



FABRICACION DE SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSABLES



JUAN CARLOS ULLOA CORTES

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA
2007**



FABRICACION DE SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSABLES



JUAN CARLOS ULLOA CORTES

Tesis para optar al título de
Magíster en Ingeniería Civil

Director

BERNARDO CAICEDO HORMAZA

Dr. Ingeniero

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA**

2007



A mis papas, a mi hermano y a mi novia.



AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos muy sinceros a:

Ingeniero Bernardo Caicedo, catedrático y director de la investigación, por sus valiosos aportes y orientación sobre la materia.

Al personal administrativo y técnico del CITEC que gracias a su ayuda y amistad me permitieron llevar a cabo este trabajo.

A mis compañeros de clase que me ayudaron siempre y lo más importante me ofrecieron su amistad sincera y desinteresada.



Nota de Aceptación

La tesis, “Fabricación de suelos expansivos y colapsables, mediante, compresión uniaxial”, presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil”, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Dr. Ing. BERNARDO CAICEDO H.

Asesor



OBJETIVO GENERAL

- El propósito de este trabajo es obtener muestras expansivas o colapsables, mediante la implementación de ensayos de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada involucrando la medida de la succión mediante psicrómetros de tipo Peltier y la medida de la variación de la humedad con técnicas no destructivas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Establecer las curvas de calibración necesarias para cada uno de los elementos de la instrumentación utilizados durante la ejecución de los ensayos que hacen parte del desarrollo experimental del tema de tesis.
2. Realizar el ensayo de compresión uniaxial con deformación controlada sobre mezclas en diferentes proporciones de arena arcillosa y kaolín, para diferentes contenidos iniciales de humedad, implementando la medida de la succión por medio de psicrómetros del tipo Peltier así como también medir el cambio de la humedad durante el ensayo utilizando técnicas no destructivas.
3. Establecer los parámetros necesarios a partir de los ensayos de compresión uniaxial con deformación controlada para la implementación del modelo constitutivo para suelos no saturados desarrollado por Alonso et al (1990).



1.0 INTRODUCCION

El estudio de la mecánica de suelos no saturados ofrece diferentes aspectos a nivel de investigación, todos ellos muy interesantes de abordar, sin embargo, uno de los fenómenos más interesantes en el estudio de los suelos no saturados, es el de los suelos cuyo comportamiento los clasifica como suelos expansivos o colapsables. Estos tipos de suelos son característicos de climas tropicales y áridos, en donde, debido a las condiciones climáticas reinantes, contribuyen al desarrollo de diferentes problemas de inestabilidad estructural asociados en un sin número de ocasiones a los problemas de expansión y colapso.

En el estudio del comportamiento de los suelos no saturados se presenta el tratamiento de una variable de esfuerzo, conocida como succión, generada por el estado de no saturación del suelo, la cual afecta considerablemente el comportamiento del suelo, además de involucrar problemas de flujo muy no lineales, e involucrando dentro del análisis del comportamiento las tres fases del suelo, sólida, líquida y gaseosa.

Con el fin de analizar el comportamiento de los suelos no saturados, especialmente lo referente a los fenómenos de expansión y colapso, se adelantó una serie de ensayos de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada, sobre mezclas de arena – kaolín, durante los cuales, se implementó la medida de la variación de la succión con la ayuda de psicómetros de tipo Peltier; complementado la información a través de la utilización de técnicas no destructivas para la lectura de los cambios de humedad en la muestra, durante la ejecución del ensayo, por medio de un sensor de humedad desarrollado para tal fin.



Una vez establecido el comportamiento experimental de las mezclas de suelo estudiadas, es importante poder describir dicho comportamiento a través de una interpretación físico - matemática de los fenómenos estudiados, para esto existen varios modelos constitutivos, que desarrollan diferentes metodologías para dicha simulación, entre estos se encuentra el modelo propuesto por E. Alonso (1990) de la Universidad Politécnica de Cataluña, con base en el cual se puede simular el comportamiento esfuerzo deformación, que desarrollan las mezclas de suelo durante los procesos de expansión o colapso.

De esta manera este trabajo establece un completo análisis del comportamiento esfuerzo deformación generado sobre mezclas artificiales durante los procesos de expansión y colapso, con el fin de dar inicio a una línea de investigación sobre estos fenómenos, e incrementar la utilización de este tipo de análisis para la ejecución de proyectos en los cuales se esperan condiciones, en las que un análisis desde el punto de vista de la mecánica de suelos tradicional, puede llevar a una solución bastante conservadora, lo cual se puede traducir en sobre costos en la ejecución final del proyecto.



2.0 COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS NO SATURADOS

2.1 Suelos Parcialmente Saturados. Generalidades

El clima existente en una región determinada es el factor de mayor importancia para que durante la depositación de un suelo ya sea de origen eólico, aluvial, coluvial, etc., este presente condiciones de parcial saturación. En general una condición no saturada o suelos con presión de agua de poros negativa pueden presentarse en cualquier depósito de suelo. Algunos de los tipos más comunes de estos suelos se presentan en zonas tropicales, en donde la estructura del suelo es bastante porosa, lo cual favorece el flujo del agua presentándose así un estado de parcial saturación¹. De igual manera se presentan suelos de origen artificial que presentan una condición de no saturación, como es el caso de los suelos conformados por compactación, en los cuales el nivel de humedad al cual son compactados se encuentra por debajo de la humedad de saturación del suelo.

2.2 Descripción de las Fases en los suelos no Saturados

Con base en la descripción anterior se puede decir que a diferencia de los suelos en condición saturada en los cuales se presenta un sistema bifásico, es decir, en el cual se pueden identificar básicamente dos fases definidas como la fase sólida y la fase líquida, en los suelos no saturados se presentan tres fases las cuales son:

¹ Fredlund D; Rahajardo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. University of Saskatchewan, Wiley-Interscience Publication, 1993, pag 9 – 12.



- **Fase sólida:** Partículas sólidas, caracterizadas por su forma, textura y composición química.
- **Fase líquida:** Compuesta básicamente por el agua, la cual se puede clasificar en tres clases, la primera el agua absorbida en la partícula, la segunda el agua capilar que permanece en suelo por la acción del agua capilar y el agua libre o agua gravitacional proveniente del drenaje libre.
- **Fase Gaseosa:** Esta fase esta formada normalmente por aire y vapor de agua.

Dentro del análisis de los suelos no saturados generalmente se considera el sistema como un sistema trifásico, sin embargo algunos autores como Fredlund y Morgenstem (1993) han propuesto una cuarta fase considerando la interfase entre el agua libre y el aire libre como una fase independiente, en la cual se pueden considerar la interacción o no entre estas, para el primer caso se considera una mezcla entre el agua libre y el aire libre, pero sin ninguna interacción y la segunda es una mezcla caracterizada por una membrana contráctil la cual a su vez puede ser caracterizada en dos casos, el primero cuando el aire disuelto en el agua alcanza un valor cercano al 2% del volumen total del agua, y el segundo caso cuando el vapor del agua esta presente en el aire. Esta cuarta fase cobra validez² ya que se considera que dos de las fases se equilibran bajo las presiones aplicadas, en el caso de la fase sólida y la fase de la membrana contráctil, mientras que las otras dos fases, es decir, el agua y el aire fluyen bajo la carga aplicada. Sin embargo dentro del análisis de las relaciones fase esta cuarta fase no se considera su volumen ni su masa ya que el peso de esta se encuentra involucrado dentro del peso del agua, por consiguiente para el desarrollo del presente trabajo de tesis se considerara el sistema como un sistema trifásico

² Op cit Fredlund G, pag 26



conformado por una fase sólida (partículas sólidas), una fase líquida (agua presente en los poros) y finalmente una fase gaseosa (aire presente en los poros).

2.3. Clasificación de los Suelos no Saturados³

Como se mencionó anteriormente el clima reinante en una zona específica es una de las principales causas para que un depósito de suelo presente características de no saturación, que junto con la estructura del suelo tienden a presentar diferentes comportamientos mecánicos. Wroth y Houlsby (1985) propusieron tres tipos diferentes de suelos no saturados clasificándolos con base a la continuidad del fluido de fases así:

- **Fase de aire discontinua y la fase del agua continua:** Este tipo de estructura es común para suelos no saturados que presenta sin embargo un alto grado de saturación, que probablemente ocurre en una zona de transición entre se presenta en una zona de transición entre un estrato saturado y estrato con un bajo grado de saturación.
- **Fase continua de aire y agua:** Este tipo de estructura se presenta en suelos con un grado intermedio de saturación, el cual se presenta generalmente en rellenos compactados de grano fino.
- **Fase de aire continua y fase de agua discontinua:** Este tipo de suelos se presenta en suelos no saturados con bajo grado de saturación, en general se presenta para depósitos de suelos cercanos a la superficie del terreno o rellenos conformados por suelos de grano grueso.

³ Wroth y Houlsby (1985)



Con base en esta calificación se puede decir que las mezclas de suelo analizadas dentro del plan de ensayos de este trabajo pueden clasificarse dentro de las características enunciadas para las condiciones de la fase continua de agua y aire ya que como se podrá observar en los capítulos posteriores los grados de saturación se pueden clasificar dentro del rango intermedio intermedios.

2.4 Succión en suelos no saturados⁴

La teoría de la succión o potencial de agua en el terreno fue principalmente desarrollada con base en el sistema planta – suelo – agua. En donde la succión es comúnmente referida al estado de energía libre del agua del suelo, la cual puede ser medida en términos de la presión de vapor del agua del suelo. El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de tensiones que tiene en cuenta aquellos efectos en superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin dentro del análisis de suelos no saturados esta variable no se tiene en cuenta sería prácticamente imposible determinar el estado de esfuerzos y por consiguiente entender el comportamiento deformacional de estos.

La relación termodinámica entre la succión del suelo (energía libre del agua del suelo) y la presión de vapor parcial en el agua de poros puede ser escrita así:

$$\psi = \frac{-RT}{v_{wo} \omega_w} \ln \left(\frac{u_v}{u_{vo}} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

ψ = Succión Total

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta

⁴ Fredlund D; Rahajardo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. University of Saskatchewan, Wiley-Interscience Publication, 1993, pag 64 – 70.



v_{w0} = Volumen específico del agua ó el inverso de la densidad del agua

ω_w = Masa molecular del vapor de agua

u_v = Presión parcial promedio de vapor de agua

u_{v0} = Presión de saturación de vapor de agua ó agua pura a la misma temperatura.

Comúnmente el término $\frac{u_v}{u_{v0}}$ es conocido como humedad relativa (RH%).

La ecuación (1) muestra entonces que la cuantificación de la succión esta relacionada principalmente con la relación entre la presión de vapor de agua a una temperatura determinada sobre una superficie de agua. De esta manera entonces para el caso de humedades relativas cercanas al 100% la succión deja de tener relevancia, caso contrario sucede para el caso de humedades relativas bajas en donde la succión presenta magnitudes bastante importantes (del orden de 10^6 kPa).

2.4.1 Componentes de la Succión en el Suelo

Como se menciona anteriormente la succión en el suelo es cuantificada en términos de la humedad relativa, valor con el cual se determina la succión total, la cual esta compuesta por la succión matricial y la succión osmótica las cuales pueden ser definidas así⁵:

- **Succión Matricial:** La componente matricial o componente capilar de energía libre, es el equivalente a la succión derivada de la medida de la presión parcial de vapor del agua en equilibrio con el agua del suelo, relativa a la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución de idéntica composición con el agua del suelo⁵.

⁵ Fredlund D; Rahajardo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. University of Saskatchewan, Wiley-Interscience Publication, 1993, pag 65



- **Succión Osmótica (soluto):** Es la succión equivalente , derivada de la medida de la presión parcial de vapor del agua en equilibrio con una solución de idéntica composición al agua del suelo, relativa a la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con agua pura⁵.

Dando como resultado la siguiente expresión:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2)$$

En donde:

ψ = Succión Total

$(u_a - u_w)$ = Succion Matricial

π = Succión osmótica

En otras palabras la succión matricial es comúnmente asociada al fenómeno de la capilaridad en la superficie de tensión del agua, la cual es una presión negativa respecto a la presión del aire y esta estrechamente relacionada con el radio de los poros del suelo, los cuales actúan como tubos capilares en donde las fuerzas de absorción entre las partículas del suelo hacen que se presenten presiones de agua de poros negativas en el suelo. En cuanto a la succión osmótica esta referida principalmente al contenido de sales disueltas en el agua del suelo, las cuales a su vez hacen que disminuya la humedad relativa del suelo con el aumento de estas sales disueltas en el agua del suelo.

En un deposito de suelo no saturado natural o artificial debido a cambios ambientales o en las condiciones de carga inicial se produce una variación de la succión total presente en el suelo, en donde los cambios en la succión matricial cobran una mayor relevancia que los cambios producidos en la succión osmótica, por esta razón se puede decir que los cambios que se observan en la succión total son debidos en su gran mayoría a los cambios en la succión matricial. Sin embargo la medida independiente de cada una de las componentes de la succión



es un proceso bastante dispendioso, en general desde el punto de vista práctico existen varios dispositivos por medio de los cuales se realiza principalmente la medida de la succión total en donde la variación de esta se puede entender como la variación de la succión matricial principalmente.

2.5 Comportamiento deformacional de los Suelos no Saturados colapsó y expansión:

Los fenómenos más característicos de los suelos no saturados están relacionados con las deformaciones volumétricas, producidas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser positivas, en cuyo caso se produce el colapso, o negativas en cuyo caso se produce la expansión⁶.

2.5.1 Fenómeno de Colapso⁶

Se puede denominar colapso a cualquier proceso de aumento en la deformación volumétrica, sin embargo el proceso de colapso se presenta ante la reducción de volumen irreparable, producido por el aumento del grado de saturación del suelo manteniendo constante el esfuerzo exterior.

Durante la evolución del proceso de colapso se puede presentar absorción de agua, siendo esta una de las principales características del fenómeno, que a su vez crea una diferencia clara frente a otros procesos de deformación que sufre el suelo, como el caso de la consolidación en donde debido al incremento del esfuerzo exterior se produce flujo tanto de agua como de aire para el caso de los suelos no saturados.

⁶ Barrera M., Garnica P. Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. Instituto Mexicano del transporte. Publicación técnica No 198. 2002. p 37 -54.



De acuerdo con autores como Dudley (1970), Araki⁷ (1995), entre otros, las características que debe tener un suelo para que ocurra el colapso son:

- Estructura abierta, no saturada, tipo panal de abeja, capaz de reducir su volumen a expensas de una disminución del volumen de poros.
- Un estado exterior de carga suficientemente grande como para generar una condición metaestable para la succión aplicada. El concepto de "metaestable", consiste en considerar a un suelo estable con respecto a pequeños disturbios, pero capaz de reaccionar violentamente si la molestia es considerable.
- La existencia de enlaces entre partículas que se debiliten en presencia del agua.

La deformación que se presenta en el proceso de colapso es completamente irreversible, ya que durante el proceso de colapso se presenta un reordenamiento de la estructura interna del suelo. Estas deformaciones se presentan cuando debido a cambios en el grado de saturación del suelo, los enlaces temporales entre partículas se pierden. Dentro de estos enlaces se pueden destacar los siguientes:

- *Enlaces de tipo capilar*
- *Enlaces por puentes de partículas arcillosas*
- *Enlaces por cementación*

En todos estos enlaces la llegada del agua causa el mismo efecto; la reducción en la resistencia la corte entre los contactos entre las partículas sólidas. Si esta resistencia cae por debajo de los esfuerzos externos a los cuales está sometida, se produce el colapso que conduce a una nueva estructura capaz de resistir el

⁷ Araki M., Camapum de Carvalho J. Study of a collapsible porous soil of Brazil. Proceedings of the first conference on unsaturated soils, Paris Francia. Pag 17 – 21.



nuevo estado de esfuerzos. Una vez ocurre el colapso el suelo adquiere una nueva estructura, la cual es estable siempre y cuando no se modifiquen las condiciones de esfuerzo y saturación adquiridas, puesto que una vez modificadas el fenómeno se repite. Maswoswe (1985), E. Alonso (1993) entre otros encontraron evidencia experimental en la cual se muestra que la magnitud del colapso presenta un valor máximo para las condiciones de carga y saturación establecidas, a partir del cual la magnitud del colapso disminuye, hasta reacomodarse totalmente generando una nueva estructura, la cual como ya se menciono, volverá a presentar colapso al modificar las condiciones de carga y saturación⁸.

2.5.2 Fenómeno de Expansión

En general el fenómeno de expansión esta expresamente relacionado con el aumento de volumen provocado en el proceso de humedecimiento manteniendo constante el estado de esfuerzo exterior.

El proceso de expansión inicia cuando un suelo no saturado se humedece absorbiendo agua entre sus partículas y aumenta de volumen. Este aumento de volumen es debido en gran parte a la relajación de los esfuerzos intergranulares producidos por el incremento en el grado de saturación de la muestra. En general, la expansión esta asociada con suelos arcillosos plásticos con densidades secas altas y presiones exteriores bajas.

⁸ E. Alonso. Constitutive modeling of unsaturated soils. Civil engineering European courses programme of continuing education. Barcelona, España. 1993. Pag 8 – 9.



La expansión de los materiales arcillosos está relacionado con el mineral arcilloso que las constituye, la capacidad de cambio de cationes, estructura del suelo, porcentaje de arcilla en el suelo y la actividad que estas presenten⁹.

Otra explicación sobre el proceso de expansión se le atribuye a la disminución de los esfuerzos intergranulares debidos a una disminución en la succión, lo que provoca una expansión elástica de la estructura del suelo⁸.

El proceso de expansión o hinchamiento obedece a una disminución de la succión al aumentar la humedad, reduciendo la intensidad de las fuerzas de contacto entre las partículas. Si la estructura es potencialmente inestable se produciría el colapso, pero si la estructura es suficientemente fuerte se ocasionara una relajación de los esfuerzos intergranulares, lo cual producirá la expansión. Los mecanismos que producen la expansión están directamente ligados con las propiedades de las partículas arcillosas. Los tres mecanismos microestructurales que producen la expansión son:

- *Hidratación de las partículas de arcilla*
- *Hidratación de cationes*
- *Repulsión osmótica*

Estos tres fenómenos están relacionados entre si, lo cual hace difícil la diferenciación entre estos durante el proceso de expansión.

Alonso et al (1993) presenta dos mecanismos distintos de expansión. El primer mecanismo está asociado con el flujo estacionario dentro de los poros abiertos de la estructura del suelo. El segundo mecanismo esta relacionado con el proceso de

⁹ Lambe y Whitman . 1959.



hidratación de los minerales arcillosos activos. Estos mecanismos pueden ocurrir simultáneamente durante el proceso de expansión.

El proceso de expansión de un suelo viene afectado por una serie de factores que condicionan su evolución y magnitud, entre los cuales se encuentran:

- *Tipo de minerales y cantidad.* Cuanto más potencialmente expansivas sea las partículas o la cantidad de partículas expansivas presentes en el suelo sean considerables, mayor será la expansión.
- *Densidad seca.* Cuanto mayor sea su densidad seca mayor es su potencial expansivo.
- *Estructura del suelo.* Una estructura dispersa presenta un mayor potencial expansivo, que una estructura cementada.
- *Tiempo.* El tiempo es un factor muy importante en el proceso de expansión, debido a que la permeabilidad asociada a los suelos arcillosos es muy baja, por lo tanto el fenómeno de expansión podrá ser más o menos largo pudiendo durar inclusive años.
- *Fluidos Intersticiales.* El pH del agua favorece la disociación catiónica produciendo la expansión.
- *Humedad.* Cuanto menor es humedad natural del suelo in situ, mayor es el potencial expansivo, debido a que al tener un contenido de humedad bajo, mayor será la capacidad de absorber agua.

De acuerdo con los factores indicados, en un proceso de compactación la expansión del suelo estará directamente relacionada con el método utilizado,



energía de compactación o la humedad inicial. Compactaciones del lado seco, generan estructuras floculadas y con menores humedades las cuales pueden producir expansión. Mayores energías de compactación llevara al suelo a tener mayores densidades secas, los cual facilita la expansión. Finalmente compactaciones estáticas, generan estructuras más floculadas, que estructuras compactadas por amasado o impactos, generando mayores posibilidades de expansión.

2.6 Resistencia al Corte de los Suelos No Saturados

La resistencia al corte de los suelos no saturados presenta una característica bien importante y es que esta aumenta con el aumento de la succión en el suelo. Antes de definir la expresión para la resistencia al corte de los suelos no saturados es importante definir la expresión para determinar el estado de esfuerzos efectivos en los suelos no saturados la cual es una de las expresiones que mayor variabilidad puede presentar de acuerdo con diferentes autores algunas de estas son¹⁰:

Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma_{total} - (u_{w_a})$$

Bishop:

$$\sigma' = \sigma_{total} - (\chi u_w + (1 - \chi) u_a)$$

En donde σ' es el esfuerzo efectivo y χ es un parámetro para esfuerzos efectivos.

Eskempton (1960)

$$\sigma' = \sigma_{total} - \left(1 - \frac{K}{K_s}\right) [\chi u_w + (1 - \chi) u_a]$$

¹⁰ Chen, Z, Stress theory and axiomatic as well as consolidation theory of unsaturated soils, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, Paris Francia 1998, pag 697-698



Donde K y k_a son los módulos bula de los granos del suelo.

Como se observa existe una gran variabilidad en la determinación de una expresión para la determinación del esfuerzo efectivo, sin embargo la expresión mas conocida para la determinación de la resistencia al corte de los suelos no saturados reúne las dos principales variables de estado ($\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$)¹¹, de la siguiente manera:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

En donde:

$\sigma - u_a$ = Esfuerzo normal en el estado de falla

ϕ' = Angulo de fricción interna asociado al esfuerzo normal

$(u_a - u_w)$ = Succión matricial en el plano de falla

ϕ^b = Angulo que indica la rata del incremento en la resistencia al corte debida a la succión matricial.

La validez general de este criterio ha sido, sin embargo, cuestionada en varias oportunidades ya que el efecto de la succión desaparece al llegar al estado saturado, por lo que el incremento de la resistencia al corte del suelo debe disminuir al llegar a este estado, de igual manera a como se observa cuando el suelo llega a un estado seco, lo cual presenta entonces un estado de máxima resistencia intermedia entre el estado no saturado y el esto saturado para el cual la resistencia la corte es realmente la máxima. En consecuencia el criterio establecido en la expresión anterior presenta validez para un rango de succiones altas, ya que para valores de succión bajos, es decir cercano al estado saturado o seco el parámetro que mide el aumento de la resistencia al corte con el aumento de la succión presenta una gran variabilidad. En general la determinación de la

¹¹ Fredlund D; Rahajardo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. University of Saskatchewan, Wiley-Interscience Publication, 1993, pag 227



resistencia al corte en suelo no saturados no esta del todo establecida, ya que experimentalmente se ha podido establecer una no linealidad de la envolvente de resistencia con respecto a la succión, lo cual hace que la expresión anterior sea valida para un rango de succiones no muy amplio.



3.0 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental del presente trabajo consiste en la ejecución de una serie de ensayos de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada, sobre muestras, de mezclas conformadas por arena amarilla y Kaolín, las cuales están definidas en la tabla 1:

Tabla 03.01. Mezclas de análisis

Mezcla No	Arena Amarilla %	Kaolín %
1	88	12
2	65	35
3	----	100

Estas muestras fueron sometidas a una serie de ensayos de caracterización, con el fin de determinar parámetros esenciales para la realización de los ensayos de compresión uniaxial. Los ensayos realizados se describen a continuación.

