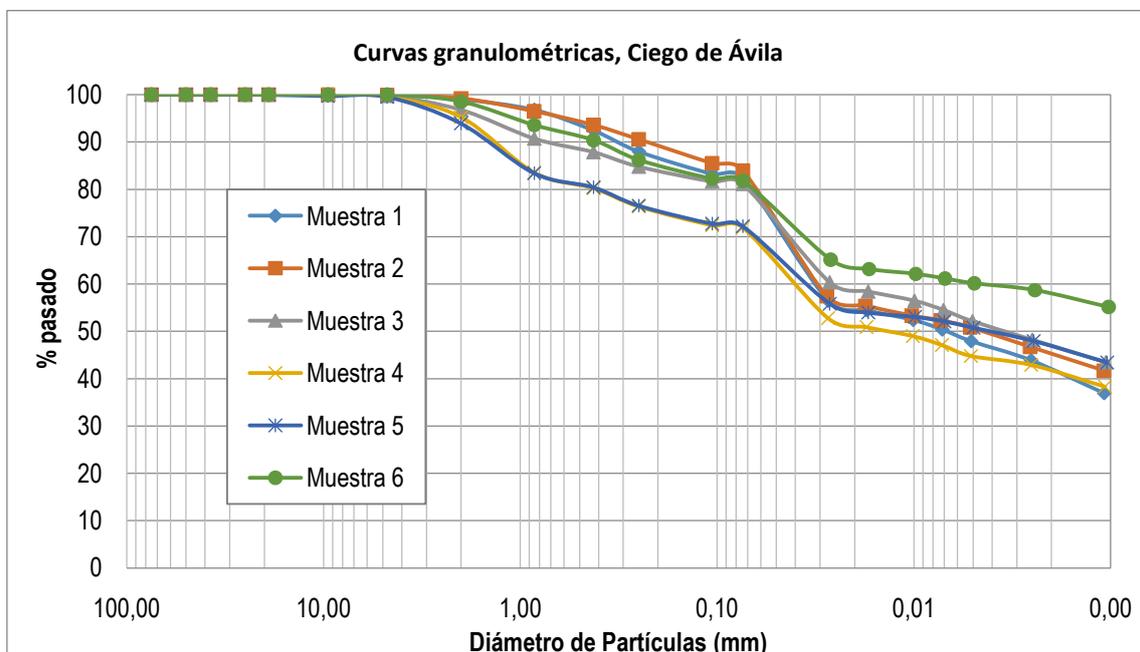


Figura B - 1.1.b. Curva granulométrica del suelo Ciego de Ávila

## Anexo 2.2. Resultados de los Límites de consistencia de los suelos objeto de estudio.

### Villa Clara

Tabla A - 2.2.a Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 1	Límite Líquido					Límite Plástico	
N° DE GOLPES	35	30	25	21	16		
PESAFILTRO	2	136	177	98	147	93	176
MASA HUMEDA (g)	28,16	29,59	29,83	28,69	29,59	27,38	27,28
MASA SECA (g)	23,03	24,68	23,75	23,32	23,58	25,20	24,98
TARA	17,76	19,67	17,86	18,09	17,88	17,77	17,21
% HUMEDAD	97,3	98,0	103,2	102,7	105,4	29,3	29,6
<b>RESULTADOS FINALES</b>							
LL	101	LP	29,5	IP	71,5		

Tabla A - 2.2.b Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 2	Límite Líquido					Límite Plástico	
N° DE GOLPES	35	30	25	21	16		
PESAFILTRO	72	25	132	127	122	105	146
MASA HUMEDA (g)	29,89	28,69	32,36	27,33	29,23	31,65	33,35
MASA SECA (g)	24,52	23,41	25,61	22,72	23,67	28,14	29,43
TARA	18,32	17,4	17,97	17,44	17,61	17,49	17,47
% HUMEDAD	86,6	87,9	88,4	87,3	91,7	33,0	32,8
<b>RESULTADOS FINALES</b>							
LL	88,7	LP	32,9	IP	55,8		

Tabla A - 2.2.c Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 3	Límite Líquido					Límite Plástico	
N° DE GOLPES	35	30	25	20	15		
PESAFILTRO	55	170	114	32	147	115	173
MASA HUMEDA (g)	31,11	32,74	30,99	29,65	30,66	33,20	33,70
MASA SECA (g)	24,4	25,8	25,35	23,82	24,53	30,11	30,95
TARA	16,49	17,91	18,81	17,34	17,88	16,85	19,08
% HUMEDAD	84,8	88,0	86,2	90,0	92,2	23,3	23,2
<b>RESULTADOS FINALES</b>							
LL	88	LP	23,2	IP	64,8		

Tabla A - 2.2.d Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 4	Límite Líquido					Límite Plástico	
N° DE GOLPES	35	30	25	21	16		
PESAFILTRO	40	32	25	126	166	89	117
MASA HUMEDA (g)	30,38	32,26	29,07	30,01	29,44	29,88	28,83
MASA SECA (g)	25,21	25,27	23,1	24,33	23,6	27,23	26,43
TARA	19,3	17,34	16,49	18,08	17,43	17,92	17,96
% HUMEDAD	87,5	88,1	90,3	90,9	94,7	28,5	28,3
<b>RESULTADOS FINALES</b>							
LL	90	LP	28,4	IP	61,6		

Tabla A - 2.2.e Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 5	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	35	30	25	21	16		
PESAFILTRO	114	77	156	89	138	21	76
MASA HUMEDA (g)	31,58	28,58	30,43	30,08	28,43	26,96	25,85
MASA SECA (g)	25,37	22,87	24,24	24,14	23,2	24,77	23,99
TARA	18,81	16,97	17,85	18,02	17,8	17,50	17,78
% HUMEDAD	94,7	96,8	96,9	97,1	96,9	30,1	30,0
RESULTADOS FINALES							
LL	96,5	LP	30	IP	66,5		

Tabla A - 2.2.f Límites de consistencia suelo Villa Clara.

Muestra 6	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	35	30	25	21	16		
PESAFILTRO	116	170	120	69	17	59	149
MASA HUMEDA (g)	28,37	32,08	29,01	31,45	33,06	28,26	27,40
MASA SECA (g)	23,24	25,28	23,39	24,8	25,82	25,79	25,49
TARA	17,61	17,91	17,32	17,67	18,06	17,62	19,20
% HUMEDAD	91,1	92,3	92,6	93,3	93,3	30,2	30,4
RESULTADOS FINALES							
LL	93	LP	30,3	IP	62,7		

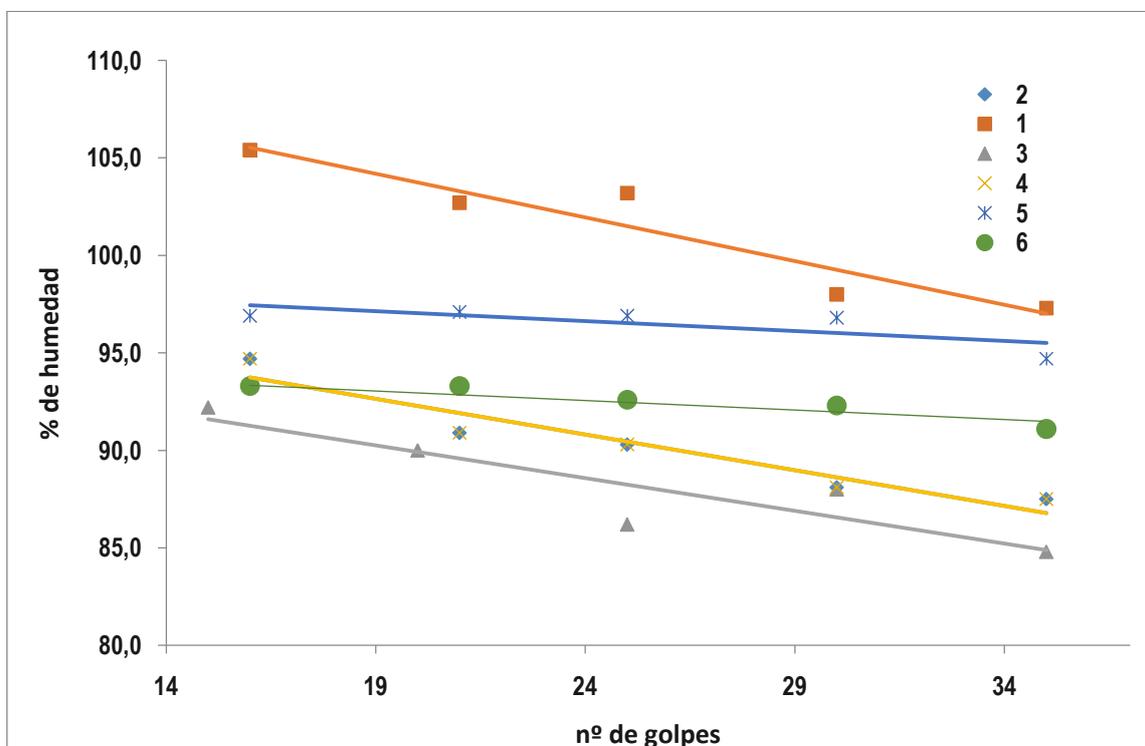


Figura A - 2.2.a. Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

## Ciego de Ávila

Tabla B - 2.2.a Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 1	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	37	31	24	17	11		
PESAFILTRO	221	21	149	83	214	28	42
MASA HUMEDA (g)	46.42	46.51	46.85	46.22	46.21	48,43	48,21
MASA SECA (g)	38.98	38.22	38.99	37.42	37.48	43,27	43,09
TARA	22.17	20.43	23.05	19.76	20.52	22,43	22,09
% HUMEDAD	44,3	46,6	49,3	49,8	51,5	24,8	24,4
RESULTADOS FINALES							
LL	48,9		LP	24,6		IP	24,3

Tabla B - 2.2.b Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 2	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	39	32	25	19	13		
PESAFILTRO	232	363	231	207	133	397	247
MASA HUMEDA (g)	45,89	45,51	45,62	45,28	45,45	44,62	46,31
MASA SECA (g)	36,77	36,74	36,73	36,24	36,56	39,68	41,40
TARA	20,61	21,56	21,57	21,03	22,20	20,74	22,42
% HUMEDAD	56,4	57,8	58,6	59,4	61,9	26,1	25,9
RESULTADOS FINALES							
LL	58,7		LP	26		IP	32,7

Tabla B - 2.2.c Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 3	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	39	33	26	20	14		
PESAFILTRO	232	306	231	367	113	180	33
MASA HUMEDA (g)	46,53	46,48	46,35	46,18	46,14	46,22	46,16
MASA SECA (g)	38,74	38,85	38,32	38,45	37,90	41,33	41,26
TARA	20,31	21,27	20,20	22,03	20,96	22,34	21,70
% HUMEDAD	42,3	43,4	44,3	47,1	48,6	25,8	25,1
RESULTADOS FINALES							
LL	45,5		LP	24,5		IP	21

Tabla B - 2.2.d Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 4	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	37	31	24	18	12		
PESAFILTRO	135	218	323	203	229	28	42
MASA HUMEDA (g)	45,69	45,47	45,57	45,75	45,40	48,43	48,21
MASA SECA (g)	38,70	38,20	38,05	38,46	37,34	43,27	43,09
TARA	22,39	21,52	21,09	22,50	20,68	22,43	22,09
% HUMEDAD	42,9	43,6	44,3	45,7	48,4	24,8	24,4
RESULTADOS FINALES							
LL	44,3		LP	25,4		IP	18,9

Tabla B - 2.2.e Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 5	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	37	31	24	18	12		
PESAFILTRO	28	376	357	274	215	37	55
MASA HUMEDA (g)	46,29	46,82	46,43	46,79	45,11	45,87	45,80
MASA SECA (g)	39,12	39,42	38,58	38,71	37,09	41,15	41,08
TARA	21,43	22,83	21,19	21,52	21,00	22,49	22,20
% HUMEDAD	40,5	44,6	45,1	47,0	49,8	25,3	25,0
RESULTADOS FINALES							
LL	44,8		LP	25,1		IP	19,7

Tabla B - 2.2.f Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

Muestra 6	Límite Líquido					Límite Plástico	
Nº DE GOLPES	39	33	26	20	14		
PESAFILTRO	240	294	267	206	214	257	345
MASA HUMEDA (g)	46,41	46,61	46,43	46,63	46,26	45,80	45,54
MASA SECA (g)	37,42	37,41	36,89	36,92	36,37	40,85	40,67
TARA	21,79	22,12	21,73	21,93	21,73	21,99	22,19
% HUMEDAD	57,5	60,2	62,9	64,8	67,6	26,2	26,4
RESULTADOS FINALES							
LL	62,7		LP	26,3		IP	36,4

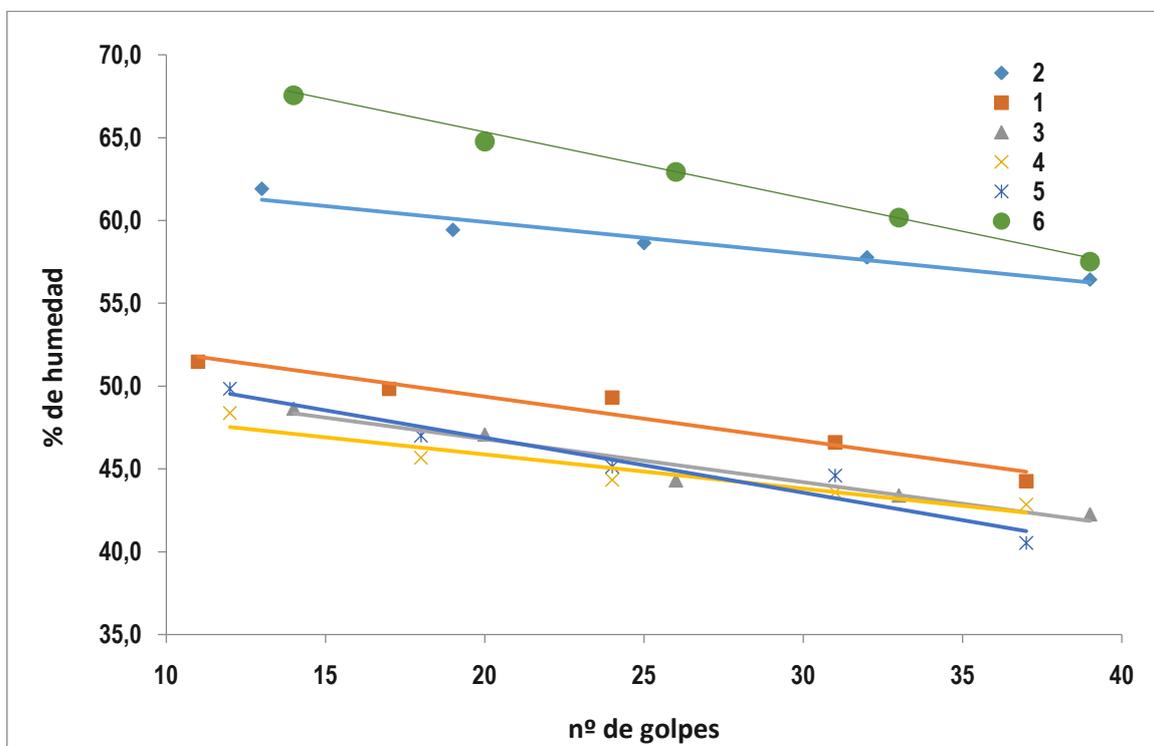


Figura B - 2.2.b. Límites de consistencia suelo Ciego de Ávila.

