

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LA ARCILLA USADA EN LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción

El suelo empleado en este estudio es una arcilla de color café, con tonos grises, de plasticidad y consistencia medias, procedente de un depósito de origen lacustre de la ciudad de Bogotá. Las muestras se tomaron con equipo de perforación manual hasta una profundidad máxima de 10 m. y una vez determinado el perfil estratigráfico detallado se decidió trabajar con aquellas muestras comprendidas entre 2 y 4 m, las cuales presentaban relativa homogeneidad, necesaria para la comparación de resultados entre los diferentes ensayos previstos.

En este capítulo se presenta inicialmente una descripción general de las principales propiedades geotécnicas de la arcilla estudiada, lo cual incluye su ubicación en un contexto geológico, ensayos convencionales de clasificación, composición mineralógica y análisis de la microestructura. Posteriormente se describen y analizan los ensayos que se realizaron para determinar las curvas de retención y las características de retracción de la arcilla, luego se presentan algunos ensayos edométricos que se hicieron para determinar características de compresibilidad tanto en condición saturada como con control de succión y finalmente se muestran los resultados de ensayos de resistencia sobre muestras reconstituidas, que incluyen compresiones simples, triaxiales de compresión y extensión y corte directo.

2.2 Marco Geológico de la arcilla de Bogotá

La ciudad de Bogotá está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, a una altura de 2640 m sobre el nivel del mar. En ella se distinguen dos zonas geomorfológicas principales: la primera corresponde a la zona plana, donde se asienta la mayor parte de la población y el urbanismo, conformada por depósitos poco consolidados y la segunda corresponde a la zona montañosa conformada por rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y el Terciario (Caro et al, 1996, Ingeominas y Universidad de Los Andes 1997). En la Figura 2.1 se presenta un corte geológico generalizado de la Sabana de Bogotá, en sentido E-W (Ingeominas y Universidad de Los Andes, 1997).

De acuerdo con diferentes estudios sobre la estratigrafía de la Sabana de Bogotá (Van der Hammen et al, 1973, Helmens 1990, Van der Hammen y Hooghiemstra, 1995, Caro et al, 1996), la parte plana se ha formado por procesos de sedimentación de un antiguo lago de origen tecto-sedimentario que recibió materiales en condiciones lacustres, fluviales o fluvio-glaciares, desde finales del Plioceno hasta su desecación hace 30.000 años.

Actualmente esta formación está compuesta por arcillas plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0 m de espesor, con interestratificaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blanzuzco (Caro et al, 1996, Ingeominas y Universidad de Los Andes, 1997). El espesor máximo de los sedimentos hasta el nivel de la roca, alcanza en la parte occidental del depósito valores de 780m y se va reduciendo al acercarse a la zona montañosa (Ingeominas, 1996). En el sitio de exploración donde se tomaron las muestras para la presente investigación, el espesor del depósito es de 180 m. y está ubicado a unos 3 km del piedemonte de los Cerros Orientales que limitan la ciudad de Bogotá.

2.3 Propiedades geotécnicas generales

De acuerdo con el mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (Ingeominas y Universidad de Los Andes, 1997) el sitio donde se realizó la exploración y obtención de muestras para la presente investigación se encuentra en la denominada “Zona de Suelos Blandos”, de la Formación Sabana, caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad, donde en los primeros 60m de profundidad es posible encontrar valores de límite líquido en un amplio intervalo que varía de 30% a más de 200% y disminuye en profundidad a un valor del orden de 30%.

Las muestras se obtuvieron a profundidades entre 2 y 4m, donde se encontró una arcilla de color café grisáceo, con tonos rojizos, de consistencia y plasticidad medias, correspondiente según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) a un material tipo CH, muy próximo a la línea A en la carta de plasticidad, con límite líquido variable entre 62 y 65% e índice de plasticidad entre 30% y 35%. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las propiedades básicas que se midieron en esta arcilla.

En cuanto al tamaño de las partículas, se analizaron dos muestras tanto por lavado sobre tamiz No 200 como por sedimentación, usando el método del hidrómetro. Las curvas obtenidas se muestran en la Figura 2.2. La fracción arcilla (C) presentó variaciones entre 61% y 63 %, la fracción limo (M) entre 32% y 35 % y la fracción arena fina (S) entre 4% y 5%. La actividad (A), definida como el índice de plasticidad sobre el porcentaje de arcilla en peso ($A = IP/C$), presentó variaciones entre 0.52 y 0.57, lo cual representa una actividad relativamente baja al compararla con otras arcillas, como la de Weld ($A = 0.63$), la de Londres ($A = 0.95$) o la de Shellhaven ($A = 1.33$), tal como se muestra en la Figura 2.3 (Skempton (1953) en: Lambe & Withman, 1979).

2.4 Mineralogía

La identificación de minerales por difracción de rayos X (DRX) se basa en la Ley de Bragg, que relaciona la distancia entre planos de cada mineral con el ángulo de incidencia de los rayos-X, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.1)$$

Donde n es un número entero, λ es la longitud de onda del rayo incidente, θ es el ángulo de incidencia de los rayos-X y d es la distancia interplanar o distancia basal (Figura 2.4). La distancia d es única para cada mineral y esto permite su identificación. La reflexión que se

presenta cuando $n = 1$ se denomina reflexión de primer orden y la distancia correspondiente entre planos se expresa como $d_{(001)}$, si $n = 2$ la reflexión es de segundo orden y la distancia se expresa como $d_{(002)}$, etc., adicionalmente el valor de $d_{(002)}$ es la mitad del valor de $d_{(001)}$ y el de $d_{(003)}$ la tercera parte, por ejemplo, si $d_{(001)} = 10 \text{ \AA}$, entonces $d_{(002)} = 5 \text{ \AA}$ y $d_{(003)} = 3.33 \text{ \AA}$ (Mitchell, 1993). Para obtener un difractograma entonces es necesario realizar el barrido de un rayo incidente de longitud de onda conocida, a diferentes ángulos θ , con lo cual se obtienen picos de reflexión cuya posición es característica de cada componente de la muestra. Este patrón de respuesta se puede comparar con patrones de materiales conocidos con el fin de identificar los distintos componentes de la muestra (Mitchell, 1993).

La identificación de los minerales arcillosos requiere adicionalmente de ciertos tratamientos previos de la muestra: la caolinita por ejemplo, que tiene una distancia basal de aproximadamente 7.2 \AA es insensible al secado por calentamiento moderado, pero se destruye cuando se calienta a 500°C ; la illita, cuya distancia basal es de cerca de 10 \AA permanece estable ante la adición de líquidos polares y después del secado; los minerales esmectíticos (montmorillonita) cuando se secan al aire tienen una distancia basal entre 12 y 15 \AA pero cuando se les adiciona etylen glycol o glycerol, se expanden a valores entre 17 y 18 \AA y cuando se secan al horno su distancia basal vuelve a reducirse a cerca de 10 \AA (Mitchell, 1993, Thorez, 2003).

En la Figura 2.5 se presentan diferentes perfiles de la arcilla hasta 160 m de profundidad, en una perforación aleadaña al sitio donde se obtuvieron las muestras de la presente investigación. Estos perfiles se hicieron con el propósito de investigar aspectos estratigráficos y paleoclimáticos (Gaviria et al, 2004) y permiten complementar la descripción geológica de los materiales de la Formación Sabana, descrita en el apartado 2.2.

El perfil (a) corresponde a una columna estratigráfica, donde se puede apreciar el predominio de los niveles de arcilla en los cincuenta metros superiores, con algunas intercalaciones de materia orgánica y fuerte interestratificación de arcillas, limos y arenas a mayores profundidades; en el perfil (b) se indica la presencia de vegetación a diferentes profundidades (las características de la vegetación encontrada guardan relación con la estratigrafía, esto hace parte específica de los estudios palinológicos y por lo tanto, aquí no se entra a discutir sobre ese aspecto); en el perfil (c) se aprecia la proporción de las diferentes fracciones que conforman el suelo, donde se puede notar que la presencia de los minerales arcillosos es muy superior a la de otros minerales como los feldespatos, cuarzo o carbonatos y particularmente hasta unos 30 m de profundidad representan cerca del 75% de la composición, esta proporción es un poco mayor a la que se determinó en los ensayos granulométricos (Figura 2.2); en el perfil (d) se presenta la relación feldespato/cuarzo, donde se ve que entre estos dos minerales predomina el cuarzo que es más resistente a la degradación; en el perfil (e) que es el de mayor importancia en términos de cambios potenciales de volumen, se presenta la proporción relativa de los diferentes minerales arcillosos en la fracción de tamaño arcilla ($< 2 \mu\text{m}$), donde se destaca que la mayor proporción (cerca del 50%) corresponde a caolinita, con menores proporciones de esmectita, illita y clorita respectivamente.

La proporción de minerales arcillosos entre 2 y 4 m de profundidad se presenta en la Tabla 2.2. El predominio de la caolinita, que es de baja actividad y la proporción relativamente baja de esmectita, que es de alta actividad, son las responsables de que en términos globales la arcilla presente una actividad moderada (Fig. 2.3b).

2.5 Microestructura

De acuerdo con Collins y McGown (1974) se pueden identificar tres tipos de elementos generales en la fábrica en un suelo: a) arreglos elementales de partículas b) Arreglos de grupos de partículas y c) poros o espacios que pueden estar ocupados por agua o aire.

Gens y Alonso (1992) presentan una síntesis de los tipos de fábrica anteriores y de su efecto en el comportamiento del material, para lo cual proponen dos niveles estructurales: uno macroestructural y otro microestructural. En el nivel macroestructural se pueden distinguir dos tipos de fábrica, la primera, conformada por grupos elementales de partículas que conforman una matriz arcillosa con poros intramatriciales (Fig. 2.6a) y la segunda, compuesta por varios grupos elementales de partículas que se unen y conforman una estructura tridimensional de tipo granular, donde existen poros inter e intra- agregados (Fig. 2.6b). Por su parte, el nivel microestructural ocurre en la vecindad de los arreglos elementales de partículas y en los poros intra-elemento (Fig. 2.6c).

Las deformaciones causadas por carga o por colapso están asociadas principalmente con el nivel macroestructural, mientras que las deformaciones causadas por la actividad de los minerales arcillosos, donde predominan interacciones físicoquímicas, están principalmente asociadas con el nivel microestructural.

La microestructura de la arcilla de Bogotá se estudió mediante microscopio electrónico de barrido en modo ambiental (ESEM), los detalles del equipo y de la técnica se presentan en el capítulo 6, pero aquí se describen las características más importantes observadas en las muestras inalteradas y a su humedad natural.

En la Figura 2.7 se presentan imágenes con diferentes niveles de amplificación, de una muestra tomada a 2.2 m de profundidad: en la Figura 2.7a (320 x) se observa que la fábrica corresponde fundamentalmente a arreglos de varios grupos de partículas que conforman unidades redondeadas, las cuales a su vez se agrupan en formas de cadenas y montículos mayores, dispuestos de forma irregular, dejando algunos vacíos pequeños y discontinuos entre los diferentes grupos, de manera similar al esquema de la Figura 2.6b.

En la Figura 2.7b (1280 x) se detalla la agrupación de los grupos de arcilla y se ven los vacíos o poros interagregados. En la Figura 2.7c (5120 x) se alcanzan a distinguir las formas laminares de algunas partículas de arcilla y la manera como se superponen paralelamente unas partículas a las otras recubriendo todas ellas a otra partícula de mayor tamaño. En la Figura 2.7d (7000 x) se detalla más la imagen anterior y se puede ver además el contacto borde-borde que se presenta entre algunas de las partículas individuales de arcilla y algunos poros intra-agregados.

En la Figura. 2.8 se presentan imágenes de otra muestra tomada a 4.0 m de profundidad, donde la arcilla es un poco más plástica. En la Figura 2.8a (438 x) se observa una fábrica similar a la de muestra anterior, donde se destacan las formas redondeadas de los grupos menores y el agrupamiento mayor en disposiciones irregulares, además se detectó un filamento que probablemente corresponde a una raicilla ya que a profundidades hasta de 8 m hay importante presencia de materia orgánica. Aunque los contactos predominantes entre partículas son cara-cara, en la Figura 2.8b (4800 x), se observa el detalle de algunas partículas

individuales de arcilla que presentan contactos borde-cara y borde-borde, además se puede apreciar la forma ondulada de las laminillas.