3.1 Ensayos Básicos

Con el fin de determinar las características de las mezclas de suelo con las que se trabajo durante las prácticas de laboratorio se realizaron los siguientes ensayos:

1. Curvas Granulométricas de la Arena Amarilla y Mezclas de las suelo (figura 3.1).
2. Azul de Metileno para la arena y el Kaolín. Tabla 3.2
3. Proctor Estándar para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima de cada muestra de suelo (figura 3.2).
4. Ensayo de gravedad Especifica (Gs). Tabla 3.3



3.1.1 Curva Granulométrica

A continuación se presenta las curvas granulométricas obtenidas para la arena amarilla así como también para las diferentes mezclas de suelo:

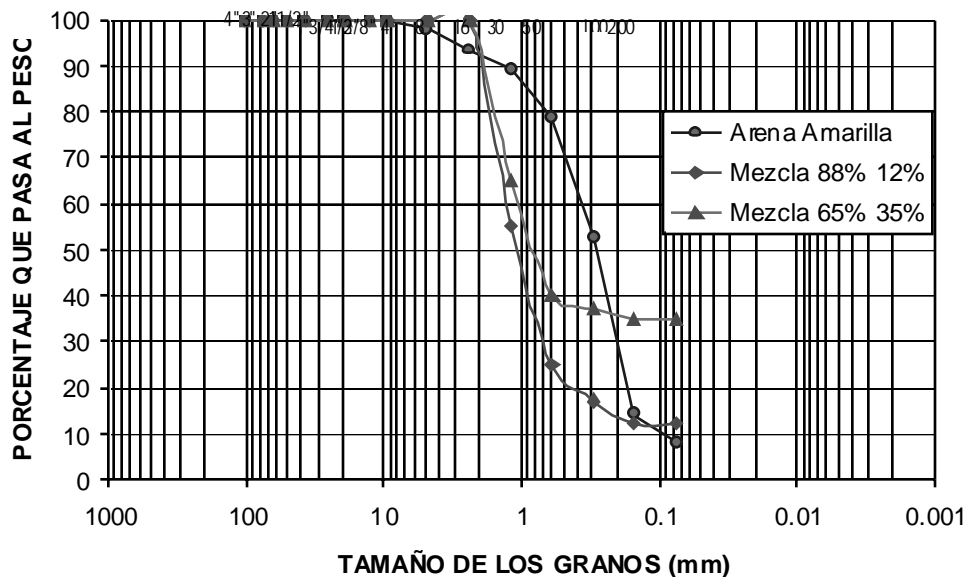


Figura 3.1. Granulometría arena amarilla y mezclas de Suelo

3.1.2. Azul de Metileno

El ensayo de azul de metileno establece la cantidad de material arcilloso presente en el suelo, el cual esta directamente relacionado con la absorción de azul de metileno en superficie específica del suelo. Los resultados obtenidos para la arena amarilla y el kaolín se presentan a continuación (tabla 3.2):

Tabla 3.2. Resultados ensayo azul de metileno

Material	Vb (gr/100gr)
Kaolín	1.58
Arena Amarilla	1.39



3.1.3. Ensayo de Proctor Estándar

Este ensayo fue realizado sobre las muestras a trabajar con el fin de obtener la densidad máxima y la humedad óptima para cada una de las muestras. Estos resultados son de suma importancia dentro del plan de ensayos, ya que de acuerdo a la humedad inicial que se tome con base en humedad óptima, las muestras pueden presentar una tendencia a colapsar o expandir.

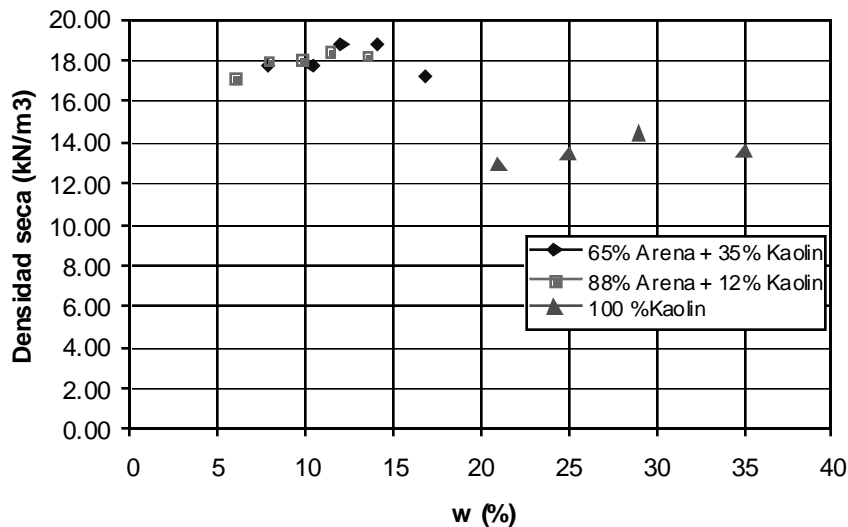


Figura 3.2. Ensayo de Proctor Estándar

Con base en los resultados anteriores se obtiene un rango de humedad inicial para los ensayos entre el 5% y el 35%, valores que se encuentran por debajo de la condición de saturación total y densidades óptimas entre 14.4 kN/m^3 y 18.9 kN/m^3 , valores.

3.1.4 Ensayo de Gravedad Específica (Gs)

Al igual que los ensayos anteriores este ensayo es de gran utilidad para el procesamiento de los datos obtenidos del laboratorio así como también para la



implementación del modelo constitutivo. Los valores obtenidos para cada mezcla de material son los siguientes:

Tabla 3.3. Resultados ensayo de gravedad específica Gs

Muestra	Gs
65 % + 35%	2.41
88% + 12%	2.47
Kaolín	2.9

3.2 Curvas de Calibración

Durante la ejecución de los ensayos de compresión uniaxial es necesario determinar el valor de la succión durante el ensayo, así como también conocer la variación del contenido de humedad. Con base en lo anterior a continuación se presenta el procedimiento de calibración para cada uno de los sensores utilizados para la medida de estas dos variables.

3.2.1 Calibración de Psicrómetros tipo Peltier

Los psicrómetros de tipo Peltier son utilizados para medir la succión total de un suelo mediante la medida de la humedad relativa en la fase de aire de los poros del suelo o en una región cercana al mismo. Los psicrómetros de tipo Peltier operan basados en la medición de la diferencia de temperatura entre una superficie no evaporada (bulbo seco) y una superficie evaporada (bulbo húmedo), en donde la diferencia de temperaturas esta relacionada con la humedad relativa.



En este tipo de Psicrómetros la evaporación es inducida conduciendo una corriente de Peltier a través de la unión evaporada. La corriente de Peltier causa que la unión se enfríe por debajo del punto de rocío, lo que resulta en la condensación de una pequeña cantidad de vapor de agua en la unión, y de esta manera a través de un equipo de registro se toma el valor del micro voltaje para el cual se produjo dicha condensación. Cuando estos valores de micro voltaje presentan un valor asintótico este valor se relaciona con el valor de la succión a través de curvas de calibración establecidas previamente. Las curvas de calibración se obtienen a partir de la ejecución de la medida de los microvoltajes en soluciones de cloruro de sodio (NaCl) de distinta molaridad para las cuales, existen tablas en las que se conocen los valores de la succión a diferentes temperaturas¹².

Con base en el procedimiento establecido anteriormente se escogieron 5 soluciones de cloruro de sodio (NaCl) con distintas molaridades con el fin de lograr un rango de succiones entre 1 Mpa y 8 Mpa, rango en el cual las curvas de calibración de los psicrómetros exhiben una tendencia lineal con la cual se facilita la interpretación de las lecturas de micro voltaje obtenidas por medio del equipo de adquisición de datos.

3.2.1.1 Equipos Utilizados para la Calibración

Los equipos utilizados para la obtención de la curva de calibración para los psicrómetros son los siguientes:

- Psicrómetros de Tipo Peltier
- Equipo Wescor – Water potential System Modelo 720

¹² Brian, J. Bridget, R. Thermocouple psychrometry. The soil solution phase, capítulo 3, US geological service. 1998. p 610 – 642.



- Horno Temostatado
- Computador para almacenamiento de datos
- Recipientes
- Equipo Menor

3.2.1.2 Procedimiento y Resultado de la Calibración

Con el fin de obtener las curvas de calibración de los psicrómetros se realizó el montaje que se muestra a continuación:



Figura 3.3. Montaje calibración Psicrómetros

En la figura 3.3 se observa el horno temostatado el cual ofrece condiciones de temperatura con una baja variabilidad ($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dentro de este se encuentran los psicrómetros que a su vez cada uno está acoplado a un recipiente, dentro del cual



se encuentra la solución de moralidad conocida (figura 3.4), una vez realizado el montaje se inicia la adquisición de datos por medio del equipo Wescor y la ayuda del computador durante el tiempo necesario para que las lecturas de los psicrómetros se encuentren estables, dentro de literatura¹² se encuentra que, los tiempos de repuesta pueden variar entre unas horas hasta varios días dependiendo el valor de la moralidad con la que se este trabajando y la temperatura a la cual se realice el ensayo.

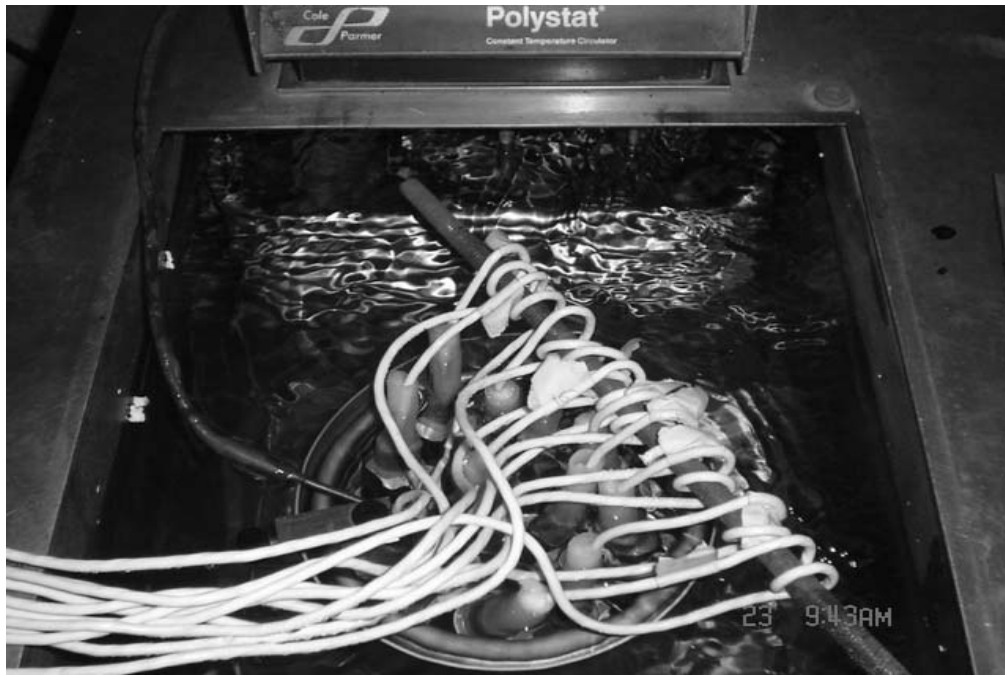


Figura 3.4. Detalle ubicación de los Psicrómetros dentro del horno termostado

Para la determinación de las curvas de calibración se tomaron las siguientes soluciones:

- NaCl Molaridad 0.20
- NaCl Molaridad 0.30
- NaCl Molaridad 0.506
- NaCl Molaridad 1.0
- NaCl Molaridad 1.5



Con cada una de estas soluciones se realizo el procedimiento de calibración para temperaturas de 20°C y 25°C, para las cuales se obtienen las siguientes curvas:

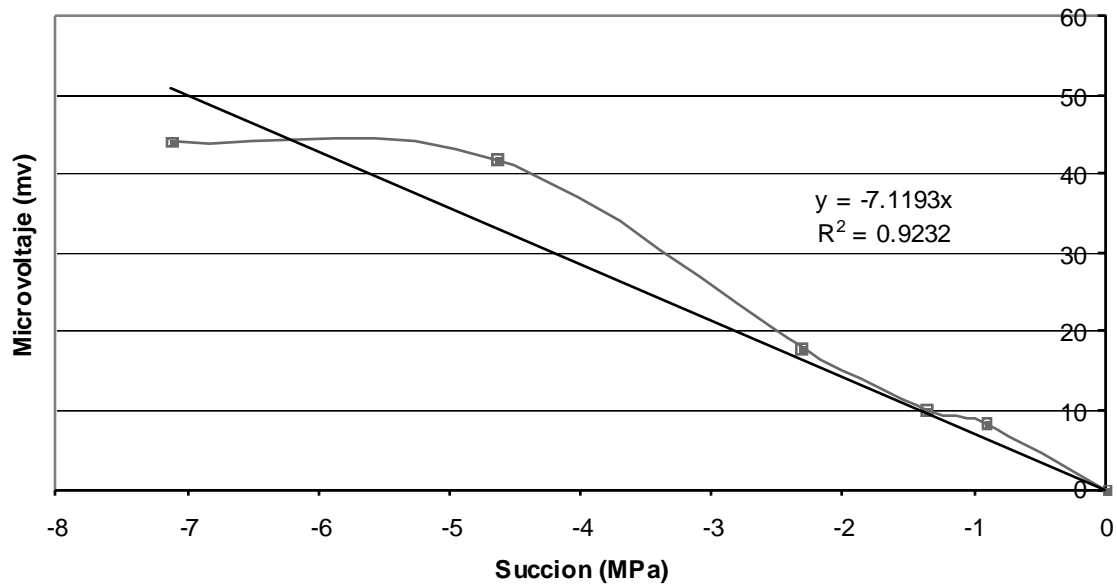


Figura 3.5. Curva de Calibración Psicrómetros Temperatura 25 °C

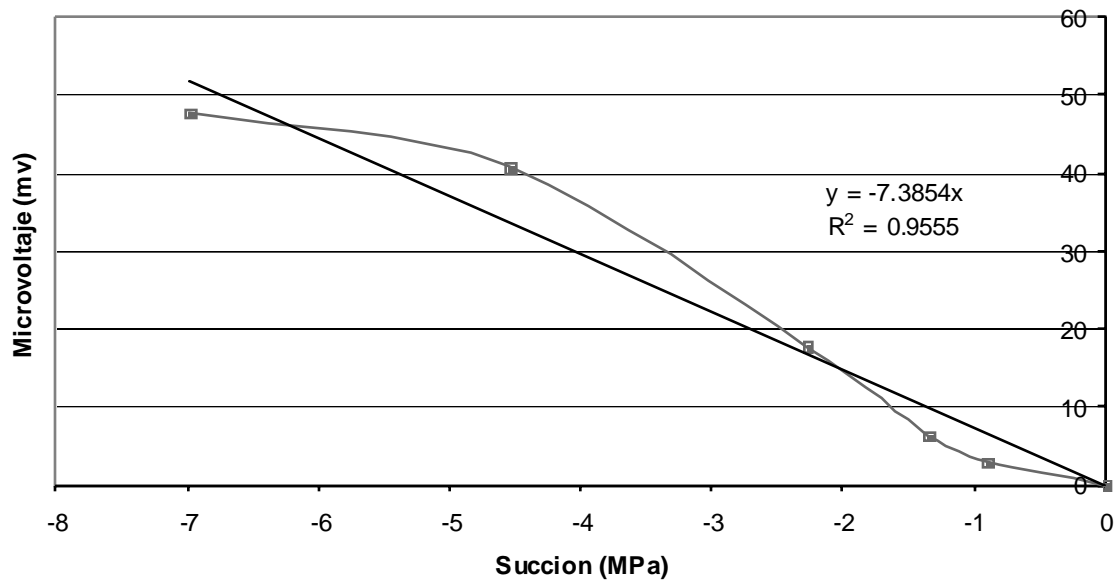


Figura 3.6. Curva de Calibración Psicrómetros Temperatura 20°C



Con base en las graficas anteriores se puede entonces determinar el valor de la succión en un rango de temperaturas entre 20 ° C y 25 ° C por medio de interpolación lineal.

3.2.2 Calibración del Sensor de Humedad

Uno de los aspectos a tener en cuenta dentro la ejecución del ensayo de compresión uniaxial es la variación del contenido de humedad durante el ensayo, con base en las lecturas obtenidas a través de un sensor de humedad (figura 3.7).

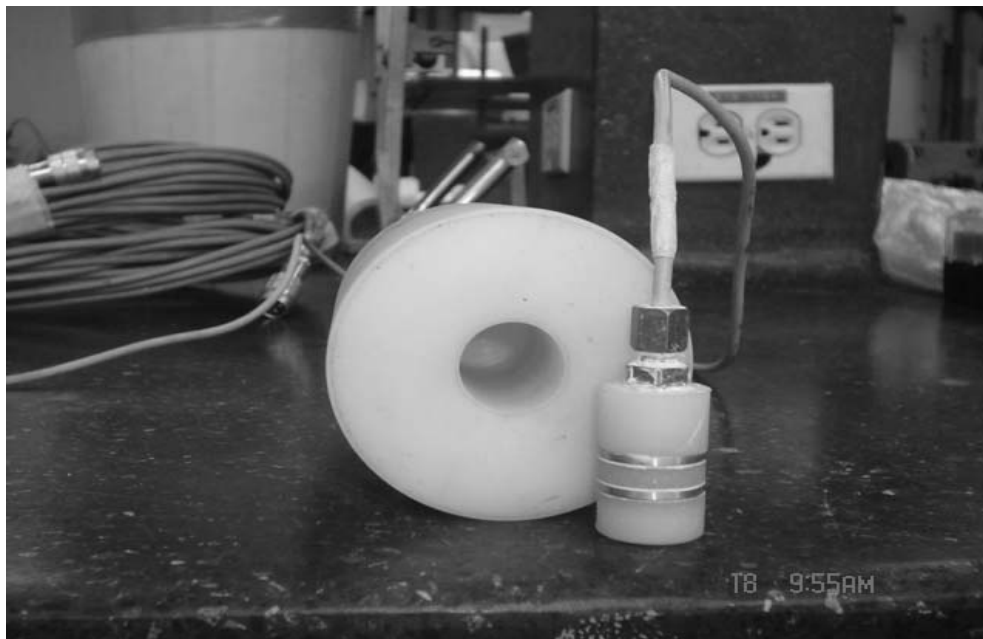


Figura 3.7. Detalle sensor de humedad

Este sensor está previsto de un dispositivo por medio del cual se mide la variación de la frecuencia debida a la variación en el contenido de humedad. Cuando se presenta una variación en el contenido de humedad del suelo, esta onda presenta una variación la cual es registrada y por medio de la curva de calibración obtenida para el sensor se puede determinar el valor del contenido de humedad en ese momento.



3.2.2.1 Equipos Utilizados para la Calibración

A continuación se listan los equipos utilizados durante la calibración del sensor de humedad:

- Sensor de Humedad
- Prensa Versa Tester
- Osciloscopio
- Fuente reguladora de Voltaje
- Molde para la muestra
- Equipo menor

3.2.2.2 Procedimiento y Resultado de la Calibración:

Para la calibración del sensor de humedad se utilizaron muestras de las mezclas que se van a, para las cuales una vez conocido el valor de la humedad óptima y la densidad seca máxima, obtenido del ensayo de promotor estándar, se estableció un rango de humedades que varía, entre humedades por debajo de la humedad óptima tomando la humedad óptima, hasta valores por encima de esta, una vez mezcladas las muestras al contenido de humedad deseado se realiza el montaje del ensayo de calibración tal como se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8. Montaje ensayo de calibración sensor de humedad

El ensayo se realiza dividiendo el peso total de la muestra en 5 partes de las cuales 4 iguales en peso y una muestra con peso diferente que tiene en cuenta el volumen ocupado por el sensor de humedad. Una vez se divide el peso del suelo se procede a compactar dentro del molde las dos primeras capas de igual peso, para esto el molde utilizado en la calibración esta previsto de un pistón de carga y anillos de volumen interior igual al volumen de la capa compactada por dentro, por medio de los cuales pasa el pistón compactando la muestra hasta que el recorrido del pistón entra en contacto con el anillo, una vez se tienen compactadas las dos primeras capas se introduce el sensor dentro del molde, se conecta a la fuente de voltaje y al osciloscopio y se agrega la parte de la muestra con masa diferente, para seguir con el proceso de compactación, en donde a partir de ese momento se registra el valor de la frecuencia que se obtiene por medio del osciloscopio hasta compactar el total de la muestra. Este procedimiento se repite para cada una de las muestras para diferentes contenidos de humedad, obteniendo de esta manera varios puntos de humedad y frecuencia con los cuales se obtiene la curva de calibración.



A partir de los datos obtenidos de la calibración, a continuación se presenta las graficas de calibración, para cada mezcla de suelo a utilizar:

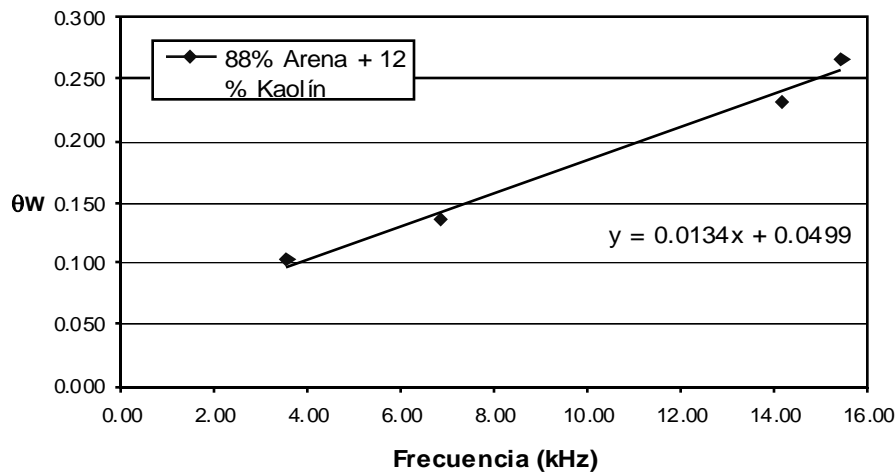


Figura 3.9. Curva de calibración humedad (θ_w) para la mezcla de Suelo 88% + 12%.

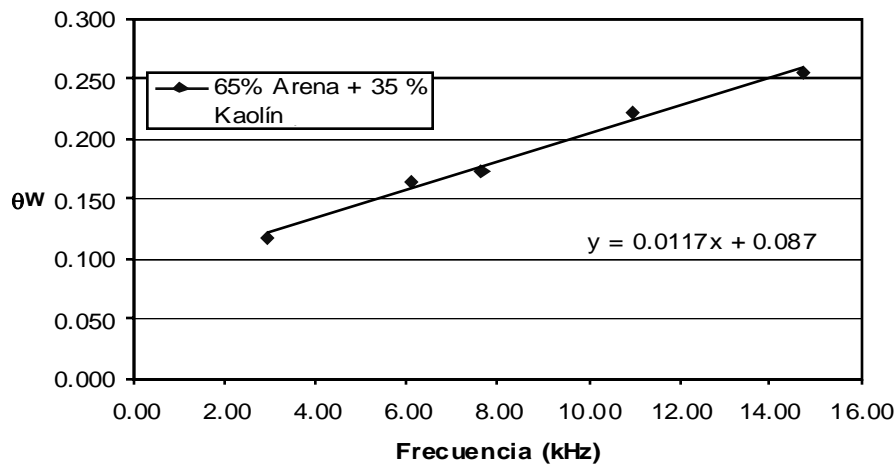


Figura 3.10. Curva de Calibración humedad (θ_w) mezcla de Suelo 65% + 35%

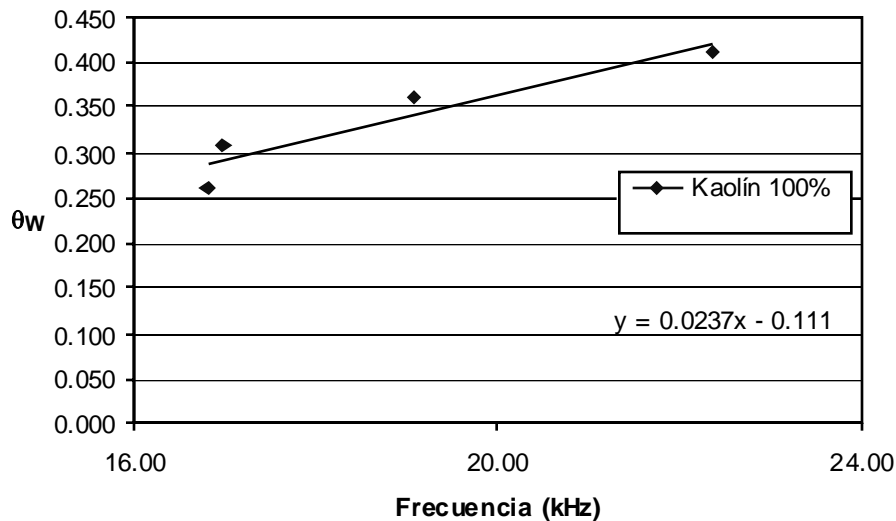


Figura 3.11. Curva de Calibración humedad (θ_w) mezcla 100 % kaolín

Con base en estas graficas y de acuerdo con el contenido de humedad inicial de la muestra se puede conocer el cambio en el contenido de humedad durante el ensayo para cada una de las mezclas de suelo analizadas.

3.3 Ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada

Una de los aspectos que presenta mayor relevancia en el proceso de carga de una muestra por medio de velocidad de deformación controlada es que inmediatamente el pistón este en movimiento, se desarrolla una condición de transición en suelo la cual debe ser disipada antes de que las condiciones de estado estático se establezcan nuevamente¹³, es por esta razón que la escogencia de la velocidad con la cual se deformara la muestra es de gran importancia ya que

¹³ Porto Cortes Jaime, Ensayo de consolidación con Deformación Controlada, Universidad de los Andes, Tesis de Maestría, pag 22 - 23



al deformar la muestra a una velocidad muy alta no se logra disipar el exceso de presión de poros que se produce como reacción al incremento en la carga. Con el fin de evitar este tipo de inconvenientes, la velocidad de consolidación con deformación controlada para suelos arcillosos debe ser del orden de 0.02 % (mm/min)¹⁴.