## Anexo 2.3 Resultados del peso específico de los suelos objeto de estudio.

### Villa Clara

Tabla A - 2.3.a Resultados del peso específico, suelo Villa Clara. T4

MÉTODO DEL PICNÓMETRO						
Tamiz (N°)	4(4.75)					
Picnómetro N°:	14			22		
Temperatura (T)°C:	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
K:	0,9983			0,9983		
Pesa filtro N°:	67			82		
Masa pesafiltro ( Wp )g:	39,18			39,28		
Masa del pesafiltro más suelo ( Wsp)g:	149,22			142,92		
Masa seca (Ws):	110,04			103,64		
Masa del picnómetro con agua (Wpw) g:	652,82			648,82		
Masa del picnómetro más agua, más suelo (Wpsw) g:	723,89			715,80		
Peso específico del suelo que pasa:	2,82			2,82		
Peso específico promedio ( $\gamma_{s2}$ ):	2,82					
PESO ESPECÍFICO DEL SUELO ( $\gamma_s$ ):	2,82					

Tabla A - 2.3.b Resultados del peso específico, suelo Villa Clara. T10.

MÉTODO DEL PICNÓMETRO						
Tamiz (N°)	10(2.00)					
Picnómetro N°:	50			53		
Temperatura (T)°C:	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
K:	0,9983			0,9983		
Pesa filtro N°:	6			264		
Masa pesafiltro ( Wp )g:	24,69			21,39		
Masa del pesafiltro más suelo ( Wsp)g:	61,72			56,13		
Masa seca (Ws):	37,03			34,74		
Masa del picnómetro con agua (Wpw) g:	376,60			356,70		
Masa del picnómetro más agua, más suelo (Wpsw) g:	400,56			379,11		
Peso específico del suelo que pasa:	2,83			2,81		
Peso específico promedio ( $\gamma_{s2}$ ):	2,82					
PESO ESPECÍFICO DEL SUELO ( $\gamma_s$ ):	2,82					

## Ciego de Ávila

Tabla B - 2.3.b Resultados del peso específico, suelo Villa Clara, M1.

MÉTODO DE LA PARAFINA			
	Densidad del líquido utilizado (g/cm <sup>3</sup> )		1,000 g/cm <sup>3</sup>
Nº del espésimen	1	2	3
Masa húmeda del espécimen suspendido en el aire (Wh) (g)	23,4	22,63	22,85
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido (Wp) (g).	25,35	25,02	25,53
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido y sumergido en el agua (Wpw) (g).	9,57	8,76	8,65
Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	16,88	16,34	16,15
Peso específico seco ( $\gamma_s$ )	12,12	11,78	11,59
Determinación de las humedades			
Nº del pesafiltro	19	16	17
Masa húmeda mas tara (WhT) (g)	99,72	96,64	91,17
Masa seca mas tara (WsT) (g)	81,9	80,32	75,98
Tara (T) (g)	36,55	37,37	37,31
Humedad %	39,3	38,7	39,3

Tabla B - 2.3.b Resultados del peso específico, suelo Villa Clara, M2.

MÉTODO DE LA PARAFINA			
	Densidad del líquido utilizado (g/cm <sup>3</sup> )		1,000 g/cm <sup>3</sup>
Nº del espésimen	1	2	3
Masa húmeda del espécimen suspendido en el aire (Wh) (g)	25,85	26,84	26,32
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido (Wp) (g).	27,93	29,4	29,12
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido y sumergido en el agua (Wpw) (g).	10,22	10,36	10,2
Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	16,48	16,28	16,35
Peso específico seco ( $\gamma_s$ )	11,71	11,51	11,57
Determinación de las humedades			
Nº del pesafiltro	11	12	13
Masa húmeda mas tara (WhT) (g)	104,2	98,44	97,38
Masa seca mas tara (WsT) (g)	84,67	80,31	79,81
Tara (T) (g)	36,74	36,46	36,29
Humedad %	40,7	41,3	41,3

Tabla B - 2.3.d Resultados del peso específico, suelo Villa Clara, M3.

MÉTODO DE LA PARAFINA			
Densidad del líquido utilizado (g/cm <sup>3</sup> )		1,000 g/cm <sup>3</sup>	
Nº del espésimen	1	2	3
Masa húmeda del espécimen suspendido en el aire (Wh) (g)	33,6	34,1	29,55
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido (Wp) (g).	36,1	36,92	33
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido y sumergido en el agua (Wpw) (g).	15,2	15,72	12,22
Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	18,21	18,54	17,13
Peso específico seco ( $\gamma_s$ )	13,99	14,24	13,12
Determinación de las humedades			
Nº del pesafiltro	23	24	25
Masa húmeda mas tara (WhT) (g)	98,33	101,24	95,57
Masa seca mas tara (WsT) (g)	84,3	86,65	81,84
Tara (T) (g)	37,73	38,28	36,98
Humedad %	30,1	30,2	30,6

Tabla B - 2.3.e Resultados del peso específico, suelo Villa Clara, M4.

MÉTODO DE LA PARAFINA			
Densidad del líquido utilizado (g/cm <sup>3</sup> )		1,000 g/cm <sup>3</sup>	
Nº del espésimen	1	2	3
Masa húmeda del espécimen suspendido en el aire (Wh) (g)	29,2	32,26	27
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido (Wp) (g).	31,02	34,62	29,78
Masa húmeda del espécimen cubierto con parafina suspendido y sumergido en el agua (Wpw) (g).	11,55	12,76	10,8
Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	16,43	16,46	16,69
Peso específico seco ( $\gamma_s$ )	11,52	11,54	11,74
Determinación de las humedades			
Nº del pesafiltro	6	7	8
Masa húmeda mas tara (WhT) (g)	98,71	95	108,3
Masa seca mas tara (WsT) (g)	80,34	77,89	87,62
Tara (T) (g)	37,19	37,83	38,59
Humedad %	42,6	42,7	42,2

## Anexo 2.4 Resultados del Proctor Estándar de los suelos objeto de estudio.

### Villa Clara

Tabla A - 2.4.c Resultados del Proctor Estándar, suelo Villa Clara.

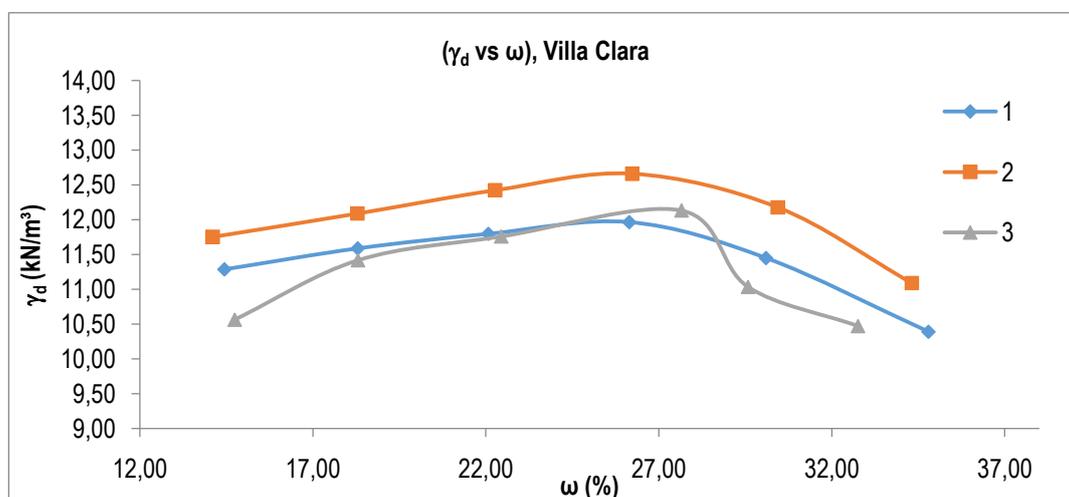
No	Muestra 1											
	1		2		3		4		5		6	
% de agua a añadir	4		8		12		16		20		24	
Masa de la muestra + molde	6600		6680		6750		6820		6800		6710	
Masa de la muestra	1305		1385		1455		1525		1505		1415	
Pesafiltro No	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	60	61
Masa húmeda + recipiente	304,20	341,85	311,85	327,80	310,00	298,00	272,30	281,90	275,64	298,00	231,40	237,70
Masa seca + recipiente	276,00	308,50	275,50	290,00	268,00	258,00	232,50	240,00	230,00	247,00	192,00	196,00
Tara	79,5	79,0	80,0	80,0	77,5	77,0	81,0	79,0	78,0	78,0	77,0	78,0
(%) humedad	14,35	14,53	18,59	18,00	22,05	22,10	26,27	26,02	30,03	30,18	34,26	35,34
(%) humedad promedio	14,44		18,30		22,07		26,15		30,10		34,80	
Peso específico húmedo	12,91		13,71		14,40		15,09		14,89		14,00	
Peso específico seco	11,29		11,59		11,80		11,96		11,45		10,39	

Tabla A - 2.4.b Resultados del Proctor Estándar, suelo Villa Clara

No	Muestra 2											
	1		2		3		4		5		6	
% de agua a añadir	4		8		12		16		20		24	
Masa de la muestra + molde	6650		6740		6830		6910		6900		6800	
Masa de la muestra	1355		1445		1535		1615		1605		1505	
Pesafiltro No	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Masa húmeda + recipiente	254,8	238,3	231,4	233	216,25	219,1	189,3	184,35	187,2	192,8	172,15	183
Masa seca + recipiente	231	217,5	206	207	189	191	163	160	159	163	145	153
Tara	66	66,5	66	66	65,5	66	65	65	65	66,5	65,5	66
(%) humedad	14,42	13,77	18,14	18,44	22,06	22,48	26,84	25,63	30,00	30,88	34,15	34,48
(%) humedad promedio	14,0995		18,2913		22,2724		26,2342		30,4404		34,3169	
Peso específico húmedo	13,4097		14,3004		15,1911		15,9828		15,8838		14,8942	
Peso específico seco	11,7526		12,0891		12,4240		12,6612		12,1771		11,0888	

Tabla A - 2.4.c Resultados del Proctor Estándar, suelo Villa Clara

No	Muestra 3											
	1		2		3		4		5		6	
% de agua a añadir	4		8		12		16		20		24	
Masa de la muestra + molde	6520		6660		6750		6860		6740		6700	
Masa de la muestra	1225		1365		1455		1565		1445		1405	
Pesafiltro No	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Masa húmeda + recipiente	242,15	227,8	212,7	212,7	232,4	215,6	188,7	188,7	196,95	196,95	193,45	193,45
Masa seca + recipiente	219,6	207	190	190	202	188	161,9	161,9	167	167	162	162
Tara	66	66,5	66	66	65,5	66	65	65	65	66,5	66	66
(%) humedad	14,68	14,80	18,31	18,31	22,27	22,62	27,66	27,66	29,36	29,80	32,76	32,76
(%) humedad promedio	14,74		18,31		22,45		27,66		29,58		32,76	
Peso específico húmedo	12,12		13,51		14,40		15,49		14,30		13,90	
Peso específico seco	10,57		11,42		11,76		12,13		11,04		10,47	



## Ciego de Ávila

Volumen (V): 940 cm <sup>3</sup>
No. capas: 3
No. golpes / capas: 25
Peso del martillo: 24,4 N
Caída libre: 304,8 mm
Energía: 591,3 kN-m/m <sup>3</sup>

Tabla B - 2.4.d Resultados del Proctor Estándar, suelo Ciego de Ávila, muestras 1 y 2.

Paso	Muestra 1						Muestra 2					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Peso Húmedo + Tara	7630	7700	7794	7870	7837	7769	7586	7669	7781	7878	7815	7805
Tara	6073	6070	6070	6070	6070	6070	6070	6070	6070	6070	6070	6070
Peso Húmedo	1557	1630	1724	1800	1767	1699	1516	1599	1711	1808	1745	1735
Densidad Húmeda	15,972	16,72	17,685	18,464	18,126	17,428	15,551	16,402	17,551	18,546	17,9	17,798
Pesafiltro	33	11	14	25	5	5	33	11	14	25	70	78
Agua	120 ml	240 ml	360 ml	480 ml	600 ml	720 ml	120 ml	240 ml	360 ml	480 ml	720 ml	840 ml
Peso Húmedo + Tara	122,73	120,42	99,35	122,36	99,38	97,3	110,99	112,23	125,6	115,84	111,54	115,09
Peso Seco + Tara	110,99	107,41	86,56	103,58	82,24	79,7	104,13	102,96	111,52	99,84	94,17	94,5
Tara	31,18	33,73	28,97	32,86	28,99	32,42	29	32,71	34,26	32,44	36,09	34,49
Peso Seco	79,81	73,68	57,59	70,72	53,25	47,28	75,13	70,25	77,26	67,4	58,08	60,01
% Humedad	14,65	17,95	22,74	26,69	32,78	36,71	9,17	13,23	18,09	23,48	29,91	34,39
Densidad Seca	13,93	14,18	14,41	14,57	13,75	12,75	14,25	14,49	14,86	15,02	13,78	13,24

Tabla B - 2.4.b Resultados del Proctor Estándar, suelo Ciego de Ávila, muestras 3 y 4.