La Figura 2.8c (3500 x) corresponde a otro sector de la muestra donde se aprecia cómo se agrupan algunas partículas y dan formas redondeadas, especialmente en la parte superior de las agrupaciones mayores. En la Figura 2.8d (14000 x), se hace una ampliación de la imagen anterior donde se aprecia que aunque la partícula tiene el tamaño de una arcilla (aproximadamente 2 micras), está compuesta por varias hojas o laminillas individuales que se sobrepone unas a otras. Entre estas laminillas se deben presentar los poros intraelemento que se indican en la Figura 2.6c.

En resumen, la microfábrica de la arcilla estudiada presenta una condición que se podría considerar algo similar a la indicada en la Figuras 2.6b y por lo tanto, las deformaciones que se presentan ante los cambios de humedad se pueden atribuir fundamentalmente a variaciones volumétricas de los vacíos intrapartículas. Adicionalmente, teniendo en cuenta que tales poros son relativamente pequeños y discontinuos, la arcilla es poco permeable pero a su vez es poco susceptible a fenómenos de colapso.

2.6 Curvas de retención

Los cambios de volumen y el agrietamiento por desecación de las arcillas están asociados directamente con las variaciones de humedad y en particular con las variaciones de succión a las cuales está sometido el suelo. Las relaciones entre la succión y otras variables como el grado de saturación, la humedad o el contenido volumétrico de agua se pueden representar mediante las curvas de retención de agua, que constituyen un parámetro de cada tipo de suelo y brindan información esencial para analizar y modelar comportamientos.

La obtención de estas curvas en laboratorio se puede realizar por medio de dos procedimientos generales: el primero consiste en la medición directa de succión para diferentes condiciones de humedad y el segundo en la imposición de succiones de magnitudes conocidas para las cuales se determina la correspondiente humedad de equilibrio en el suelo. Dentro de cada uno de estos procedimientos generales existen varias técnicas, algunas de las cuales se utilizaron en esta investigación y serán discutidas a continuación, sin profundizar exhaustivamente en ellas debido a que existe suficiente bibliografía que puede consultarse al respecto, por ejemplo: Fredlund & Rahardjo (1993), Lloret (1993), Marinho (1994), Dineen, (1997), Romero (1999), Gens y Romero (2000), Ávila (2001), Barrera (2002), etc. En la Tabla 2.3 se presenta un resumen de los diferentes técnicas y equipos de medición de succión y en la Figura 2.9 se presenta un resumen de las técnicas y equipos de imposición de succión (Gens y Romero, 2000).

2.6.1 Equipos y métodos utilizados

2.6.1.1 Psicrómetro de Transistores

Este equipo permite medir la succión de una muestra de suelo mediante la determinación de la humedad relativa del aire húmedo que la rodea. El principio físico se basa en la ley de Kelvin o ley psicrométrica, que establece una relación termodinámica entre las dos variables:

$$HR = e^{\frac{-M_w S}{RT}} \quad (2.2)$$

Donde:

HR: humedad relativa

M_w: masa molecular del agua (0.018 kg/mol)

S: Succión (MPa)

R: Constante universal de los gases (8.3143E-3 MPa Kg/°K mol)

T: Temperatura (°K)

Teniendo en cuenta que la humedad relativa está definida como la presión parcial del vapor de agua a una temperatura dada, en relación a la presión de saturación del agua a esa misma temperatura, la técnica psicrométrica consiste en determinar la diferencia de temperaturas entre un termómetro seco situado en el ambiente cuya humedad relativa quiere medirse, y otro húmedo que está rodeado de agua que se evapora de forma continua. El calor de vaporización hace que descienda la temperatura del termómetro húmedo proporcionalmente a la diferencia entre la presión de vapor en el ambiente y la presión de vapor de saturación del mismo (Lloret, 1993).

El procedimiento del ensayo consiste en colocar una gota de agua en el termómetro húmedo, la cual al estar expuesta al aire en equilibrio con la muestra de suelo, se va evaporando y causa un descenso de su temperatura que es detectado por el transistor. La temperatura, como se puede ver en la Figura 2.10, pasa de T_1 a T_2 y a partir de este punto no puede seguir descendiendo porque ya ha llegado a la curva de saturación, de esta manera, es posible determinar el valor de la presión P que es la incógnita para el cálculo de la HR, ya que se conocen T_1 por el termómetro seco, T_2 por el termómetro húmedo en el momento de descenso máximo de temperatura y P' que es la presión relacionada con la temperatura T_2 que es conocida por tratarse de agua pura.

El parámetro que finalmente se lee cuando se realizan las mediciones en este equipo es un voltaje de salida de los transistores que es función de la diferencia de temperatura entre los dos termómetros y por lo tanto, de acuerdo con los principios físicos antes mencionados, tal voltaje está relacionado con la succión. Por esta razón lo único que se debe tener es una curva de calibración previa entre succión y lectura del psicrómetro (en voltios). La calibración se realizó de acuerdo con el procedimiento seguido por Dimos (1991) y por Romero (1999), consistente en la determinación de las lecturas correspondientes a succiones conocidas que se imponen mediante sales a diferentes concentraciones. El psicrómetro mide la succión total, es decir la succión matricial más la succión osmótica y no es posible diferenciar con esta técnica la una de la otra.

El psicrómetro utilizado para este estudio es de 12 canales, de marca SMI, con el cual se pueden obtener valores de succión entre 0.1 y 25 MPa. En la Figura 2.11 se observan los componentes principales de este equipo, entre los cuales se distinguen el tubo de prueba, la cámara de aislamiento térmico y la unidad de adquisición de datos:

- El tubo de prueba está fabricado en plástico (pvc) y consta de tres partes: la cabeza, en cuyo extremo superior se encuentra un potenciómetro regulable que sirve para poner la

lectura inicial en cero; el cuerpo, que es un tubo central que permite llevar la muestra hasta la parte interna del aislamiento térmico y la punta, que es el sitio donde se ubica la cápsula de la muestra y donde están instalados los transistores.

- La cámara de aislamiento térmico es un recipiente que mantiene un líquido a temperatura controlada con una precisión aproximada de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, lo cual es indispensable para la correcta medición de la humedad relativa, sin que se vea afectada por las variaciones ambientales de temperatura.

- El sistema de adquisición de datos consta de dos secciones: una análoga y otra digital. La sección digital está compuesta por un microprocesador, un convertidor análogo/digital con un tablero y una pantalla de cristal líquido. La parte análoga comprende 12 canales de amplificación, un multiplexor y filtros para control de ruido. Usualmente sólo se utiliza como unidad de lectura directa de los valores de voltaje, asociados a cierta succión, aunque se podrían almacenar los datos y después procesarlos o imprimirlos.

Para los ensayos se emplearon 2 muestras inalteradas y de cada una de ellas se extrajeron submuestras de aproximadamente 1.5 cm de diámetro y 1.0 cm de alto con el fin de realizar múltiples determinaciones simultáneamente en los distintos canales y así tener mayor confianza en los resultados.

Para la trayectoria de secado se partió de la humedad natural y una vez determinada la succión correspondiente, la muestra se dejaba expuesta al aire, de forma que perdiera cierta humedad. Los tiempos de exposición al aire fueron variables entre 3 y 6 horas aproximadamente, de acuerdo con la pérdida de peso que se iba detectando. Después de cada exposición, las cápsulas se cerraban herméticamente y se dejaban estabilizar por períodos de 18 a 24 horas, antes de proceder a hacer la siguiente determinación de succión. Con el psicrómetro esta determinación tarda aproximadamente 1 hora que es el tiempo que transcurre hasta que la temperatura se estabiliza.

La trayectoria de mojado se intentó inicialmente en la cámara húmeda, dejando las muestras expuestas a tal ambiente, sin embargo se notó que el suelo no ganaba agua sino que en algunos casos incluso seguía perdiéndola, aún con tiempos de estabilización de 72 horas, por tal razón se decidió mojar directamente, aplicando agua con un atomizador sobre la superficie de la muestra y cerrando la cápsula durante 24 horas, para permitir que por capilaridad se hiciera uniforme la humedad, de esta forma se pudieron realizar las trayectorias de humedecimiento. Tanto en la trayectoria de secado como en la de mojado se determinaba el peso de la muestra inmediatamente después de haber determinado la succión, con lo cual, por diferencia de peso respecto a la condición inicial se podía determinar la correspondiente humedad.

El psicrómetro de transistores es un equipo que brinda resultados repetibles, en un amplio intervalo de succiones y en tiempos relativamente cortos, lo cual hace que sea una herramienta de gran utilidad para obtener la curva de retención en términos de succión y humedad, sin embargo, debido a que el volumen de la muestra no se mide en las distintas etapas, no es posible conocer el grado de saturación y por esta razón se debe complementar con otro tipo de técnicas.

2.6.1.2 Imposición de succión por equilibrio de vapor

La presencia de materiales disueltos en el agua como sales o ácidos reduce la tendencia de las moléculas de agua a escapar mediante evaporación o condensación, esto implica una reducción en la presión parcial de vapor (P) que hace aumentar la humedad relativa (P/P_0) y por lo tanto, de acuerdo con la ley psicrométrica (ecuación 2.2) se produce aumento de la succión total (ver Fig. 2.10).

Esta propiedad de las sales y de los ácidos disueltos se emplea para imponer diferentes valores de succión a muestras de suelo. Robinson, (1945, citado por Marinho, 1994) obtuvo una relación experimental entre molaridad (M) de cloruro de sodio y humedad relativa. A partir de estos datos, Marinho (1994) presenta la siguiente relación entre la succión (S) y la molaridad de NaCl (la molaridad es el número de moles del soluto por litro de solución. El número de moles del soluto, se calcula dividiendo su masa entre su masa molecular, que para el caso de la sal es de 58 g.):

$$S = 4598.95M^{1.00122} \quad (2.3)$$

Esta ecuación es válida para una temperatura de 25°C y para molaridades entre 0 y 1.

Romero (1999) presenta la siguiente relación entre la succión (S) en kPa, la temperatura (T) en °C y la actividad (a) de la solución acuosa de NaCl:

$$S = -465.17(T + 273.15)e^{-4.573 \times 10^{-4} T} \ln a \quad (2.4)$$

La ecuación anterior es válida para molalidades entre 0 y 3. Nótese que el intervalo de validez ya no está en términos de la molaridad (M) sino de la molalidad (m) que se define como el cociente entre el número de moles del soluto (NaCl) por kilogramo de solvente (agua).

La actividad de la solución es equivalente a la humedad relativa del vapor en equilibrio y se puede expresar en términos de la molalidad como:

$$a = 1 - 0.035m - 1.1421 \times 10^{-3} m(m - 3) \quad (2.5)$$

Con base en las ecuaciones (2.4) y (2.5), en la Tabla 2.4 se presentan algunos valores de succión impuestos por cloruro de sodio a diferentes concentraciones, expresadas en términos de la molalidad. En la misma tabla se indican cuántos gramos de soluto se deben emplear por 1000 gr. de agua pura, para lograr las concentraciones deseadas. Los datos de la Tabla 2.4 se muestran también en la Figura 2.12 (Romero, 1999).

En algunos casos puede ser conveniente usar otro tipo de soluciones salinas para aplicar succión. En la Tabla 2.5 (Vicol, 1990, en Lloret 1993) se presentan los valores de succión

impuestos por algunas soluciones salinas saturadas. Para aplicar succiones altas, hasta aproximadamente 350 MPa, son más apropiadas las soluciones de ácido sulfúrico H_2SO_4 .

Los ensayos de imposición de succión por equilibrio de vapor que se realizaron en esta investigación se llevaron a cabo en un laboratorio con temperatura y humedad relativa controladas. El procedimiento consistió introducir en un desecador de vidrio las muestras previamente medidas y pesadas en una balanza con precisión de 0.0001 g. En el fondo del desecador se había puesto una solución salina o ácida a cierta concentración (Fig. 2.13), de tal manera que se imponía una humedad relativa al ambiente interior, sin que se tuviera contacto directo entre las muestras y la solución. Las muestras ensayadas se dejaron en equilibrio por períodos mínimos de 10 días, al cabo de los cuales se determinaba nuevamente el peso de la muestra y sus dimensiones, luego se cambiaba la concentración de la solución para imponer una nueva succión, se dejaba en equilibrio durante otros 10 días y se repetía el proceso de pesado y medición para determinar diferentes puntos de la trayectoria de secado. Al final de la prueba, después de varias etapas a diferentes valores de succión impuesta, se determinaba el peso seco de la muestra y su volumen final, con lo cual se podía calcular la humedad y el grado de saturación en todas las etapas anteriores.