Para la ejecución del ensayo se plantearon dos grupos de muestras, con el fin de establecer la muestra más expansiva y la muestra más colapsible. Para esto cada grupo estaba conformado por tres muestras, una por cada mezcla, las cuales, en el caso del grupo de las muestras expansivas tendrían una humedad inicial correspondiente a la humedad óptima, obtenida del ensayo de proctor estándar para cada mezcla, llevándolas a una carga vertical máxima de 9kN. En el caso del grupo del grupo de las muestras colapsables, la humedad inicial corresponde al 70% de la humedad óptima obtenida del ensayo proctor de cada muestra, llevándolas a una carga vertical máxima de 3kN. Este proceso de carga se complementa con un ciclo de humedecimiento, el cual se prolonga hasta que la muestra experimente el inicio de una expansión o colapso, teniendo en cuenta que al aumentar la carga únicamente debido al aumento de la humedad se presenta una expansión y en caso contrario se presentaría un colapso.

3.3.1 Procedimiento del Ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada

3.3.1.1 Equipo:

Para el desarrollo del ensayo de consolidación con deformación controlada se utilizaron los siguientes equipos de laboratorio:

¹⁴ Suzuki koji et al, Two case studies of consolidation settlement analysis using constant rate of strain consolidation Test, Japanese Geotechnical Society, Soil and Foundations Vol 44 pag 69 - 70



- *Cámara de compresión uniaxial:* Esta cámara de sección circular esta prevista de una serie de orificios laterales en los cuales se instalan los psicrómetros y las celdas de carga horizontales como se puede observar en la figura 3.12. Adicionalmente la cámara esta acoplado a una base en la cual se encuentra una piedra porosa, la cual permite el drenaje, e ingreso de agua a la muestra por la parte inferior de esta, siempre y cuando las llaves de drenaje así lo permitan (Figura 3.13).
- *3 psicrómetros*
- *Equipo Wescor para la recolección de datos de Succión*
- *Computador*
- *Sensor de Humedad*
- *Osciloscopio*
- *Fuente reguladora de Voltaje*
- *3 Celdas de Carga para carga horizontal*



Figura 3.12. Detalle cámara de compresión uniaxial



Figura 3.13. Detalle base de la cámara de compresión uniaxial

- *Celda de Carga vertical*
- *Defomimetro*
- *Prensa*
- *Equipo menor*



Figura 3.14. Montaje general de l ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada

Las figuras 3.14 y 3.15 presentan el montaje de laboratorio necesario para la ejecución del ensayo de compresión con velocidad de deformación controlada, en el cual se puede apreciar cada uno de los equipos anteriormente listados.

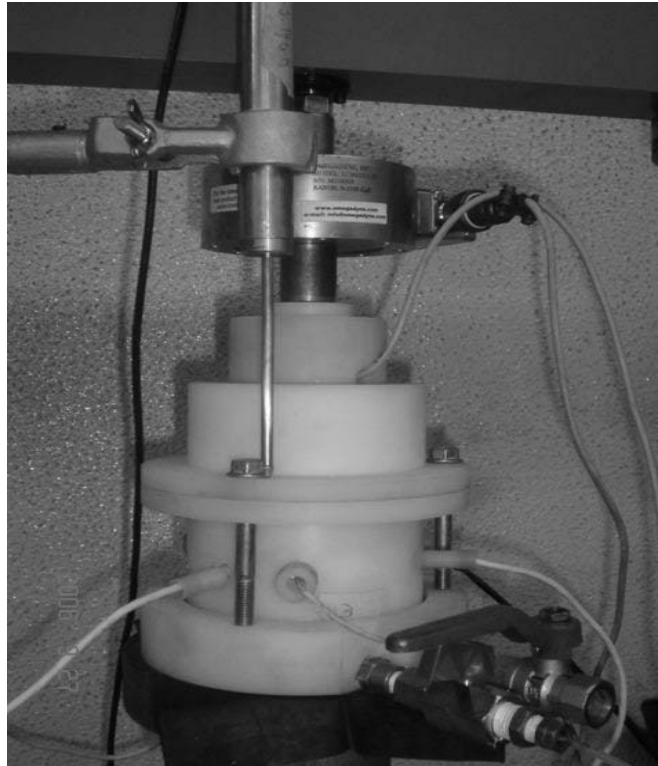


Figura 3.15. Cámara ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada

3.3.1.2 Procedimiento de Ensayo

Inicialmente la muestra, sea una muestra correspondiente al grupo de las expansivas, o al grupo de las colapsables, es mezclada con el agua hasta lograr el valor de la humedad inicial deseada. Posteriormente la muestra es introducida en estado suelto dentro de la cámara de compresión uniaxial, alrededor del sensor de humedad, el cual esta ubicado en el centro de la cámara compresión uniaxial. Una vez depositada la muestra, se coloca el pistón de carga, el cual esta provisto de una perforación circular, que permite el paso del sensor de humedad para evitar el aplastamiento de este (ver figura 3.7), inmediatamente se da inicio al ciclo de carga, el cual corresponde a un ciclo de carga inicial, hasta la carga máxima de 9kN, seguido de un ciclo de descarga total de la muestra y finaliza con una recarga de la muestra nuevamente hasta 9kN.



Una vez es terminado el ciclo de carga, se registra el valor de la carga última y se da inicio al proceso de humedecimiento, el cual se mantiene hasta que la muestra bajo análisis presente muestras de expansión o colapso, teniendo en cuenta que el aumento sostenido de la carga asociado únicamente al aumento en el contenido de humedad, es señal de una expansión, mientras que una disminución sostenida de la carga asociada igualmente al aumento en el contenido de humedad de la muestra, se relaciona con el proceso de colapso.



4.0 RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada, efectuados sobre los dos grupos de muestras.

4.1 Muestras expansivas

4.1.1 Muestra 1 - 88% arena + 12% kaolín

Este ensayo se realizó sobre una muestra compuesta por 88% arena amarilla y 12% kaolín, con una humedad inicial igual al 12%. El tiempo total del ensayo fue de 30 horas. En la figura 4.1 se observa el cambio en el volumen específico que experimenta la muestra durante el ensayo, en donde la muestra, una vez finalizado el ciclo de carga, al aumentar el contenido de humedad, la muestra no presenta expansión.

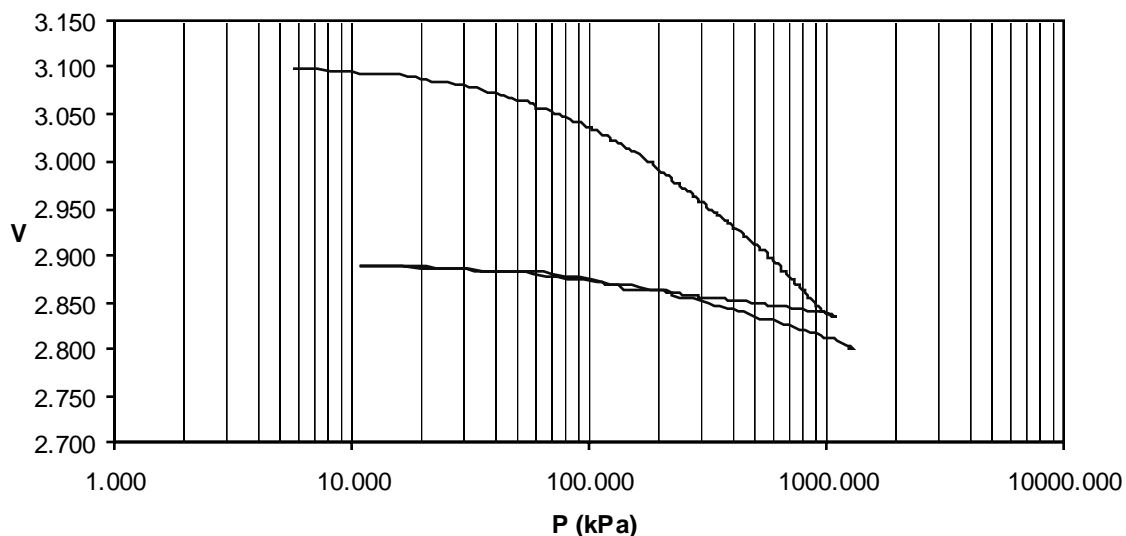


Figura 4.1. Cambio en el volumen específico por el incremento en P.



Como se menciona anteriormente en la figura 4.1, no es muy claro el comportamiento experimentado por la muestra una vez finaliza el ciclo de carga, en la figura 4.2 se puede observar con mayor claridad desde el punto de vista de la trayectoria de esfuerzos, el comportamiento de la muestra una vez se da inicio al ciclo de humedecimiento, en donde la muestra experimenta una relajación en el estado de esfuerzos durante la mayor parte del ciclo y casi al final da muestras de una recuperación, la cual no es sostenida y es seguida nuevamente de una relajación.

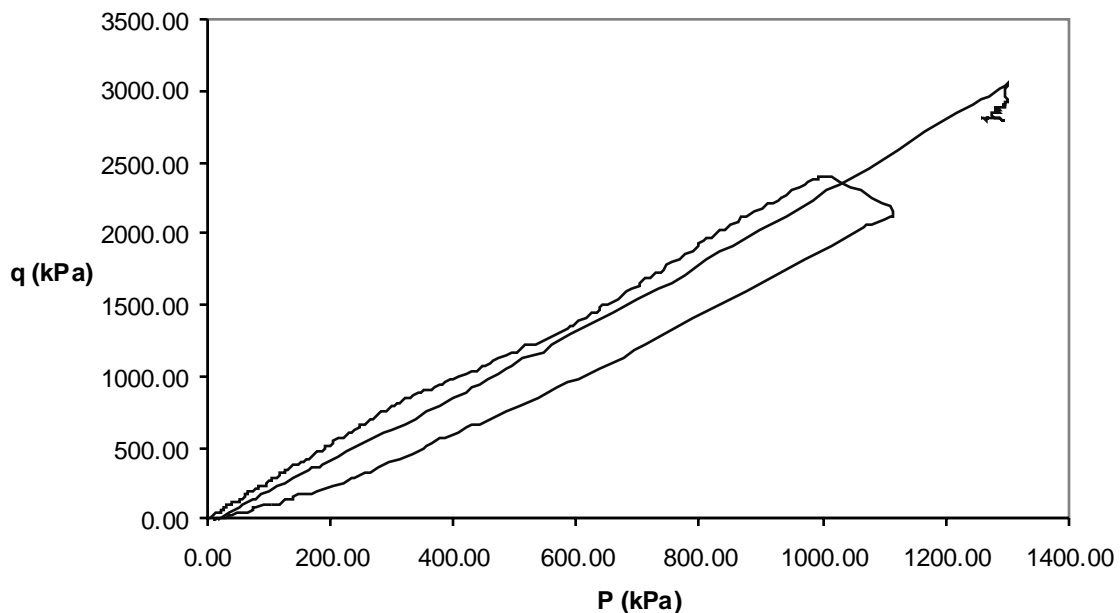


Figura 4.2. Trayectoria de esfuerzos

Desde el punto de vista del comportamiento esfuerzo deformación que experimenta la muestra Figura 4.3, se observa al igual que en la trayectoria de esfuerzos que experimenta la muestra, esta una vez se inicia el ciclo de humedecimiento presenta una relajación el estado de esfuerzos sostenido, lo cual se relaciona más con un comportamiento de colapso. Es importante aclarar que debido a las condiciones del montaje no es posible medir la deformación del suelo durante el proceso de humedecimiento, el cual para este trabajo se considera



constante, claro esta sin que sea de esta manera, ya que parte de la relación en el estado de esfuerzos de la muestra esta relacionado con la deformación que la muestra experimenta durante el humedecimiento.

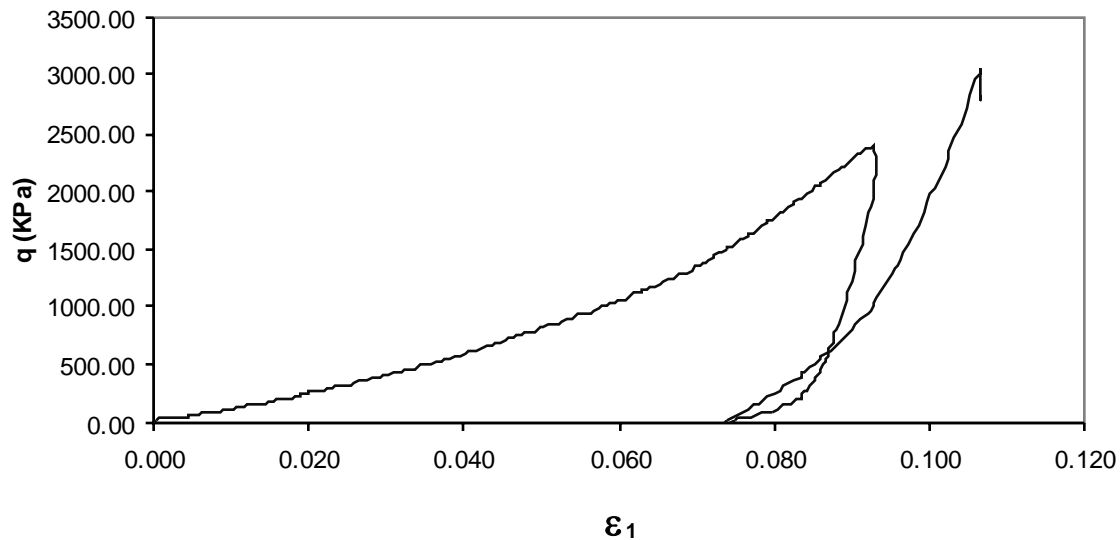


Figura 4.3. Comportamiento esfuerzo deformación

Con la implementación de la medida de la variación en la succión durante el ensayo, se puede establecer el comportamiento que experimenta esta variable, a través del ensayo. La muestra presenta una succión inicial de 6.65 Mpa, la cual durante el ciclo de carga, presenta una disminución, asociada al aumento de la deformación en la muestra figura 4.4. Una vez se inicia el proceso de humedecimiento, en donde, la succión registrada es de 5.53 Mpa, el incremento en el contenido de humedad en la muestra genera una disminución sostenida de la succión, la cual se mantiene hasta el final del ensayo.

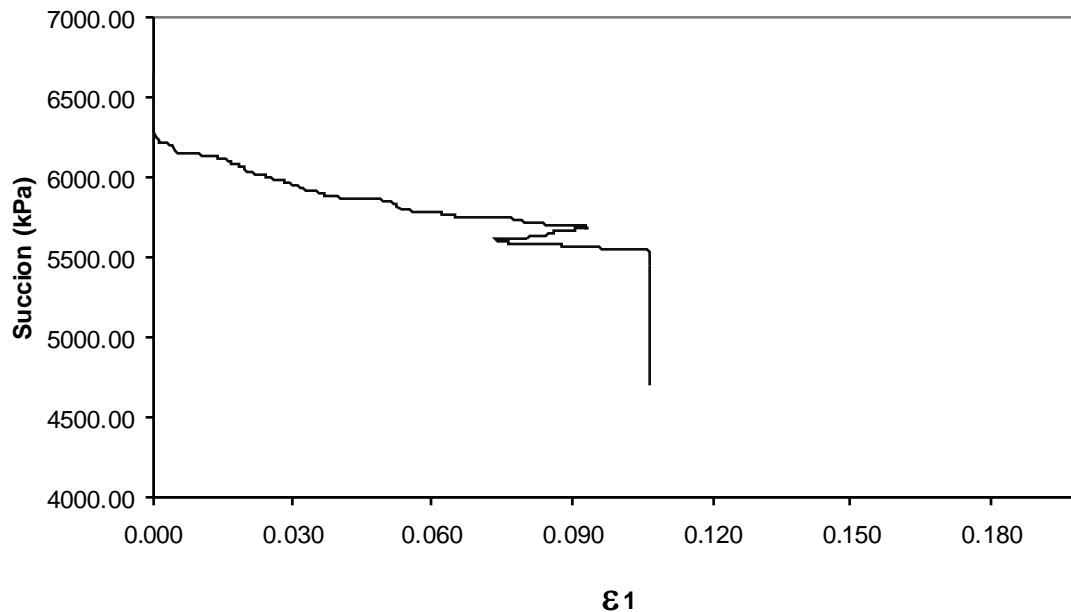


Figura 4.4. Comportamiento succión deformación

La muestra experimenta un aumento sostenido en el contenido de humedad (figura 4.5), asociado inicialmente a la deformación producida durante el proceso de carga. Sin embargo, durante el proceso de humedecimiento, la muestra experimenta un aumento importante en el contenido de humedad, el cual a su vez genera un aumento en el grado de saturación (figura 4.6), lo cual produce un descenso significativo en la succión, lo cual facilita la presentación del comportamiento de relajación en el estado de esfuerzos mostrado por la muestra, el cual como ya se mencionó se asocia a un proceso de colapso, demostrando que la mezcla utilizada, bajo las condiciones iniciales previstas, no genera expansión.

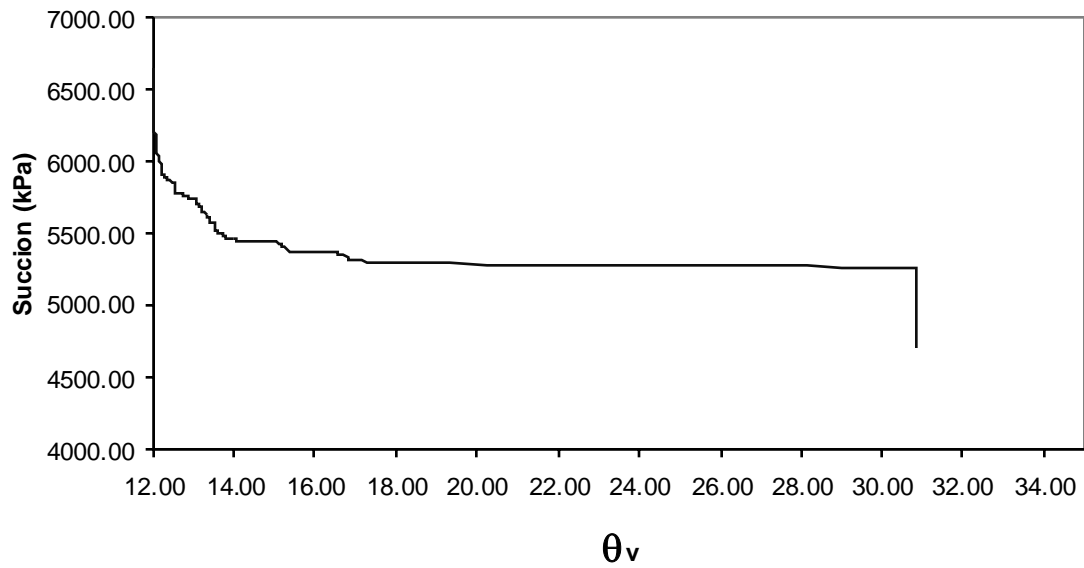


Figura 4.5. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

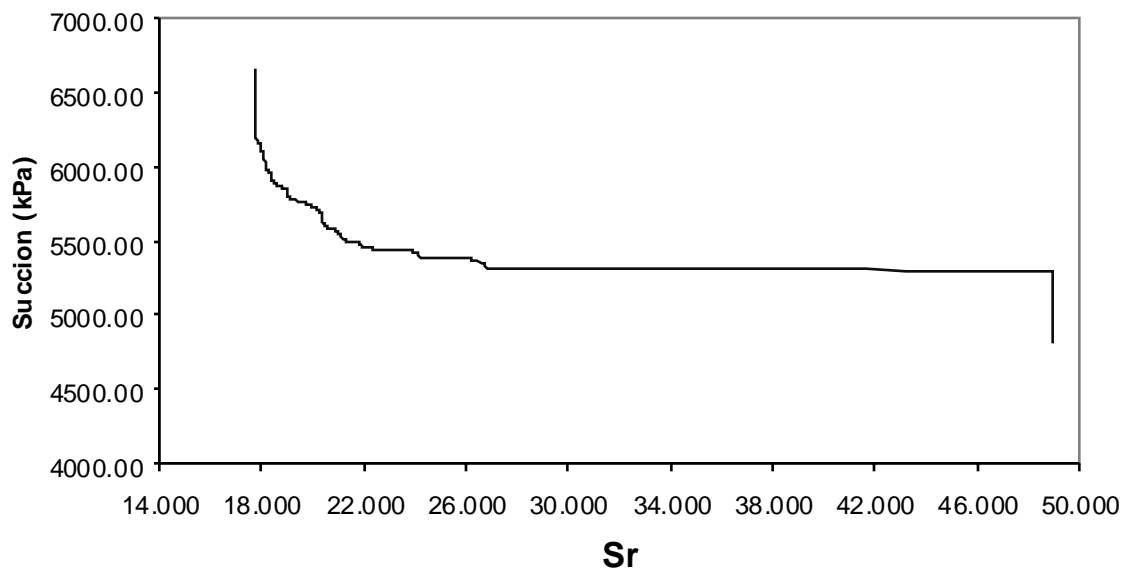


Figura 4.6. Comportamiento succión vs saturación



4.1.2 Muestra 2 – 65% arena + 35% kaolín

Este ensayo se realizo sobre una muestra compuesta por una mezcla de 65% arena amarilla y 35% kaolín, con una humedad inicial del 13 %. El tiempo total del ensayo fue de 46 horas. La figura 4.7 muestra el comportamiento que experimenta la muestra en términos de la variación del volumen específico, producida por el aumento del esfuerzo promedio P , en donde una vez iniciado el proceso de humedecimiento, la muestra exhibe un comportamiento expansivo, el cual se traduce como un incremento en P debido únicamente al aumento en el contenido de humedad en la muestra.

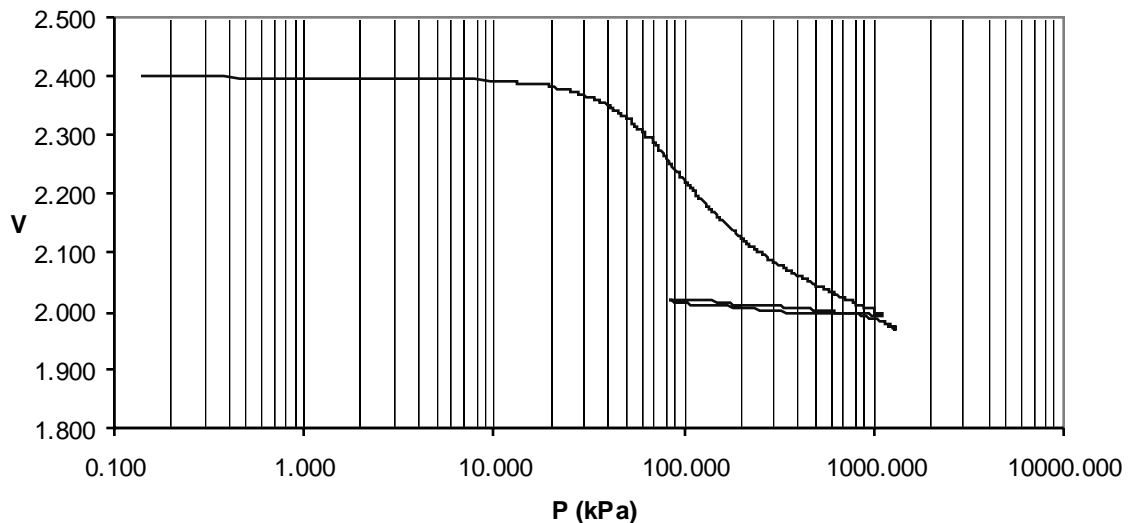


Figura 4.7 Cambio en el volumen específico por el aumento en P



La trayectoria de esfuerzos mostrada en la figura 4.8, muestra el comportamiento experimentado por la muestra durante el ensayo, la cual, una vez iniciado el proceso de humedecimiento, presenta una relajación en el estado de esfuerzos, hasta alcanzar un contenido de humedad tal que, se da inicio al proceso de expansión de la muestra, asociado con el incremento en el estado de esfuerzos, debido únicamente al incremento en el contenido de humedad de la muestra.

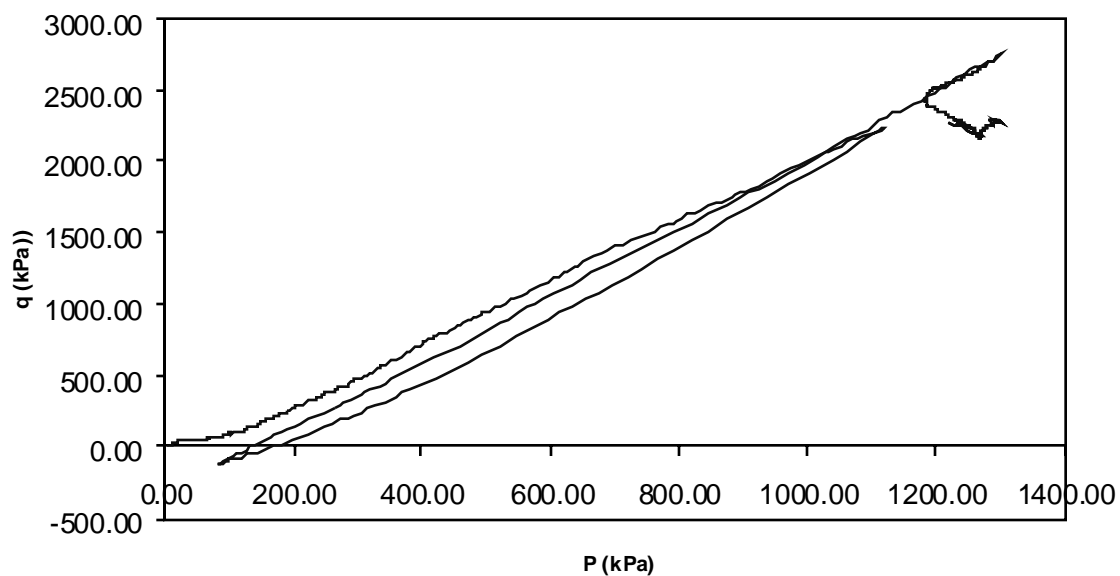


Figura 4.8 Trayectoria de esfuerzos

La figura 4.9, muestra el comportamiento esfuerzo deformación, que experimenta la muestra, la cual, una vez iniciado el proceso de humedecimiento, presenta inicialmente una disminución en q , debida al aumento progresivo en el contenido de humedad de la muestra, hasta que la muestra alcanza un contenido de humedad tal que, se da inicio al proceso de expansión, en donde el estado de esfuerzos para q experimenta una recuperación, la cual en términos de la deformación y por las condiciones del ensayo ocurre, sobre la misma trayectoria.