Paso	Muestra 3						Muestra 4					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Peso Húmedo + Tara	7608	7684,5	7787,5	7874	7826	7787	7630	7700	7794	7870	7837	7769
Tara	6071,5	6070	6070	6070	6070	6070	6073	6070	6070	6070	6070	6070
Peso Húmedo	1536,5	1614,5	1717,5	1804	1756	1717	1557	1630	1724	1800	1767	1699
Densidad Húmeda	15,761	16,561	17,618	18,505	18,013	17,613	15,972	16,72	17,685	18,464	18,126	17,428
Pesafiltro	<b>33</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>25</b>	<b>70</b>	<b>78</b>	<b>33</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>25</b>	<b>70</b>	<b>78</b>
Agua	120 ml	240 ml	360 ml	480 ml	720 ml	840 ml	120 ml	240 ml	360 ml	480 ml	720 ml	840 ml
Peso Húmedo + Tara	116,86	116,33	112,48	119,1	105,46	106,2	122,73	120,42	99,35	122,36	99,38	97,3
Peso Seco + Tara	107,56	105,19	99,04	101,71	88,21	87,1	110,99	107,41	86,56	103,58	82,24	79,7
Tara	30,09	33,22	31,62	32,65	32,54	33,46	31,18	33,73	28,97	32,86	28,99	32,42
Peso Seco	77,47	71,97	67,43	69,06	55,67	53,65	79,81	73,68	57,59	70,72	53,25	47,28
% Humedad	11,88	15,49	20,07	25,01	30,82	35,45	14,65	17,95	22,74	26,69	31,78	36,71
Densidad Seca	14,09	14,34	14,67	14,8	13,77	13	13,93	14,18	14,41	14,57	13,75	12,75

Tabla B - 2.4.c Resultados del Proctor Estándar, suelo Ciego de Ávila, muestras 5.

Paso	Muestra 5						
	1	2	3	4	5	6	7
Peso Húmedo + Tara	5533	5615	5725	5820	5822	7815	7805
Tara	4043	4043	4043	4043	4043	6070	6070
Peso Húmedo	1490	1572	1682	1777	1779	1745	1735
Densidad Húmeda	15,55	16,406	17,554	18,545	18,566	17,9	17,798
Pesafiltro	<b>33</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>25</b>	<b>70</b>	<b>78</b>	<b>29</b>
Agua	120 ml	240 ml	360 ml	480 ml	600 ml	720 ml	840 ml
Peso Húmedo + Tara	110,99	112,23	125,6	115,84	106,98	111,54	115,09
Peso Seco + Tara	104,3	102,96	111,52	99,84	90,69	94,17	94,5
Tara	29	32,71	34,26	32,44	33,72	36,09	34,49
Peso Seco	75,13	70,25	77,26	67,4	56,97	58,08	60,01
% Humedad	9,17	13,23	18,09	23,48	28,51	29,91	34,39
Densidad Seca	14,24	14,49	14,86	15,02	14,45	13,78	13,24

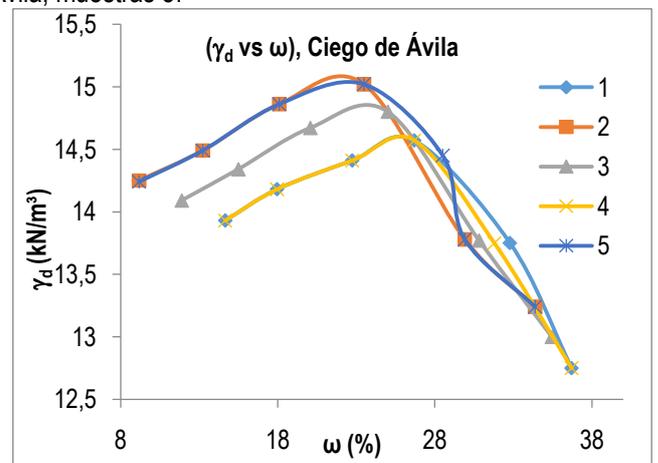


Figura B - 2.4.b. Curvas de ( $\gamma_d$  vs  $\omega$ ) suelo Ciego de Ávila.

## Anexo 2.5 Resultados experimentales del ensayo de succión

### Calibración del papel del filtro

Tabla 2.5.a. Concentraciones de soluciones de sal para evaluar la succión del suelo (ASTM D 5298-10)

Soluciones salinas F#	W Húmedo		W Seco		w arriba	w abajo	w Superior	w Inferior	w promedio	Succión (kpa)	Log succión
	P. Superior	P. Inferior	P. Superior	P. Inferior							
A1	0,3104	0,3042	0,2356	0,2317	0,0748	0,0725	31,75	31,29	31,52	94,58	1,98
B2	0,2849	0,2916	0,2219	0,2262	0,063	0,0654	28,39	28,91	28,65	103,07	2,01
E5	0,2970	0,2906	0,2424	0,2394	0,0546	0,0512	22,52	21,39	21,96	655,09	2,82
F6	0,2902	0,2864	0,2414	0,2373	0,0488	0,0491	20,22	20,69	20,45	989,67	2,995
G7	0,2707	0,2768	0,2359	0,2413	0,0348	0,0355	14,75	14,71	14,73	3075,05	3,49
H8	0,2632	0,2559	0,2368	0,2311	0,0264	0,0248	11,15	10,73	10,94	9663,18	3,99

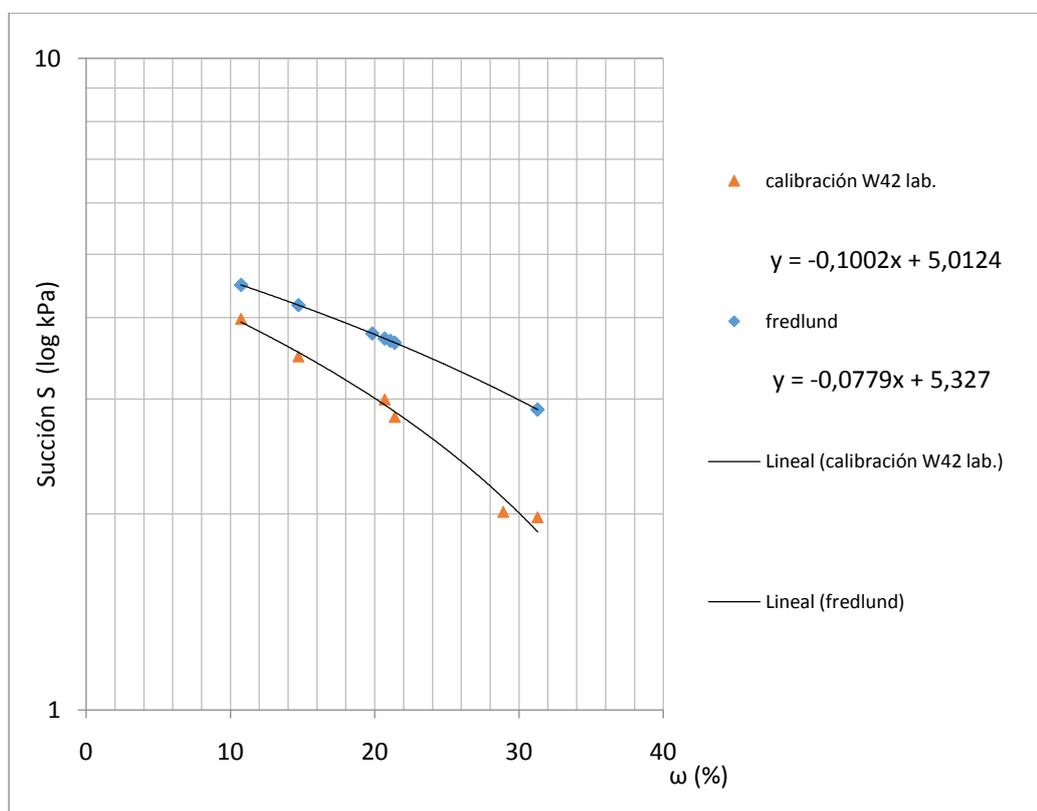


Figura 2.5.a. Curva de calibración obtenida en el laboratorio y la propuesta por Fredlund, que es la que propone la norma.

## Villa Clara 1 (e=0.865)

Tabla A - 2.5.a Humedades de las muestras en secado y en humedecimiento.

Muestras en secado					Muestras en humedecimiento				
Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%	Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%
1	117,9412	202,2182	186,6468	22,66	6	116,9677	204,3928	185,9234	26,78
2	116,7062	204,0857	185,5057	27,01	7	119,5367	201,9955	188,1813	20,12
3	119,6410	202,9478	188,6114	20,79	8	119,7994	203,6812	188,6311	21,87
4	117,3809	200,7546	186,0478	21,42	9	116,3702	200,1666	185,3685	21,45
5	118,9794	201,1591	188,0243	19,02	10	119,4023	199,1361	188,9921	14,58

Tabla A - 2.5.b Succión Matricial en la curva de secado.

Succión Matricial, muestras en secado						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,2932	0,2617	0,0315	10,7435198	3,9359	8.627,7851
2	0,3158	0,2593	0,0565	17,8910703	3,2197	1.658,4973
3	0,3173	0,2683	0,049	15,4427986	3,4650	2.917,6392
4	0,2893	0,2439	0,0454	15,6930522	3,4400	2.753,9508
5	0,2914	0,2509	0,0405	13,8984214	3,6198	4.166,5651

Tabla A - 2.5.c Succión Matricial en la curva de humedecimiento.

Succión Matricial, muestras en humedecimiento						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
6	0,3061	0,2548	0,0513	16,7592	3,3331	2.153,4027
7	0,3111	0,2574	0,0537	17,2613	3,2828	1.917,8501
8	0,3054	0,255	0,0504	16,5029	3,3588	2.284,5713
9	0,3193	0,2619	0,0574	17,9768	3,2111	1.626,0062
10	0,2972	0,2556	0,0416	13,9973	3,6099	4.072,5809

## Villa Clara 2 (e=0.865)

Tabla A - 2.5.d Humedades de las muestras en secado y en humedecimiento.

Muestras en secado					Muestras en humedecimiento				
Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%	Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%
1	117,9412	201,2200	185,7772	22,76	6	116,9677	203,6086	184,8212	27,69
2	116,7062	204,0570	184,5625	28,73	7	119,5367	201,2932	187,3876	20,49
3	119,641	203,4780	187,4979	23,55	8	119,7994	203,7706	187,6593	23,74
4	117,3809	199,7460	185,2365	21,38	9	116,3702	196,9690	184,2264	18,78
5	118,9794	200,5910	186,8330	20,28	10	119,4023	199,9062	187,2616	18,63

Tabla A - 2.5.e Succión Matricial en la curva de secado.

Succión Matricial, muestras en secado						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,4565	0,3847	0,0718	15,728368	3,4364	2731.6026
2	0,3325	0,2738	0,0587	17,6541353	3,2435	1751.6835
3	0,3204	0,2756	0,0448	13,9825218	3,6114	4086.4982
4	0,3302	0,2868	0,0434	13,1435494	3,6954	4959.2540
5	0,3252	0,2851	0,0401	12,3308733	3,7768	5982.0012

Tabla A - 2.5.f Succión Matricial en la curva de humedecimiento.

Succión Matricial, muestras en humedecimiento						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,3239	0,2618	0,0621	19,1726	3,0913	1233.9770
2	0,3204	0,266	0,0544	16,9788	3,3111	2047.0412
3	0,3162	0,2668	0,0494	15,6230	3,4470	2798.8077
4	0,301	0,2711	0,0299	9,9336	4,0171	10400.5859
5	0,315	0,2786	0,0364	11,5556	3,8545	7153.7430

## Ciego de Ávila 1(e=0.7444)

Tabla B - 2.5.b Humedades de las muestras en secado y en humedecimiento.

Muestras en secado					Muestras en humedecimiento				
Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%	Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%
1	174,1474	260,9400	252,2340	11,15	6	167,8637	267,9820	245,9497	28,22
2	168,9299	264,1810	247,0152	21,98	7	171,6634	262,5080	249,7471	16,34
3	170,6467	267,3240	248,7318	23,81	8	173,9868	263,3860	252,0701	14,49
4	167,8587	263,3240	245,9456	22,26	9	170,6232	259,4110	248,7102	13,70
5	173,2903	260,1990	251,3762	11,30	10	169,0959	263,4440	247,1845	20,82

Tabla B - 2.5.c Succión Matricial en la curva de secado.

Succión Matricial, muestras en secado						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,439	0,3128	0,1262	28,74715	2,1319	135,498756
2	0,417	0,309	0,108	25,89928	2,4173	261,391876
3	0,4492	0,3656	0,0836	18,61086	3,1476	1404,72545
4	0,4063	0,3138	0,0925	22,76643	2,7312	538,522483
5	0,3889	0,3135	0,0754	19,38802	3,0697	1174,14207

Tabla B - 2.5.c Succión Matricial en la curva de humedecimiento.

Succión Matricial, muestras en secado						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,439	0,3128	0,1262	28,74715	2,1319	135,498756
2	0,417	0,309	0,108	25,89928	2,4173	261,391876
3	0,4492	0,3656	0,0836	18,61086	3,1476	1404,72545
4	0,4063	0,3138	0,0925	22,76643	2,7312	538,522483
5	0,3889	0,3135	0,0754	19,38802	3,0697	1174,14207

## Ciego de Ávila 2(e=0.7444)

Tabla B - 2.5.d Humedades de las muestras en secado y en humedecimiento.