2.6.1.3 Placa de Presión

Este ensayo, también denominado membrana de presión, se basa en el método de traslación de ejes, desarrollado por Hilf (1956), el cual se utilizó originalmente para poder medir succiones superiores a 100 kPa sin que se presentaran problemas de cavitación del agua en el sistema de medida. La traslación de ejes consiste en aplicar una presión de aire (P_a) sobre una muestra de suelo, lo que se puede considerar como un incremento artificial de la presión atmosférica a la cual se hace el ensayo o como un traslado de la presión de aire de referencia, de esta manera, la presión de poros negativa que existe en la muestra de suelo se incrementa en la misma medida de la sobrepresión de aire y se puede llevar a un valor positivo. Fredlund y Rahardjo (1993) presentan la descripción del equipo de Hilf (1956) y de otros equipos que emplean la técnica de traslación de ejes para medir succión y Romero (1999) hace una discusión detallada de la técnica, aplicada a ensayos edométricos y triaxiales con succión controlada.

En el ensayo de placa de presión (Fig. 2.14) se introduce una muestra de suelo dentro de una cámara que en su base tiene una membrana semipermeable de alto valor de entrada de aire (permite el paso del agua pero impide el paso de aire), fabricada en acetato de celulosa. La muestra se pone en contacto directo con la membrana que ha sido dejada previamente en saturación inmersa en agua destilada durante 24 horas. Una vez instalada la muestra, la cámara se cierra herméticamente y se le aplica en su interior presión de aire o de otro gas como nitrógeno. Teniendo en cuenta que la membrana está saturada y conectada al exterior mediante un conducto también saturado que normalmente se deja a la presión atmosférica, la presión de aire aplicada (P_a) corresponde directamente a la succión matricial (S) ya que $S = P_a - P_w$, donde P_w es la presión de agua ($P_w = 0$). De esta manera, la presión de aire puede variarse a voluntad para imponer la succión requerida hasta valores de 10 a 15 MPa.

Los ensayos se hicieron en trayectoria de secado, con muestras inalteradas, partiendo de la humedad natural. En total se aplicaron hasta cuatro incrementos de presión, variables entre 0.6 y 2.25 MPa, en cada una de las etapas las muestras se dejaron durante un tiempo mínimo de 7 días. Al final de cada etapa se determinaban rápidamente las dimensiones y el peso de la muestra (balanza de 0.0001 g. de precisión), se cambiaba la membrana de celulosa y se

procedía a realizar el siguiente incremento de presión. Una vez terminados todos los ciclos se determinaba la humedad final y con este valor se calculaban las humedades en todas las etapas anteriores. Con estos datos se tiene información sobre la succión aplicada, la humedad y el grado de saturación de las muestras.

2.6.1.4 Papel filtro

Si una muestra de suelo a cierta humedad se pone en contacto con un material poroso, como el papel filtro, entre los dos materiales se presenta un flujo de agua hasta que se alcanza un equilibrio en el potencial total, que en este caso corresponde a un equilibrio en la succión. Con base en este principio, se puede determinar la succión en un suelo, si se cuenta con una calibración previa entre la humedad del papel filtro y la succión.

La calibración del papel de filtro puede hacerse mediante diferentes técnicas, tales como la placa de presión, el equilibrio de vapor en un desecador, el psicrómetro, etc. Marinho (1994), presenta una descripción de algunas de las principales técnicas de calibración para diferentes intervalos de succión. El procedimiento general consiste en permitir que el papel filtro alcance el equilibrio con una cierta succión de magnitud conocida, luego se pesa y se seca al horno con el fin de determinar su humedad. Este mismo procedimiento se repite para diferentes valores de succión, con lo cual se tiene la relación entre la humedad del papel filtro y la succión impuesta.

En un gráfico de humedad del papel filtro contra el logaritmo de la succión, las curvas de calibración existentes presentan dos tramos claramente definidos por el cambio de pendiente: para succiones altas, la pendiente es mayor que para succiones bajas. Este comportamiento se presenta porque a altas succiones la humedad se retiene como una película adsorbida a las superficies de las fibras del papel filtro mientras que a bajas succiones la humedad se absorbe por capilaridad o por fuerzas de tensión superficial entre las fibras (ASTM-D5298-92). En la Figura 2.15 (Marinho, 1994) se presentan curvas de calibración del papel filtro Whatman n.º 42 propuestas por diferentes autores. Para el presente estudio se empleó este mismo tipo de papel filtro y se usó la calibración propuesta por Chandler et al (1992), con las siguientes ecuaciones regresión:

$$\begin{aligned} S(kPa) &= 10^{(4.84-0.0622w)} && \text{para } w \leq 47\% \\ S(kPa) &= 10^{(6.05-2.48 \log w)} && \text{para } w > 47\% \end{aligned} \quad (2.6)$$

Donde S es la succión y w la humedad.

La absorción de agua por parte del papel filtro puede presentarse por flujo de vapor o por flujo capilar. Cuando el flujo ocurre por transferencia de vapor únicamente, el papel filtro mide la succión total, ya que incorpora todas las fuerzas osmóticas y capilares que retienen a las moléculas de agua, mientras que si el flujo ocurre por capilaridad el papel filtro mide la succión matricial (Marinho, 1994). En este sentido el procedimiento puede hacerse con papel filtro en contacto directo con la muestra o sin contacto directo. En este último caso se puede instalar un disco perforado entre la muestra y el papel filtro, para que el flujo de vapor se presente a través de los orificios.

Los ensayos realizados en esta investigación se hicieron con papel filtro en contacto con la muestra. Se usó un papel filtro nuevo, sin secar al horno y con el fin de tener dos datos por cada medición, se colocó un papel filtro en cada lado de la muestra. El procedimiento

consistió en tomar las dimensiones y el peso iniciales de la muestra y el peso del papel filtro, luego se colocaba un disco acrílico sobre cada papel para asegurar buen contacto entre éste y la muestra y posteriormente se envolvía en papel plástico y en una bolsa plástica con cierre hermético. La muestra en estas condiciones se guardaba dentro de un recipiente cerrado durante 7 días para permitir un adecuado equilibrio. Al final de este periodo se tomaba rápidamente el peso del papel de filtro, haciendo la manipulación con pinzas y luego se llevaba al horno durante 1 hora para determinar luego su peso seco y la correspondiente humedad. En cada una de las etapas también se pesaba y se medía la muestra de forma muy cuidadosa para no perder material y al final se determinaba su peso seco, con lo cual se podían calcular las humedades en todas las etapas del proceso.

2.6.1.5 Contracción libre

Con el propósito de complementar los datos de los ensayos anteriores, particularmente en lo relacionado con las características de cambio de volumen en función de los cambios de humedad y del grado de saturación, se hicieron ensayos en los cuales las muestras previamente medidas y pesadas, se dejaban expuestas al aire para que perdieran humedad y a diferentes tiempos se tomaban nuevamente sus medidas y su peso. Al final del proceso se determinaba la humedad y con este dato se recalculaban las humedades en todos los pasos intermedios. Estos ensayos, aunque no permiten la medición de la succión, tienen la ventaja de ser muy sencillos y rápidos para obtener las curvas de retracción y particularmente fueron de utilidad para determinar en cada caso, las ecuaciones de correlación entre humedad y grado de saturación que se emplearon para calcular el grado de saturación en las muestras ensayadas en el psicrómetro, a las cuales, como ya se indicó, por su pequeño tamaño no es posible medirles el volumen con precisión.

2.6.2 Resultados generales

Se obtuvieron las curvas de retención de tres muestras diferentes, dos inalteradas y una alterada, con las siguientes características iniciales:

- S1-M8, muestra inalterada, tomada entre 2.8 y 3.2 m. de profundidad, $w = 44\%$, $LL = 63\%$, $IP = 32\%$, $\gamma_t = 16.7 \text{ kN/m}^3$.
- S1-M10, inalterada, tomada entre 3.6 y 3.8 m. de profundidad, $w = 42\%$, $LL = 67\%$, $IP = 33\%$, $\gamma_t = 17.2 \text{ kN/m}^3$.
- S1-M10A, remoldeada. Es la misma muestra S1-M10 pero reconstituida, $w = 66\%$, $\gamma_t = 15.8 \text{ kN/m}^3$. En este caso los ensayos sólo se realizaron con la técnica de papel filtro.

Todos los ensayos se hicieron en condición de volumen variable, es decir permitiendo la libre contracción o expansión de las muestras con los cambios de contenido de agua. En la Figura 2.16a se presenta la curva de retracción de la muestra S1-M8, expresada en términos de variación del índice de poros. En esta curva es claro que la mayor parte de la contracción presenta un comportamiento lineal, característico de un material saturado y sólo a partir de humedades inferiores a 30% aproximadamente esta relación deja de ser lineal para finalmente estabilizarse en el límite de contracción ($w_{LC} \approx 23\%$, $e_{\min} \approx 0.75$). En la Figura 2.16b se presenta la variación del grado de saturación en función de la humedad, aquí, como en la

Figura 2.16a se puede apreciar que el suelo comienza a desaturarse a valores cercanos a 30% de humedad. Los datos de retracción libre de esta gráfica se ajustaron a una ecuación polinómica, mediante una función de regresión del programa Grapher®, la cual sirve posteriormente para relacionar todos los valores de succión con grado de saturación, en particular aquellos obtenidos mediante el psicrómetro a los cuales no es posible determinarles en todas las etapas el grado de saturación.

La Figura 2.17a muestra la variación de la succión en función de la humedad, para trayectorias tanto de secado como de mojado, donde se puede notar la histéresis del comportamiento en cada caso. Los datos más consistentes fueron los de psicrómetro, mientras que los de placa de presión y equilibrio de vapor presentaron tendencia a dar valores de succión un poco mayores. Una posible causa de la discrepancia en los resultados es que debido al mayor tamaño de las muestras usadas en los ensayos de placa de presión y equilibrio de vapor con respecto a los que se usan en el psicrómetro, el agua más interna no logra salir de la muestra y por lo tanto no se alcanza un equilibrio total entre la succión impuesta y la humedad medida, incluso en algunos casos se amplió el período de estabilización de 10 a 15 días y los resultados fueron similares, sin embargo, es probable que se haya requerido aún de mayor tiempo de estabilización, pues Gens y Romero (2000) indican que éste debe ser mayor de 3 semanas.

En la Figura 2.17b se presenta la variación de la succión con el grado de saturación, aquí se puede notar que el valor de entrada de aire durante la trayectoria de secado (VEA), es decir la succión a la cual el suelo comienza a desaturarse, es aproximadamente de 0.9 MPa, esto indica que la arcilla puede mantener succiones relativamente altas en condiciones saturadas o cuasisaturadas y este aspecto, como se discutirá posteriormente es importante para el análisis del agrietamiento en términos de tensiones efectivas.

En las Figuras 2.18 y 2.19 se presentan las mismas curvas descritas anteriormente, pero para la muestra S1-M10, que es un poco más plástica. En este caso la muestra presentó mayor contracción ($w_{LC} \approx 13\%$, $e_{min} \approx 0.48$, Fig. 2.18a) y similar humedad de desaturación ($w = 30\%$, Fig. 2.18b); las trayectorias de secado y mojado mostraron amplia divergencia (Figuras 2.19a y 2.19b) y el VEA resultó similar que en la muestra anterior, con un valor cercano a 0.9 MPa (Fig 2.17b).

En las Figuras anteriores también se presentan, en líneas a trazos, las curvas determinadas sobre la arcilla reconstituida (S1-M10 alterada). En este caso las muestras se remodelaron manualmente y se les agregó agua destilada, hasta alcanzar una humedad mayor a la de las muestras inalteradas ($w_0 = 66\%$). Durante la ejecución de estos ensayos no se disponía de los diferentes métodos de medir succión, anteriormente descritos y por tal razón, se empleó únicamente la técnica del papel filtro en contacto con la muestra, con la cual se determina la succión total.

Como resultado interesante se observa que en ambos casos los comportamientos son muy similares en términos de las características de contracción (Fig. 2.18), sin embargo para humedades superiores a la humedad natural de las muestras inalteradas, se observa que la curva de succión-humedad (Fig. 2.19a) tiende a ser más horizontal cuando la arcilla es alterada. Este comportamiento también se ha observado en otros suelos arcillosos (Croney, 1952, Croney y Coleman, 1954, Brady, 1988) y es típico del efecto de la alteración y alta humedad inicial de la muestra donde las curvas de retención tienden hacia la curva de suelo

alterado continuamente (continuously disturbed soil). Marinho (1994) presenta una discusión más amplia sobre el efecto de la alteración de las muestras en la relación succión-humedad.

En la Figura 2.19a se incluyeron también los datos medidos en los ensayos de tracción directa con el tensiómetro del Imperial College (Ridley y Burland, 1993), realizados sobre muestras reconstituidas (ver capítulo 4). Como se puede apreciar, estos resultados se ajustan bien a los obtenidos con papel filtro. Finalmente, el valor de entrada de aire y la forma de la curva succión-grado de saturación son muy similares en las muestras inalterada y alterada (Fig. 2.19b).