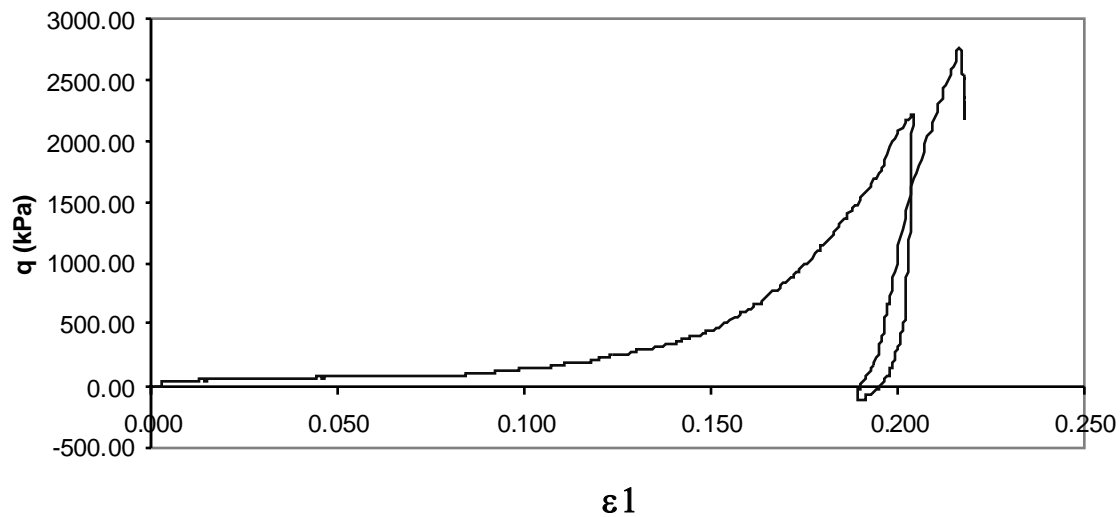


Figura 4.9. Comportamiento esfuerzo deformación

Bajo las condiciones del ensayo, la succión inicial en la muestra, es de 5.75 Mpa, menor a la desarrollada en la muestra numero 1, lo cual muestra la sensibilidad que presenta la succión, frente a los cambios de humedad, ya que la diferencia en el contenido de humedad entre una muestra y otra es tan solo del 1%. Al igual que la muestra 1, la succión experimenta un descenso como consecuencia del proceso de deformación inducido por el ciclo de carga, descenso que se ve incrementado con el ciclo de humedecimiento. Figura 4.10.

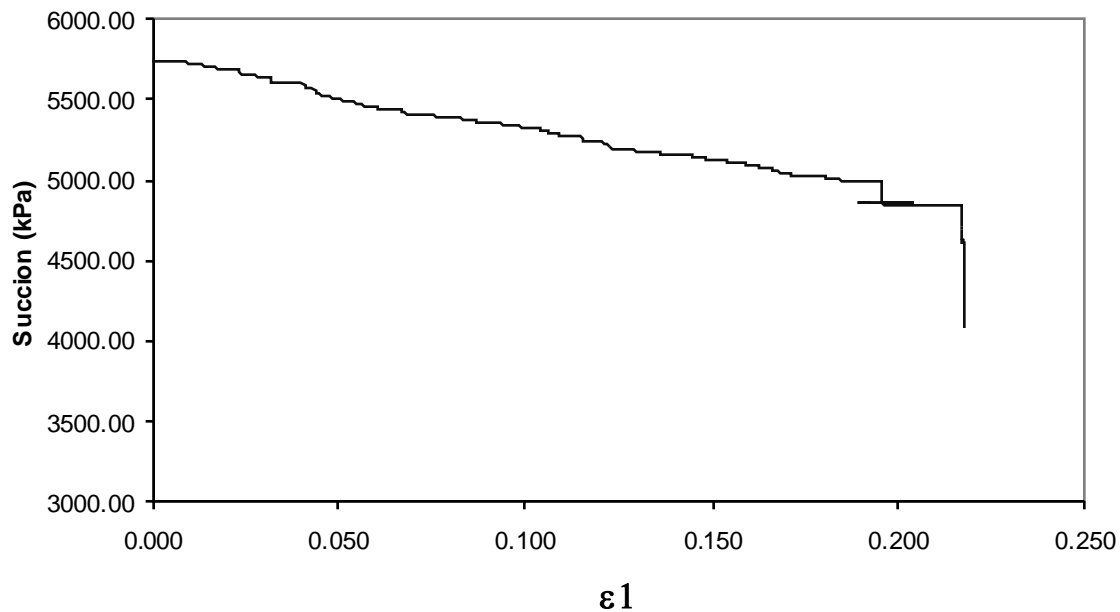


Figura 4.10. Comportamiento succión deformación

En las figuras 4.11 y 4.12, muestran el incremento sostenido, tanto en el contenido de humedad de la muestra, como en el grado de saturación, a lo largo del ensayo, teniendo un aumento significativo, durante el proceso de humedecimiento. Al inicio del proceso de humedecimiento se presenta una succión de 4,83 Mpa, para un contenido de humedad de 14.4 % y un grado de saturación de 29.13. A partir de este momento y con tan solo un aumento en el grado de saturación en la muestra del 2%, se presenta una disminución de cerca de 800 kPa en la succión, lo cual facilita el proceso de expansión observado en la muestra.

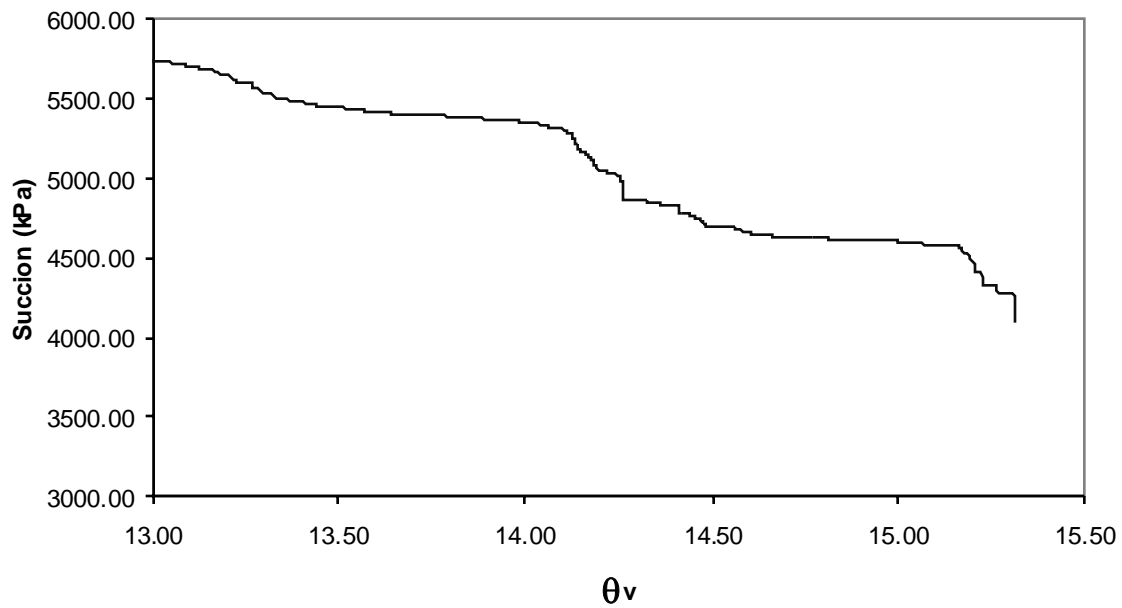


Figura 4.11. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

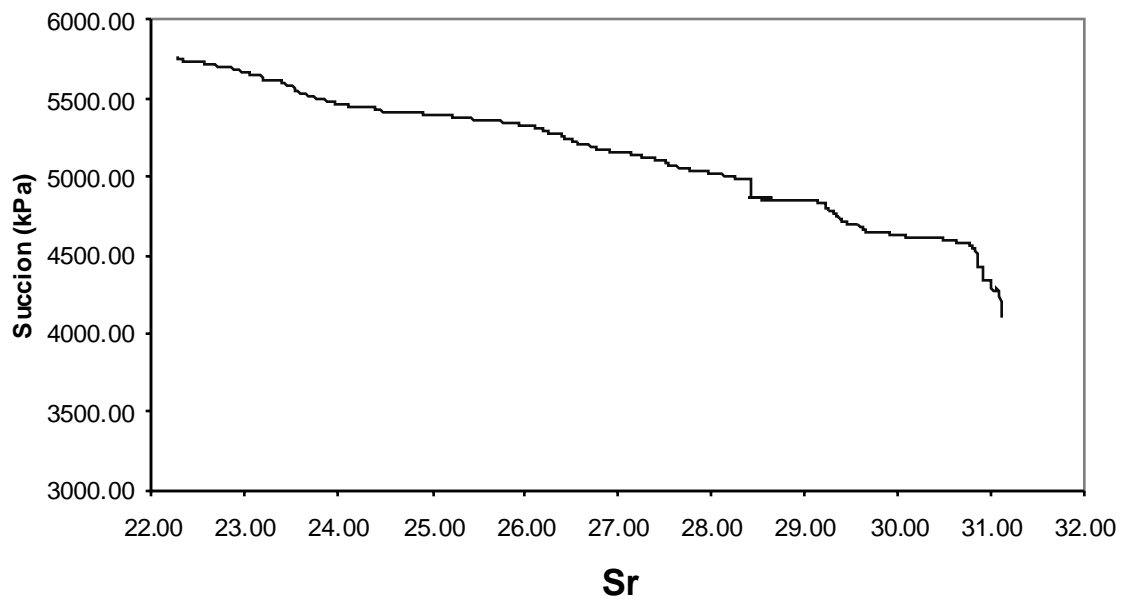


Figura 4.12. Comportamiento succión vs grado de saturación



4.1.3 Muestra 3 – 100% kaolín

Este ensayo se realizo sobre una muestra de kaolín 100%, con una humedad inicial del 25%. El tiempo total del ensayo fue de 56 horas. La figura 4.13, muestra el comportamiento que experimenta la muestra, en términos de la variación del volumen específico con respecto al incremento en el esfuerzo promedio P , durante el ensayo. En donde se observa que la muestra es bastante compresible, bajo las condiciones de humedad y carga impuestas, así mismo, como se vera más adelante, esta muestra desarrollo la mayor expansión, de las tres muestra analizadas.

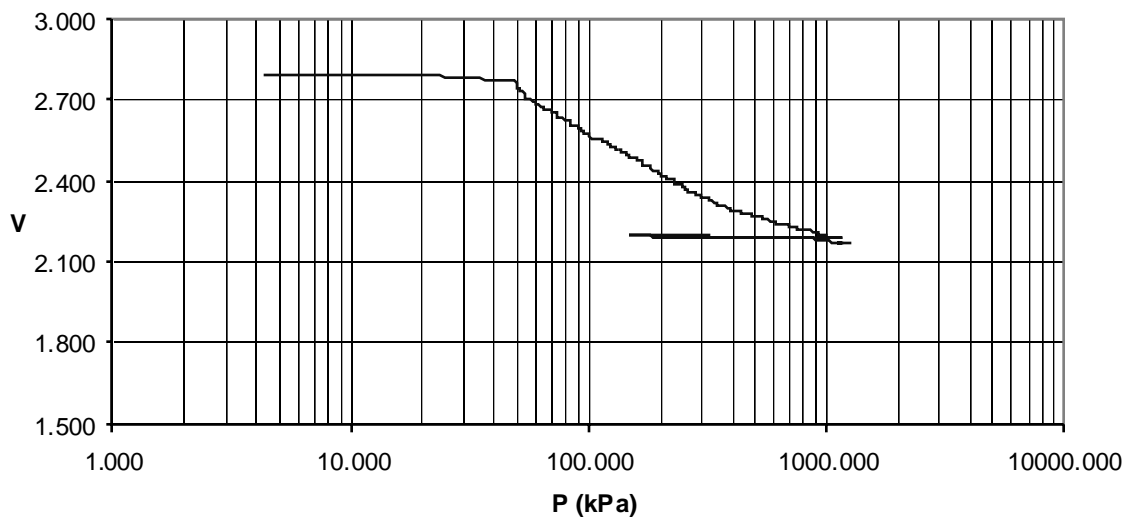


Figura 4.13. Cambio en el volumen específico debido al aumento en P

La figura 4.14, muestra la trayectoria de esfuerzos que experimenta la muestra, en donde, una vez iniciado el proceso de humedecimiento, la muestra experimenta un relajación en el estado de esfuerzos, debido a que la muestra continua con el proceso de deformación, hasta que, el contenido de humedad que alcanza la muestra da inicio al proceso de expansión.

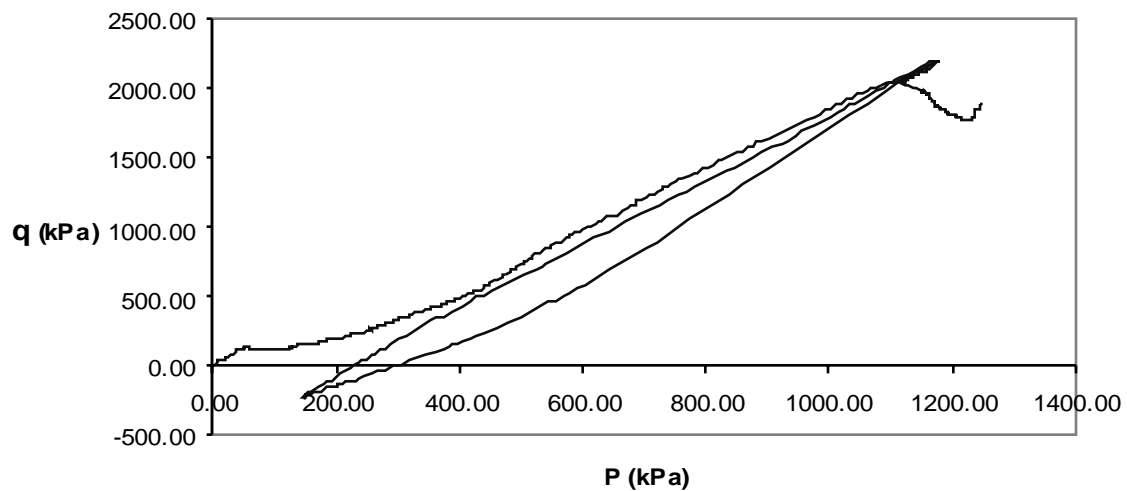


Figura 4.14. Trayectoria de esfuerzos

La figura 4.15, muestra el comportamiento esfuerzo deformación, que experimenta la muestra, en la cual al igual que en las muestras anteriores, se presenta una disminución en q , durante el inicio del proceso de humedecimiento de la muestra, el cual se mantiene durante gran parte del proceso de expansión, pero debido al aumento en el contenido de humedad de la muestra presenta una recuperación hacia el final del ensayo.

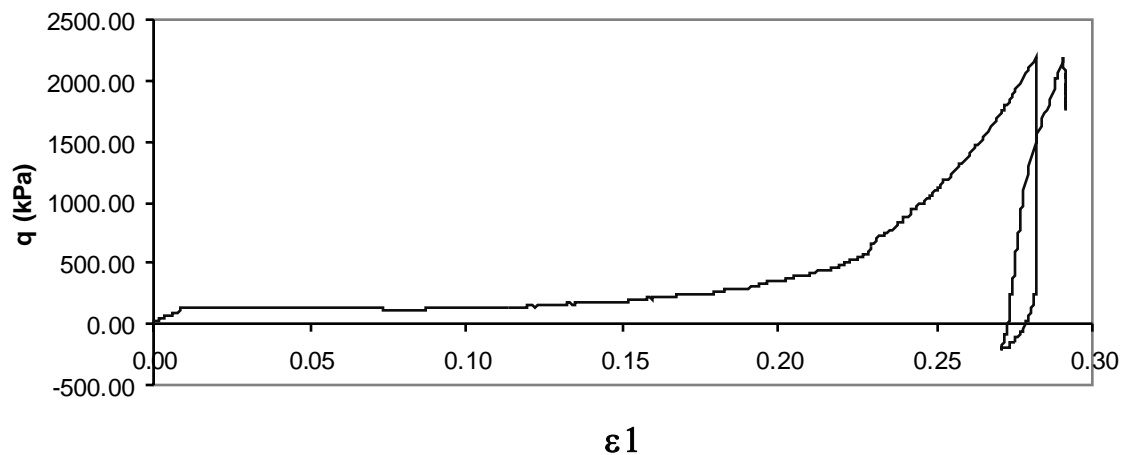


Figura 4.15 Comportamiento esfuerzo deformación



Desde el punto de vista de la succión, este ensayo se inicio con un valor de 7.53 Mpa, para un contenido de humedad del 25%. Este es el valor inicial de succión más alto de los tres ensayos, al ser este realizado sobre la muestra de material más arcilloso de los tres. Este ensayo presenta una menor variación en la succión durante el proceso de carga, como lo muestra la figura 4.16, en donde se muestra que una vez se da inicio al proceso de humedecimiento, la succión presenta su mayor variación.

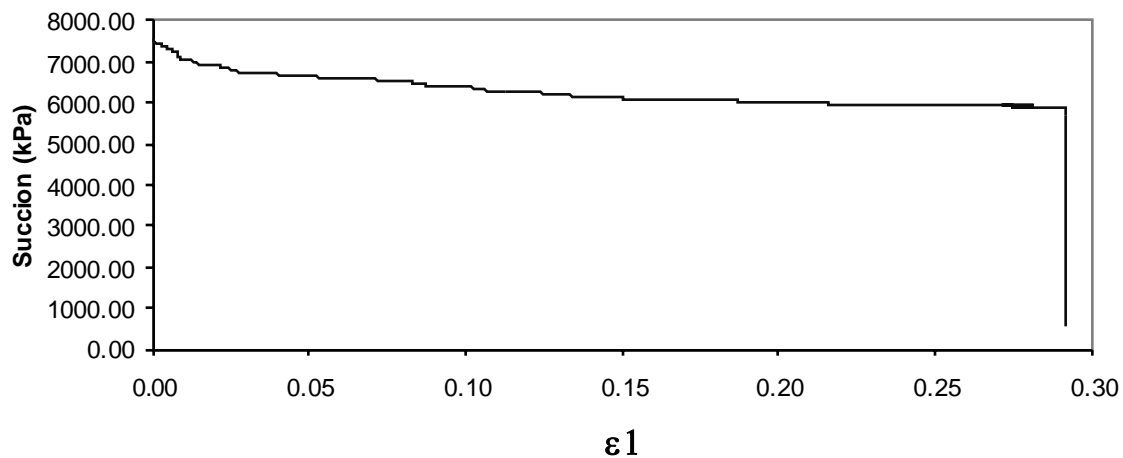


Figura 4.16 Comportamiento succión deformación

El proceso de humedecimiento para esta muestra se inicia cuando la succión registrada presenta un valor de 5.87 Mpa para un grado de saturación del 35%, con el aumento en el contenido de humedad durante este proceso (figura 4.17), la muestra alcanza un grado de saturación cercano al 67% (figura 4.18) y por consiguiente una disminución en la succión de 5.3 Mpa, hasta llegar a un valor de 0.5 Mpa, produciendo de esta manera la mayor expansión registrada, de las tres muestras analizadas.

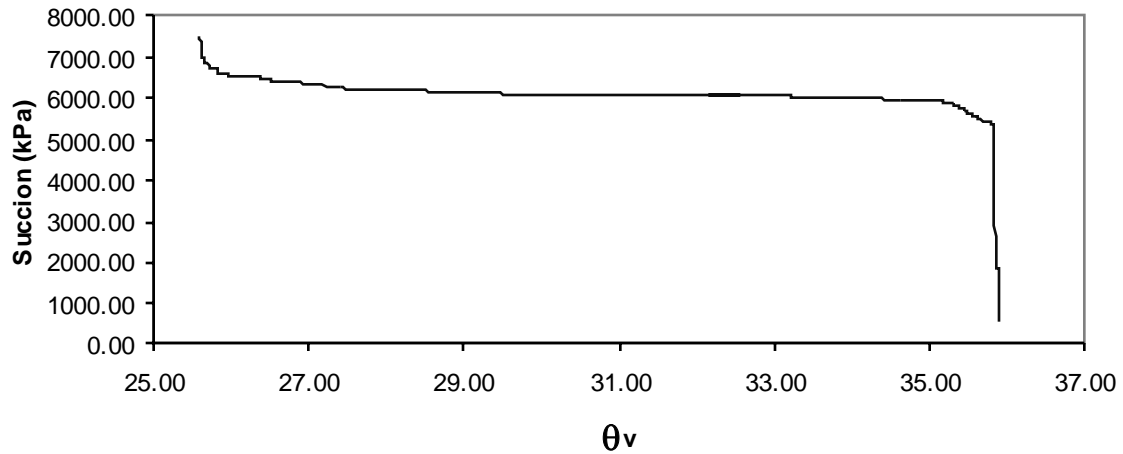


Figura 4.17. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

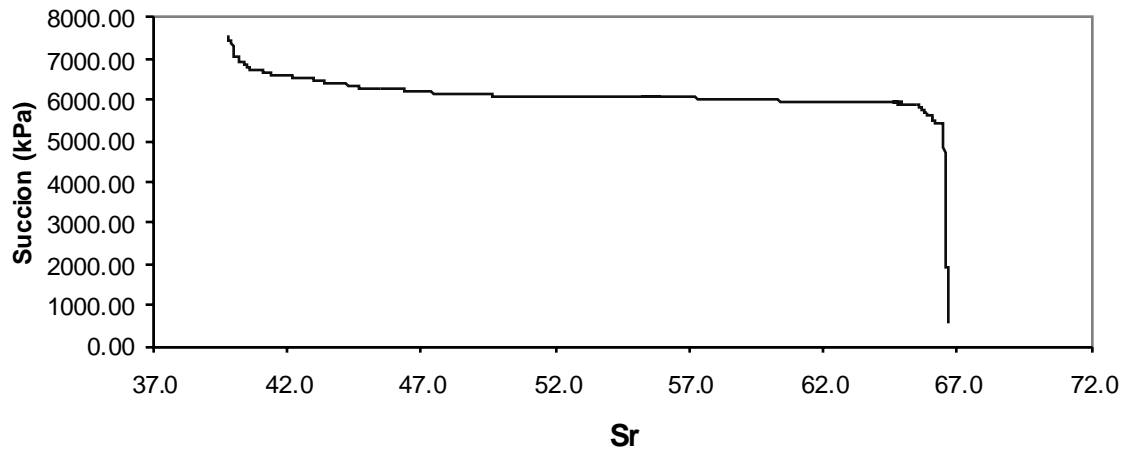


Figura 4.18. Comportamiento succión vs grado de saturación



4.2 Muestras colapsables

Para el caso de las muestras colapsables, la humedad inicial con la cual se prepararon las muestras corresponde al 70% del valor obtenido como humedad óptima, del ensayo de proctor estándar, llevándolas durante el proceso de carga, a una carga máxima de 3kN.

4.2.1 Muestra 1 – 88% arena + 12% kaolín

Este ensayo se realizó sobre una muestra conformada por 88% arena amarilla y 12% kaolín, con una humedad inicial del 8.55%. El tiempo total del ensayo fue de 24 horas. La figura 4.19, muestra el comportamiento experimentado por la muestra durante el proceso de carga y posterior humedecimiento. A pesar de que la muestra se introduce en la cámara en estado suelta, se observa una ligera preconsolidación, la cual es debida principalmente a la succión presente en la muestra.