Muestras en secado					Muestras en humedecimiento				
Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%	Muestras	Wcil	(Wcil+s)h	(Wcil+s)s	w%
1	174,1474	267,1472	252,2372	19,09	6	167,8637	261,5473	245,9452	19,98
2	168,9299	262,1201	247,0148	19,34	7	171,6634	264,1832	249,7528	18,48
3	170,6467	262,5806	248,7306	17,74	8	173,9868	266,5717	252,0735	18,57
4	167,8587	259,2141	245,9403	17,00	9	170,6232	260,7071	248,7115	15,36

Tabla B - 2.5.e Succión Matricial en la curva de secado.

Succión Matricial, muestras en secado						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
6	0,3921	0,2828	0,1093	27,87554	2,2193	165,680233
7	0,3933	0,3021	0,0912	23,18841	2,6889	488,564311
8	0,3663	0,3075	0,0588	16,05242	3,4039	2534,82459
9	0,3785	0,2974	0,0811	21,42668	2,8654	733,577893

Tabla B - 2.5.f Succión Matricial en la curva de humedecimiento.

Succión Matricial, muestras en humedecimiento						
Muestras	W Húmedo	W Seco			P. Inferior	
	P. Inferior	P. Inferior	w abajo	w% Inferior	Log Succión	Succión (kPa)
1	0,3854	0,2496	0,1358	35,2361	1,4817	30,3208
2	0,4103	0,2775	0,1328	32,3666	1,7693	58,7855
3	0,3547	0,264	0,0907	25,5709	2,4502	281,9651
4	0,3591	0,2899	0,0692	19,2704	3,0815	1206,4410

## Anexo 2.6 Resultados del Ensayo de Corte Directo Villa Clara

Tabla A - 2.6.a Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, Prueba 1.

100 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,000
20	0,20	1,0	4,91	53,5	0,535
40	0,40	1,5	7,37	53,5	0,535
60	0,60	2,0	9,82	53,5	0,535
80	0,80	4,0	19,65	54,0	0,540
100	1,00	8,0	39,30	55,0	0,550
120	1,20	14,0	68,77	54,5	0,545
140	1,40	18,0	88,42	51,5	0,515
160	1,60	23,0	112,99	48,0	0,480
180	1,80	27,0	132,64	44,0	0,440
200	2,00	30,0	147,37	39,0	0,390
220	2,20	34,0	167,02	33,0	0,330
240	2,40	36,0	176,85	27,0	0,270
260	2,60	38,0	186,67	20,0	0,200
280	2,80	40,0	196,50	12,0	0,120
300	3,00	42,0	206,32	8,0	0,080
320	3,20	43,0	211,23	-5,0	-0,050
340	3,40	44,0	216,15	-14,0	-0,140
360	3,60	44,0	216,15	-22,0	-0,220
380	3,80	44,0	216,15	-32,0	-0,320
400	4,00	44,0	216,15	-44,0	-0,440
200 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,0	0,0
20	0,2	1	4,90	78,0	0,8
40	0,4	1	4,90	78,0	0,8
60	0,6	2	9,80	79,0	0,8
80	0,8	5	24,49	79,0	0,8
100	1,0	12	58,78	79,5	0,8
120	1,2	19	93,08	79,5	0,8
140	1,4	24	117,57	78,5	0,8
160	1,6	31	151,86	77,5	0,8
180	1,8	36	176,35	77,0	0,8
200	2,0	40	195,95	76,5	0,8
220	2,2	43	210,64	75,0	0,8
240	2,4	46	225,34	73,0	0,7
260	2,6	49	240,04	71,0	0,7
280	2,8	51	249,83	69,0	0,7
300	3,0	53	259,63	65,0	0,7
320	3,2	55	269,43	61,0	0,6
340	3,4	56	274,33	58,0	0,6
360	3,6	57	279,23	53,0	0,5
380	3,8	57	279,23	50,0	0,5
400	4,0	58	284,12	45,0	0,5

300 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,00
20	0,2	1,0	4,94	108,0	1,08
40	0,4	1,0	4,94	108,0	1,08
60	0,6	2,0	9,88	109,0	1,09
80	0,8	3,5	17,29	110,0	1,10
100	1,0	8,0	39,52	111,0	1,11
120	1,2	15,0	74,10	111,0	1,11
140	1,4	22,0	108,68	111,5	1,12
160	1,6	30,0	148,20	112,0	1,12
180	1,8	38,0	187,72	111,5	1,12
200	2,0	40,0	197,60	110,5	1,11
220	2,2	45,0	222,31	109,0	1,09
240	2,4	49,0	242,07	108,5	1,09
260	2,6	52,0	256,89	107,5	1,08
280	2,8	56,0	276,65	106,0	1,06
300	3,0	58,0	286,53	104,0	1,04
320	3,2	60,0	296,41	102,0	1,02
340	3,4	62,0	306,29	101,0	1,01
360	3,6	64,0	316,17	98,5	0,99
380	3,8	65,0	321,11	96,0	0,96
400	4,0	65,0	321,11	94,5	0,95
400 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0	0	0	0	0
20	0,2	1,5	7,36865951	125	1,25
40	0,4	2	9,82487934	125	1,25
60	0,6	3	14,737319	125,5	1,255
80	0,8	10	49,1243967	126,5	1,265
100	1	19	93,3363537	127,5	1,275
120	1,2	28	137,548311	128	1,28
140	1,4	34	167,022949	128,5	1,285
160	1,6	40	196,497587	128,5	1,285
180	1,8	45	221,059785	128	1,28
200	2	49	240,709544	127,5	1,275
220	2,2	53	260,359303	127	1,27
240	2,4	58	284,921501	127	1,27
260	2,6	62	304,57126	126,8	1,268
280	2,8	64	314,396139	126,2	1,262
300	3	68	334,045898	125	1,25
320	3,2	70	343,870777	124	1,24
340	3,4	71	348,783217	122,5	1,225
360	3,6	74	363,520536	121	1,21
380	3,8	75	368,432975	120	1,2
400	4	76	373,345415	119	1,19

Tabla A - 2.6.b Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, Prueba2.

50 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,0	0,000
20	0,2	1	4,93	27,5	0,275
40	0,4	2	9,85	27,5	0,275
60	0,6	5	24,63	30,0	0,300
80	0,8	8	39,41	32,0	0,320
100	1,0	12	59,11	30,0	0,300
120	1,2	17	83,75	26,0	0,260
140	1,4	26	128,08	24,0	0,240
160	1,6	28	137,93	14,0	0,140
180	1,8	30	147,79	6,0	0,060
200	2,0	32	157,64	-5,0	-0,050
220	2,2	33	162,57	-9,0	-0,090
240	2,4	35	172,42	-22,0	-0,220
260	2,6	36	177,34	-50,0	-0,500
280	2,8	36	177,34	-60,0	-0,600
300	3,0	37	182,27	-72,0	-0,720
320	3,2	38	187,20	-90,0	-0,900
340	3,4	40	197,05	-102,0	-1,020
360	3,6	40	197,05	-115,0	-1,150
380	3,8	42	206,90	-120,0	-1,200
400	4,0	42	206,90	-139,0	-1,390
100 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,0	0,00
20	0,2	1	4,91	49,5	0,50
40	0,4	2	9,82	50,0	0,50
60	0,6	2	9,82	52,0	0,52
80	0,8	5	24,56	53,0	0,53
100	1,0	10	49,12	55,0	0,55
120	1,2	16	78,60	55,5	0,56
140	1,4	21	103,16	54,0	0,54
160	1,6	27	132,64	51,0	0,51
180	1,8	30	147,37	48,0	0,48
200	2,0	35	171,94	45,0	0,45
220	2,2	38	186,67	40,0	0,40
240	2,4	42	206,32	31,0	0,31
260	2,6	43	211,23	25,0	0,25
280	2,8	45	221,06	16,0	0,16
300	3,0	47	230,88	10,0	0,10
320	3,2	47	230,88	-2,0	-0,02
340	3,4	49	240,71	-11,0	-0,11
360	3,6	50	245,62	-22,0	-0,22
380	3,8	50	245,62	-34,0	-0,34
400	4,0	50	245,62	-45,0	-0,45

150 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,00	0,000
20	0,2	1	4,91	70,00	0,700
40	0,4	2	9,82	70,00	0,700
60	0,6	6	29,47	70,20	0,702
80	0,8	14	68,77	70,50	0,705
100	1,0	19	93,34	70,20	0,702
120	1,2	23	112,99	69,00	0,690
140	1,4	28	137,55	68,00	0,680
160	1,6	31	152,29	65,35	0,654
180	1,8	34	167,02	63,00	0,630
200	2,0	37	181,76	56,00	0,560
220	2,2	38	186,67	55,00	0,550
240	2,4	40	196,50	51,00	0,510
260	2,6	41	201,41	47,00	0,470
280	2,8	42	206,32	42,00	0,420
300	3,0	43	211,23	31,00	0,310
320	3,2	44	216,15	30,00	0,300
340	3,4	44	216,15	25,00	0,250
360	3,6	44	216,15	20,00	0,200
380	3,8	44	216,15	16,00	0,160
400	4,0	44	216,15	8,00	0,080
200 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,0	0,000
20	0,2	1	4,90	94,5	0,945
40	0,4	2	9,80	94,5	0,945
60	0,6	10	48,99	94,8	0,948
80	0,8	18	88,18	96,0	0,960
100	1,0	24	117,57	95,0	0,950
120	1,2	29	142,06	93,5	0,935
140	1,4	33	161,66	92,5	0,925
160	1,6	36	176,35	91,0	0,910
180	1,8	40	195,95	89,0	0,890
200	2,0	43	210,64	86,5	0,865
220	2,2	44	215,54	84,0	0,840
240	2,4	46	225,34	81,0	0,810
260	2,6	48	235,14	78,0	0,780
280	2,8	50	244,93	74,0	0,740
300	3,0	51	249,83	70,0	0,700
320	3,2	52	254,73	66,0	0,660
340	3,4	53	259,63	62,0	0,620
360	3,6	53	259,63	58,0	0,580
380	3,8	53	259,63	54,0	0,540
400	4,0	53	259,63	49,0	0,490

Tabla A - 2.6.b Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, Prueba2.

150 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0,0	0	0,00	0,0	0,000
20	0,2	1	4,87	78,0	0,780
40	0,4	1	4,87	78,5	0,785
60	0,6	1,2	5,85	78,5	0,785
80	0,8	2	9,74	78,5	0,785
100	1,0	4	19,49	78,5	0,785
120	1,2	9	43,84	80,0	0,800
140	1,4	15	73,07	79,0	0,790
160	1,6	26	126,66	78,0	0,780
180	1,8	26	126,66	76,5	0,765
200	2,0	30	146,14	73,0	0,730
220	2,2	36	175,37	70,0	0,700
240	2,4	40	194,85	68,0	0,680
260	2,6	43	209,47	64,5	0,645
280	2,8	45	219,21	61,5	0,615
300	3,0	48	233,83	57,5	0,575
320	3,2	51	248,44	53,0	0,530
340	3,4	52	253,31	47,0	0,470
360	3,6	53	258,18	41,0	0,410
380	3,8	53	258,18	36,0	0,360
400	4,0	54	263,05	27,0	0,270
250 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0	0	0,00	0,0	0,00
20	0,2	1	4,94	97,0	0,97
40	0,4	1	4,94	97,5	0,98
60	0,6	2,5	12,35	98,0	0,98
80	0,8	8	39,52	98,5	0,99
100	1	14	69,16	99,0	0,99
120	1,2	20	98,80	98,0	0,98
140	1,4	27	133,38	97,0	0,97
160	1,6	31	153,14	96,5	0,97
180	1,8	36	177,84	95,5	0,96
200	2	41	202,54	94,0	0,94
220	2,2	44	217,37	93,0	0,93
240	2,4	48	237,13	92,0	0,92
260	2,6	50	247,01	91,0	0,91
280	2,8	52	256,89	89,0	0,89
300	3	54	266,77	87,0	0,87
320	3,2	56	276,65	84,0	0,84
340	3,4	58	286,53	82,0	0,82
360	3,6	59	291,47	79,0	0,79
380	3,8	60	296,41	77,0	0,77
400	4	60	296,41	74,0	0,74

350 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0	0	0,000	0	0
20	0,2	1	4,926	135,5	1,355
40	0,4	1	4,926	135,5	1,355
60	0,6	3,5	17,242	135,5	1,355
80	0,8	14	68,967	137	1,37
100	1	21	103,451	138,5	1,385
120	1,2	28	137,935	139,5	1,395
140	1,4	33	162,566	139,5	1,395
160	1,6	38	187,197	139,5	1,395
180	1,8	42	206,902	139,5	1,395
200	2	46	226,607	139	1,39
220	2,2	49	241,386	138,5	1,385
240	2,4	52	256,165	138,2	1,382
260	2,6	53	261,091	138	1,38
280	2,8	56	275,870	137,5	1,375
300	3	57	280,796	137	1,37
320	3,2	60	295,575	137	1,37
340	3,4	60	295,575	136	1,36
360	3,6	62	305,427	135,5	1,355
380	3,8	62	305,427	134,5	1,345
400	4	62	305,427	134	1,34
450 kPa					
Desplazamiento horizontal (Divisiones)	Desplazamiento horizontal (mm)	Anillo dinamométrico (divisiones)	Esfuerzo tangencial (kPa)	Deformac. vertical acumulada (div.)	Deformac. vertical acumulada (mm)
0	0	0	0,000	0	0
20	0,2	1,5	7,410	173	1,73
40	0,4	2	9,880	173,2	1,732
60	0,6	2	9,880	173,2	1,732
80	0,8	7	34,581	173,2	1,732
100	1	16	79,042	175	1,75
120	1,2	22	108,683	176	1,76
140	1,4	28	138,323	178	1,78
160	1,6	33,5	165,494	177,5	1,775
180	1,8	38	187,724	178	1,78
200	2	42	207,485	178	1,78
220	2,2	46	227,245	178	1,78
240	2,4	51	251,946	178,5	1,785
260	2,6	54	266,766	178,8	1,788
280	2,8	56	276,646	179	1,79
300	3	60	296,407	179	1,79
320	3,2	62	306,287	179,5	1,795
340	3,4	64	316,167	180	1,8
360	3,6	64	316,167	180,5	1,805
380	3,8	67	330,988	181	1,81
400	4	68	335,928	182	1,82