En las Figuras 2.20 y 2.21 se presentan las curvas de retención de las muestras S1-M8 y S1-M10 respectivamente, en términos del contenido volumétrico de agua (θ) y de la succión, expresada como cabeza de presión hidráulica (ψ_m). La relación entre el contenido gravimétrico de agua y el contenido volumétrico de agua está dada por:

$$\theta = n.Sr = \frac{G_s.w}{1+e} \quad (2.7)$$

Donde: n es la porosidad, Sr el grado de saturación y G_s la gravedad específica. A partir de estas curvas se puede determinar el coeficiente específico de almacenamiento o capacidad hidráulica capilar $C(\psi) = d\theta/d\psi_m$ [L^{-1}], que es un parámetro empleado en los modelos de flujo en el medio poroso.

2.7 Características de compresibilidad

2.7.1 Equipos y métodos utilizados

A continuación se presenta la descripción de algunos ensayos que se hicieron para conocer las características básicas de compresibilidad de la arcilla y en particular para evaluar los efectos que producen ciertas trayectorias de succión en tales características. Los tipos de pruebas realizadas fueron: edómetro convencional en condición saturada, edómetro de succión controlada por transferencia de vapor y edómetro de succión controlada por ósmosis, utilizando una solución de Polietilen Glycol (PEG). Después de hacer la descripción de las técnicas se presentan y discuten los resultados de los tres ensayos.

2.7.1.1 Ensayo de consolidación unidimensional en condición saturada (EDO-SAT)

Este es un ensayo edométrico convencional que se realizó en un consolidómetro de anillo fijo, aplicando incrementos de carga que se dejaron actuar durante aproximadamente 24 horas cada uno. En total se realizaron dos ciclos de carga y descarga y se tomaron los correspondientes datos de tensión vertical aplicada y de deformación en función del tiempo, con estos datos se determinaron la tensión de preconsolidación, los índices de compresión y recompresión, el coeficiente de consolidación y la permeabilidad saturada para diferentes intervalos de carga.

2.7.1.2 Ensayo edométrico de succión controlada por transferencia de vapor (EDO-TRV)

El método de aplicación de succión por transferencia de vapor se describió en el apartado 2.6.1.2 para determinar las curvas de retención de la arcilla. En este caso el principio general es el mismo pero cambian algunos aspectos del procedimiento y de los equipos.

El equipo empleado se muestra esquemáticamente en la Figura 2.22. Consta de una cámara edométrica en cuyos extremos tiene orificios que permiten establecer un flujo continuo de vapor a una cierta humedad relativa. Para hacer circular el vapor se emplea una pequeña bomba que va conectada mediante mangueras a un recipiente que en el fondo contiene una solución salina o ácida a cierta concentración, de acuerdo con la magnitud de la succión que se desea imponer (ver Tablas 2.4 y 2.5). Teniendo en cuenta el alto grado de saturación inicial y la baja permeabilidad de la arcilla estudiada, la circulación del vapor no se hizo a través de la muestra, como se suele hacer en suelos de alta porosidad, sino únicamente en sus extremos, tal como lo indican Gens y Romero (2000). Para lograr tiempos razonables de estabilización se empleó una muestra de pequeño espesor (10 mm). Con este equipo se puede aplicar tensión vertical y succión simultáneamente y se pueden leer los valores correspondientes de deformación vertical de la muestra, sin embargo no es posible conocer el grado de saturación porque no se tiene control sobre el cambio en el contenido de agua en la muestra.

2.7.1.3 Ensayo edométrico de succión controlada por PEG (EDO-PEG)

El polietileno glycol (PEG) es una sal soluble en agua, que se consigue en el mercado con pesos moleculares variables entre 200 y 35.000. Para la aplicación de succión osmótica, normalmente se emplea PEG de peso molecular mayor o igual a 20.000, con lo cual el tamaño de las moléculas es bastante grande y no logran pasar a través de una membrana semipermeable. En la Figura 2.23 (Dineen, 1997) se presenta un esquema que explica el principio de aplicación de ósmosis: en la parte izquierda del recipiente se tiene agua pura, en la parte derecha una solución salina a cierta concentración y entre las dos hay una membrana semipermeable que permite el paso de las moléculas de agua (que son de menor tamaño) pero no permite el paso de las moléculas de sal. Como ya se indicó anteriormente, la sal produce succión osmótica y esto genera un desequilibrio en el sistema, de tal forma que el agua pura es atraída por la solución y pasa a través de la membrana, hasta que se alcanza un equilibrio en el sistema, cuando la cabeza de presión (h) iguala la succión osmótica. La altura de equilibrio depende de la concentración del soluto.

El sistema de edómetro que se empleó en este caso fue el desarrollado por Dineen, (1997), basado en los trabajos previos de Kasiff y Ben Shalom (1971), Kasiff et al (1973, citado por Dineen, 1997) y Delage et al (1992). El esquema del equipo se presenta en la Figura 2.24. Consta de una cámara edométrica en cuya base se instala la membrana semipermeable y bajo la membrana se hace circular la solución de PEG. El circuito que se emplea para hacer circular la solución consiste en una manguera, una bomba peristáltica y un recipiente de almacenamiento. La succión impuesta depende de la concentración de la solución, sin embargo, en este ensayo se hace un control adicional de la misma, mediante un tensiómetro (tensiómetro del Imperial College) instalado en la parte superior. Para determinar la cantidad de agua que sale de la muestra o que entra a ella, se controla el peso del recipiente de almacenamiento mediante una balanza electrónica, por lo tanto es necesario que el sistema sea cerrado y que se minimicen las pérdidas por evaporación.

La reducción de pérdidas por evaporación es uno de los aspectos críticos del sistema. Dineen (1997) encontró que una forma eficiente de reducir tales pérdidas era disminuyendo las áreas efectivas de evaporación tanto en el envase de almacenamiento de la solución como en los conductos y en la superficie de la muestra. Para el envase propone usar una delgada capa de aceite de silicona sobre solución de PEG y encima de esta capa un disco de vidrio flotante. Respecto a los conductos indica que su longitud y el número de uniones se deben reducir a lo mínimo posible y propone además un diseño especial de unión de tramos de manguera. Las pérdidas en la parte superior de la muestra se reducen recubriéndola con un sello de látex. Aún así encontró que en todo el sistema se presentaba una pérdida general de 0.00356 gr./h.

En este estudio se siguieron las recomendaciones en cuanto al recubrimiento de la muestra con látex y la reducción de la longitud de la conducción y de los empalmes, sin embargo, se empleó un sistema simplificado de almacenamiento de la solución, consistente en un recipiente de plástico con tapa superior y en esta tapa se hicieron orificios para que pasaran las mangueras por donde circulaba la solución. Las pérdidas determinadas en ensayos de prueba preliminares fueron superiores a las reportadas por Dineen pero en general se mantuvieron bastante estables, pues variaron entre 0.0175 y 0.0185 gr./h. Un valor de 0.018 gr./h se empleó para corregir las lecturas de la balanza por pérdidas debidas a la evaporación general en el sistema.

Adicional a la aplicación de succión, es posible aplicar carga vertical en la parte superior de la muestra mediante un actuador neumático acoplado a una celda de carga o con cargas muertas y esto permite hacer diferentes trayectorias de tensión-succión. Finalmente, otra variable que se mide es la deformación vertical mediante un LVDT instalado sobre el pedestal superior. Los datos del tensiómetro, de la balanza, del LVDT, de la celda de carga y los tiempos correspondientes a cada uno de ellos, se toman mediante un sistema de adquisición de datos conectado a un PC.

En este ensayo la succión osmótica se aplicó con PEG 35.000, para lo cual fue necesario realizar la respectiva calibración, teniendo en cuenta que en la literatura sólo se disponía de calibraciones para PEG 20.000 o de menor masa molecular. A continuación se hace una descripción de la calibración efectuada.

Calibración de la succión aplicada por PEG 35.000

El proceso de calibración se realizó con el tensiómetro del Imperial College cuya calibración previa se había hecho aplicando incrementos positivos de presión hasta un valor máximo de 4000 kPa (para mayor detalle de la calibración del tensiómetro ver capítulo 4). La membrana utilizada fue Spectra/Por 5 MWCO 12-14.000, usada normalmente con fines médicos en procesos de diálisis. Esta membrana tiene dos láminas ya que viene en forma tubular, sin embargo, para la calibración se recortó, de manera que quedara una sola lámina y se dejó inmersa en agua destilada durante 2 horas, hasta que su consistencia fuera muy blanda, luego se recortó al tamaño del anillo del edómetro y se instaló cuidadosamente de forma que quedara totalmente lisa y sellada con los platos superior e inferior del edómetro. La disposición general del sistema de circulación de PEG fue igual a la que se describió para la realización del ensayo, sólo que en este caso se puso una fracción muy delgada de arcilla entre el tensiómetro y la membrana con el fin de tener una lectura prácticamente directa. Esta pequeña interfase de arcilla es importante para evitar la rápida cavitación del sistema.

La preparación de la solución se hizo mezclando PEG 35.000 (disponible comercialmente en forma de gránulos secos) con agua destilada. Las concentraciones empleadas, referidas a peso de PEG respecto a peso de agua fueron: 15%, 20%, 25%, 30% y 40%, sin embargo para la de 40% no se logró determinar la succión impuesta porque el sistema presentaba cavitación antes de alcanzar la condición de equilibrio. Las mezclas se realizaron agitando manualmente durante 15 minutos y dejando luego la solución en reposo durante dos horas. Una vez se tenía lista la solución, se ponía en circulación para remover las burbujas de aire que quedaban dentro de las mangueras o bajo la membrana, esta labor era necesaria para que las lecturas del tensiómetro fueran estables.

En la Figura 2.25 se presentan las curvas de succión medida en función del tiempo para las diferentes concentraciones de PEG. Para concentraciones inferiores a 15%, la estabilización se logró en menos de 40 minutos, para concentraciones entre 15% y 35% la estabilización de la succión se presentó entre 100 y 120 minutos y para la concentración de 40% no se alcanzó la estabilización de la lectura porque se presentó cavitación cuando la succión llegó a 1351 kPa. El ensayo se repitió varias veces a la misma concentración pero nuevamente ocurría cavitación antes de estabilizarse la lectura. En la Figura 2.26 se presenta la curva de calibración en términos de la succión al inicio de la condición estable y la concentración de PEG. La curva de regresión se ajustó a la siguiente ecuación polinomial mediante una función del programa Grapher ®:

$$\pi = -25.857 - 2.0214C + 1.13571C^2 \quad (2.8)$$

Donde π es la succión osmótica [kPa] y C es la concentración de PEG [%]. El coeficiente de correlación R^2 obtenido fue 0.991.

La comparación de la calibración obtenida con otras calibraciones se presenta en la Figura 2.27 (Gens y Romero, 2000).

2.7.2 Resultados Generales

2.7.2.1 Ensayo EDO-SAT

En la Figura 2.28 se presenta la curva de compresibilidad en términos de la tensión vertical efectiva y del índice de poros. A partir de esta curva se determinaron la tensión de preconsolidación y los índices de compresión y recompresión. Los resultados indican que se trata de una arcilla sobreconsolidada, probablemente por desecación superficial ($RSC = 3$) y que presenta características de compresibilidad relativamente moderadas ($C_c = 0.35$, $C_r = 0.11$).

Los coeficientes de consolidación C_v para diferentes incrementos de carga se determinaron con base en las curvas de desplazamiento vertical en función de la raíz cuadrada del tiempo (Fig. 2.29), de acuerdo con el método de Taylor. En la Figura 2.30 se presentan los resultados, donde se puede observar que C_v varió entre 0.025 y 0.04 mm^2/s y mostró tendencia a reducirse a medida que aumentaba la tensión vertical. Además se notó un pequeño incremento de C_v en el primer ciclo de descarga, asociado con la expansión elástica del material.

De los datos de consolidación también se obtuvo el coeficiente de permeabilidad al agua en condición saturada k , para diferentes incrementos de carga, cuyos resultados se presentan en

la Figura 2.31 en función del índice de poros. Aunque el coeficiente de correlación es bajo, se observa cierta tendencia al aumento de k con el incremento de e y la ecuación de correlación encontrada fue:

$$k[m/s] = 1,588 \times 10^{-12} \text{EXP}(3.41886e) \quad (2.9)$$

2.7.2.2 Ensayo EDO-TRV

Con este ensayo se quería evaluar el efecto de la aplicación de un ciclo de succión previo a la aplicación de carga vertical y verificar los tiempos de estabilización de la succión. La trayectoria de tensiones seguida se presenta en la Figura 2.32. Inicialmente se aplicó una pequeña tensión vertical de 48 kPa para ajustar la muestra y el equipo y luego se aplicaron dos incrementos de succión: el primero, de 39,5 MPa, haciendo circular vapor de una solución saturada de cloruro de sodio y el segundo, de 144,3 MPa mediante una solución de ácido sulfúrico con concentración del 50% en peso.