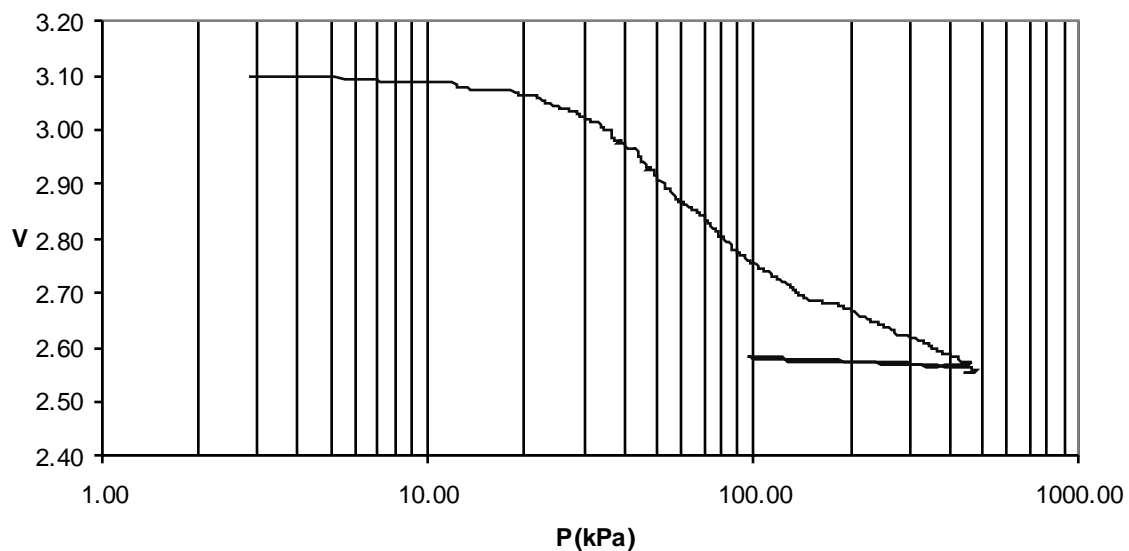


Figura 4.19. Cambio en el volumen específico debido al incremento en P



Desde el punto de vista de la trayectoria de esfuerzos (figura 4.20), se observa que, una vez se inicia el proceso de humedecimiento, se presenta una relajación en el estado de esfuerzos alcanzado al final del proceso de carga, debido únicamente al aumento en el contenido de humedad, lo cual desarrolla el proceso de colapso observado en la muestra.

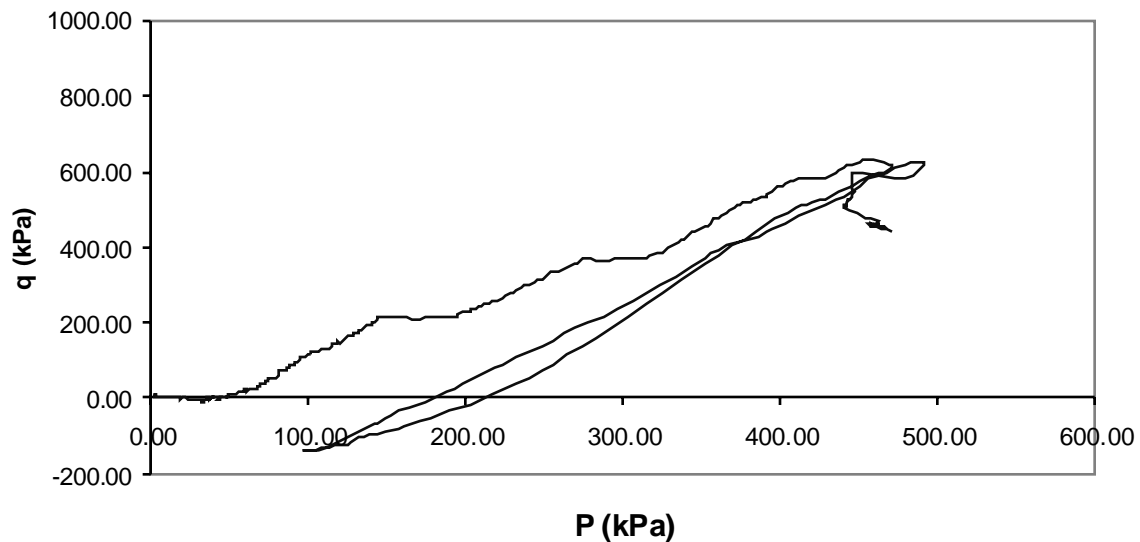


Figura 4.20. Trayectoria de esfuerzos

En cuanto al comportamiento esfuerzo deformación experimenta por la muestra (figura 4.21), se observa que una vez iniciado el proceso de humedecimiento, la muestra experimenta un descenso sostenido en el estado de esfuerzos hasta la finalización del ensayo, lo cual es producido únicamente por el incremento en el contenido de humedad de la muestra.

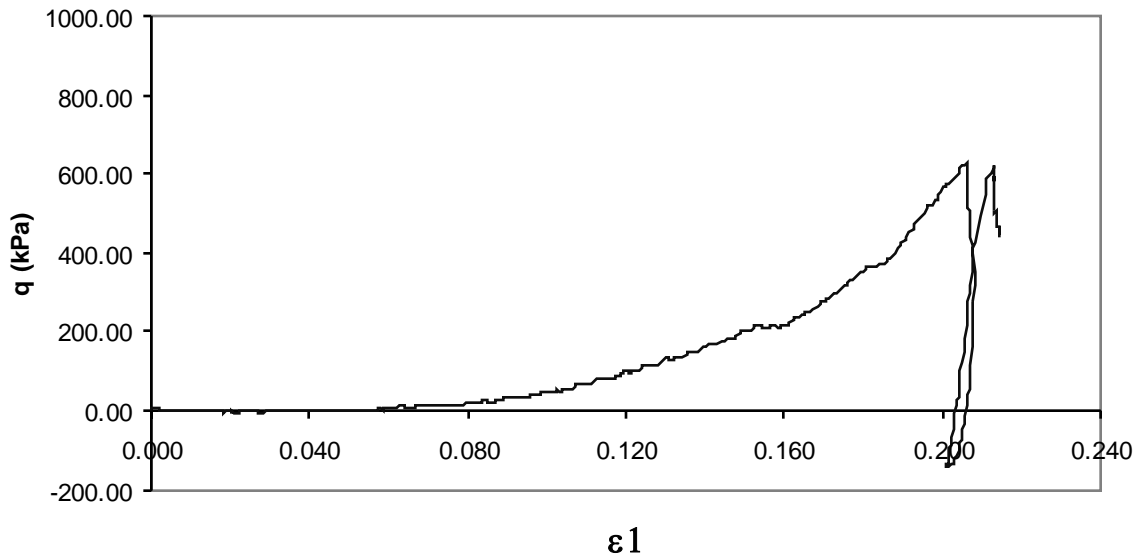


Figura 4.21 Comportamiento esfuerzo deformación

El valor registrado al inicio del ensayo para la succión es de 6.74 Mpa, el cual es progresivamente disminuido durante el proceso de caga, como consecuencia de la deformación producida durante este. Cuando la muestra es sometida al proceso de humedecimiento, el valor de la succión sufre al igual a lo observado en las muestras expansivas un descenso mucho mas importante, del que venia presentado durante el proceso de carga, el cual se mantiene hasta el final del ensayo. (Figura 4.22).

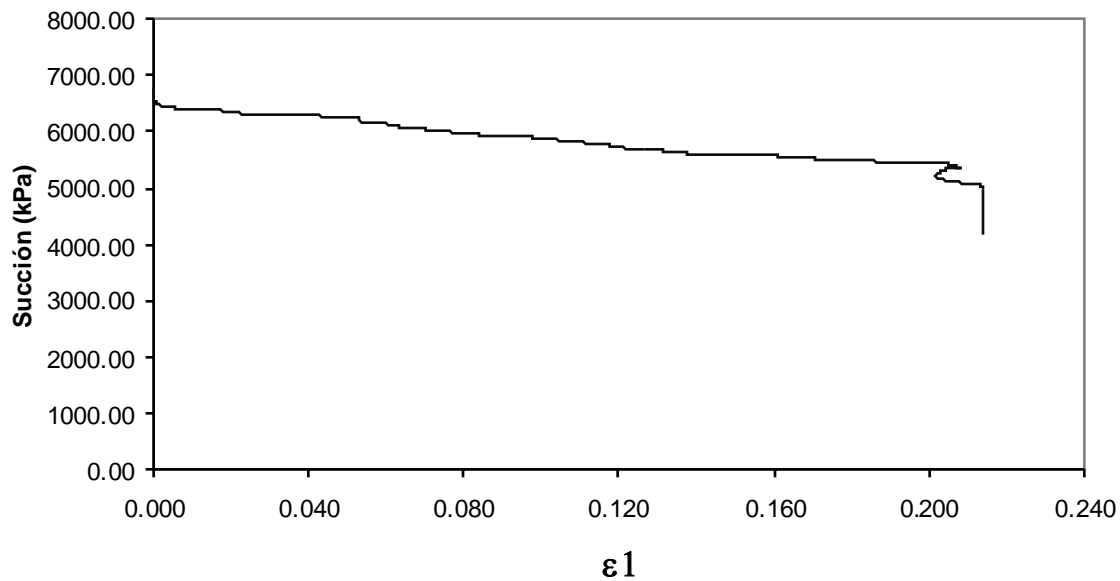


Figura 4.22. Comportamiento succión deformación

El proceso de humedecimiento se inicia para una succión registrada de 5.06 Mpa, correspondiente a un contenido de humedad de 10.96% (figura 4.23), a partir de este momento la muestra experimenta un aumento importante en el contenido de humedad, lo cual se traduce en un aumento en el grado de saturación de la muestra (figura 4.24), que en ambos casos implica una disminución importante de la succión, frente a pequeños cambios en el contenido de humedad del suelo, que de esta manera facilitan el desarrollo del proceso de colapso exhibido por la muestra.

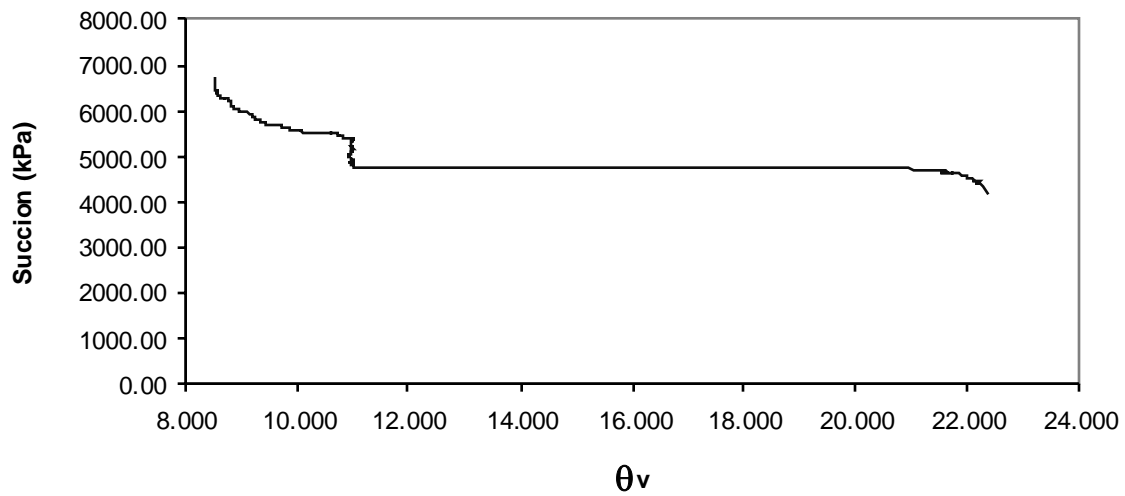


Figura 4.23. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

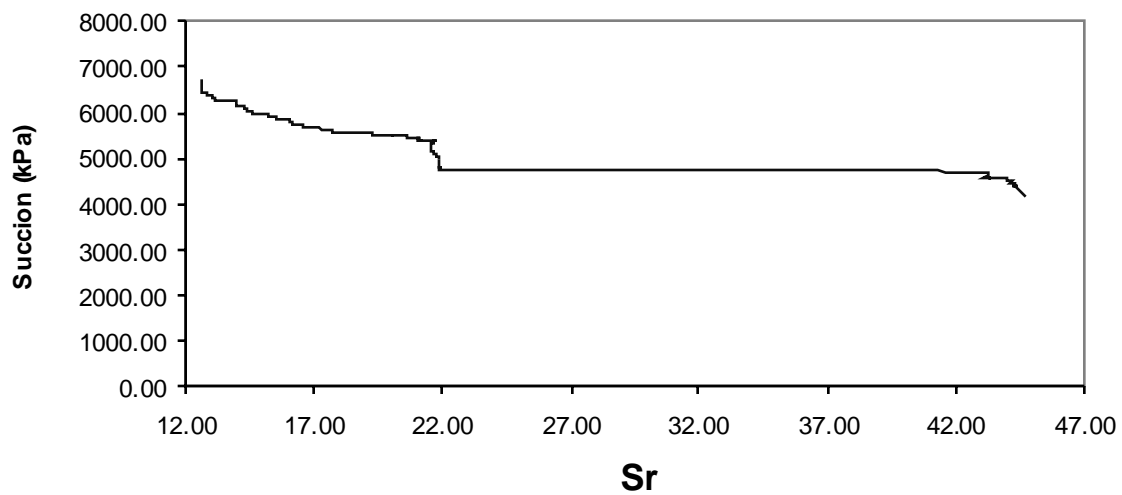


Figura 4.24. Comportamiento succión vs grado de saturación



4.2.2 Muestra 2 – 65% arena + 35% kaolín

Este ensayo se realizó sobre una muestra conformada por 65% arena amarilla y 35% kaolín, con una humedad inicial del 9.10%. La duración total del ensayo fue de 18 horas. La figura 4.25, muestra el comportamiento observado en la muestra en cuanto a la variación en el volumen específico, debido al incremento del esfuerzo promedio P , producido por el ciclo de carga y posteriormente debida al proceso de humedecimiento. Al igual que las muestras anteriores, la muestra es introducida a la cámara en estado suelto, sin embargo la muestra presenta un ligero grado de preconsolidación, debida principalmente a la succión que se genera en la muestra gracias a su condición de no saturación. Una vez se inicia el proceso de humedecimiento, la muestra presenta el mayor comportamiento colapsivo de las tres muestras de analizadas.

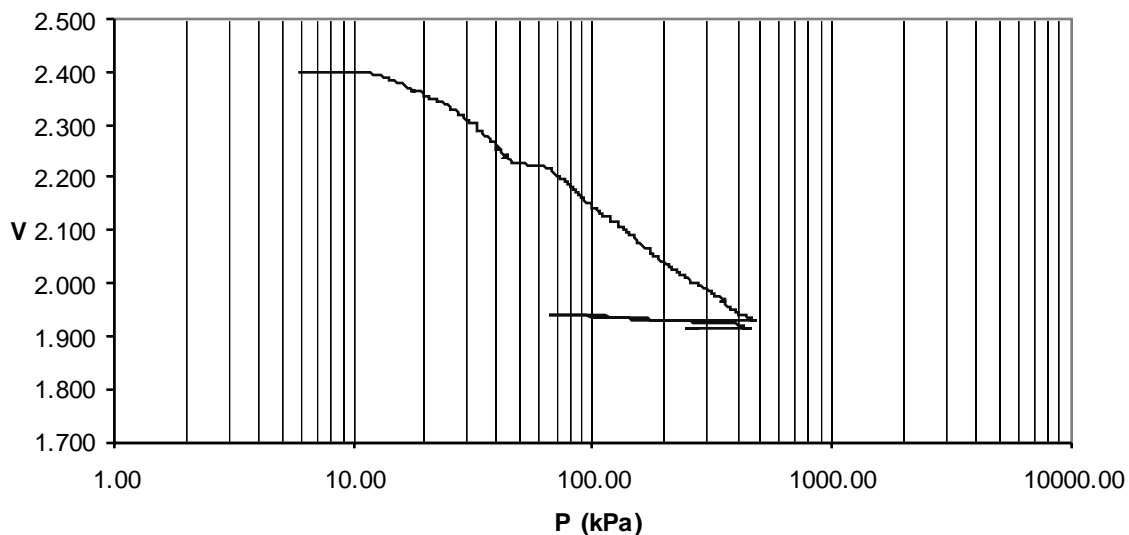


Figura 4.25. Cambio en el volumen específico debido al incremento en P

Analizando el proceso de colapso, desde el punto de vista de la trayectoria de esfuerzos, presenta una relajación sostenida del nivel de esfuerzos a la cual fue sometida la muestra, al final del ciclo de carga, en donde esta disminución se debe



principalmente al aumento en el contenido de humedad de la muestra, debido al proceso de humedecimiento. Figura 4.26. -

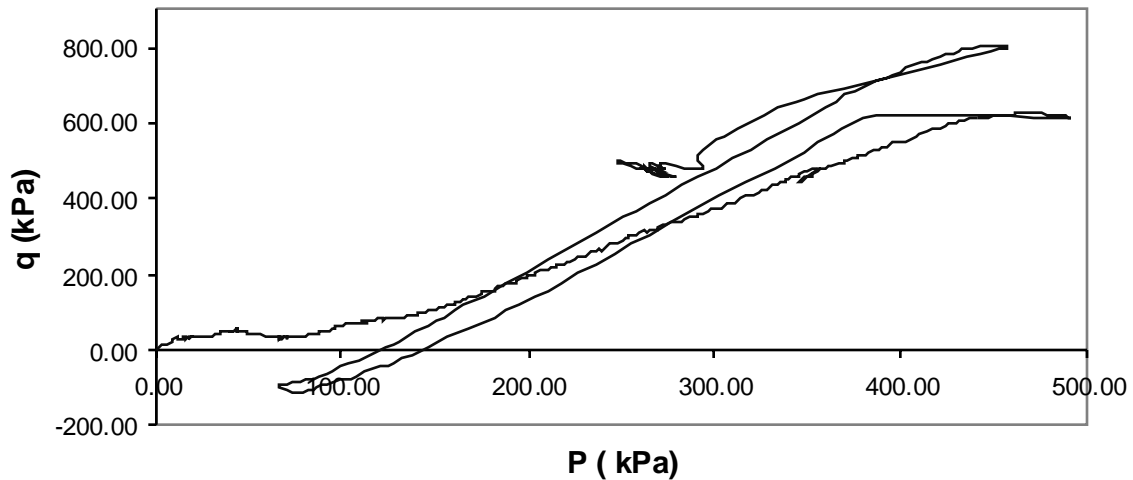


Figura 4.26. Trayectoria de esfuerzos

El desarrollo del colapso que exhibe esta muestra se puede observar de manera más clara desde el punto de vista del comportamiento esfuerzo deformación (figura 4.27), en donde, el nivel de deformación y esfuerzos que presenta la muestra al inicio del proceso de humedecimiento, muestra una relajación debido al ingreso del agua en la muestra.

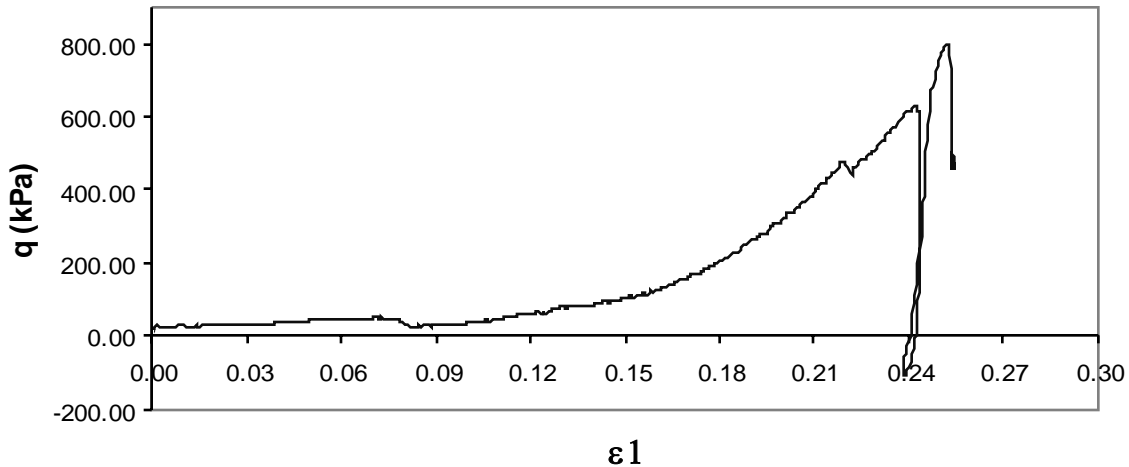


Figura 4.27. Comportamiento esfuerzo deformación

La succión registrada la inicio del ensayo fue de 5.95 Mpa. La figura 4.28, muestra el comportamiento que experimenta la succión durante el ensayo, donde se observa que, principalmente durante el ciclo de carga, la succión presenta la mayor disminución, debido a la alta compresibilidad exhibida por la muestra durante el ensayo.

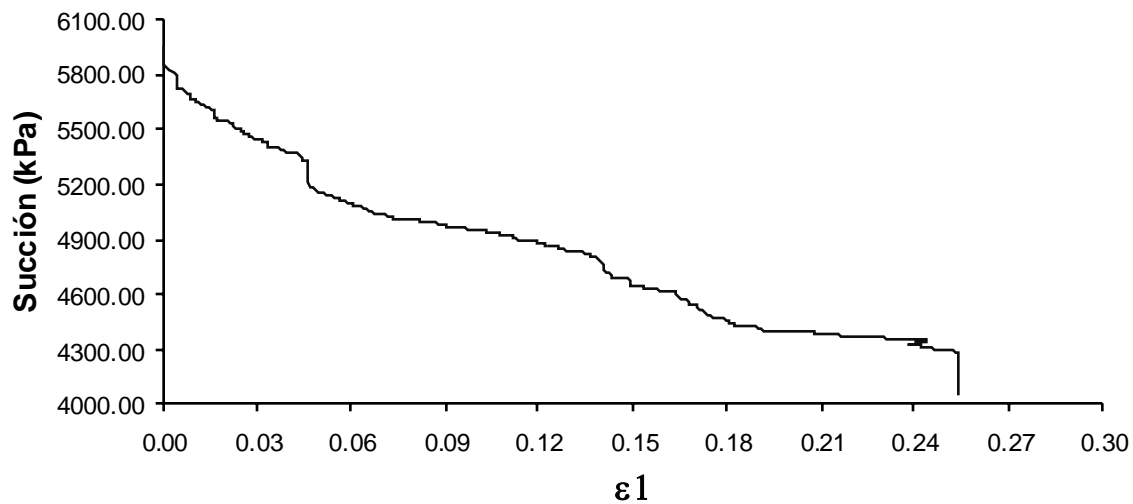


Figura 4.28. Comportamiento succión deformación



Una vez finalizado el ciclo de carga, se da inicio al proceso de humedecimiento, para el cual el valor de la succión registrada es de 4.28 Mpa, para un contenido de humedad del 13.32%. Durante el proceso de humedecimiento la muestra no experimenta grandes cambios desde el punto de vista del contenido de humedad (figura 4.29), pero al ver el comportamiento de la muestra en términos de la saturación (figura 4.30), se muestra un incremento importante en el grado de saturación de la muestra, lo que se traduce en una disminución adicional de las condiciones de succión de la muestra, ara que de esta manera facilitar el proceso de colapso.