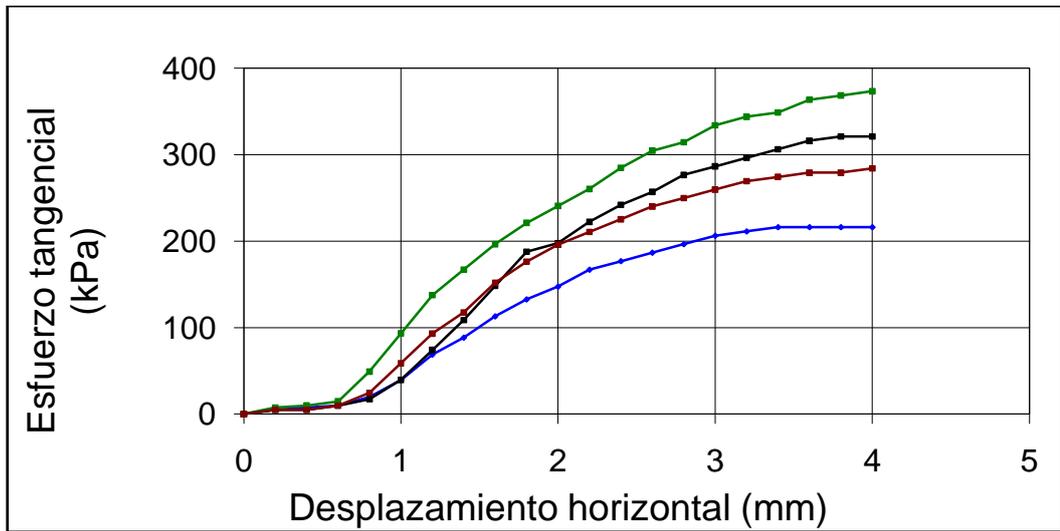


Figura A - 2.6.a. Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Villa Clara Prueba 1.

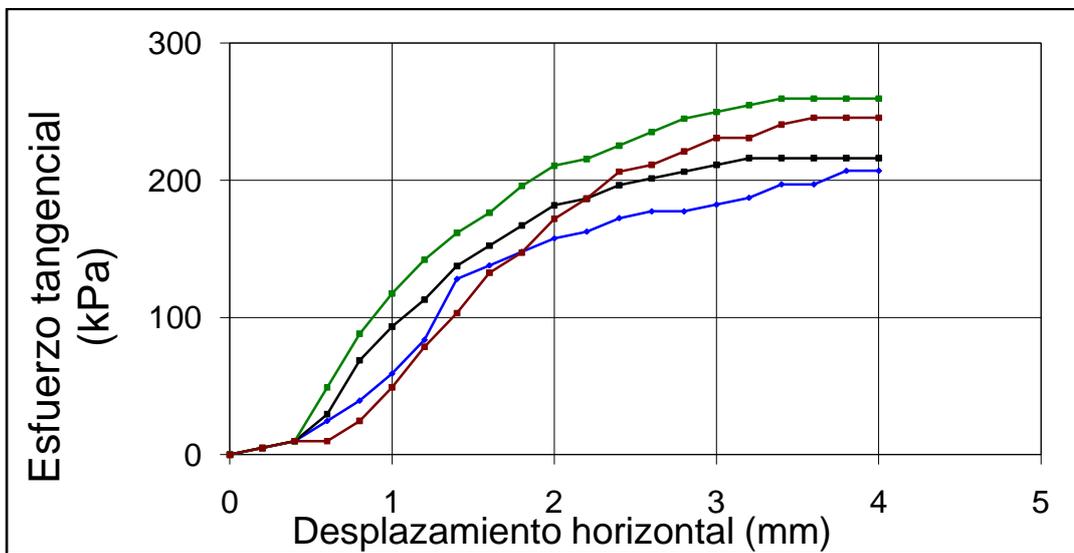


Figura A - 2.6.b Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Villa Clara Prueba 2.

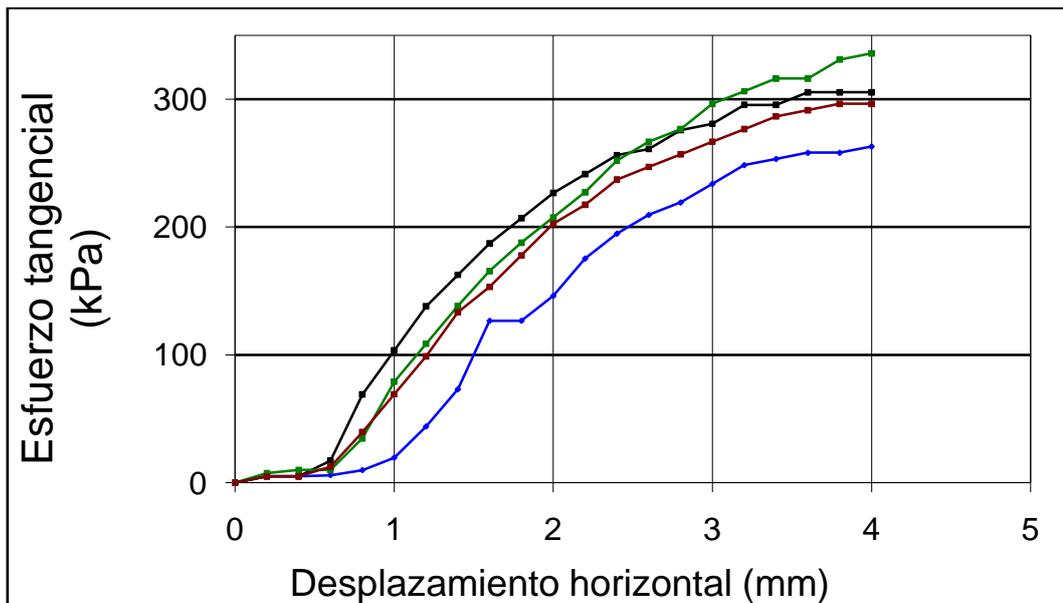


Figura A - 2.6.c Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Villa Clara Prueba 3.

## Ciego de Ávila

Tabla B - 2.6.a Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 1.

Tiempo	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	80,00	163,76	50,71	20,00	0,20	294,00	0,29
30	115,00	235,41	72,90	45,00	0,45	312,00	0,31
45	124,00	253,83	78,60	70,00	0,70	302,00	0,30
60	130,00	266,11	82,40	100,00	1,00	266,00	0,27
75	134,00	274,30	84,94	130,00	1,30	216,00	0,22
90	135,00	276,35	85,57	158,00	1,58	140,00	0,14
105	137,00	280,44	86,84	180,00	1,80	95,00	0,10
120	140,00	286,58	88,74	208,00	2,08	35,00	0,04
135	139,00	284,53	88,11	240,00	2,40	-35,00	-0,04
150	137,00	280,44	86,84	270,00	2,70	-100,00	-0,10
165	135,00	276,35	85,57	305,00	3,05	-140,00	-0,14
180	130,00	266,11	82,40	330,00	3,30	-160,00	-0,16
195	128,00	262,02	81,14	360,00	3,60	-220,00	-0,22
210	126,00	257,92	79,87	385,00	3,85	-253,00	-0,25
225	124,00	253,83	78,60	418,00	4,18	-280,00	-0,28
240	122,00	249,73	77,33	470,00	4,70	-300,00	-0,30
255	119,00	243,59	75,43	535,00	5,35	-340,00	-0,34
270	118,00	241,55	74,80	560,00	5,60	-370,00	-0,37

Tabla B - 2.6.b Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 2.

Tiempo	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	85,00	174,00	54,15	15,00	0,15	255,00	0,26
30	110,00	225,17	70,08	40,00	0,40	280,00	0,28
45	118,00	241,55	75,18	65,00	0,65	283,00	0,28
60	123,00	251,78	78,36	90,00	0,90	281,00	0,28
75	125,00	255,88	79,64	125,00	1,25	273,00	0,27
90	126,00	257,92	80,27	150,00	1,50	263,00	0,26
105	127,00	259,97	80,91	178,00	1,78	247,00	0,25
120	129,00	264,06	82,19	210,00	2,10	231,00	0,23
135	129,50	265,09	82,50	238,00	2,38	228,00	0,23
150	129,00	264,06	82,19	265,00	2,65	198,00	0,20
165	128,00	262,02	81,55	298,00	2,98	195,00	0,20
180	128,00	262,02	81,55	328,00	3,28	191,00	0,19
195	128,00	262,02	81,55	370,00	3,70	187,00	0,19
210	128,00	262,02	81,55	420,00	4,20	175,00	0,18
225	128,00	262,02	81,55	445,00	4,45	174,00	0,17
240	128,00	262,02	81,55	468,00	4,68	168,00	0,17
255	128,00	262,02	81,55	495,00	4,95	166,00	0,17
270	126,00	257,92	80,27	530,00	5,30	165,00	0,17
285	125,00	255,88	79,64	560,00	5,60	165,00	0,17

Tabla B - 2.6.c Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 3.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	60,00	122,82	38,43	6,00	0,06	475,00	0,48
30	160,00	327,52	102,49	35,00	0,35	494,00	0,49
45	190,00	388,93	121,71	55,00	0,55	516,00	0,52
60	205,00	419,64	131,31	74,00	0,74	524,00	0,52
75	210,00	429,87	134,52	102,00	1,02	526,00	0,53
90	214,00	438,06	137,08	120,00	1,20	529,00	0,53
105	220,00	450,34	140,92	150,00	1,50	530,00	0,53
120	222,00	454,43	142,20	180,00	1,80	530,00	0,53
135	224,00	458,53	143,48	210,00	2,10	530,00	0,53
150	224,00	458,53	143,48	250,00	2,50	531,00	0,53
165	224,00	458,53	143,48	290,00	2,90	531,00	0,53
180	220,00	450,34	140,92	340,00	3,40	531,00	0,53
195	218,00	446,25	139,64	380,00	3,80	538,00	0,54
210	218,00	446,25	139,64	410,00	4,10	542,00	0,54
225	217,00	444,20	139,00	460,00	4,60	542,00	0,54
240	216,00	442,15	138,36	470,00	4,70	546,00	0,55
255	216,00	442,15	138,36	510,00	5,10	552,00	0,55
270	215,00	440,11	137,72	540,00	5,40	553,00	0,55
285	214,00	438,06	137,08	560,00	5,60	553,00	0,55

Tabla B - 2.6.d Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 4.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	98,00	200,61	62,26	10,00	0,10	1185,00	1,19
30	155,00	317,29	98,47	30,00	0,30	1225,00	1,23
45	190,00	388,93	120,70	55,00	0,55	1285,00	1,29
60	210,00	429,87	133,41	75,00	0,75	1250,00	1,25
75	226,00	462,62	143,57	100,00	1,00	1290,00	1,29
90	233,00	476,95	148,02	130,00	1,30	1340,00	1,34
105	236,00	483,09	149,93	165,00	1,65	1375,00	1,38
120	240,00	491,28	152,47	196,00	1,96	1400,00	1,40
135	245,00	501,52	155,64	220,00	2,20	1425,00	1,43
150	246,00	503,56	156,28	245,00	2,45	1448,00	1,45
165	248,00	507,66	157,55	275,00	2,75	1460,00	1,46
180	250,00	511,75	158,82	305,00	3,05	1476,00	1,48
195	251,00	513,80	159,46	330,00	3,30	1492,00	1,49
210	252,00	515,84	160,09	360,00	3,60	1495,00	1,50
225	252,50	516,87	160,41	395,00	3,95	1506,00	1,51
240	253,00	517,89	160,73	418,00	4,18	1526,00	1,53
255	253,00	517,89	160,73	450,00	4,50	1530,00	1,53
270	253,00	517,89	160,73	470,00	4,70	1535,00	1,54
285	253,00	517,89	160,73	508,00	5,08	1553,00	1,55
300	253,00	517,89	160,73	540,00	5,40	1563,00	1,56

Tabla B - 2.6.e Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 5.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	48,00	98,26	30,49	12,00	0,12	327,00	0,33
30	68,00	139,20	43,20	42,00	0,42	346,00	0,35
45	78,00	159,67	49,55	68,00	0,68	355,00	0,36
60	85,00	174,00	54,00	89,00	0,89	351,00	0,35
75	90,00	184,23	57,18	120,00	1,20	317,00	0,32
90	94,00	192,42	59,72	154,00	1,54	274,00	0,27
105	96,00	196,51	60,99	175,00	1,75	230,00	0,23
120	98,00	200,61	62,26	195,00	1,95	168,00	0,17
135	101,00	206,75	64,16	225,00	2,25	120,00	0,12
150	102,00	208,79	64,80	265,00	2,65	82,00	0,08
165	104,00	212,89	66,07	295,00	2,95	30,00	0,03
180	104,00	212,89	66,07	312,00	3,12	-18,00	-0,02
195	104,00	212,89	66,07	345,00	3,45	-38,00	-0,04
210	104,00	212,89	66,07	370,00	3,70	-92,00	-0,09
225	103,00	210,84	65,43	395,00	3,95	-110,00	-0,11
240	103,00	210,84	65,43	435,00	4,35	-122,00	-0,12
255	102,00	208,79	64,80	462,00	4,62	-140,00	-0,14
270	102,00	208,79	64,80	486,00	4,86	-169,00	-0,17
285	100,00	204,70	63,53	515,00	5,15	-184,00	-0,18
300	100,00	204,70	63,53	558,00	5,58	-218,00	-0,22