En la Figura 2.33 se puede ver que la contracción vertical con la carga de ajuste inicial fue de 5.05%, luego, con el primer incremento de succión se presentó una contracción del 9.0% (contracción acumulada 14.05%) y con el segundo la contracción sufrida fue tan solo del 0.5% (contracción acumulada 14.55%), es decir que succiones superiores a 39.5 MPa causaron muy bajo efecto sobre los cambios volumétricos de esta arcilla. La reducción de la succión causó un leve incremento del volumen lo cual refleja que un ciclo de succión produce en esta arcilla una deformación permanente importante.

Las curvas de variación de la deformación con el tiempo para los dos incrementos de succión se muestran en la Figura 2.34. Para el primer incremento de succión la contracción comienza a manifestarse aproximadamente a los 10 min. de iniciada la circulación del vapor, pero las reducciones drásticas de volumen se presentan a partir de los 1000 min. (16.7 h) y luego se estabilizan aproximadamente a los 7300 min. (5 días). En el segundo incremento de succión se presentó una leve contracción después de transcurridos 300 min. y luego se estabilizó la deformación a los 3000 min (aprox. 2 días). Es decir, debido al poco espesor de la muestra empleada, los tiempos de estabilización de la succión y de las correspondientes deformaciones inducidas por ésta, son bastante menores de las tres semanas que se tenían previstas por cada incremento de succión. Probablemente un tiempo razonable en este caso es de una semana por cada incremento de succión.

En la curva de deformación volumétrica en función de los incrementos de tensión vertical (Fig. 2.35) se puede ver que el ciclo de succión causó un aumento significativo de la tensión de preconsolidación que pasó de 180 kPa (Fig. 2.28) a 550 kPa, es decir que el material tiende a hacerse más rígido. Este tipo de comportamiento se ajusta al modelo de análisis de suelos parcialmente saturados propuesto Alonso et al (1990), caracterizado por la presencia de dos fronteras o superficies de fluencia que delimitan el comportamiento elástico del comportamiento plástico de un material (Fig. 2.36): la frontera de carga-colapso (Loading Collapse, LC) y la frontera de incremento de succión (Suction Increase, SI), estas dos fronteras están acopladas entre si de tal manera que el corrimiento de una de ellas causa a su vez corrimiento en la otra. Con la trayectoria seguida en este ensayo se indujo un desplazamiento hacia arriba de la línea SI, porque se superó la succión máxima que había experimentado la arcilla y esto causó un desplazamiento acoplado hacia la derecha de la línea LC, de tal forma que la presión de confinamiento P_o^* correspondiente al estado saturado inicial, pasó a un valor mayor representado por P_o . Para determinar los parámetros completos de este modelo

es necesario realizar un mayor número de trayectorias tanto en ensayos edométricos como en ensayos triaxiales con succión controlada, pero esto se sale de los alcances de la presente investigación.

2.7.2.3 Ensayo EDO-PEG

La trayectoria de tensión – succión seguida en este ensayo se presenta en la Figura 2.37. De acuerdo con las concentraciones de PEG 35.000 y la calibración indicada en la Figura 2.26, las succiones impuestas deberían definir una trayectoria lineal, sin embargo, se presentaron algunas diferencias entre la succión osmótica impuesta en la parte inferior de la muestra y la que se midió con el tensiómetro en la parte superior (Fig. 2.38), por lo cual, la trayectoria que corresponde a las succiones medidas, presenta un comportamiento algo irregular.

Para succiones impuestas inferiores a 200 kPa, la diferencia es bastante grande (hasta del 125%) con respecto a la medida en el tensiómetro. Esta diferencia se puede atribuir a dos causas principales: en primer lugar, para concentraciones inferiores a 15%, las moléculas de sal están muy dispersas y no alcanzan a transmitir eficientemente la succión a través de membrana semipermeable y esto se refleja en los datos de la curva de calibración (ver Fig. 2.26) donde la diferencia en las succiones medidas para las concentraciones de PEG de 10% y 15% es muy baja y en segundo lugar, en la misma muestra la succión no es totalmente uniforme sino que se presente un cierto gradiente por evaporación de agua en la parte superior, a pesar de que esto se trata de evitar mediante un recubrimiento con plástico de la cámara edométrica. Cuando las succiones impuestas son superiores a 400 kPa, las diferencias con respecto a las succiones medidas se reducen a valores máximos de 14%.

Estos resultados muestran la importancia de medir el valor de la succión que realmente está actuando en el suelo y diferenciarla de la que teóricamente se está imponiendo. Adicionalmente, para efectos de que se tenga una cierta uniformidad en la succión que actúa en toda la muestra, es conveniente que las succiones de trabajo sean mayores a 400 kPa.

Al aplicarse cada incremento de succión osmótica se requiere un cierto tiempo de estabilización de la misma. Lo que se observó en este ensayo es que el tiempo de estabilización en la trayectoria de secado tiende a aumentar con la concentración de PEG (Fig. 2.39) mientras que en la trayectoria de mojado no se detectaron diferencias sustanciales en los tiempos de estabilización (Fig. 2.40).

En la Figura 2.41 se muestra la deformación volumétrica medida en función del tiempo para los distintos incrementos de succión. Aquí se puede ver que la contracción acumulada máxima ocurre al final de los incrementos de succión, es decir, cuando se aplica una concentración de PEG del 30%, sin embargo, la mayor contracción parcial se presenta cuando se aplica PEG al 20% de concentración, mientras que para las demás concentraciones de PEG, las deformaciones volumétricas son sensiblemente menores. Esta Por otra parte, los tiempos de estabilización de las deformaciones son similares a los de estabilización de la succión y en la trayectoria de secado muestran la misma tendencia de aumentar proporcionalmente con la concentración de PEG.

La deformación al final de cada incremento de succión se presenta en la Figura 2.42 y en ella se puede definir de manera relativamente clara lo que en el modelo de Alonso et al (1990) se denomina succión de fluencia (S_o) caracterizada por el cambio de pendiente en la trayectoria de secado y que representa la succión máxima que ha experimentado este suelo en el pasado.

En este caso el valor de S_o es aproximadamente 220 kPa. Este parámetro no se había podido definir en el ensayo anterior (EDO-TRV- Fig. 2.33) porque los intervalos de succión empleados fueron muy amplios.

En la Figura 2.43 se presenta la deformación debida a la aplicación de presión vertical después del ciclo de succión impuesto con PEG. En este caso la deformación acumulada máxima alcanzó un valor cercano al 25% el cual resulta alto si se le compara con la deformación del 18% obtenida en el ensayo EDO-SAT a la misma tensión vertical máxima, especialmente porque era de esperar que el ciclo de succión hiciera más rígido al suelo y por lo tanto que se redujera su deformabilidad. La causa más probable de tal discrepancia, tiene que ver con la deformación que se induce en la parte inferior de la muestra al momento de hacer circular el PEG, debido a que la membrana sufre una cierta deformación que puede incidir en las lecturas de desplazamiento vertical (Fig. 2.44). Este fue un aspecto que se trató de corregir en diferentes pruebas realizadas pero resulta muy difícil debido a que necesariamente la membrana debe tener un cierto desplazamiento para que pueda circular la solución entre la base del edómetro y la muestra. El efecto de la deformación causada por la membrana tiende a reducirse a medida que se incrementa la tensión vertical aplicada sobre la muestra.

En la Figura 2.43 también se observa el valor de la presión de preconsolidación que como era de esperarse tuvo un incremento respecto a la obtenida en el ensayo EDO-SAT, pues pasó de 180 kPa a 350 kPa. Los datos conjuntos de presión de preconsolidación contra valores máximos de los ciclos de succión para los tres ensayos edométricos realizados (EDO-SAT, EDO-TRV y EDO –PEG) se presenta en la Figura 2.45 y en ella se puede ver que la presión de preconsolidación máxima que se logra con la aplicación de los ciclos de succión, tiende hacia un valor límite de aproximadamente 700 kPa. Esta gráfica además puede emplearse para estimar la presión de preconsolidación debida a la aplicación de valores intermedios de succión.

La variación del grado de saturación de la muestra durante todo en ensayo se determinó mediante la medición continua del peso de agua que entra o sale de ella y la respectiva variación del volumen medido. En la Figura 2.46 se presentan los resultados del grado de saturación calculados en función del tiempo para las diferentes concentraciones de PEG. En este caso, como ya se indicó, se hizo una corrección por pérdidas debidas a evaporación, usando un factor de pérdida de 0.018 gr/h. Las oscilaciones tan fuertes que se notan en la figura, obedecen a cambios en la lectura de la balanza asociados con los pulsos producidos por la bomba peristáltica que hace circular el PEG, con flujos no uniformes debidos a la deformación de la membrana y con leves oscilaciones que se pueden presentar en los conductos a través de los cuales se hace la circulación. De todas formas los resultados obtenidos fueron consistentes con las curvas de retención y muestran que para el intervalo de succiones impuestas (0 - 868 kPa), el suelo permanece saturado o muy cerca de saturación.

2.8 Ensayos de resistencia sobre muestras reconstituidas

2.8.1 Ensayos de compresión simple

Se realizaron 10 ensayos de compresión simple con muestras compactadas a diferente humedad inicial. Para la preparación de las muestras se hizo amasado de la arcilla con una espátula a la humedad requerida y luego se dejaba equilibrar la humedad durante períodos

mínimos de 24 horas. Posteriormente las muestras se introducían en un molde cilíndrico y se compactaban estáticamente.

La etapa de rotura se realizó en una prensa convencional a deformación controlada, con una velocidad de 0.2 mm/min. Las curvas de tensión-deformación (Fig. 2.47) presentaron comportamientos típicamente dúctiles, es decir sin pico definido o con caídas muy suaves después del pico, a excepción del ensayo A que fue el de menor humedad, cuyo comportamiento fue frágil.

La resistencia a la compresión varió en los distintos ensayos entre 20 y 130 kPa, y mostró tendencia a disminuir a medida que aumentaba la humedad, aunque como se observa en la Figura 2.48a, los resultados presentaron bastante dispersión porque en algunos casos ocurría agrietamiento longitudinal de las muestras. La relación entre la resistencia y la humedad se ajustó a partir de los datos obtenidos a una curva de tipo exponencial. En la figura se presentan también los valores de succión obtenidos de la curva de retención.

El módulo de elasticidad presentó comportamiento similar al de la resistencia, es decir, con tendencia a disminuir a medida que aumentaba de la humedad y con una amplia dispersión de resultados (Fig. 2.48b). En este caso los datos también se ajustaron a una curva de exponencial y variaron entre 1000 y 6200 kPa.

2.8.2 Ensayos triaxiales de compresión

Se realizaron 6 ensayos triaxiales consolidados no drenados, con medición de la presión de poros, designados como C-1 a C-6 y dos ensayos consolidados drenados, designados como D-1 y D-2. Las curvas de tensión deformación de estos ensayos se presentan en la Figura 2.49.

Los ensayos C-1 a C-4 presentaron un comportamiento normal, donde los incrementos de resistencia fueron directamente proporcionales a los incrementos en las tensiones efectivas de consolidación, pero los ensayos C-5 y C-6 mostraron comportamientos anómalos, probablemente por alteraciones en el montaje o la ejecución de las pruebas, ya que su resistencia resultó menor de la que se esperaba, de acuerdo con su presión de consolidación. Estos resultados se pueden apreciar mejor en la Figura 2.50 donde se muestran las trayectorias de tensiones efectivas seguidas por los distintos ensayos.

Los ensayos D-1 y D-2 mostraron buena concordancia con los ensayos C-1 a C-4 y todos ellos permiten definir una envolvente de resistencia en compresión, cuya pendiente M es 1.1. De acuerdo con esta envolvente el ángulo de fricción interna se puede determinar como (Wood, 1990):

$$\text{sen } \phi' = \frac{3M}{6 + M} \quad (2.10)$$

Por lo tanto, en compresión $\phi' = 27.7^\circ$.