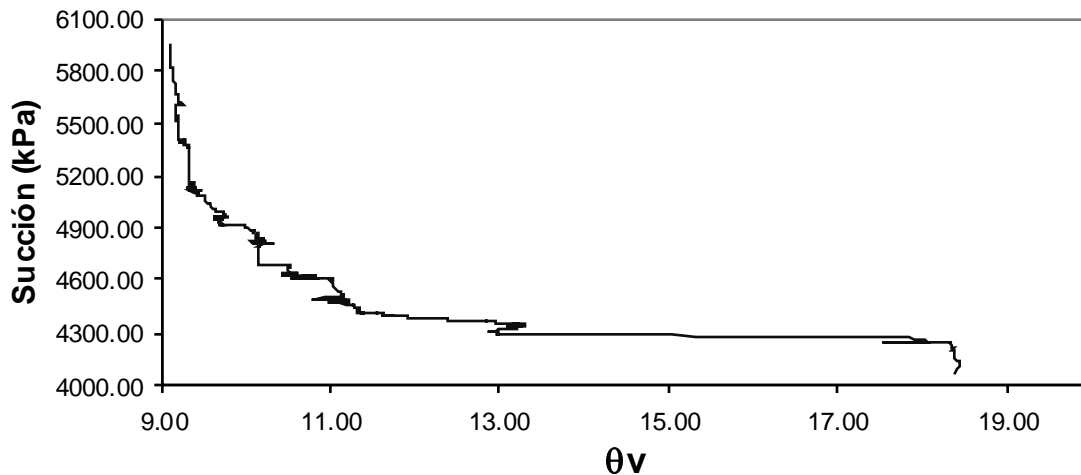


Figura 4.29. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

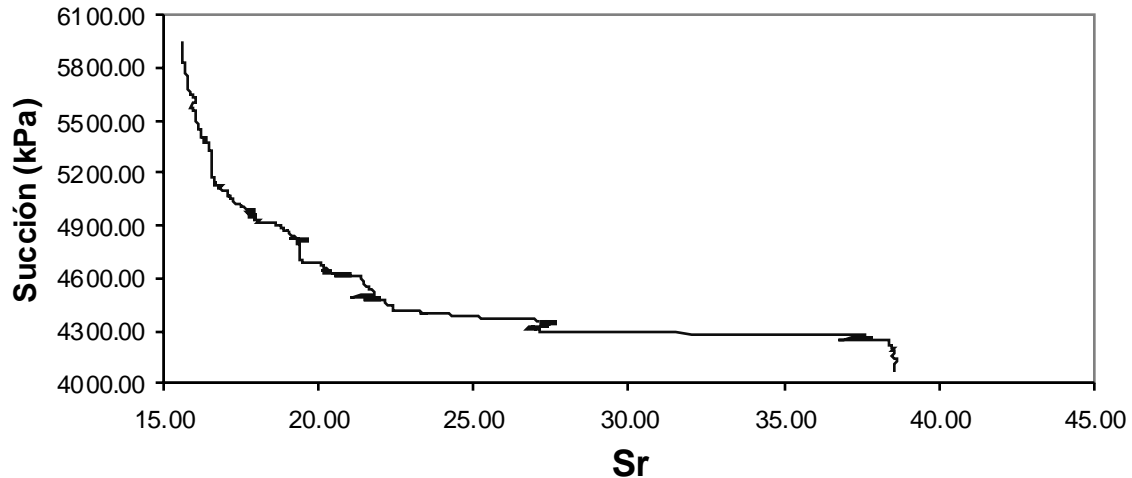


Figura 4.30 Comportamiento succión vs grado de saturación

4.2.3 Muestra 3 – 100% kaolín

Este ensayo se realizó sobre una muestra conformada por 65% arena amarilla y 35% kaolín, con una humedad inicial del 17.5 %. La duración total del ensayo fue de 23 horas. La figura 4.31, muestra el cambio en el volumen específico, el cual se debe principalmente al aumento en el esfuerzo promedio durante el proceso de carga. Al igual que las diferentes muestras analizadas, la condición de saturación inicial está por debajo del 100%, lo que genera una succión inicial de 7.63 Mpa, los cuales generan en la muestra un estado de preconsolidación, debido principalmente a la succión, en especial para este ensayo, ya que es el valor de succión inicial más alto registrado durante todo el desarrollo experimental. Durante el proceso de humedecimiento la muestra desarrolló un colapso, el cual es menor al presentado por la muestra anterior.

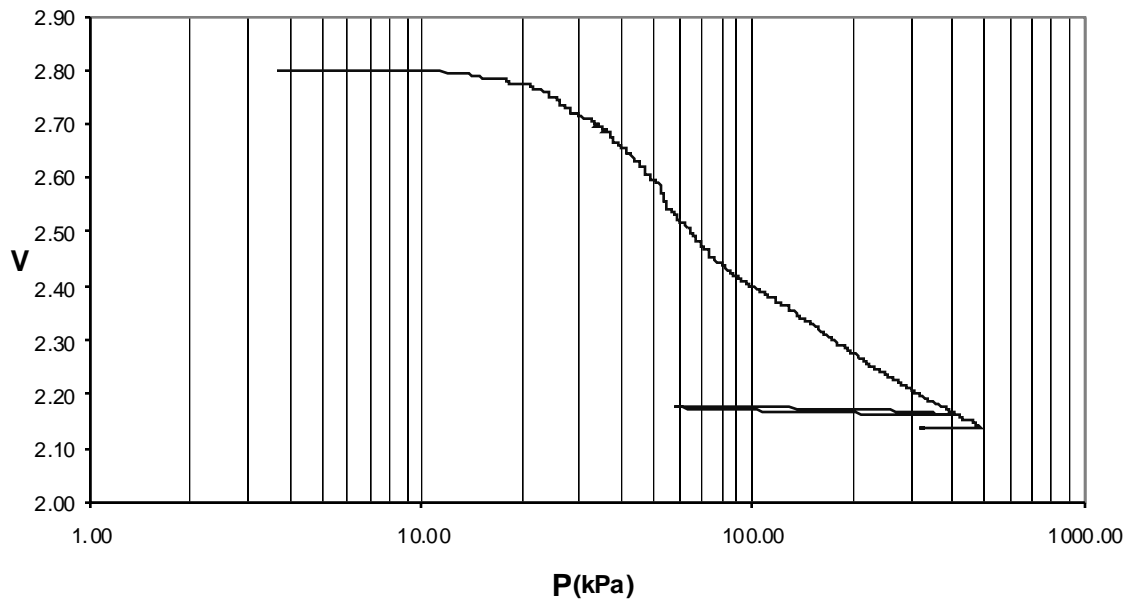


Figura 4.31. Cambio en el volumen específico por el aumento en P

La figura 4.32, muestra la trayectoria de esfuerzos que experimenta la muestra, en la cual se puede observar, una vez iniciado el proceso de humedecimiento, la relajación en el estado de esfuerzos que se alcanzó durante el ciclo de carga, debido únicamente al incremento en el contenido de humedad de la muestra.

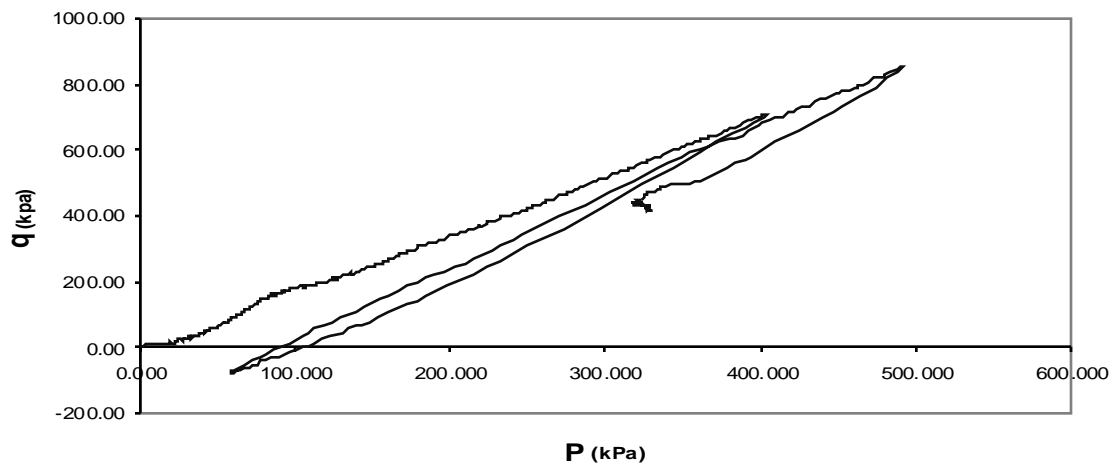


Figura 4.32 Trayectoria de esfuerzos



Desde el punto de vista del comportamiento esfuerzo deformación, los resultados muestran una deformación importante durante el proceso de carga, el cual debido a las condiciones del montaje se mantiene durante el proceso de humedecimiento, lo cual explica la disminución vertical que se observa en la figura 4.33, en la cual la disminución en el estado de esfuerzos de la muestra debido al aumento en el contenido de humedad se produce a deformación constante.

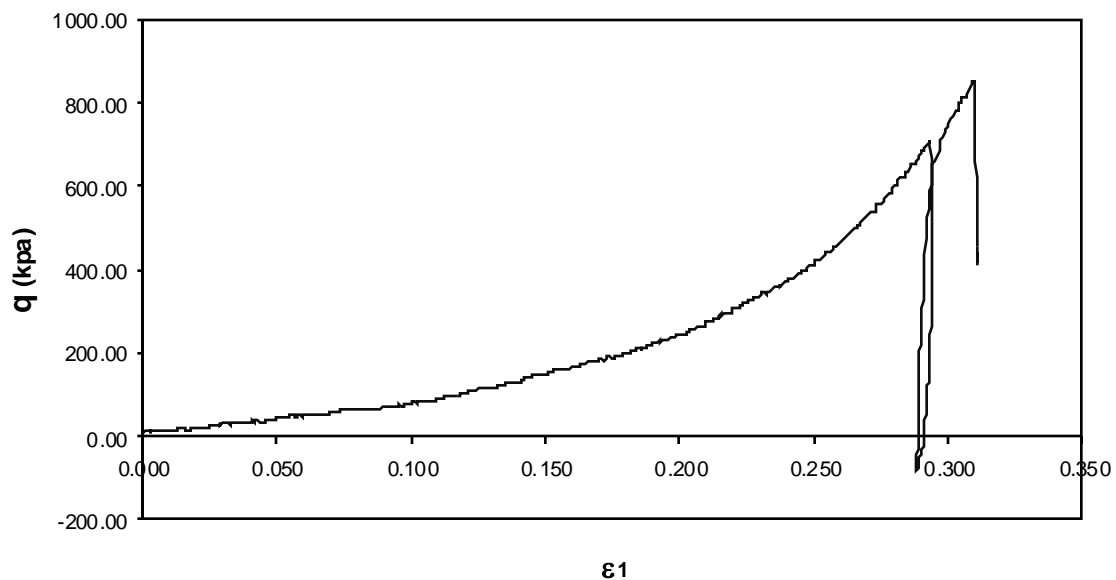


Figura 4.33. Comportamiento esfuerzo deformación

La succión inicial generada en la muestra de análisis, como ya se mencionó, es el valor más alto que se presentó durante el desarrollo experimental, generándose una disminución, principalmente durante el proceso de carga, durante el cual experimentó un cambio igual a 1 Mpa, debido únicamente al cambio en el volumen específico de la muestra, el cual genera un aumento en el contenido de humedad de la muestra, lo que explica esta que la variación más importante observada durante este proceso se está, puesto que al comparar esta variación con la obtenida durante el proceso de humedecimiento que tan solo fue de 500 kPa, muestra que el comportamiento observado para esta muestra depende



principalmente del proceso de deformación asociado a la carga, el cual deja a la muestra bajo unas condiciones de succión, las cuales hacen vulnerable a la muestra de sufrir el proceso de colapso durante el humedecimiento.

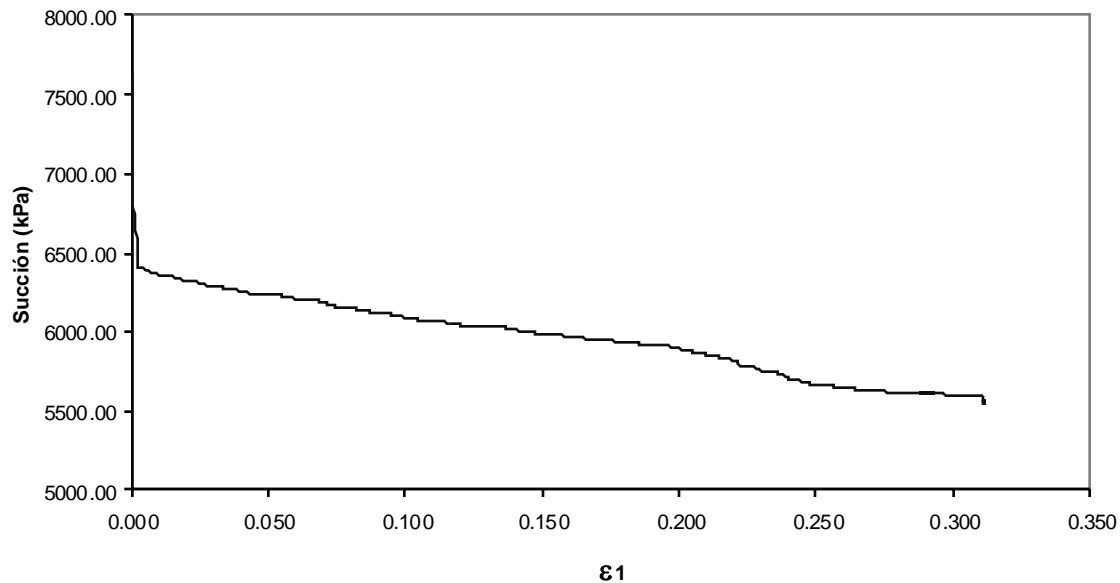


Figura 4.34 Comportamiento succión deformación

En las figuras 4.35 y 4.36, se observa la caída en la succión, en el cual pequeños cambios de humedad, asociados al proceso de deformación experimentado por la muestra durante le ciclo de carga, generan un aumento importante en el grado de saturación de la muestra, sin embargo la muestra aumenta mucho más su grado de saturación y contenido de humedad una vez se inicia el proceso de humedecimiento, durante el cual tiene cabida el proceso de colapso, el cual se presenta, sin experimentar grandes cambios a nivel de succión, pero debido a las condiciones establecidas al inicio del humedecimiento, el agua entra al suelo de manera tal que, al aumentar el grado de saturación deja vulnerable a la muestra, la cual bajo las condiciones de esfuerzo que experimenta colapsa.

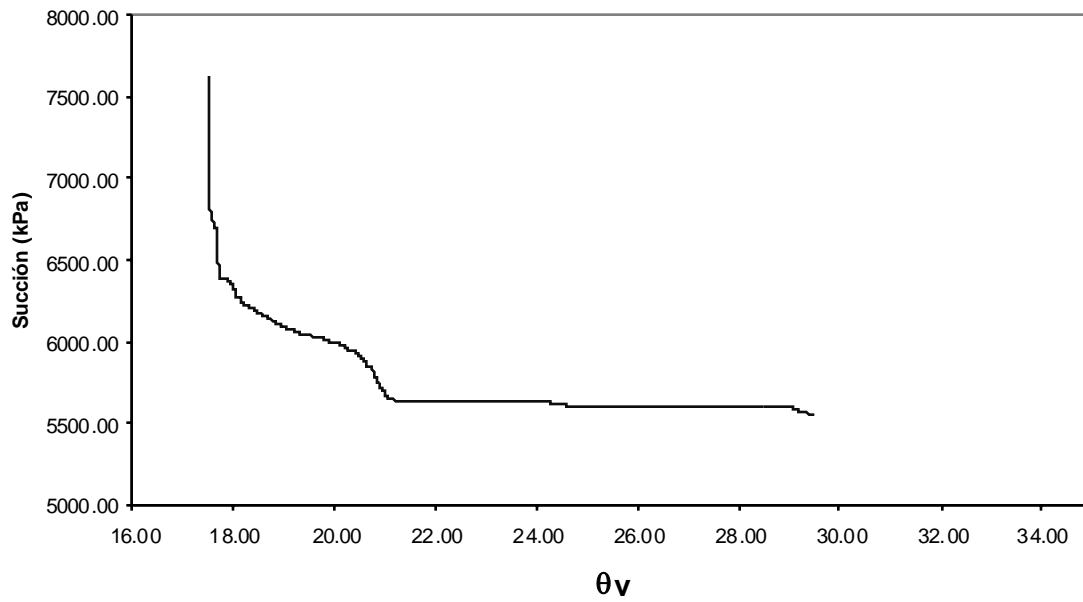


Figura 4.35. Comportamiento succión vs humedad volumétrica

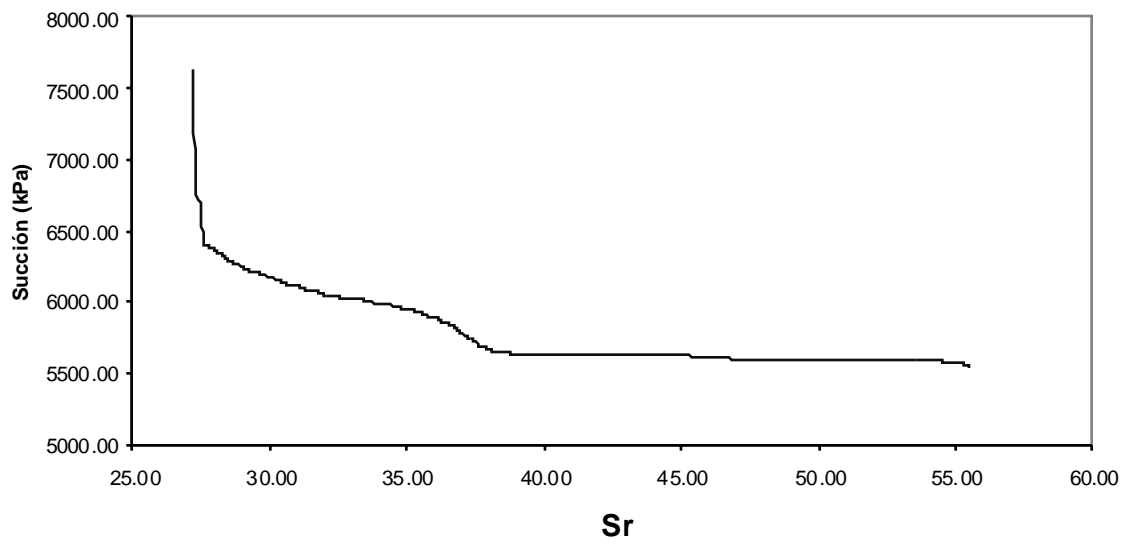


Figura 4.36. Comportamiento succión vs grado de saturación



5.0 MODELO CONSTITUTIVO PARA SUELOS NO SATURADOS

En términos de relaciones constitutivas, el uso de modelos matemáticos en la mecánica de suelos, ha sido apropiado para reproducir el comportamiento del suelo en términos de esfuerzo deformación. El uso de modelos elastoplásticos, los cuales describen el comportamiento de materiales en los que se observan deformaciones irreversibles, fenómenos de fluencia y dilatancia, producidos por la modificación en el estado de esfuerzos, son de gran utilidad, teniendo en cuenta que estos encuentran basados en la teoría de la plasticidad.

Un modelo elastoplástico se define como la formulación de un criterio límite de discontinuidad, la aplicación del principio de aditividad de deformaciones elásticas y plásticas, la definición de una regla de flujo generalizada, y el planteamiento de las reglas de rigidización¹⁵.

El criterio de límite de discontinuidad, está relacionado con la frontera que divide la zona elástica de la zona plástica, establecida en el espacio de esfuerzos, llamada superficie de fluencia, la cual permite definir, durante el proceso de carga, la evolución de las fronteras del dominio elástico y también el comienzo del proceso inelástico. El principio de aditividad consiste en que la deformación total ε_{ij} es la suma de la componente elástica, ε_{ij}^e , y de la plástica ε_{ij}^p , y se expresa como:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (5.1)$$

La ley de flujo, así como también la ley de rigidización, relacionan la evolución de las deformaciones plásticas y elásticas producidas por las trayectorias de esfuerzo.

¹⁵ Barrera, M. Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables. Publicación técnica No 226. Instituto mexicano del transporte. 2004



El modelo elastoplastico también establece un criterio de rotura, el cual relaciona un conjunto de variables internas, entre las cuales se encuentra el estado de deformaciones plásticas, con el estado de esfuerzos, para el cual se establece un estado limite correspondiente al estado en el que el material inicia la fluencia.

Desde el punto de vista de los suelos, Cam – Clay (Roscoe & Schofield.1963), fue el primero de los modelos elastoplasticos propuesto. Fue inicialmente desarrollado para arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas. En el estado critico establecen una relación entre el volumen específico V , el esfuerzo efectivo P' , y el esfuerzo de corte q tal que:

$$V = \Gamma - \lambda \ln P' \quad (5.2)$$

$$q = MP' \quad (5.3)$$

Donde:

M: Pendiente de la línea de estado critico

Γ : Valor de V cuando P' vale 1

λ : Pendiente de la rama de carga en el espacio $(v, \ln P')$ en estado critico

P': Esfuerzo efectivo

q: esfuerzo de corte

Ante la necesidad de establecer un modelo matemático por medio del cual se pudiera predecir a el comportamiento de los suelos no saturados, E. Alonso et al (1990) desarrollaron un modelo elastoplastico de estado critico para este tipo de suelos basado en el modelo Cam Clay modificado, desarrollado para suelos saturados. Con base en este modelo se realizara el análisis matemático de las muestras de suelo analizadas en la parte experimental.



5.1 Modelo Constitutivo para Suelos no Saturados (E. Alonso et al)¹⁶:

E Alonso (et al 1990), desarrollo un modelo matemático con base en la teoría de la plasticidad rigidizable, compuesto por una superficie de fluencia, ley de fluencia (deformaciones plásticas), y ley de rigidización (deformaciones elásticas). El modelo utiliza dos variables de esfuerzo independientes, las cuales son el tensor de esfuerzos neto (exceso del esfuerzo total sobre la presión del aire) y la succión.

5.1.1 Formulación para el estado Isotrópico de esfuerzos

Al considerar un ensayo Isotrópico sobre una muestra, para una succión dada, que posteriormente es sometida a un proceso de carga a lo largo de la línea virgen de compresión, y teniendo en cuenta que al igual que en el caso de los suelos saturados $v = 1 + e$, el cambio en el volumen específico en el caso de los suelos no saturados estará dado por:

$$V = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{P}{P^c} \quad (5.4)$$

Donde P^c es una presión de referencia para la que $V = N(s)$. $\lambda(s)$, es la pendiente de la línea virgen en condiciones isotrópicas, la cual se relaciona con la succión a través de:

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1-r) \exp(-\beta S) + r] \quad (5.5)$$

Donde r es una constante relacionada con la máxima rigidez del suelo debida a los aumentos en la succión, β es un parámetro que controla la

¹⁶ Alonso, E. Gens, A. & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique 40, No 3, 405 – 430.



velocidad con que varía $\lambda(s)$ con la succión, y $\lambda(0)$ corresponde a la pendiente de la línea virgen de compresión para la condición saturada.

En las ramas de descarga y recarga, el comportamiento del suelo se plantea a partir de la relación:

$$dv = -k \frac{dP}{P} \quad (5.6)$$

Donde k , es la pendiente de las línea de descarga recarga, la cual fue considerada independiente de la succión, con el fin de asegurar que el modelo resultara conservador.

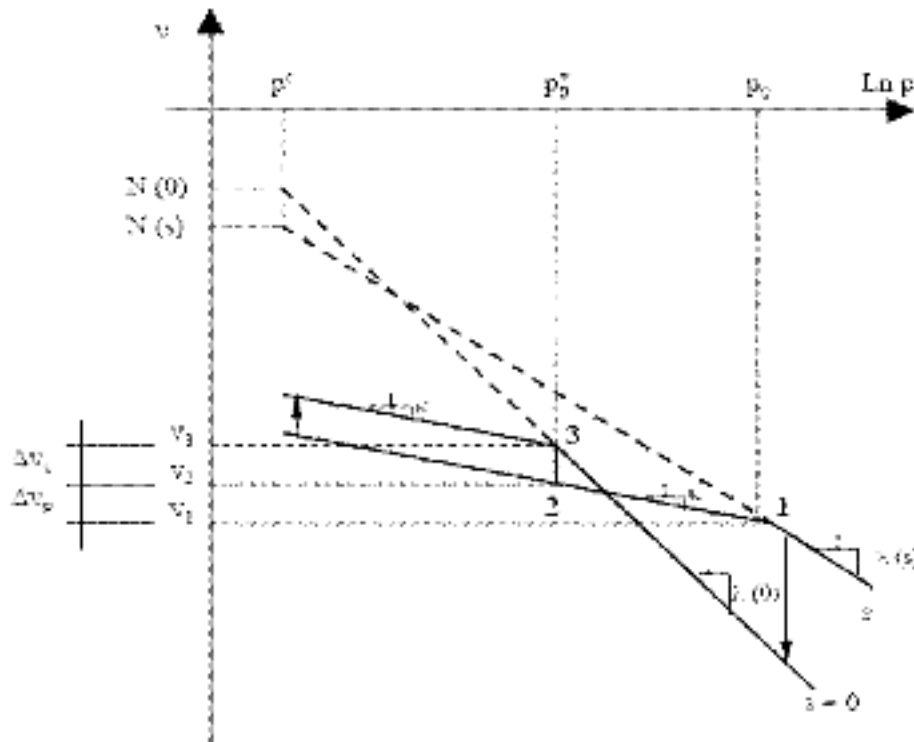


Figura 5.1. Curva de compresión para condiciones saturadas y no saturadas
(Alonso, *et al*, 1990)



La figura 5.1, presenta de acuerdo con el modelo, la respuesta de dos muestras de un mismo suelo, una en condiciones saturadas y la otra en condiciones de no saturación. Para el saturado la presión de preconsolidación es P_o^* , ya para el caso no saturado la presión para la cual se comienzan a producir deformaciones permanentes es P_o . La relación genérica entre P_o y P_o^* , en el espacio (P, S), se obtuvo relacionando el cambio en el volumen específico, que ocurre en la trayectoria **1:2:3** mostrada en la figura 5.1, de tal forma que:

$$V_1 + \Delta V_p + \Delta V_s = V_3 \quad (5.7)$$

La descarga de succión que ocurre de **2** a **3** se produce en el dominio elástico. En donde bajo estas circunstancias la expansión recuperable está dada por la expresión:

$$dv = -k_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (5.8)$$

Donde K_s , es la pendiente de la recta que relaciona V_s , y $\ln(S + P_{atm})$ es una rama de descarga y recarga. El valor de P_{atm} se incorporó, con el fin de evitar que dv , tendiera al infinito para valores de succión cercanos a cero.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 5.4, 5.6 – 5.8, se obtiene:

$$N(s) - \lambda(s) \ln \frac{P_o}{P^c} + k \ln \frac{P_o}{P_o^*} + k_s \ln \frac{s + P_{atm}}{P_{atm}} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{P_o^*}{P^c} \quad (5.9)$$

La cual provee una relación entre P_o y S, función de unos parámetros de referencia (P_o^* , P^c), y de otros parámetros del suelo ($N(s)$, $\lambda(s)$, k , k_s). $N(0)$ y $\lambda(0)$ son los valores $N(s)$, $\lambda(s)$ obtenidos para la condición saturada. Si se admite que P^c es la presión para la que se alcanza la curva de compresión virgen de la condición saturada, partiendo de un estado no saturado



siguiendo una trayectoria de reducción en la succión, la cual solamente genera expansión elástica, se cumple que:

$$\Delta V(P^c)_0^s = N(0) - N(s) = k_s \ln \frac{S + Patm}{Patm} \quad (5.10)$$

Adicionalmente si la ecuación 5.10 es introducida dentro de la ecuación 5.9, se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{p_o}{p^c} \right) = \left(\frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-k}{\lambda(s)-k}} \quad (5.11)$$

Esta ecuación define en el espacio (S, P) una superficie de fluencia (figura 5.2), cuya posición queda determinada por la presión de consolidación del suelo saturado, P_o^* , que es un parámetro de rigidización del modelo. Si $P_o^* = P^c$, $P_o = P^c$, la superficie de fluencia, se transforma en una recta vertical.