Tabla B - 2.6.f Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 6.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	65,00	133,06	41,20	18,00	0,18	479,00	0,48
30	89,00	182,18	56,42	40,00	0,40	510,00	0,51
45	98,00	200,61	62,12	64,00	0,64	538,00	0,54
60	108,00	221,08	68,46	98,00	0,98	551,00	0,55
75	115,00	235,41	72,90	120,00	1,20	554,00	0,55
90	117,00	239,50	74,16	140,00	1,40	553,00	0,55
105	122,00	249,73	77,33	170,00	1,70	540,00	0,54
120	125,00	255,88	79,23	205,00	2,05	530,00	0,53
135	128,00	262,02	81,14	225,00	2,25	510,00	0,51
150	130,00	266,11	82,40	250,00	2,50	490,00	0,49
165	128,00	262,02	81,14	280,00	2,80	483,00	0,48
180	127,00	259,97	80,50	320,00	3,20	473,00	0,47
195	127,00	259,97	80,50	360,00	3,60	455,00	0,46
210	127,00	259,97	80,50	395,00	3,95	451,00	0,45
225	127,00	259,97	80,50	470,00	4,70	450,00	0,45
240	127,00	259,97	80,50	450,00	4,50	445,00	0,45
255	127,00	259,97	80,50	480,00	4,80	435,00	0,44
270	127,00	259,97	80,50	505,00	5,05	434,00	0,43
285	127,00	259,97	80,50	515,00	5,15	434,00	0,43
300	127,00	259,97	80,50	560,00	5,60	434,00	0,43

Tabla B - 2.6.g Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 7

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	70,00	143,29	44,84	25,00	0,25	1090,00	1,09
30	98,00	200,61	62,77	38,00	0,38	2045,00	2,05
45	112,00	229,26	71,74	62,00	0,62	3045,00	3,05
60	124,00	253,83	79,43	78,00	0,78	3083,00	3,08
75	130,00	266,11	83,27	105,00	1,05	4019,00	4,02
90	135,00	276,35	86,47	138,00	1,38	4048,00	4,05
105	138,00	282,49	88,40	154,00	1,54	4080,00	4,08
120	139,00	284,53	89,04	194,00	1,94	4012,00	4,01
135	140,00	286,58	89,68	220,00	2,20	4046,00	4,05
150	141,00	288,63	90,32	250,00	2,50	4064,00	4,06
165	143,00	292,72	91,60	275,00	2,75	4082,00	4,08
180	144,00	294,77	92,24	330,00	3,30	4096,00	4,10
195	144,00	294,77	92,24	360,00	3,60	5019,00	5,02
210	144,00	294,77	92,24	380,00	3,80	5028,00	5,03
225	144,00	294,77	92,24	418,00	4,18	5031,00	5,03
240	144,00	294,77	92,24	445,00	4,45	5034,00	5,03
255	145,00	296,82	92,88	470,00	4,70	5049,00	5,05
270	145,00	296,82	92,88	505,00	5,05	5040,00	5,04
285	145,00	296,82	92,88	535,00	5,35	5040,00	5,04

Tabla B - 2.6.h Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 8.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	80,00	163,76	50,97	8,00	0,08	2005,00	2,01
30	118,00	241,55	75,18	28,00	0,28	2035,00	2,04
45	135,00	276,35	86,01	56,00	0,56	2068,00	2,07
60	144,00	294,77	91,74	78,00	0,78	3004,00	3,00
75	148,00	302,96	94,29	90,00	0,90	3031,00	3,03
90	153,00	313,19	97,48	115,00	1,15	3042,00	3,04
105	157,00	321,38	100,02	150,00	1,50	3060,00	3,06
120	160,00	327,52	101,94	178,00	1,78	3076,00	3,08
135	161,00	329,57	102,57	205,00	2,05	3080,00	3,08
150	164,00	335,71	104,48	265,00	2,65	3092,00	3,09
165	165,00	337,76	105,12	290,00	2,90	4002,00	4,00
180	168,00	343,90	107,03	310,00	3,10	4010,00	4,01
195	169,00	345,94	107,67	390,00	3,90	4020,00	4,02
210	170,00	347,99	108,31	400,00	4,00	4028,00	4,03
225	172,00	352,08	109,58	440,00	4,40	4028,00	4,03
240	173,00	354,13	110,22	475,00	4,75	4029,00	4,03
255	173,00	354,13	110,22	495,00	4,95	4048,00	4,05
270	173,00	354,13	110,22	520,00	5,20	4050,00	4,05
285	173,00	354,13	110,22	540,00	5,40	4050,00	4,05

Tabla B - 2.6.i Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 9.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	15,00	30,71	9,54	3,00	0,03	135,00	0,14
30	70,00	143,29	44,50	24,00	0,24	145,00	0,15
45	98,00	200,61	62,30	52,00	0,52	162,00	0,16
60	108,00	221,08	68,65	80,00	0,80	162,00	0,16
75	115,00	235,41	73,10	100,00	1,00	135,00	0,14
90	118,00	241,55	75,01	140,00	1,40	105,00	0,11
105	121,00	247,69	76,92	165,00	1,65	55,00	0,06
120	123,00	251,78	78,19	187,00	1,87	-25,00	-0,03
135	125,00	255,88	79,46	230,00	2,30	-70,00	-0,07
150	126,00	257,92	80,10	255,00	2,55	-105,00	-0,11
165	124,00	253,83	78,82	270,00	2,70	-155,00	-0,16
180	123,00	251,78	78,19	310,00	3,10	-190,00	-0,19
195	120,00	245,64	76,28	345,00	3,45	-220,00	-0,22
210	112,00	229,26	71,20	390,00	3,90	-240,00	-0,24
225	109,00	223,12	69,29	400,00	4,00	-270,00	-0,27
240	107,00	219,03	68,02	420,00	4,20	-280,00	-0,28
255	106,00	216,98	67,38	460,00	4,60	-285,00	-0,29
270	103,00	210,84	65,48	485,00	4,85	-290,00	-0,29
285	101,00	206,75	64,20	510,00	5,10	-308,00	-0,31
300	98,00	200,61	62,30	545,00	5,45	-320,00	-0,32

Tabla B - 2.6.j Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 10.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	22,00	45,03	13,96	5,00	0,05	390,00	0,39
30	84,00	171,95	53,31	22,00	0,22	400,00	0,40
45	118,00	241,55	74,89	44,00	0,44	420,00	0,42
60	135,00	276,35	85,68	75,00	0,75	422,00	0,42
75	144,00	294,77	91,39	100,00	1,00	420,00	0,42
90	148,00	302,96	93,93	135,00	1,35	390,00	0,39
105	150,00	307,05	95,20	160,00	1,60	355,00	0,36
120	152,00	311,14	96,47	178,00	1,78	320,00	0,32
135	154,00	315,24	97,74	210,00	2,10	300,00	0,30
150	155,00	317,29	98,38	230,00	2,30	285,00	0,29
165	156,00	319,33	99,01	264,00	2,64	260,00	0,26
180	156,00	319,33	99,01	295,00	2,95	245,00	0,25
195	156,00	319,33	99,01	330,00	3,30	243,00	0,24
210	156,00	319,33	99,01	350,00	3,50	225,00	0,23
225	156,00	319,33	99,01	380,00	3,80	214,00	0,21
240	154,00	315,24	97,74	415,00	4,15	211,00	0,21
255	152,00	311,14	96,47	440,00	4,40	211,00	0,21
270	151,00	309,10	95,84	468,00	4,68	208,00	0,21
285	150,00	307,05	95,20	498,00	4,98	207,00	0,21
300	150,00	307,05	95,20	530,00	5,30	207,00	0,21

Tabla B - 2.6.k Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 11.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	10,00	20,47	6,34	2,00	0,02	630,00	0,63
30	75,00	153,53	47,57	18,00	0,18	655,00	0,66
45	135,00	276,35	85,63	38,00	0,38	670,00	0,67
60	155,00	317,29	98,31	60,00	0,60	695,00	0,70
75	167,00	341,85	105,92	89,00	0,89	710,00	0,71
90	170,00	347,99	107,83	115,00	1,15	725,00	0,73
105	174,00	356,18	110,36	150,00	1,50	733,00	0,73
120	177,00	362,32	112,27	175,00	1,75	732,00	0,73
135	178,00	364,37	112,90	200,00	2,00	732,00	0,73
150	180,00	368,46	114,17	230,00	2,30	740,00	0,74
165	180,00	368,46	114,17	260,00	2,60	743,00	0,74
180	180,00	368,46	114,17	285,00	2,85	743,00	0,74
195	180,00	368,46	114,17	320,00	3,20	750,00	0,75
210	181,00	370,51	114,80	345,00	3,45	758,00	0,76
225	181,00	370,51	114,80	378,00	3,78	758,00	0,76
240	181,00	370,51	114,80	400,00	4,00	758,00	0,76
255	182,00	372,55	115,44	435,00	4,35	760,00	0,76
270	182,00	372,55	115,44	460,00	4,60	773,00	0,77
285	182,00	372,55	115,44	485,00	4,85	773,00	0,77
300	182,00	372,55	115,44	520,00	5,20	787,00	0,79

Tabla B - 2.6.l Valores de deformación vertical y esfuerzo tangencial, M 12.

Tiempo (Seg)	Fuerza Horizontal		Esfuerzo Tangencial t (kPa)	Desplazamiento Horizontal		Desplazamiento Vertical	
	Lectura (div.)	Fuerza (N)		Lectura (div.)	Deformación (mm)	Lectura (div.)	Deformación (mm)
15	98,00	200,61	62,59	7,00	0,07	1090,00	1,09
30	155,00	317,29	99,00	28,00	0,28	1120,00	1,12
45	178,00	364,37	113,69	58,00	0,58	1170,00	1,17
60	189,00	386,88	120,72	85,00	0,85	1225,00	1,23
75	195,00	399,17	124,55	105,00	1,05	1275,00	1,28
90	197,00	403,26	125,83	140,00	1,40	1305,00	1,31
105	197,00	403,26	125,83	165,00	1,65	1325,00	1,33
120	200,00	409,40	127,74	195,00	1,95	1345,00	1,35
135	202,00	413,49	129,02	220,00	2,20	1370,00	1,37
150	203,00	415,54	129,66	250,00	2,50	1385,00	1,39
165	203,00	415,54	129,66	284,00	2,84	1395,00	1,40
180	205,00	419,64	130,94	306,00	3,06	1410,00	1,41
195	205,00	419,64	130,94	340,00	3,40	1425,00	1,43
210	205,00	419,64	130,94	368,00	3,68	1427,00	1,43
225	205,00	419,64	130,94	390,00	3,90	1435,00	1,44
240	205,00	419,64	130,94	428,00	4,28	1450,00	1,45
255	205,00	419,64	130,94	452,00	4,52	1455,00	1,46
270	205,00	419,64	130,94	480,00	4,80	1455,00	1,46
285	205,00	419,64	130,94	510,00	5,10	1465,00	1,47
300	205,00	419,64	130,94	540,00	5,40	1472,00	1,47

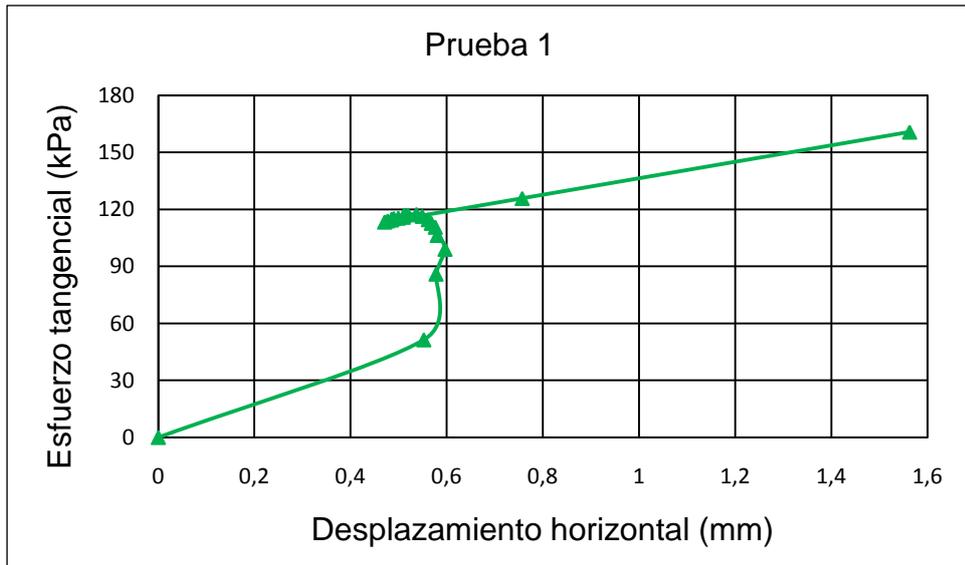


Figura B - 2.6.a Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Ciego de Ávila Prueba 1.

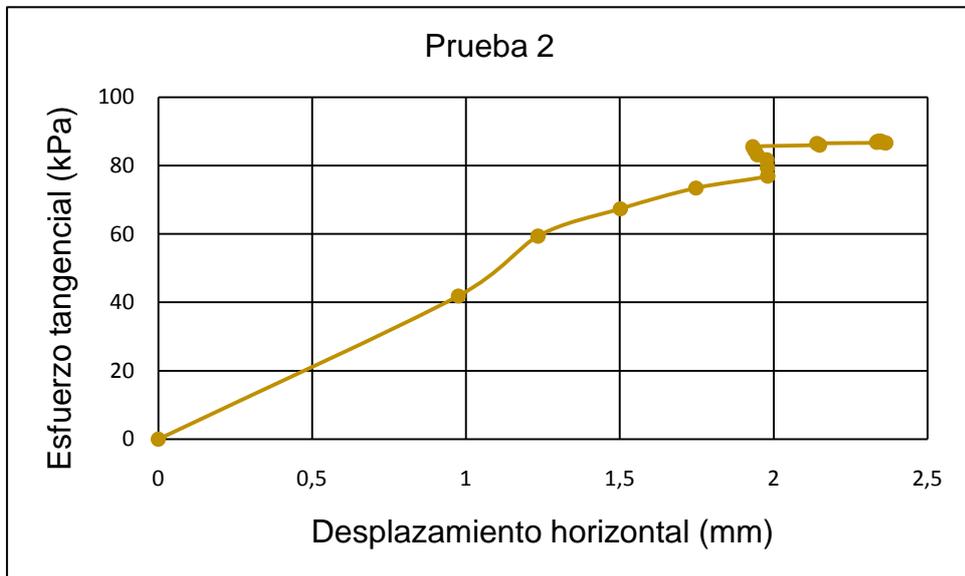


Figura B - 2.6.b Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Ciego de Ávila Prueba 2.