2.8.3 Ensayos triaxiales de extensión

Se efectuaron 5 ensayos triaxiales consolidados no drenados de extensión, designados como E-1 a E-5. En este caso el procedimiento consistió en aplicar la presión isotropa de consolidación y posteriormente se hizo reducción de la tensión vertical, por eso tanto la tensión desviadora como las deformaciones se consideran negativas, tal como se muestra en la Figura 2.51. Todas las pruebas mostraron comportamientos consistentes con las presiones de consolidación aplicadas y permiten definir una envolvente de rotura en extensión $M^* = 0.77$, cuya relación con el ángulo ϕ' está dada por (Wood, 1990):

$$\text{sen}\phi' = \frac{3M^*}{6 - M^*} \quad (2.11)$$

De tal manera que para la arcilla remoldeada $\phi' = 26.2^\circ$. Este valor es muy similar al que se obtuvo en compresión.

La similitud en el ángulo de fricción interna en compresión y en extensión aquí obtenida se ajusta a lo encontrado por Gens (1982) sobre muestras de arcilla de baja plasticidad.

En el capítulo 4 se vuelven a presentar las envolventes de resistencia en compresión y extensión, pero en términos de la formulación de Lambe, para compararlas con los resultados de los ensayos de tracción.

2.8.4 Ensayo de corte directo residual

Este fue un ensayo complementario para determinar la resistencia residual de la arcilla reconstituida. Las muestras se montaban en el equipo de corte directo y se hacían dos ciclos de carga y descarga para inducir la rotura previa del material, luego de los cuales tomaban los respectivos datos de tensión cortante, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical que se reportan en las Figuras 2.53a y 2.53b. La velocidad de desplazamiento fue de 0.05 mm/min.

Considerando que la cohesión residual debe ser cero, el ángulo de fricción interna en condición residual que se obtiene al interpolar los tres puntos de ensayo es 18° (Fig. 2.53c). El valor de ϕ' bastante menor al que se determinó en los ensayos triaxiales antes descritos, pero como se verá posteriormente es mayor que el que se obtiene en pruebas de tracción.

2.9 Conclusiones

- El suelo estudiado es una arcilla de color café grisáceo, con tonos rojizos, de consistencia y plasticidad medias, que según el Sistema USCS corresponde a un material tipo CH, con LL entre 62% y 65%, IP entre 30% y 35%, porcentaje de arcillas entre 61% y 63% y actividad moderada, con valores entre 0.52 y 0.57.
- La fracción arcillosa del suelo presenta una composición predominante de caolinita (55%) seguida de esmectita (17%) y menores proporciones de illita y clorita. Esta predominancia de la caolinita hace que la arcilla tenga una actividad moderada.

- La microestructura de la arcilla presenta arreglos de varios grupos de partículas que conforman unidades redondeadas o “paquetes” dispuestos en forma de cadenas y montículos mayores similares a los de la Figura 2.7b (Gens y Alonso, 1992). Entre los diferentes grupos de partículas quedan los vacíos o poros interagregados que son pequeños y discontinuos por lo cual la arcilla es poco permeable y poco susceptible de sufrir colapso. Los poros intraagregados son aún más pequeños y por lo tanto tienen poca contribución en la deformabilidad volumétrica de esta arcilla.
- Las curvas de retención de la arcilla se realizaron mediante diferentes técnicas complementarias como el psicrómetro de transistores, la imposición de succión por equilibrio de vapor, la placa de presión y el papel filtro. Los resultados más consistentes fueron los determinados mediante el psicrómetro de transistores, mientras que los de placa de presión y equilibrio de vapor mostraron tendencia a dar mayores valores de succión. Estas discrepancias probablemente se deban a insuficiente tiempo de estabilización de la succión en las muestras de placa de presión y equilibrio de vapor.
- Los parámetros de compresibilidad de la arcilla inalterada se determinaron mediante ensayos edométricos convencionales en condición saturada (EDO-SAT) y ensayos edométricos con control de succión. En estos últimos la succión se controló mediante dos técnicas: por transferencia de vapor (EDO-TRV) y por aplicación de succión osmótica con PEG 35.000 (EDO-PEG). La calibración de la succión aplicada mediante PEG 35.000 a diferentes concentraciones no estaba disponible en la literatura y por lo tanto hubo necesidad de realizarla en este estudio.
- La arcilla estudiada es sobreconsolidada ($RSC = 3$) y presenta características de compresibilidad moderadas ($C_c = 0.35$ y $C_r = 0.11$). Los ciclos de succión aplicados en los ensayos EDO-TRV y EDO-PEG produjeron incrementos de la tensión de preconsolidación tal como lo predice el modelo de Alonso et al (1990).
- Las deformaciones volumétricas presentaron relación no lineal con respecto a los incrementos de succión, por ejemplo en el ensayo EDO-TRV el primer incremento de succión de 39.5 MPa produjo una contracción volumétrica del 9% mientras que el segundo incremento que se llevó hasta 114.3 MPa sólo causó una contracción del 0.5% . En el ensayo EDO-PEG se observó un comportamiento similar donde la mayor contracción se produjo para una concentración de PEG de 20% mientras que para las demás concentraciones las deformaciones fueron bastante menores. Esto está asociado con el incremento de rigidez que adquiere el suelo al reducirse la humedad.
- La succión osmótica aplicada en la parte inferior de la muestra en el ensayo EDO-PEG difiere de la medida con el tensiómetro en la parte superior, particularmente para succiones inferiores a 400 kPa. Este comportamiento indica que para concentraciones de PEG 35.000 inferiores a 15% el método de imposición de succión osmótica resulta poco eficiente pero para succiones mayores el método es satisfactorio.
- Los ensayos de resistencia a la compresión simple realizados sobre muestras compactadas estáticamente a diferentes humedades mostraron que a pesar de la dispersión de resultados, la resistencia tiende a disminuir con el incremento de

humedad y que la relación entre las dos variables se puede ajustar a una curva de tipo exponencial.

- El ángulo de fricción interna (ϕ') determinado mediante ensayos triaxiales de compresión resultó similar al que se obtuvo en ensayos triaxiales de extensión (ϕ' comp. = 27.7° y ϕ' ext. = 26.6°). En ambos casos se trabajó con muestras reconstituidas que se consolidaron a diferentes tensiones efectivas iniciales. El valor de ϕ' también se determinó mediante un ensayo de corte directo residual sobre una muestra previamente cortada y en este caso el valor se redujo a ϕ' res. = 18° . Estos valores de resistencia al corte se emplearán posteriormente para compararlos con los de resistencia a la tracción.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Intervalo
Humedad natural	ω_n	%	42 - 46
Límite líquido	LL	%	62 - 65
Límite plástico	LP	%	28 - 32
Índice de plasticidad	IP	%	30 - 35
Gravedad específica	Gs	-----	2,6 - 2,7
Peso unitario natural	γ_t	kN/m ³	16,5 - 18,0
Índice de poros	e	m ³ /m ³	1,25 - 1,27
Grado de saturación	S _r	%	96 - 100
Fracción Arcilla (<0,002 mm)	C	%	61 - 63
Actividad	A	-----	0,52 - 0,57
Resistencia no drenada	S _u	kPa	55 - 65

Tabla 2.1 Parámetros básicos de la arcilla entre 2 y 4 m de profundidad

Composición Global	Arcillas	75%
	Feldespatos	3%
	cuarzo	22%
	Total	100%
Composición Fracción Arcillosa	Caolinita	55%
	Esmectita	17%
	Illita	15%
	Clorita	13%
	Total	100%

Tabla 2.2 Composición mineralógica aproximada de la arcilla de Bogotá a partir de análisis de difracción de rayos X (deducido de Gaviria et al, 2004).

Equipo	Succión	Fenómeno medido	Rango (MPa)	Tiempo Equilibrado
Psicrómetro de Transistor SMI	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0,3 - 25 70 equipos mejorados	Minutos
Psicrómetro de termopartes WESCOR	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0,3 - 7	Minutos
Higrómetro capacidad/resistivo	Total	Humedad relativa (diferencia Temp.)	10 - 400	Minutos
Papel de filtro	Total (sin contacto) Matricial (contac.)	Contenido de humedad	0,4 - 40	min. 7 días
Placa de succión	Matricial	Tracción de agua	0 - 0,08	horas/días
Placa de presión con membrana acetato	Matricial	Traslación de ejes	0-7	días/semanas
Tensiómetro	Matricial	Tracción de agua	0 - 0,08	Minutos
Tensiómetro Imperial College	Matricial total (sin contacto)	Tracción de agua	0 - 2,1	Minutos
Celulosa porosa (Bloque de yeso, fibra de vidrio)	Matricial	Resistencia eléctrica	0 - 1,5	días/semanas
Conductividad Térmica	Matricial	Conductividad térmica	0 - 1,5	días/semanas
Sensor TDR con cerámica (también se usa s/cerámica)	Matricial	Constante dieléctrica	0 - 0,3 (60% porosidad de cerámica)	horas/días
Técnica de Squeezing	Osmótica	Conductividad eléctrica	0 - 3	horas/días

Tabla 2.3 Resumen de técnicas y equipos para medición de succión (Gens y Romero, 2000).

molalidad	fra molar	actividad	succión(Mpa)	gr NaCl/1000 gr H2O
0.2	0.996	0.994	0.862	11.7
0.4	0.993	0.987	1.742	23.4
0.6	0.989	0.981	2.641	35.1
1.0	0.982	0.967	4.495	58.4
1.5	0.974	0.950	6.921	87.7
2.0	0.965	0.932	9.475	116.9
2.5	0.957	0.914	12.162	146.1
3.0	0.949	0.895	14.989	175.3
3.5	0.941	0.874	18.127	204.6
4.0	0.933	0.853	21.477	233.8
4.5	0.925	0.831	25.053	263.0
5.0	0.917	0.808	28.872	292.2
5.5	0.910	0.784	32.952	321.4
6.0	0.902	0.759	37.313	350.7
6.5	0.895	0.733	41.980	379.9
7.0	0.888	0.706	46.981	409.1

Tabla 2.4 Succiones impuestas por soluciones de NaCl a diferentes concentraciones.

Solución saturada	Succión (Mpa)
CuSO ₄ .5H ₂ O	1,6
ZnSO ₄ .7H ₂ O	12,6
KCl	22,4
NaCl	33,1
NaNO ₂	60,3
CaCl ₂ .6H ₂ O	158,5
H ₂ SO ₄	398,1

Tabla 2.5 Succiones asociadas a diversas soluciones salinas saturadas (Vicol, 1990, en: Lloret, 1993).

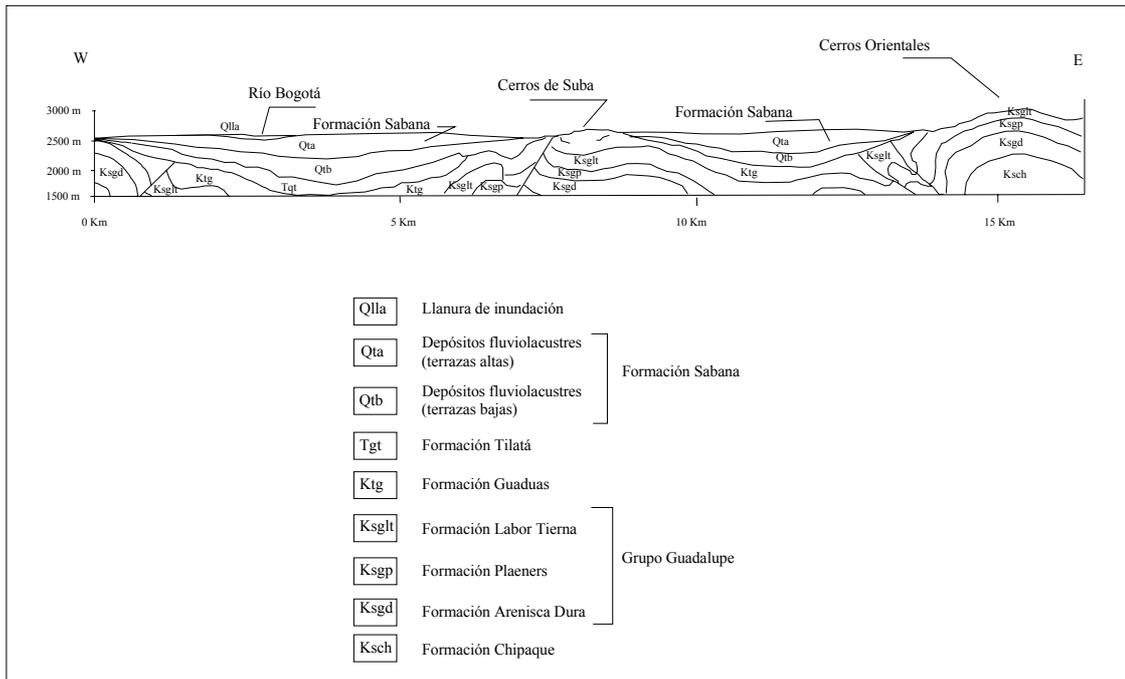


Figura 2.1 Corte geológico generalizado de la Sabana de Bogotá, en sentido E-W. (Adaptado de Ingeominas y Universidad de Los Andes, 1997).