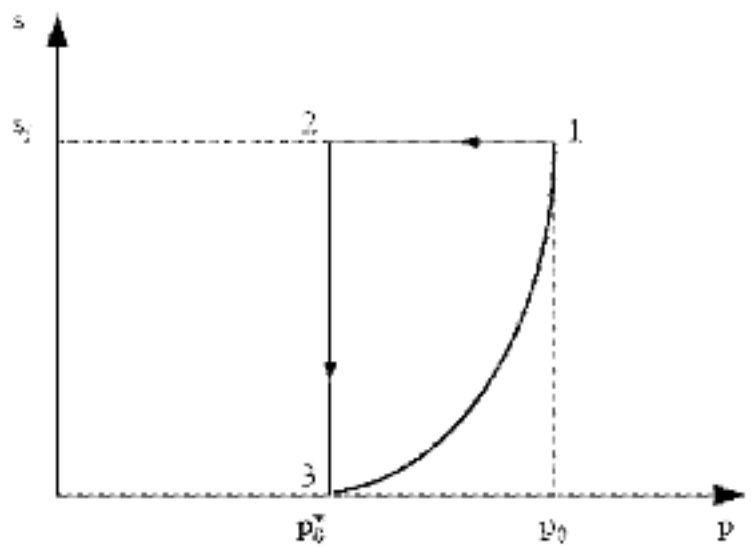


Figura 5.2. Superficie de fluencia asociada a P_o^* (Alonso, *et al*, 1990).

Josa (1988) adopto un valor de la succión, $S_o(p)$, considerado como el más elevado al que había estado sometido el suelo en toda su historia de esfuerzos, de manera tal que cuando la succión aplicada en el suelo, alcanza



este valor, aparecen deformaciones, que conducen de un estado de deformación elástico, al estado plástico. So (p) es una nueva superficie de fluencia del suelo, considerada constante.

La figura 5.3 presenta las dos diferentes superficies de fluencia, en la cual la superficie LC (Loading – Colapso), representa la superficie de activación de las deformaciones irreversibles, cuando es alcanzada por trayectorias de carga (load) o de humedecimiento (colapso). En cuanto a la superficie SI (Suction Increase), representa la superficie de activación de las deformaciones irreversibles cuando la succión en la muestra es incrementada.

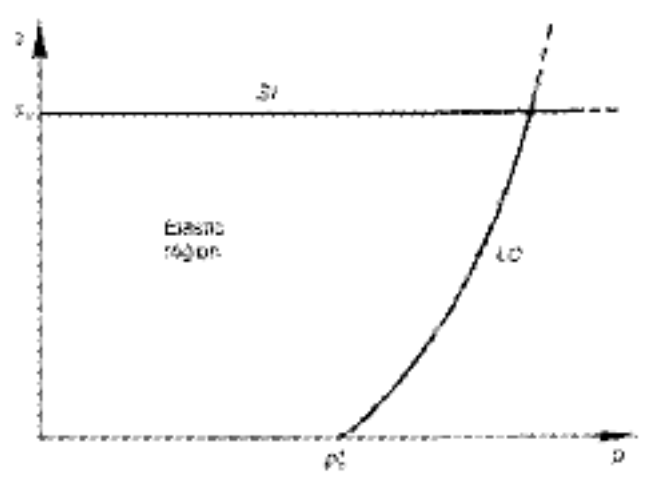


Figura 5.3. Curvas de fluencia LC y SI. (Alonso, *et al*,1990)

Adicionalmente, las curvas LC y Si, delimitan la región en la cual el suelo el comportamiento del suelo es elástico.

El modelo adopta una dependencia lineal entre V y $\ln (S + P_{atm})$, tanto en el rango elastoplastico (curva de compresión virgen), como en el caso elástico (ramas de descarga y recarga). El cambio de volumen específico dv , en la rama de compresión virgen tiene la siguiente expresión:



$$dv = -\lambda_s \frac{ds}{(s + Patm)} \quad (5.12)$$

Y en la rama de descarga y recarga esta expresada por la ecuación 5.8.

5.1.2 Leyes de Endurecimiento

De acuerdo con la ecuación 5.6, un aumento en P dentro del dominio elástico, causara un incremento en la deformación volumétrica, el cual esta dado por:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{k dP}{v P} \quad (5.13)$$

Cuando P alcanza la superficie de fluencia, P_o , el incremento de deformación volumétrica total se expresa como:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s) dP_o}{v P_o} \quad (5.14)$$

Tal que el incremento de la deformación volumétrica plástica, tiene la expresión:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s) - k dP_o}{v P_o} \quad (5.15)$$

De manera análoga, un aumento en de la succión dentro del campo elástico, genera un incremento de deformación volumétrica elástica cuya expresión es:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{k_s dS}{v (S + Patm)} \quad (5.16)$$

y si llegara a alcanzar la superficie de fluencia $S_I (S_o(p))$, se producirán deformaciones plásticas cuyos incrementos serán:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda(s) - k_s dS_o}{v (S_o + Patm)} \quad (5.17)$$



De esta manera se controla la posición de las superficies de fluencia LC y SI, que pueden moverse en principio, independientemente una de la otra en el espacio de esfuerzos (p , s). Sin embargo las dos superficies pueden depender de la deformación volumétrica plástica total, de tal manera que las leyes de rigidización sean las siguientes:

$$\frac{dP_o^*}{P_o^*} = \frac{v}{\lambda(0) - k} d\varepsilon_v^p \quad (5.18)$$

$$\frac{dS_o}{S_o + P_{atm}} = \frac{v}{\lambda_s - k_s} d\varepsilon_v^p \quad (5.19)$$

5.1.3 Modelo para el estado de esfuerzos triaxial

El tercer parámetro de esfuerzo es el esfuerzo desviador q . El estado de deformación esta definido por la deformación volumétrica (5.20) y la deformación por corte (5.21)

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3) \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (5.21)$$

Por consistencia, en el modelo debe predecir el comportamiento saturado, en el caso que la succión sea cero. Tomando como base le modelo Cam – Clay, se propuso un superficie para una muestra a succión constante, s , que estará descrita por una elipse que presenta un esfuerzo de de preconsolidacion P_o previamente definido, el cual como ya se menciono se encuentra en la superficie LC.

Para definir la elipse se necesita especificar el estado de falla. Paralelamente a las condiciones saturadas, una línea de estado crítico (CSL) para una succión diferente de cero representa el incremento en la resistencia inducida



por la succión. El efecto del incremento en la succión esta representado por un incremento en la cohesión, manteniendo constante la pendiente M del la línea CSL para condiciones saturadas. Si el incremento en la succión sigue una relación lineal con la succión, las elipses interceptaran el eje P en un punto para el cual:

$$P = -P_s = -kS \quad (5.22)$$

Donde k es una constante.

El eje mayor de la elipse atraviesa el segmento $-P_s$ a P_o (figura 5.4), su ecuación esta dada por:

$$q^2 - M^2(p + ps)(p_o - p) = 0 \quad (5.23)$$

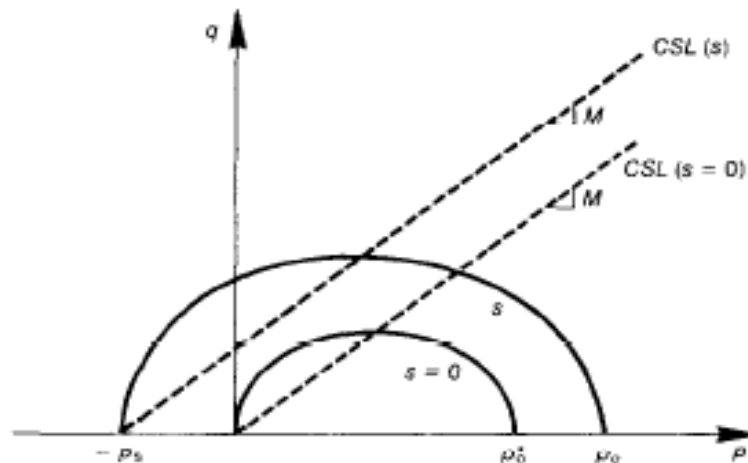


Figura 5.4. Superficie de fluencia en el espacio (P,q). (Alonso, *et al*, 1990)

Una muestra de la superficie tridimensional (p,q,s) se muestra en la figura 5.5.

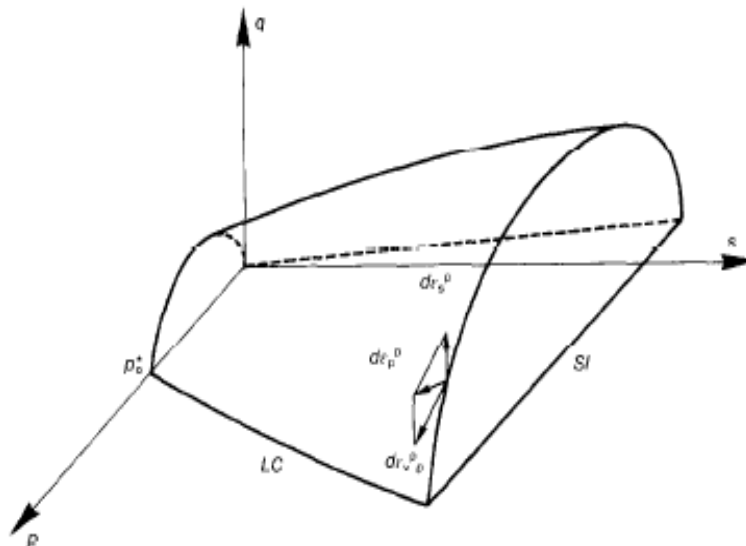


Figura 5.5. Superficie de fluencia en el espacio (p,q,s). (Alonso *et al*, 1990)

Con respecto a la dirección de los incrementos de la deformación plástica, asociados con la superficie de fluencia, se sugiere una regla de flujo no asociada en los planos $S = 0$ constante. De hecho es conocido que (Gens y Potes 1982 a) el modelo de estado crítico convencional, a menudo subestima los valores de K_0 . Para evitar este problema la expresión para la regla de flujo asociada se modificó, introduciendo un parámetro α (Ohmaki, 1982), resultando lo siguiente:

$$\frac{d\varepsilon_q^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + ps - p_0)} \quad (5.24)$$

Donde α es la constante de no asociatividad, que se deriva a partir de la condición de deformaciones laterales nulas en un estado de esfuerzo correspondiente a valores K_0 (Jaky 1948):



$$K_o = 1 - \text{sen } \phi' = \frac{6 - 2M}{6 + M} \quad (5.25)$$

Dada la relación entre K_o y M , la nueva regla de flujo no introduce parámetros constitutivos adicionales.

Las componentes de la deformación plástica asociadas a la superficie de fluencia están dadas por $(d\varepsilon_{vp}^p, d\varepsilon_s^p)$. Para la segunda superficie de fluencia $S = S_o$, el vector de incremento en la deformación plástica inducida por el incremento en la succión es $(d\varepsilon_{vp}^p, 0)$, donde $d\varepsilon_{vp}^p$ esta dado por la ecuación 5.17.

La deformación elástica inducida por cambios en q , será analizada a través del modulo de corte G :

$$\begin{aligned} d\varepsilon_s^e &= \frac{2}{3} (d\varepsilon_1^e - d\varepsilon_3^e) \\ d\varepsilon_s^e &= \frac{dq}{3G} \end{aligned} \quad (5.26)$$

El modelo establecido por *Alonso et al* (1990) es capaz de reproducir las principales características del comportamiento de los suelos no saturados, siempre y cuando el material no exhiba anisotropía o una expansividad irreversible.

5.1.4 Determinación de los parámetros del modelo

Para la aplicación del modelo se requiere de la información relacionada con el estado de esfuerzos y la determinación de los parámetros así:



- **Estado Inicial:** Es necesario conocer el estado de esfuerzos inicial, relación de vacíos inicial y los parámetros de endurecimiento que definen la posición de la superficies de fluencia (Po_i^* , So_i).
- **Parámetros asociados con la curva de fluencia (LC):** Esfuerzo de referencia P^c ; el coeficiente de compresibilidad a lo largo del tramo virgen de la línea de compresión para las condiciones saturadas $\lambda(0)$; coeficiente de compresibilidad en el tramo descarga – recarga k ; r y β .
- **Parámetros directamente asociados con la curva de fluencia (SI):** Coeficiente de compresibilidad por incrementos en la succión $\lambda(s)$, coeficiente de compresibilidad por cambios en la succión dentro de la zona elástica k_s .
- **Parámetros relacionados con los cambios en el esfuerzo cortante:** Se debe conocer G modulo de corte, M pendiente de la línea del estado critico y el parámetro k asociado con el incremento de la cohesión debido a cambios en la succión.

Para la determinación de los parámetros del modelo en general, se requiere del desarrollo de ensayos de succión controlada, en donde se involucren trayectorias de esfuerzo que incluyan carga y descarga, implementar ciclos de humedecimiento secamiento, y como complemento se debe realizar ensayos de corte para diferentes niveles de succión, para que de esta manera se puedan establecer las condiciones de esfuerzo para la modelación, así como también todos los parámetros involucrados.



6.0 MODELACION NUMERICA

Con base en el modelo matemático establecido anteriormente se determino el comportamiento esfuerzo deformación de las muestras estudiadas en la parte experimental. Con base en los resultados obtenidos de los ensayos, se determinaron los parámetros necesarios para la implantación del modelo constitutivo. Los resultados se muestran a continuación.

La modelación se realizo siguiendo el mismo proceso adelantado en la parte experimental, en donde inicialmente se realizo el proceso de carga, seguido de un ciclo de humedecimiento, el cual se mantenía hasta el final del ensayo.

6.1 Muestras Expansivas

6.1.1 Muestra No1 – 88% arena + 12% kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 88% arena y 12% kaolín, se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros para el modelo muestra 88% arena 12% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.001
K	0.0001
r	0.90
β (Mpa ⁻¹)	0.80
P ^c (Mpa)	0.0035
k _s	0.001



V_o	3.100
S_o (Mpa)	6.65
P_o^* (Mpa)	0.2

Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación se muestran en la figura 6.1.

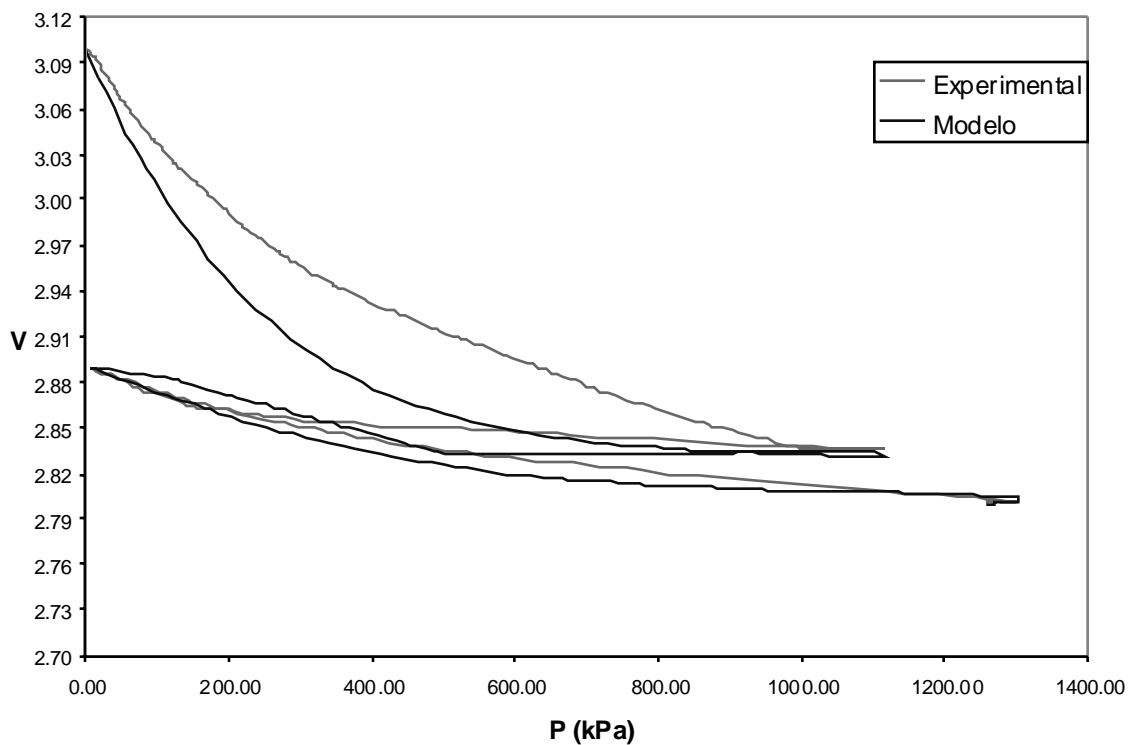


Figura 6.1. Comparación modelo - experimental para la muestra 88% arena +12% kaolín

Como se muestra en la figura 6.1, los resultados obtenidos a partir de la modelación, presentan un buen ajuste con respecto a los resultados experimentales. El comportamiento observado en la muestra experimental, la cual presento un leve colapso, es igualmente representado por el modelo. De los resultados obtenidos de la modelación se observa una diferencia en la magnitud del cambio en el volumen específico durante la carga inicial de la muestra, sin



embargo se observa que el modelo puede predecir de manera correcta la tendencia que se presenta durante la carga. El modelo muestra un buen ajuste durante las etapas de descarga, recarga y predice igualmente el comportamiento colapsivo de la muestra.

6.1.2 Muestra No2 – 65% arena + 35% kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 65% arena y 35% kaolín, se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Parámetros para el modelo muestra 65% arena 35% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.004
K	0.001
r	0.5
$\beta(\text{Mpa}^{-1})$	5.00
Pc (Mpa)	0.035
ks	0.10
Vo	2.400
So (Mpa)	5.75
P*o (Mpa)	0.15

Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación, se muestran en la figura 6.2. Los resultados obtenidos del modelo, representan adecuadamente el comportamiento expansivo desarrollado por muestra una vez se inicia el proceso de humedecimiento, sin embargo presenta una diferencia notable en la magnitud del cambio en el volumen específico, durante el proceso de carga inicial, pese a eso el modelo predice la



tendencia observada durante el desarrollo experimental. En la parte correspondiente a la descarga y recarga, el modelo ofrece un buen ajuste de acuerdo a los resultados experimentales.

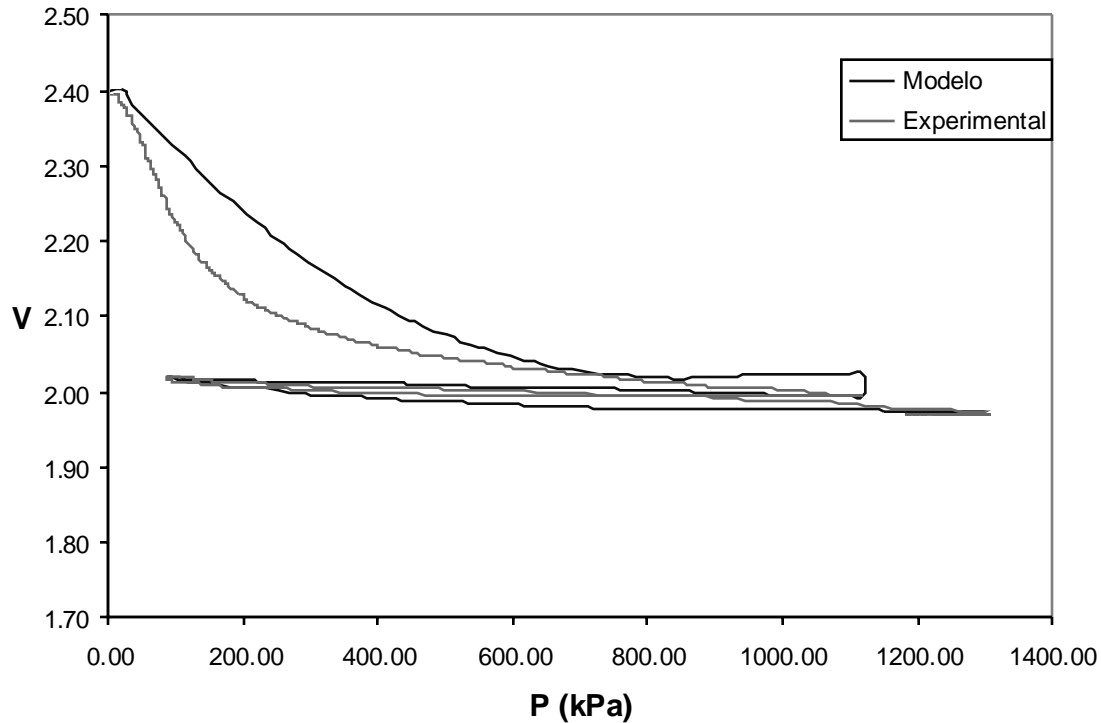


Figura 6.2. Comparación modelo - experimental para la muestra 65% arena + 35% kaolín

6.1.3 Muestra No3 – 100% kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 100% kaolín, se muestran en la tabla 6.3.



Tabla 6.3. Parámetros para el modelo muestra 65% arena 35% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.004
K	0.001
r	0.500
β (Mpa-1)	0.200
Pc (Mpa)	0.0035
ks	0.030
Vo	2.800
So (Mpa)	7.540
P*o (Mpa)	0.100

Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación, se muestran en la figura 6.3.

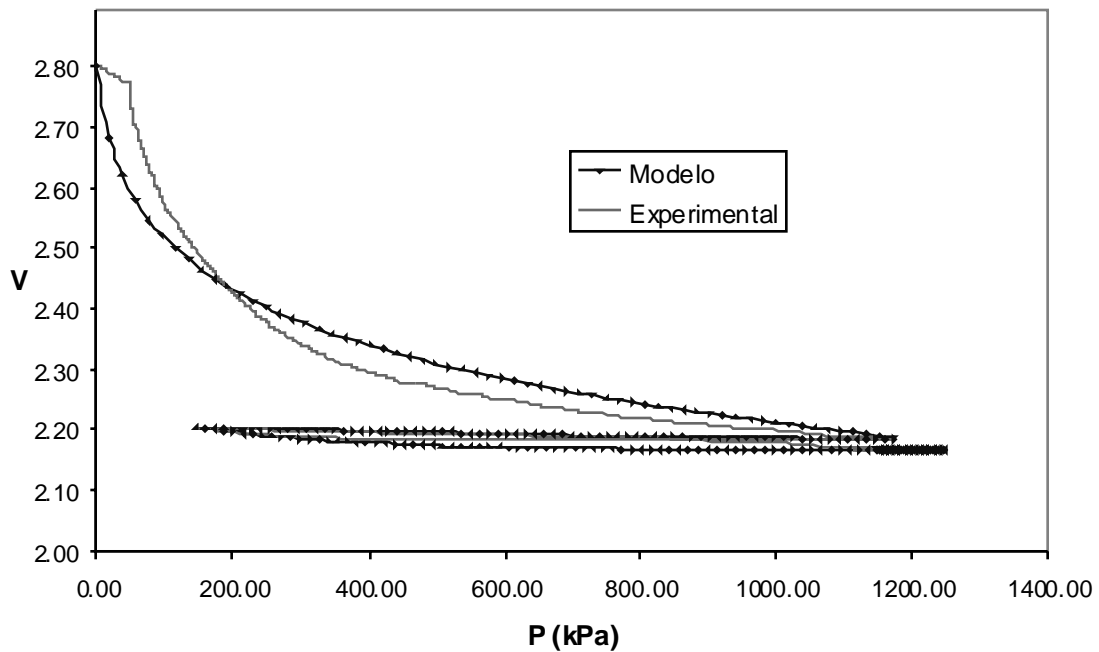


Figura 6.3. Comparación modelo - experimental para la muestra 100% kaolín



Los resultados obtenidos de la modelación, predicen el comportamiento expansivo de la muestra, de acuerdo al comportamiento observado durante el desarrollo experimental, a través del ciclo de humedecimiento. Esta muestra exhibe la mejor predicción en cuanto al comportamiento del cambio en el volumen específico durante el proceso de carga inicial, mostrando igualmente un buen ajuste en la parte correspondiente a la descarga y recarga.