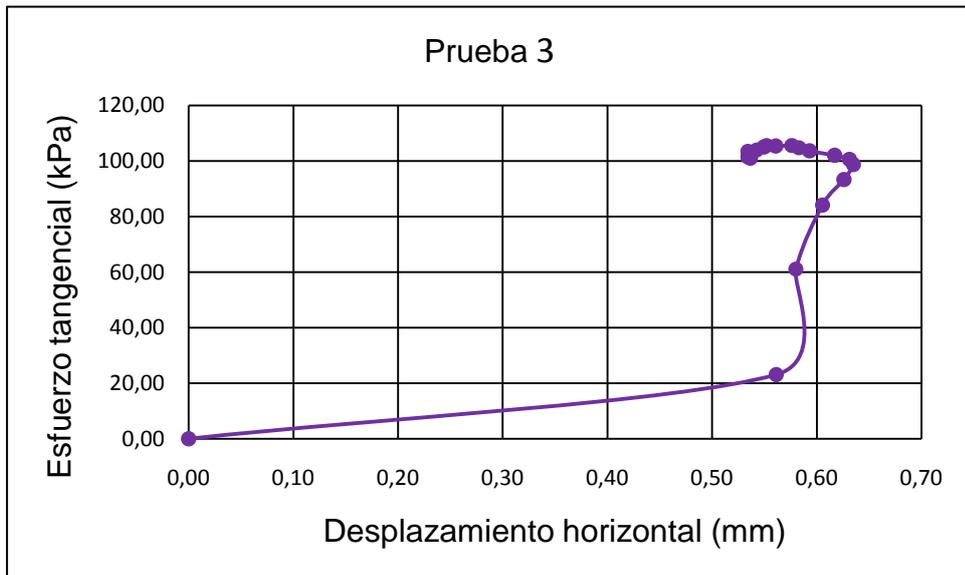


Figura B - 2.6.c Gráfico de esfuerzo tangencial vs deformación vertical, suelo Ciego de Ávila Prueba 3.

## Anexo 2.7 Resultados del Ensayo de Consolidación

### Villa Clara

Tabla A - 2.7.a Valores obtenidos en el ensayo de consolidación, suelo Villa Clara, muestra 1.

carga (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\varepsilon$ (%)	e	av (1/kPa)	1+em	mv (1/kPa)	E (kPa)
0,25	25	0,16	0,8529	1,5E-04	1,8544	7,9E-05	12657
0,5	50	0,54	0,8458	2,8E-04	1,8493	1,5E-04	6502
1	100	0,94	0,8383	1,5E-04	1,8421	8,1E-05	12375
2	200	2,20	0,8150	2,3E-04	1,8267	1,3E-04	7825
4	400	4,78	0,7670	2,4E-04	1,7910	1,3E-04	7469
2	100	5,50	0,7538	-	-	-	-
0	5	4,84	0,7660	-	-	-	-

Tabla A - 2.7.b Valores obtenidos en el ensayo de consolidación, suelo Villa Clara, muestra 2.

carga (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\varepsilon$ (%)	e	av (1/kPa)	1+em	(1/kPa) (1/k)	E (kPa)
0,25	25	0,01	0,8538	1,1E-05	1,8539	6,1E-06	165207
0,5	50	0,11	0,8519	7,5E-05	1,8529	4,1E-05	24469
1	100	0,46	0,8455	1,3E-04	1,8487	6,9E-05	14507
2	200	1,49	0,8264	1,9E-04	1,8360	1,0E-04	9599
4	400	3,59	0,7875	1,9E-04	1,8069	1,1E-04	9282
2	100	4,30	0,7743	-	-	-	-
0	5	3,54	0,7885	-	-	-	-

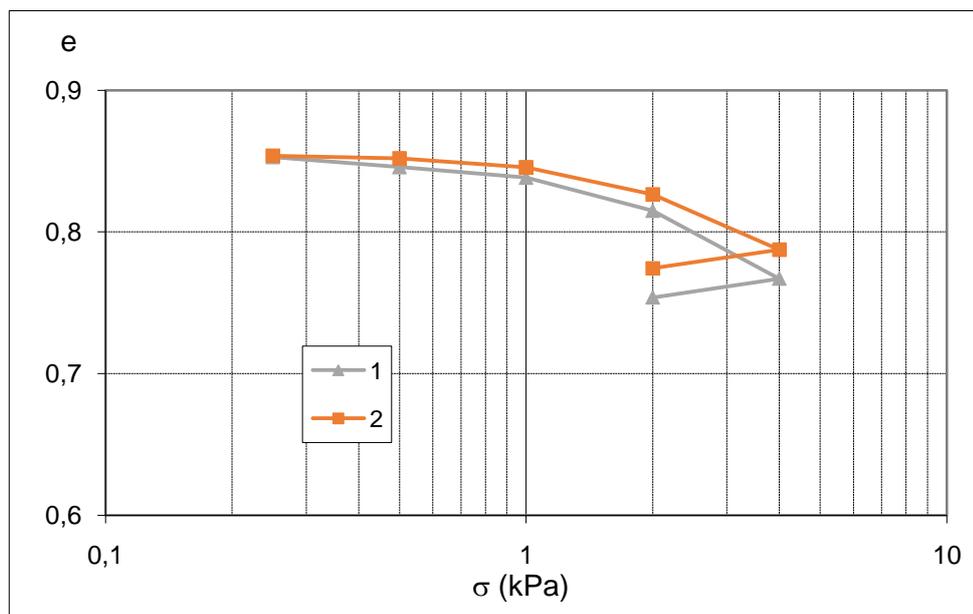


Figura A - 2.7.a Curvas de compresibilidad (e vs  $\sigma$ ) suelo Villa Clara.

## Ciego de Ávila

Tabla B - 2.7.a Valores obtenidos en el ensayo de consolidación, suelo Villa Clara, muestra 1.

carga (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\varepsilon$ (%)	e	av (1/kPa)	1+e <sub>m</sub>	kPa	E (kPa)
0,5	49,03	0,68	0,7482	-	-	-	-
1,0	98,07	1,20	0,7390	1,9E-04	1,7436	1,1E-04	9252
2,0	196,13	2,18	0,7218	1,7E-04	1,7304	1,0E-04	9888
4,0	392,27	3,43	0,6998	1,1E-04	1,7108	6,6E-05	15251
8,0	784,53	5,03	0,6717	7,2E-05	1,6857	4,3E-05	23481
2,0	196,13	4,65	0,6783	1,1E-05	1,6750	6,7E-06	-
0,0	10,00	3,68	0,6954	9,2E-05	1,6868	5,5E-05	-

Tabla B - 2.7.b Valores obtenidos en el ensayo de consolidación, suelo Villa Clara, muestra 2.

carga (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\varepsilon$ (%)	e	av (1/kPa)	1+e <sub>m</sub>	kPa	E (kPa)
0,5	49,03	0,50	0,7418	-	-	-	-
1,0	98,07	1,11	0,7312	2,2E-04	1,7365	1,2E-04	8040
2,0	196,13	2,16	0,7128	1,9E-04	1,7220	1,1E-04	9144
4,0	392,27	3,36	0,6918	1,1E-04	1,7023	6,3E-05	15893
8,0	784,53	5,03	0,6625	7,5E-05	1,6771	4,4E-05	22504
2,0	196,13	4,67	0,6688	1,1E-05	1,6657	6,4E-06	-
0,0	10,00	3,37	0,6916	1,2E-04	1,6802	7,3E-05	-

Tabla B - 2.7.c Valores obtenidos en el ensayo de consolidación, suelo Villa Clara, muestra 3.

carga (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\varepsilon$ (%)	e	av (1/kPa)	1+e <sub>m</sub>	kPa	E (kPa)
0,5	49,03	0,64	0,7431	-	-	-	-
1,0	98,07	1,40	0,7298	2,7E-04	1,7365	1,6E-04	6386
2,0	196,13	2,23	0,7152	1,5E-04	1,7225	8,6E-05	11601
4,0	392,27	3,26	0,6971	9,3E-05	1,7061	5,4E-05	18430
8,0	784,53	4,75	0,6710	6,6E-05	1,6840	3,9E-05	25358
2,0	196,13	4,38	0,6775	1,1E-05	1,6743	6,6E-06	-
0,0	10,00	3,39	0,6949	9,3E-05	1,6862	5,5E-05	-

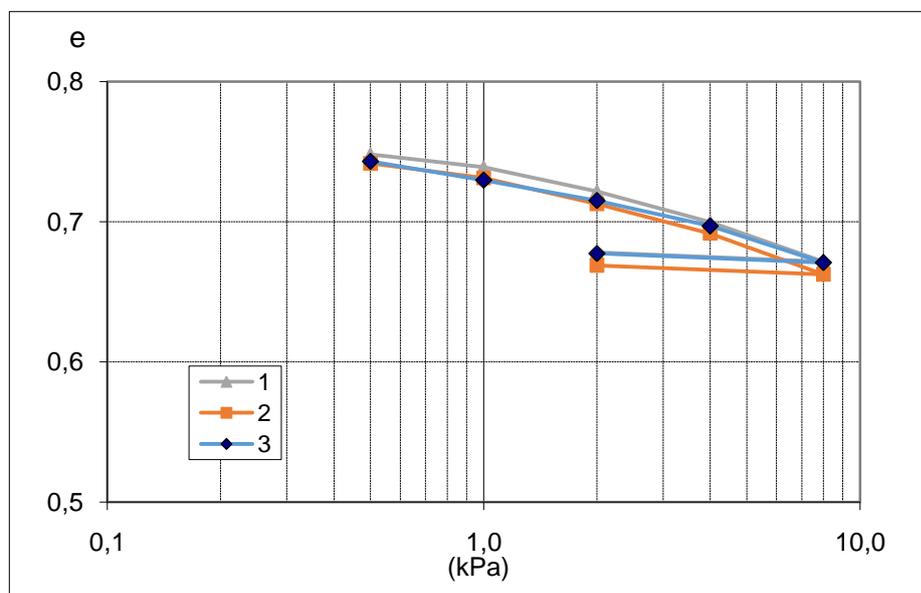


Figura B - 2.7.b Curvas de compresibilidad (e vs  $\sigma$ ) suelo Ciego de Ávila.

### Anexo 3.1. Ajuste de las curvas características

#### Método de Van Genuchten

Tabla E - 3.1.a. Parámetros de ajustes del modelo de Van Genuchten para el suelo Ciego de Ávila.

Suelos	Valores de ajustes en humedecimiento			Valores de ajustes en secado		
	$\alpha$	m	$\eta$	$\alpha$	m	$\eta$
Ciego de Ávila	0,0065	0,213	1,27	0,0075	0,2	1,25

#### Método de Fredlund

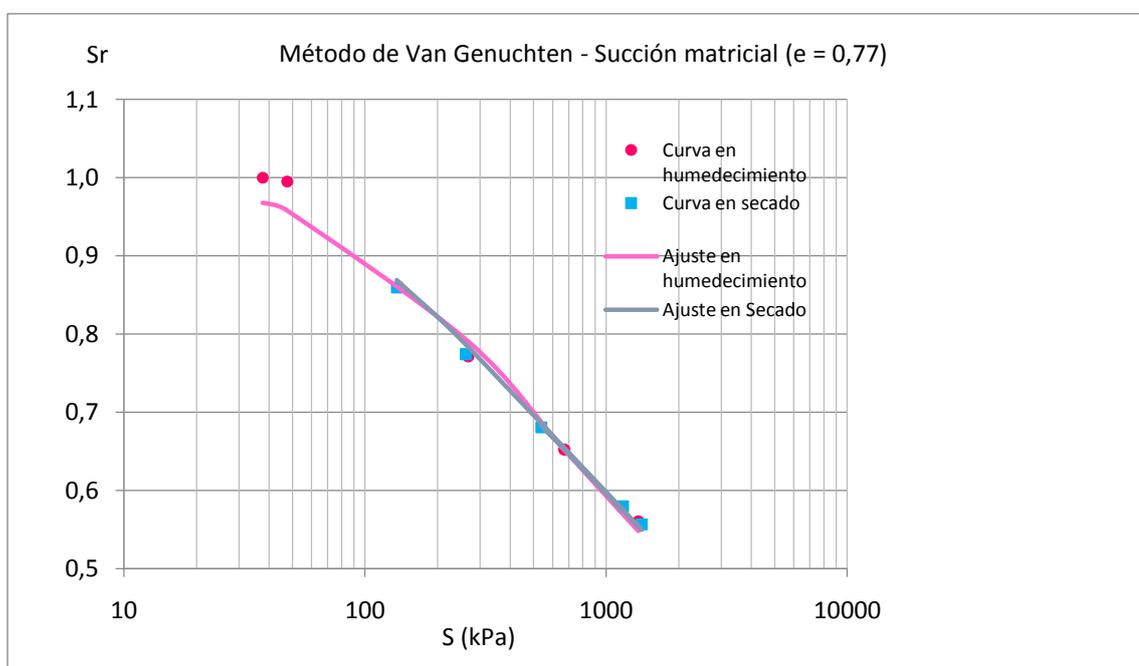
Tabla E - 3.1.b. Parámetros de ajustes del modelo de Fredlund para para el suelo Ciego de Ávila.