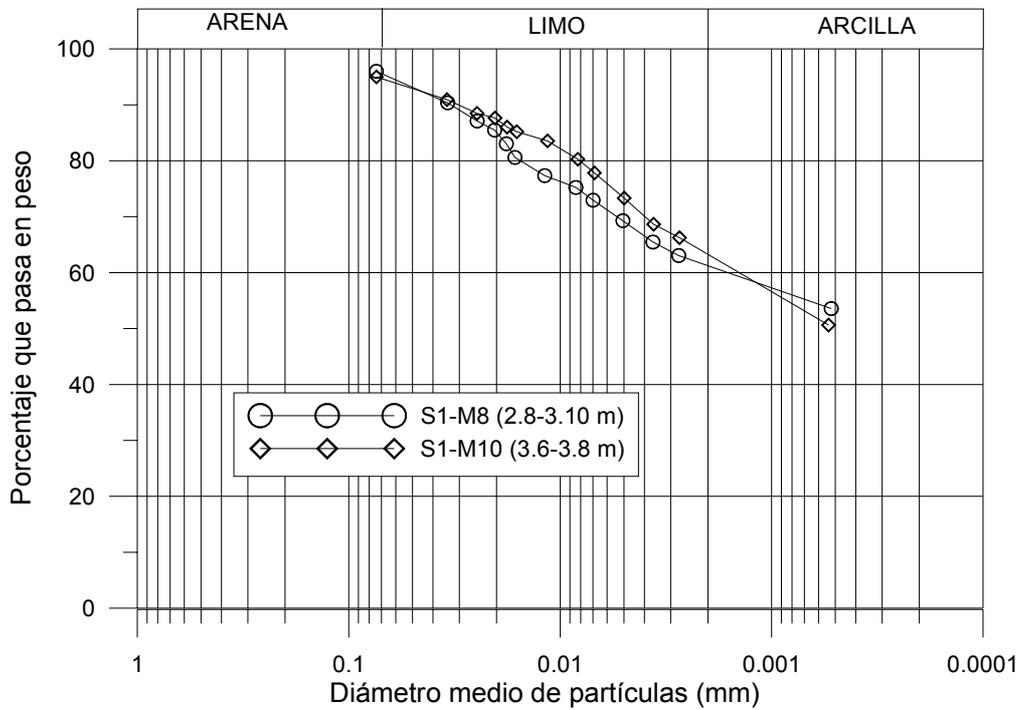


Figura 2.2 Distribución de tamaños de partículas.

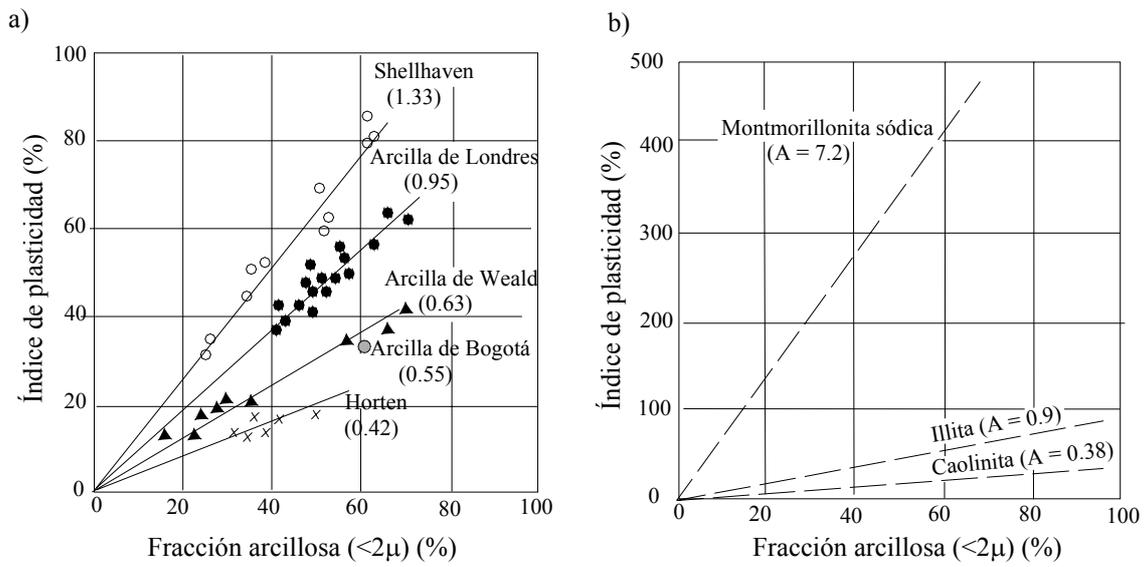


Figura 2.3 Relación entre índice de plasticidad y fracción arcillosa (Skempton, 1953, en: Lambe y Whitman, 1979).

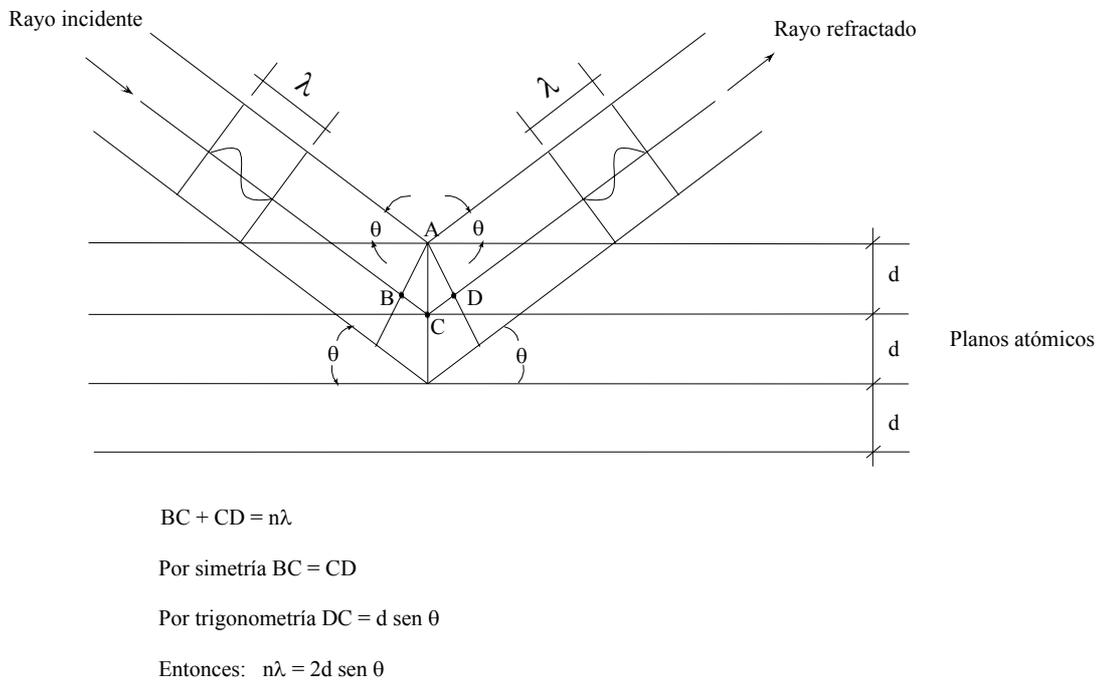


Figura 2.4 Ley de Bragg (Mitchell, 1993).

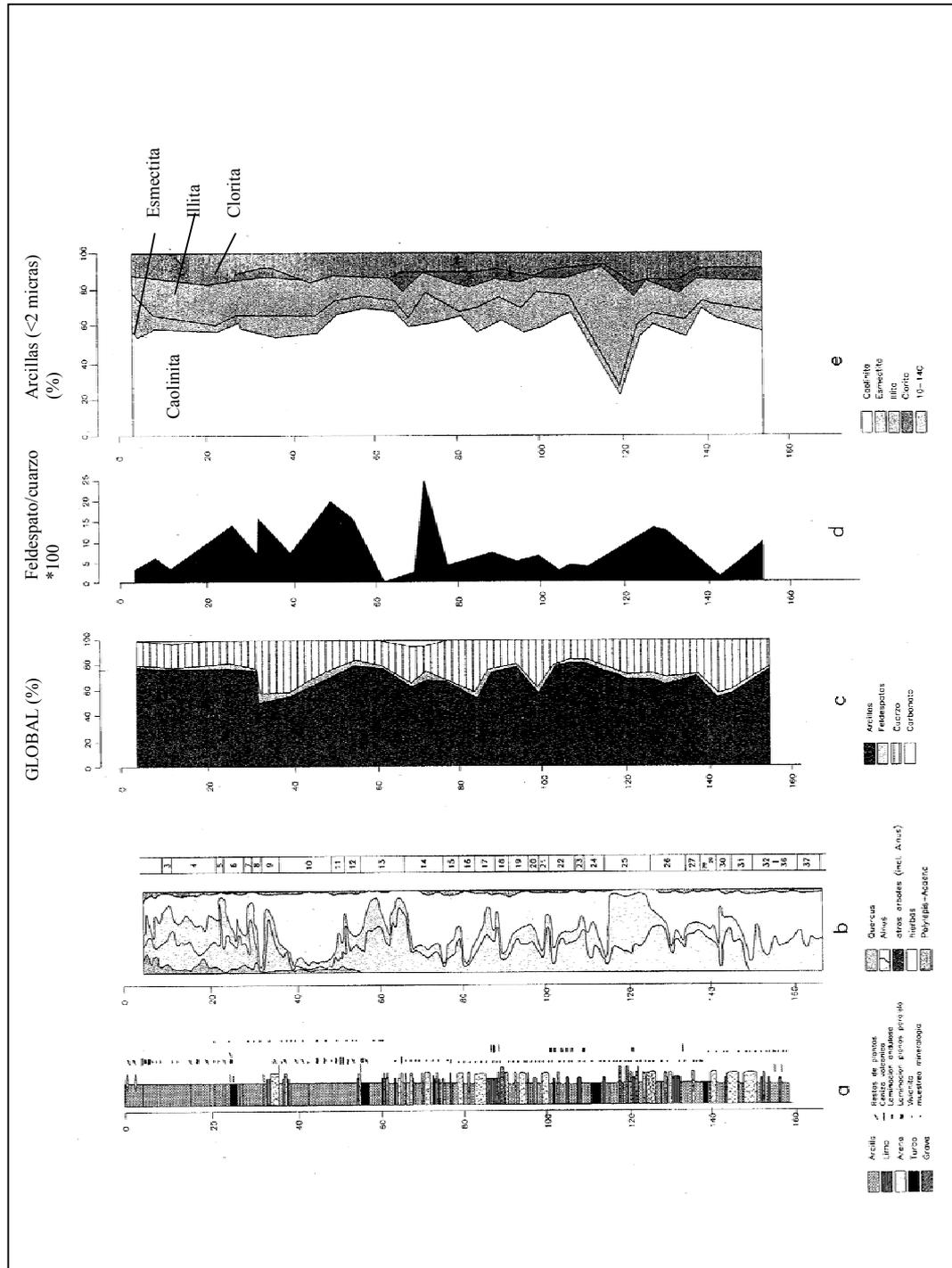


Figura 2.5 Perfiles mineralógicos de la arcilla de Bogotá. Pozo Ingeominas entre 0 y 160 m. (Gaviria et al, 2004).