6.2 Muestras colapsables

6.2.1 Muestra No 1 – 88% arena + 12 % Kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 88% arena + 12 % kaolín, se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4. Parámetros para el modelo muestra 88% arena 12% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.0001
K	0.00001
r	0.90
β (Mpa ⁻¹)	0.80
P ^c (Mpa)	0.0035
k _s	0.0001
V _o	3.100
S _o (Mpa)	6.74
P [*] _o (Mpa)	0.2



Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación, se muestran en la figura 6.4.

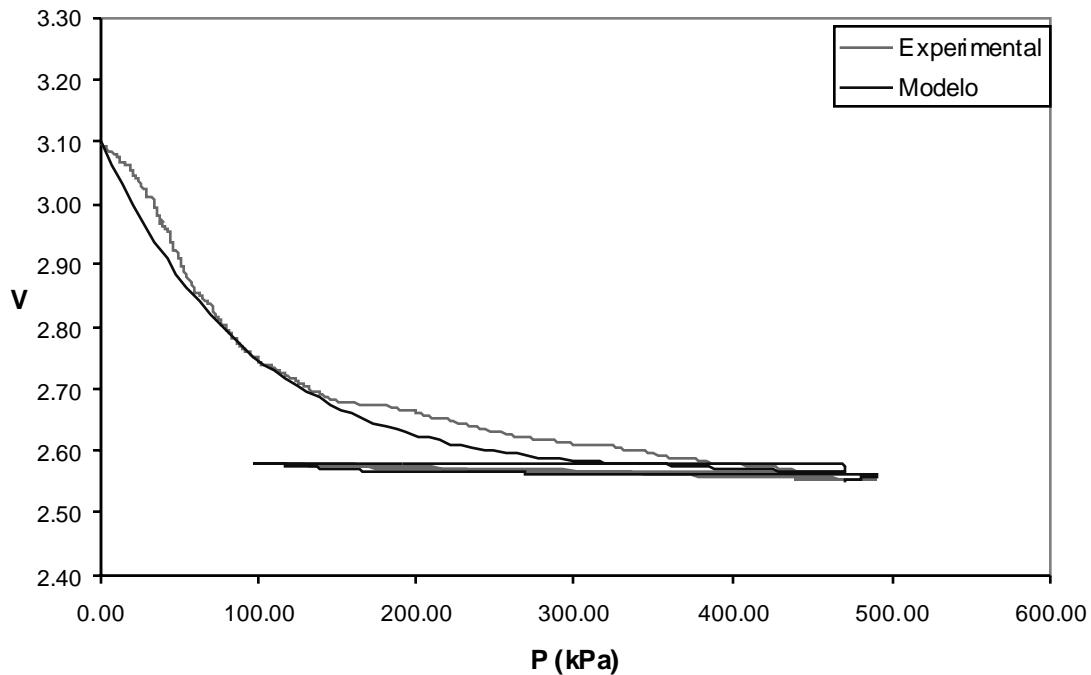


Figura 6.4. Comparación modelo - experimental para la muestra 88% arena + 12% kaolín

El comportamiento obtenido de la modelación, muestra al igual que en el caso experimental el colapso de la muestra durante el proceso de humedecimiento. El modelo predice adecuadamente para esta muestra, la variación en el volumen específico producto del ciclo de carga, sin embargo finalizando el proceso de carga inicial, se presenta una diferencia notable en el comportamiento experimental, que pueden deberse a condiciones particulares sucedidas durante la realización del ensayo. Los parámetros obtenidos para el modelo difieren un poco de los obtenidos para la misma muestra en condiciones de expansión, lo cual puede deberse a la diferencia que se presentan en las condiciones iniciales de los ensayos.



6.2.2 Muestra – 65% arena + 35% kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 65% arena y 35% kaolín, se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Parámetros para el modelo muestra 65% arena 35% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.001
K	0.001
r	0.10
$\beta(\text{Mpa}^{-1})$	5.00
Pc (Mpa)	0.035
ks	0.090
Vo	2.40
So (Mpa)	5.95
P*o (Mpa)	0.15

Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación, se muestran en la figura 6.5. Los resultados obtenidos de la modelación predicen el comportamiento colapsivo de la muestra adecuadamente, encontrando un buen ajuste con el comportamiento experimental. Al igual que el muestra anterior el modelo predice adecuadamente el cambio en el volumen específico, producto del ciclo de carga, sin embargo las perturbaciones observadas durante el proceso de carga, el modelo no las reproduce con un buen ajuste, sin embargo la tendencia observada en el modelo corresponde de manera adecuada a la observada en experimentalmente. Igualmente las condiciones del



ensayo hacen que se presente una variación entre los parámetros utilizados en este modelo y los obtenidos para la modelación del caso expansivo.

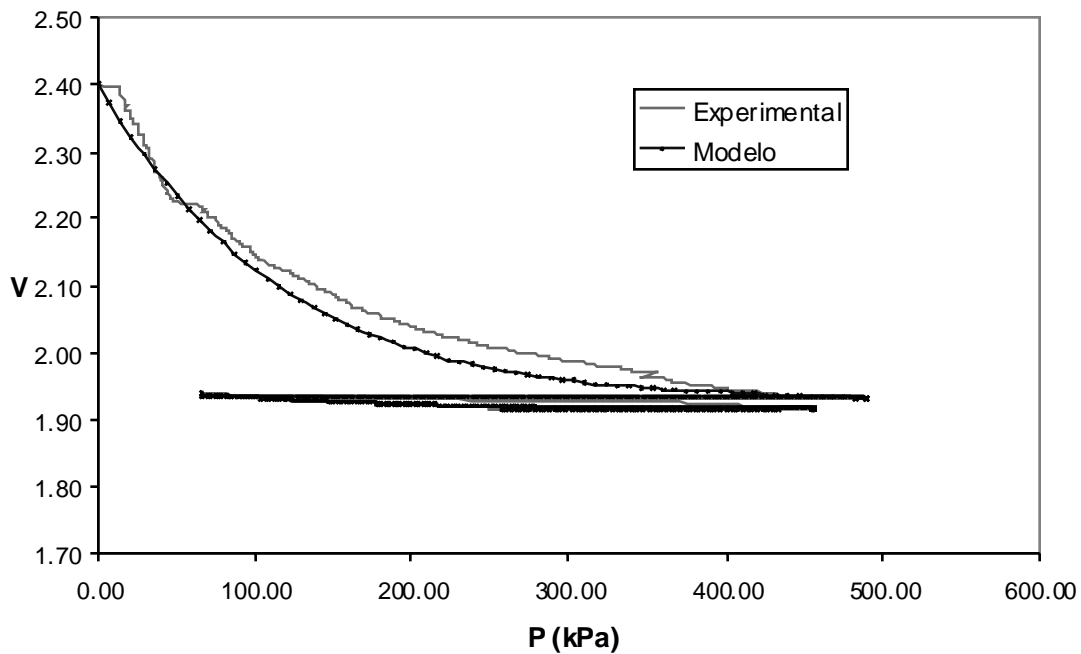


Figura 6.5. Comparación modelo - experimental para la muestra 65% arena + 35% kaolín

6.2.3 Muestra No 3 – 100% kaolín

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, los parámetros para la modelación de la muestra conformada por 100% kaolín, se muestran en la tabla 6.6.

Tabla 6.6. Parámetros para el modelo muestra 65% arena 35% kaolín

Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	0.004
K	0.0001



r	0.90
β (Mpa-1)	0.80
Pc (Mpa)	0.0035
ks	0.001
Vo	2.80
So (Mpa)	7.63
P*o (Mpa)	0.10

Con base en los parámetros anteriormente establecidos, los resultados obtenidos de la modelación, se muestran en la figura 6.6.

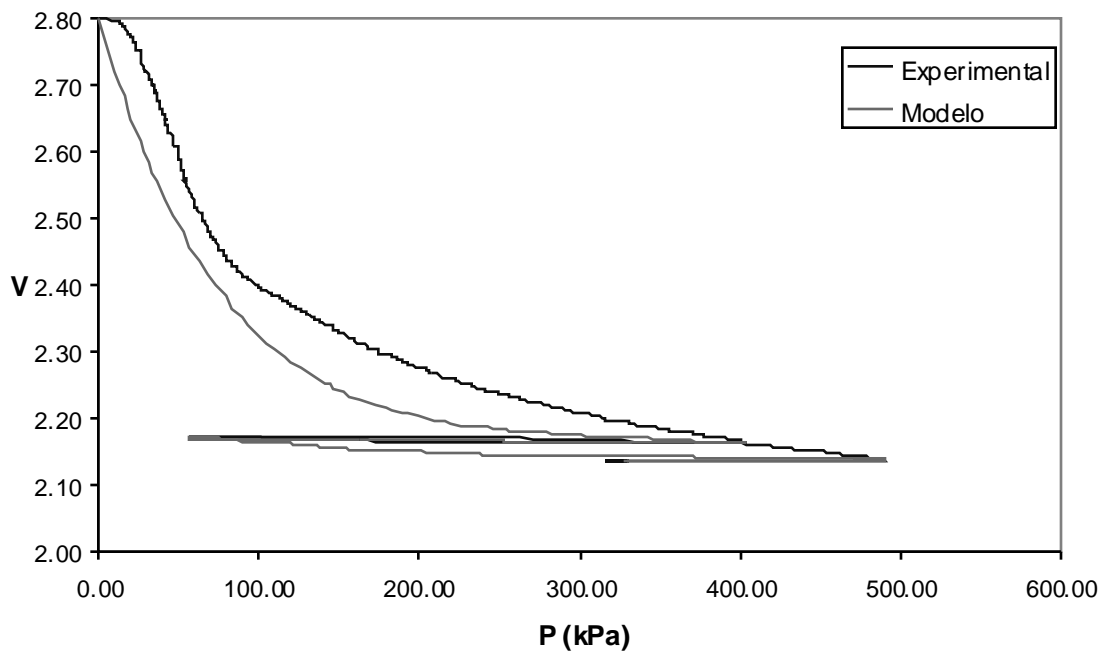


Figura 6.6. Comparación modelo - experimental para la muestra 100% kaolín

El comportamiento obtenido de la modelación, representa adecuadamente el colapso experimentado en la muestra durante el proceso de humedecimiento. En



este modelo, nuevamente se presentan diferencias en la magnitud del cambio en volumen específico especialmente en los proceso de carga y recarga, sin embargo el modelo presenta una tendencia similar a la observada en la parte experimental. En cuanto a los parámetros obtenidos para esta muestra, presenta unas ligeras variaciones con respecto a los obtenidos en la el caso expansivo, lo cual hace que el comportamiento de la muestra sea hacia el colapso, esto debido a las condiciones iniciales y la trayectoria de esfuerzos impuesta para la modelación.



7.0 CONCLUSIONES

1. La instrumentación realizada para la ejecución de los ensayos de compresión uniaxial permite establecer el comportamiento de las variables involucradas en el comportamiento de los suelos expansivos y colapsables, lo cual lo convierte en una valiosa herramienta para el estudio de estos fenómenos.
2. El comportamiento de los suelos expansivos y colapsables, presenta una estrecha relación con la variación que se presente en el contenido de humedad y saturación en la muestra, ya que esto conlleva una disminución, en ocasiones vertiginosa en las condiciones de succión en el suelo, facilitando de esta manera la presentación de los fenómenos de expansión y colapso.
3. La muestra cuyo comportamiento observado durante parte experimental presenta la mayor expansión, es la muestra correspondiente a 100% kaolín, en donde debido a las condiciones de la muestra, (la cual presenta el mayor contenido arcilloso de las tres muestras de análisis), las condiciones iniciales de humedad, la trayectoria de esfuerzos impuesta, y el posterior proceso de humedecimiento, generan en la muestra el fenómeno de expansión asociado principalmente, a la reducción en la succión debido al incremento en el contenido de humedad y de saturación de la muestra.
4. La muestra cuyo comportamiento observado en la parte experimental exhibe mayor colapso, es la mezcla conformada por 65% arena amarilla y 35% kaolín, la cual fue estudiada, para un contenido de humedad inicial correspondiente a una humedad del lado seco de la curva de proctor estándar, lo cual comprueba la teoría de Alonso (1993), la cual dice que



muestras compactadas a humedades que se encuentran del lado seco generan colapso, al someterlas a ciclos de humedecimiento.

5. Desde el punto de vista de la succión se observaron reducciones importantes debido al proceso de humedecimiento, especialmente se observó una disminución importante durante el proceso de expansión de la muestra de 100%, en la cual la succión casi se redujo en su totalidad lo cual facilitó el proceso de expansión, pese a las condiciones de esfuerzo impuestas.
6. Desde el punto de vista del colapso la reducción en la succión durante el proceso de humedecimiento experimenta una menor magnitud a la observada en la muestra expansiva. El proceso de colapso observado para la muestra 65% arena y 35% kaolín se desarrolló dentro de una reducción en la succión tan solo de 300 kPa, obteniendo al final del ensayo una succión cercana a los 4 Mpa.
7. Es clara la dependencia que existe entre el contenido de humedad y grado de saturación de las muestras, con el descenso en la succión, la cual principalmente durante el proceso de humedecimiento, genera en algunos casos descensos importantes, observados durante pequeños cambios en el contenido de humedad.
8. Los resultados obtenidos de la modelación, muestran un buen ajuste entre estos y los resultados experimentales, en donde el modelo predice correctamente el proceso de colapso o expansión de las muestras con base en los parámetros obtenidos de los ensayos experimentales.



9. El plan de ensayos ejecutado, genera principalmente una reducción continua en la succión, lo cual desde el punto de vista del modelo generaría principalmente deformaciones que se encuentran dentro del rango elástico producidas por el cambio en la succión, dejando como principal generador de las deformaciones plásticas a la trayectoria de esfuerzos a la cual es sometida la muestra.



8.0 BIBLIOGRAFIA

1. Alonso, E. Gens, A, & Josa, A (1990). A Constitutive Model for Partially Saturated Solis, Géotechnique 40, No3 , pag 405 – 430.
2. Alonso, E. 1993. Constitutive modeling of unsaturated soils. Civil engineering European courses program of continuing education. Barcelona, España. Pag 1 – 86.
3. Araki, M. Camapum de Carvalho J. Study of collapsible porous soil of brazil. Proceedings of the first conference on unsaturated soils. Paris Francia. Pag 17 -21.
4. Barrera, M. Estudio del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables. Instituto Mejicano del Transporte, Publicación técnica No 226.2004.
5. Barrera, M. Garnica , P. Influencia de la succión en los cambios volumétricos del suelo compactado, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación tecnica No 238 2004.
6. Barrera, M. Garnica, P. Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres, Instituto Mejicano del Transporte, Publicación técnica No 198.2004.
7. Brian, J. Bridget, R. Thermocuple Psychometry. The soil solution phase, capitulo 3. US Geological Service. 1998. pag 610 – 642.



8. Chen, Z, Stress theory and axiomatics as well as consolidation theory of unsaturated soils, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, Paris Francia 1998, pag 697-698.
9. Fredlund D; Rahajardo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. University of Saskatchewan, Wiley- Interscience Publication, 1993.
10. Porto Cortes Jaime, Ensayo de consolidación con Deformación Controlada, Universidad de los Andes, Tesis de Maestría, pag 22 – 23.
11. Suzuki koji et al, Two case studies of consolidation settlement analysis using constant rate of strain consolidation Test, Japanese Geotechnical Society, Soil and Foundations Vol 44. pag 69 – 70.



TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVO GENERAL	1
OBJETIVOS ESPECIFICOS	1
1.0 INTRODUCCION	2
2.0 COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS NO SATURADOS	4
2.1 Suelos Parcialmente Saturados. Generalidades	4
2.2 Descripción de las Fases en los suelos no Saturados	4
2.3. Clasificación de los Suelos no Saturados	6
2.4 Succión en suelos no saturados	7
2.4.1 Componentes de la Succión en el Suelo	8
2.5 Comportamiento deformacional de los Suelos no Saturados colapsó y expansión:	10
2.5.1 Fenómeno de Colapso ⁶	10
2.5.2 Fenómeno de Expansión	12
2.6 Resistencia al Corte de los Suelos No Saturados	15
3.0 DESARROLLO EXPERIMENTAL	18
3.1 Ensayos Básicos	18
3.1.1 Curva Granulométrica	19
3.1.2. Azul de Metileno	19
3.1.3. Ensayo de Proctor Estándar	20
3.1.4 Ensayo de Gravedad Específica (Gs)	20
3.2 Curvas de Calibración	21
3.2.1 Calibración de Psicrómetros tipo Peltier	21
3.2.2 Calibración del Sensor de Humedad	26
3.3 Ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada	30
3.3.1 Procedimiento del Ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada	31
4.0 RESULTADOS EXPERIMENTALES	37
4.1 Muestras expansivas	37
4.1.1 Muestra 1 - 88% arena + 12% kaolín	37
4.1.2 Muestra 2 – 65% arena + 35% kaolín	42
4.1.3 Muestra 3 – 100% kaolín	47
4.2 Muestras colapsables	51
4.2.1 Muestra 1 – 88% arena + 12% kaolín	51
4.2.2 Muestra 2 – 65% arena + 35% kaolín	56
4.2.3 Muestra 3 – 100% kaolín	60
5.0 MODELO CONSTITUTIVO PARA SUELOS NO SATURADOS	65
5.1 Modelo Constitutivo para Suelos no Saturados (E. Alonso et al):	67
5.1.1 Fomulación para el estado Isotrópico de esfuerzos	67



5.1.2 Leyes de Endurecimiento _____	72
5.1.3 Modelo para el estado de esfuerzos triaxial _____	73
5.1.4 Determinación de los parámetros del modelo _____	76
6.0 MODELACION NUMERICA _____	78
6.1 Muestras Expansivas _____	78
6.1.1 Muestra No1 – 88% arena + 12% kaolín _____	78
6.1.2 Muestra No2 – 65% arena + 35% kaolín _____	80
6.1.3 Muestra No3 – 100% kaolín _____	81
6.2 Muestras colapsables _____	83
6.2.1 Muestra No 1 – 88% arena + 12 % Kaolín _____	83
6.2.2 Muestra – 65% arena + 35% kaolín _____	85
6.2.3 Muestra No 3 – 100% kaolín _____	86
7.0 CONCLUSIONES _____	89
8.0 BIBLIOGRAFIA _____	92



INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 (pag 19)	Granulometría Arena y Mezclas de Suelo
Figura 3.2 (pag 20)	Ensayo de Proctor Estándar
Figura 3.3 (pag 23)	Montaje calibración psicrómetros
Figura 3.4 (pag 24)	Detalle de ubicación de los psicrómetros dentro del homo temostatado
Figura 3.5 (pag 25)	Curva de calibración psicrómetros temperatura 25°C
Figura 3.6 (pag 25)	Curva de calibración psicrómetros temperatura 20°C
Figura 3.7 (pag 26)	Detalle sensor de humedad
Figura 3.8 (pag 28)	Montaje ensayo de calibración sensor de humedad
Figura 3.9 (pag 29)	Curva de calibración humedad para la mezcla de suelo 88% +12%
Figura 3.10 (pag 29)	Curva de calibración humedad para la mezcla de suelo 65% +35%
Figura 3.11 (pag 30)	Curva de calibración humedad para la mezcla 100% kaolín
Figura 3.12 (pag 32)	Detalle cámara de compresión uniaxial
Figura 3.13 (pag 33)	Detalle base de la cámara de compresión uniaxial
Figura 3.14 (pag 34)	Montaje general del ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada
Figura 3.15 (pag 35)	Cámara ensayo de compresión uniaxial con velocidad de deformación controlada



Figura 4.1 (pag 37)	Cambio en el volumen especifico por el incremento en P muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 4.2 (pag 38)	Trayectoria de esfuerzos muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 4.3 (pag 39)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 4.4 (pag 40)	Comportamiento succión deformación muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 4.5 (pag 41)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 88% a+ 12% k expansivo
Figura 4.6 (pag 41)	Comportamiento succión vs saturación muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 4.7 (pag 42)	Cambio en el volumen especifico por el incremento en P muestra 65% a + 35% k expansivo
Figura 4.8 (pag 43)	Trayectoria de esfuerzos muestra 65% a + 35% k
Figura 4.9 (pag 44)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 65% a + 35% k expansivo
Figura 4.10 (pag 45)	Comportamiento succión deformación muestra 65% a + 35% k expansivo
Figura 4.11 (pag 46)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 65% a+ 35% k expansivo
Figura 4.12 (pag 46)	Comportamiento succión vs saturación muestra 65% a + 35% k expansivo
Figura 4.13 (pag 47)	Cambio en el volumen especifico por el incremento en P muestra 100% k expansivo
Figura 4.14 (pag 48)	Trayectoria de esfuerzos muestra 100% k expansivo



Figura 4.15 (pag 48)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 100% k expansivo
Figura 4.16 (pag 49)	Comportamiento succión deformación muestra 100% k expansivo
Figura 4.17 (pag 50)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 100% k expansivo
Figura 4.18 (pag 50)	Comportamiento succión vs saturación muestra 100% k expansivo
Figura 4.19 (pag 51)	Cambio en el volumen específico por el incremento en P muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.20 (pag 52)	Trayectoria de esfuerzos muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.21 (pag 53)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.22 (pag 54)	Comportamiento succión deformación muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.23 (pag 55)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.24 (pag 55)	Comportamiento succión vs saturación muestra 88% a + 12% k colapsable
Figura 4.25 (pag 56)	Cambio en el volumen específico por el incremento en P muestra 65% a + 35% k colapsable
Figura 4.26 (pag 57)	Trayectoria de esfuerzos muestra 65% a + 35% k
Figura 4.27 (pag 58)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 65% a + 35% k colapsable
Figura 4.28 (pag 58)	Comportamiento succión deformación muestra 65% a + 35% k colapsable



Figura 4.29 (pag 59)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 65% a+ 35% k colapsable
Figura 4.30 (pag 60)	Comportamiento succión vs saturación muestra 65% a + 35% k colapsable
Figura 4.31 (pag 61)	Cambio en el volumen específico por el incremento en P muestra 100% k colapsable
Figura 4.32 (pag 61)	Trayectoria de esfuerzos muestra 100% k colapsable
Figura 4.33 (pag 62)	Comportamiento esfuerzo deformación muestra 100% k colapsable
Figura 4.34 (pag 63)	Comportamiento succión deformación muestra 100% k colapsable
Figura 4.35 (pag 64)	Comportamiento succión vs humedad volumétrica muestra 100% k colapsable
Figura 4.36 (pag 64)	Comportamiento succión vs saturación muestra 100% k colapsable
Figura 5.1 (pag 68)	Curva de compresión para condiciones saturadas y no saturadas (Alonso, <i>et al</i> , 1990)
Figura 5.2 (pag 70)	Superficie de fluencia asociada a P_o^* (Alonso, <i>et al</i> , 1990)
Figura 5.3 (pag 71)	Curvas de fluencia LC y SI (Alonso, <i>et al</i> , 1990)
Figura 5.4 (pag 74)	Superficie de fluencia en el espacio (p,q) (Alonso, <i>et al</i> , 1990)
Figura 5.5 (pag 71)	Superficie de fluencia en el espacio (p,q,s) (Alonso, <i>et al</i> , 1990)
Figura 6.1 (pag 79)	Comparación modelo – experimental para la muestra 88% a + 12% k expansivo
Figura 6.2 (pag 81)	Comparación modelo – experimental para la muestra 65% a + 35% k expansivo



- Figura 6.3 (pag 82) Comparación modelo – experimental para la muestra 100% k expansivo
- Figura 6.4 (pag 84) Comparación modelo – experimental para la muestra 88% a + 12% k colapsable
- Figura 6.5 (pag 86) Comparación modelo – experimental para la muestra 65% a + 35% k colapsable
- Figura 6.6 (pag 87) Comparación modelo – experimental para la muestra 100% k colapsable



INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	(pag 18)	Mezclas de análisis
Tabla 3.2	(pag 19)	Resultados ensayo azul de metileno
Tabla 3.3	(pag 21)	Resultados ensayo de gravedad especifica
Tabla 6.1	(pag 78)	Parámetros para el modelo 88% a + 12% k expansivo
Tabla 6.2	(pag 80)	Parámetros para el modelo 65% a + 35% k expansivo
Tabla 6.3	(pag 82)	Parámetros para el modelo 100% k expansivo
Tabla 6.4	(pag 83)	Parámetros para el modelo 88% a + 12% k colapsable
Tabla 6.5	(pag 85)	Parámetros para el modelo 65% a + 35% k colapasable
Tabla 6.6	(pag 86)	Parámetros para el modelo 100% k colapasable