Suelos	Valores de ajustes en humedecimiento			Valores de ajustes en secado		
	$\alpha$	m	$\eta$	$\alpha$	m	$\eta$
Ciego de Ávila	1	5,25	0,0435	0,542	1,81	0,095

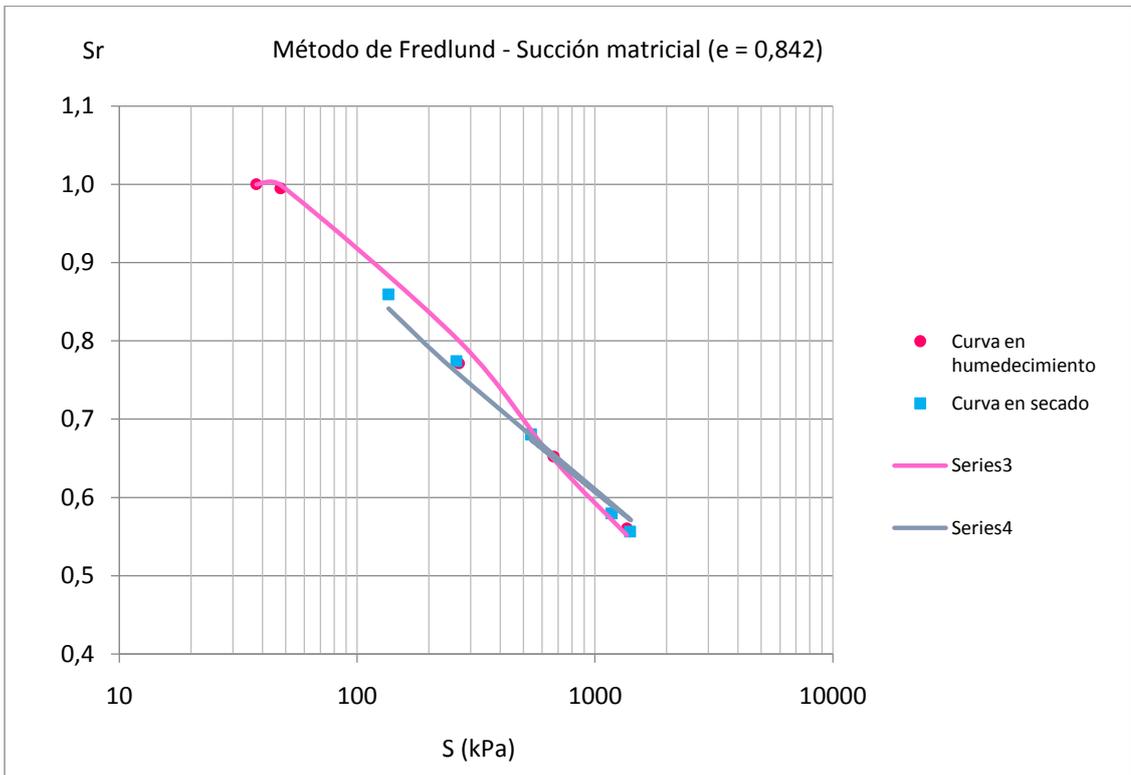
#### Método de Gallipoli

Tabla E - 3.1.c. Parámetros de ajustes del modelo de Gallipoli para para el suelo Ciego de Ávila.

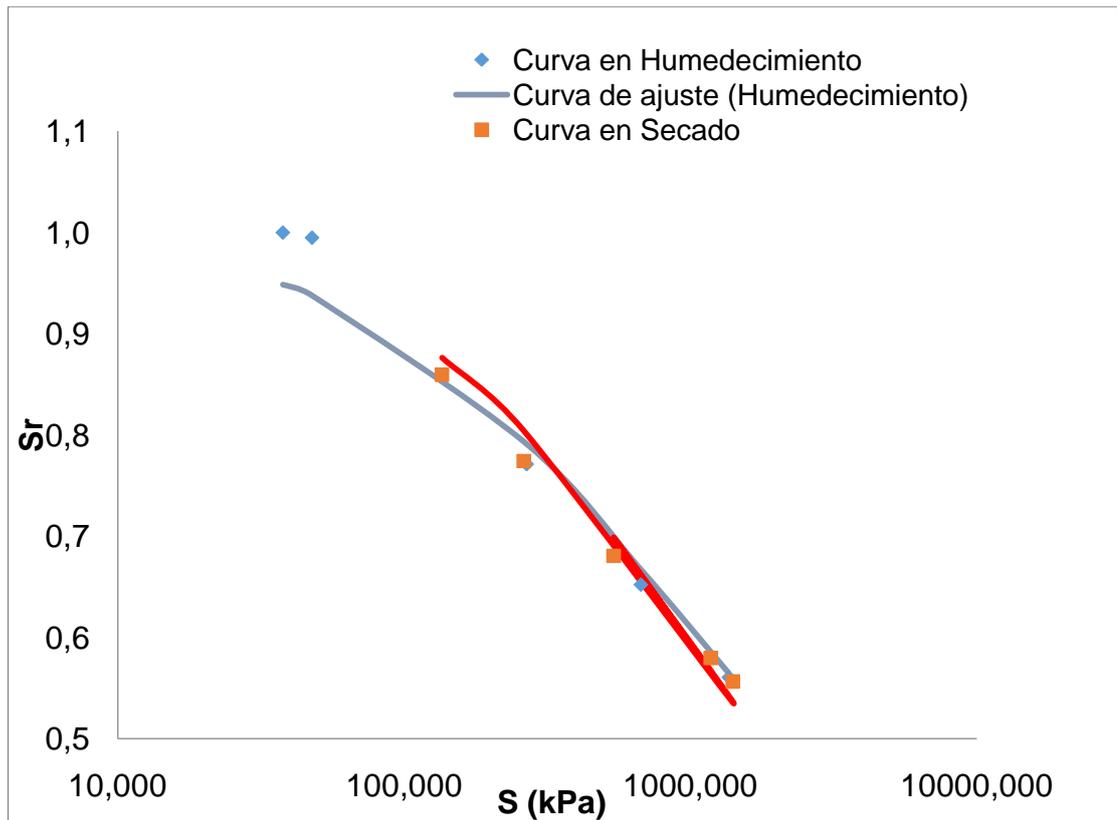
Suelos	Valores de ajustes en humedecimiento				Valores de ajustes en secado			
	$\psi$	$\phi$	$\eta$	m	$\psi$	$\phi$	$\eta$	m
Ciego de Ávila	60	100	0,9	0,35	50	10	0,9	0,5



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1.a. Curvas características experimentales del suelo Ciego de Ávila, (a) Método de Van Genuchten (b) Método de Fredlund y (c) Método de Gallipoli.

### Anexo 3.2. Obtención de las curvas edométricas del consolidómetro tradicional

(e vs  $\sigma$ )

#### Ciego de Ávila (e = 0.77)

Tabla A - 3.2.a. Valores obtenidos en la simulación de las curvas edométricas, suelo Ciego de Ávila, S = 37 kPa y e = 0,77.

Carga				
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo I	25	150	0,024	-0,031
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo II	150	800	0,052	-0,071

Succión = 37 kPa y Sr = 95%					
$e_o$	$\sigma$ (kPa)	Uw (kPa)	$\sigma'$ (kPa)	$\sigma_o'$ (kPa)	e
0,7700	0,1	0	114,3431	114,3431	0,7700
0,7444	50	0	164,2431	114,3431	0,7528
0,7333	100	0	214,2431	164,2431	0,7393
0,7166	200	0	314,2431	214,2431	0,7251
0,6892	400	0	514,2431	314,2431	0,7137
0,6684	800	0	914,2431	514,2431	0,6963

Tabla A - 3.2.b. Valores obtenidos en la simulación de las curvas edométricas, suelo Ciego de Ávila, S = 47 kPa y e = 0,77.

$e_o$

Succión = 47 kPa y Sr = 90%					
$e_o$	s (kPa)	Uw (kPa)	$\sigma'$ (kPa)	$\sigma_o'$ (kPa)	e
0,7700	0,1	0	107,2663655	107,2664	0,7700
0,7444	50	0	157,1663655	107,2664	0,7532
0,7333	100	0	207,1663655	157,1664	0,7396
0,7166	200	0	307,1663655	207,1664	0,7254
0,6892	400	0	507,1663655	307,1664	0,7142
0,6684	800	0	907,1663655	507,1664	0,6966

Tabla A - 3.2.c. Valores obtenidos en la simulación de las curvas edométricas, suelo Ciego de Ávila, S = 267 kPa y e = 0,77

Carga				
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo I	25	150	0,024	-0,031
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo II	150	800	0,052	-0,071

Carga				
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo I	25	150	0,024	-0,031
	$\sigma_{1u}$ (kPa)	$\sigma_2$ (kPa)	$\Delta e$	$\kappa$
tramo II	150	800	0,052	-0,071

Succión = 267 kPa y Sr = 85%					
$e_o$	s (kPa)	Uw (kPa)	$\sigma'$ (kPa)	$\sigma_o'$ (kPa)	e
0,7700	0,1	0	2,660589	2,660589	0,7700
0,7444	50	0	52,56059	2,660589	0,7700
0,7333	100	0	102,5606	52,56059	0,7689
0,7166	200	0	202,5606	102,5606	0,7521
0,6892	400	0	402,5606	202,5606	0,7236
0,6684	800	0	802,5606	402,5606	0,7019

Tabla D - 3.2.1.a. Muestras ensayadas con el consolidómetro tradicional

Parámetros del suelo parcialmente saturado para la simulación, Ciego de Ávila.

	Succión (S=37 kPa)	Succión (S=47 kPa)	Succión (S=267 kPa)
elástica $\kappa$	-0.031	-0.031	-0.031
plástica $\lambda$	-0.071	-0.071	-0.071
$\kappa$ Sr $\chi$	0.95	0.90	0.85
ión de vacío inicial $e_0$	0.052	0.052	0.052
cional de fabricación $\sigma_{fab}$	150 kPa	150 kPa	150 kPa

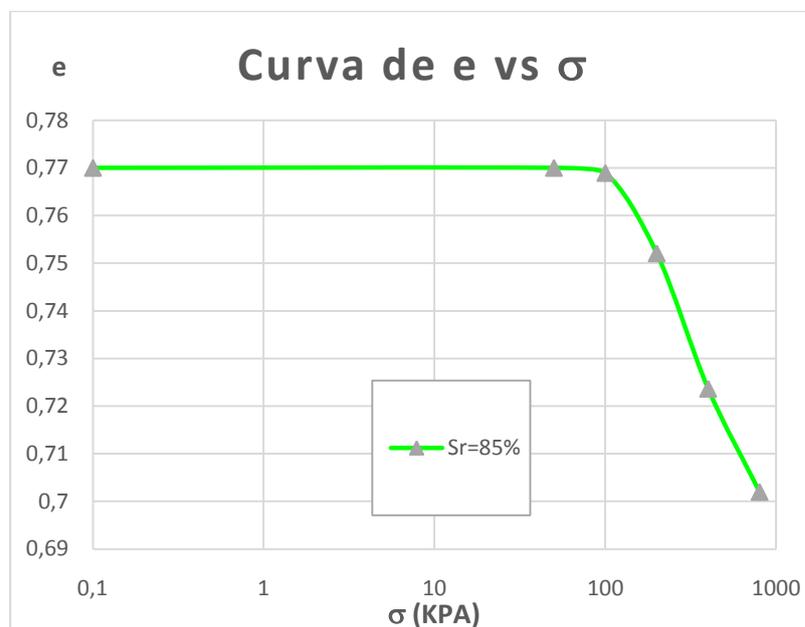
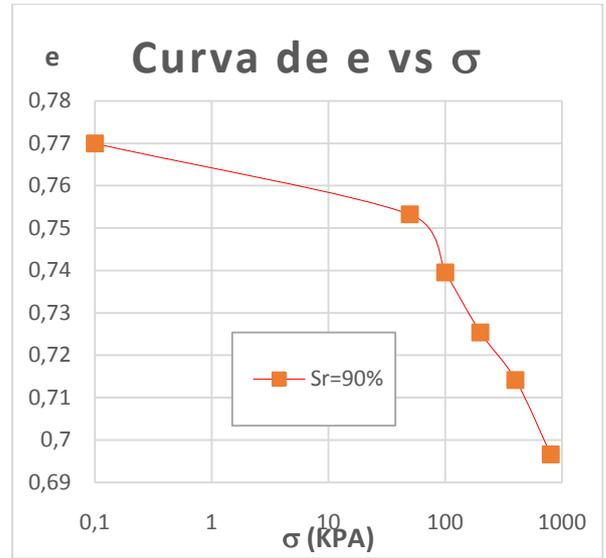
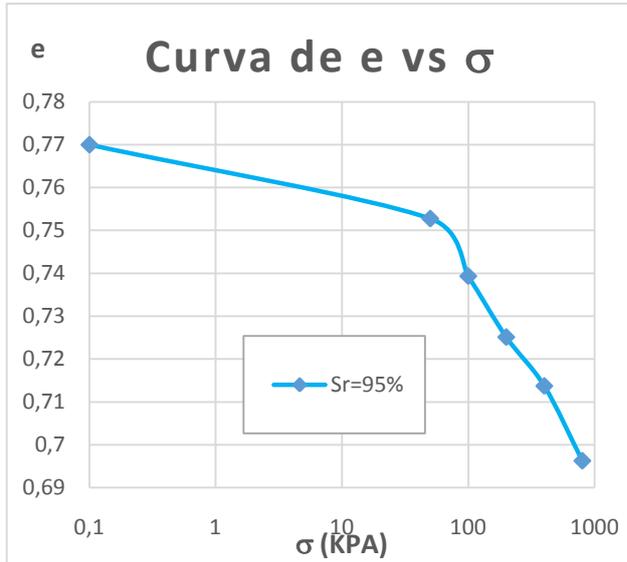


Figura 3.2.a. Curva edométrica promedio del suelo Ciego de Ávila para 95%, 90% y 85% de saturación.