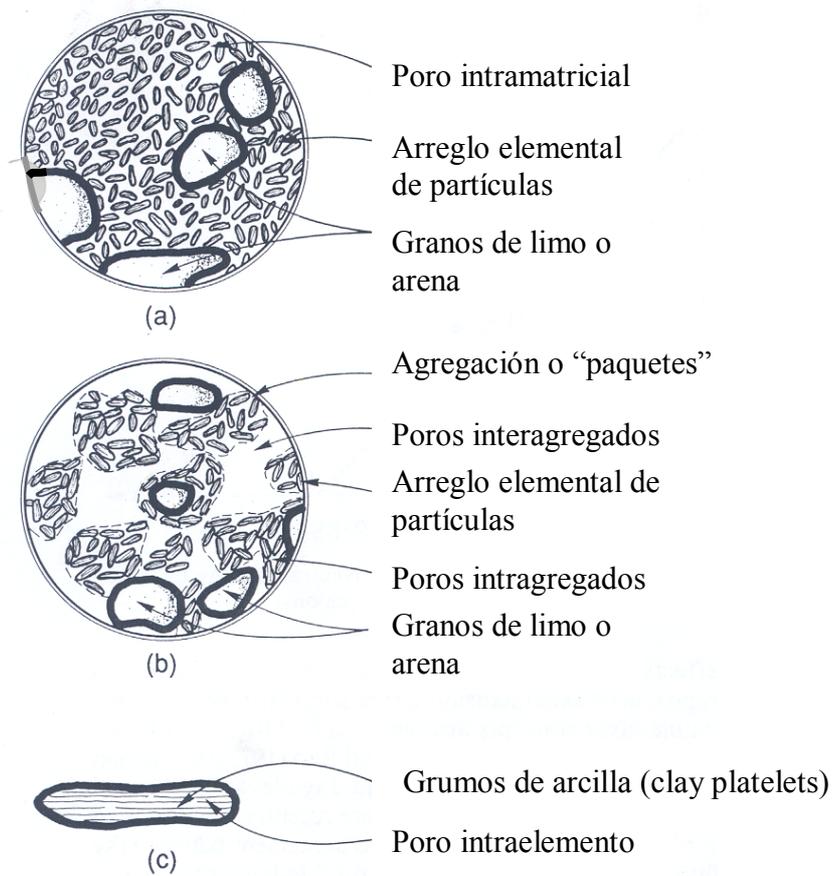


Figura 2.6 Tipos de fábrica (Gens y Alonso, 1992). (a) Matriz arcillosa, constituida predominantemente por arreglos elementales de grumos de arcilla (clay platelets). (b) Microfábrica de una arcilla, constituida predominantemente por agrupación de arreglos elementales de partículas. (c) Arreglo elemental de partículas en una configuración paralela.

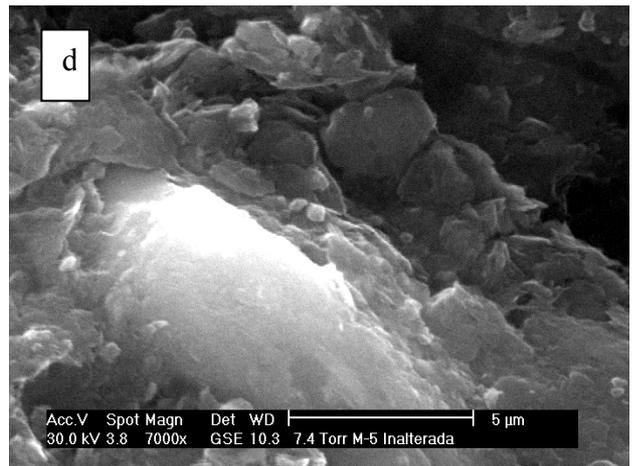
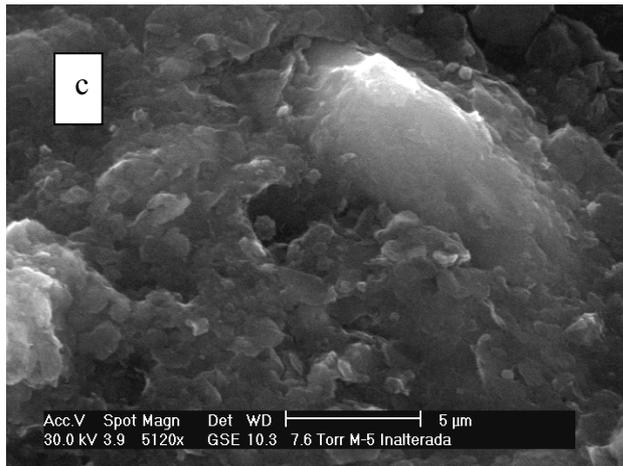
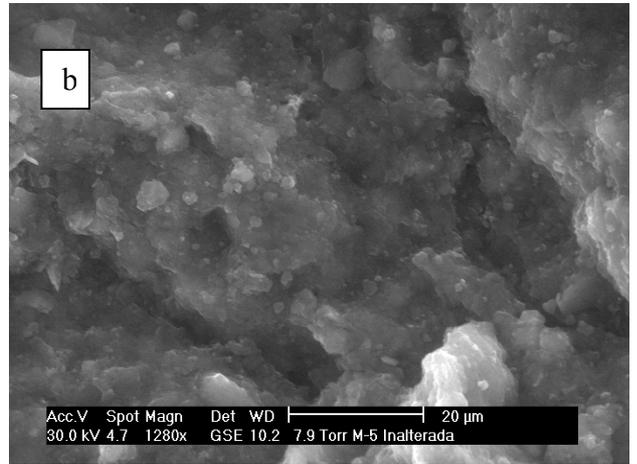
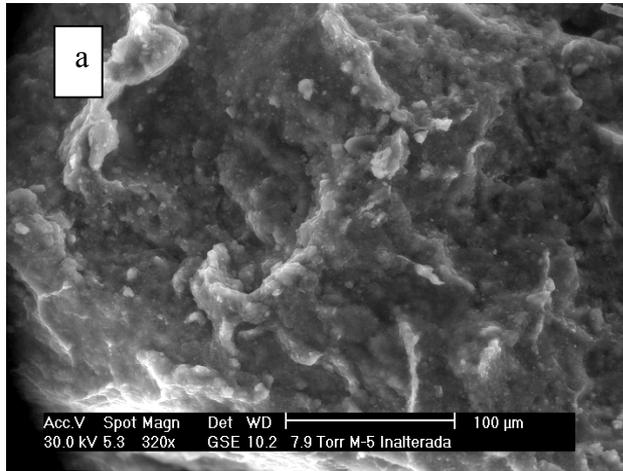


Figura 2.7 Fotografías de la microfábrica de la arcilla inalterada (muestra tomada a 2.2 m de profundidad).

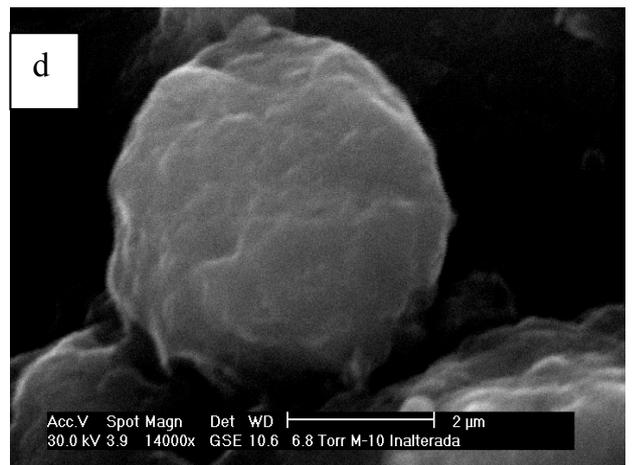
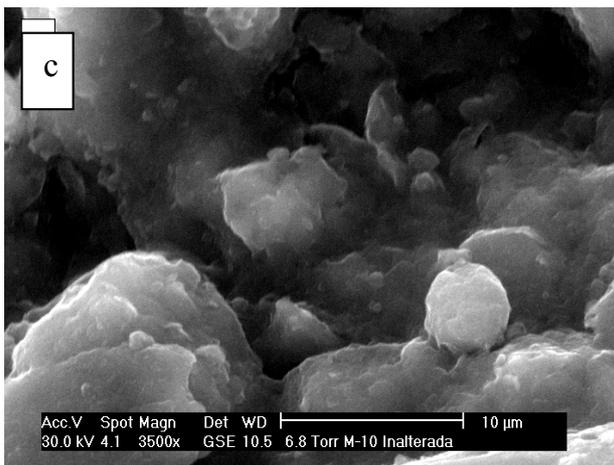
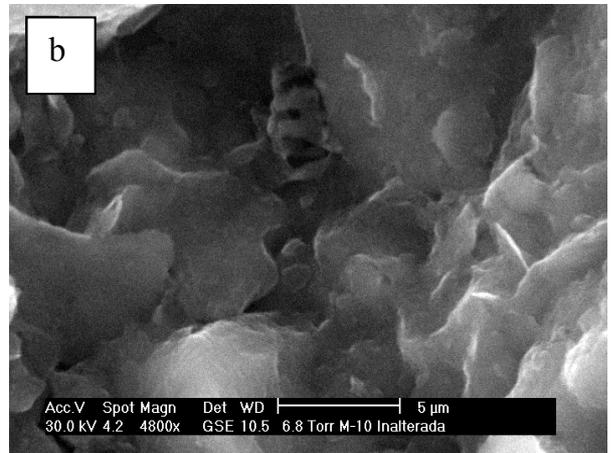


Figura 2.8 Fotografías de la microfábrica de la arcilla inalterada (muestra tomada a 4m de profundidad).

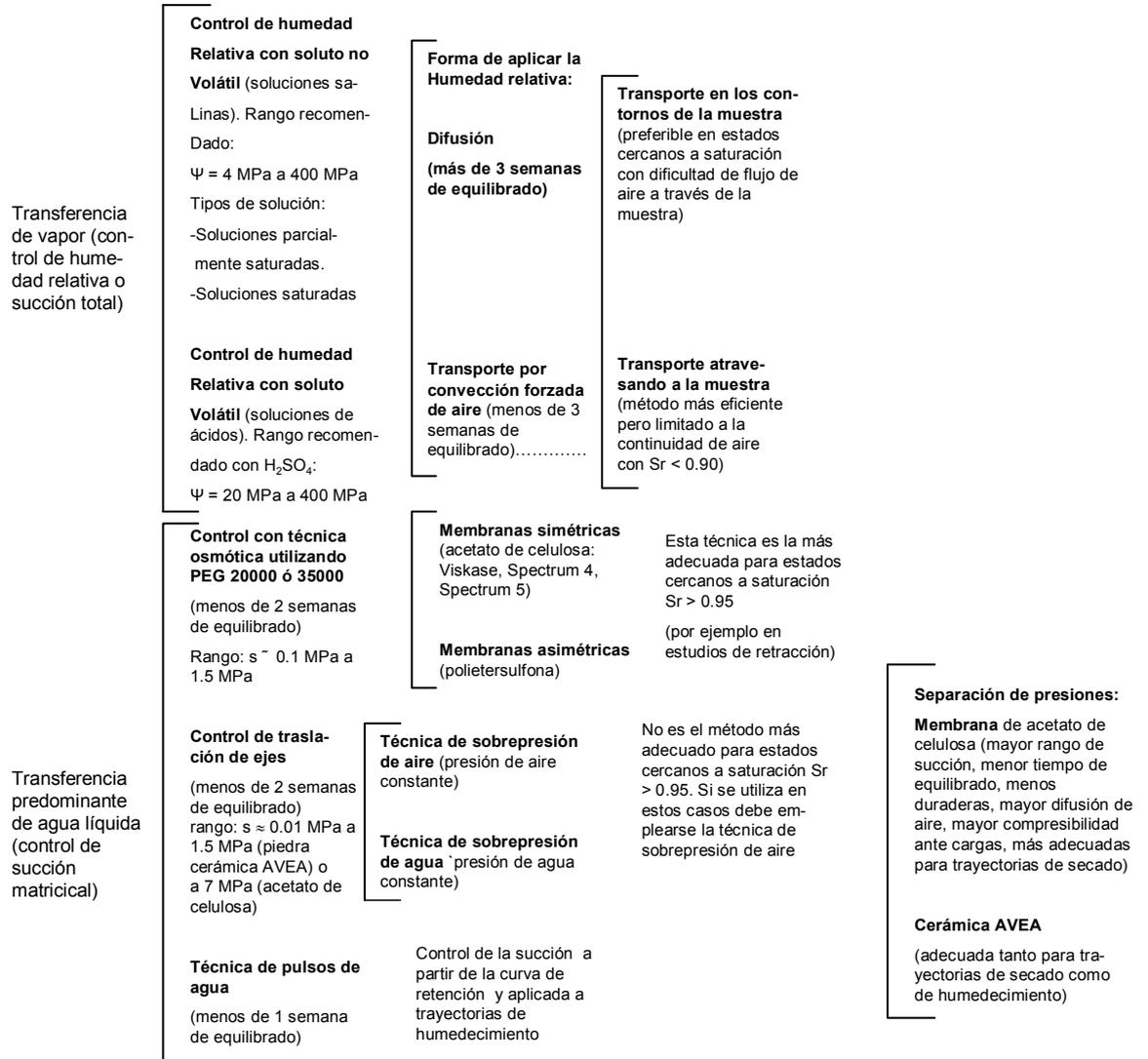


Figura 2.9 Técnicas experimentales de aplicación de succión, rangos típicos de succión aplicada y tiempos de equilibrado aproximados para suelos arcillosos con distancia de drenaje de 10 mm (Gens y Romero, 2000).

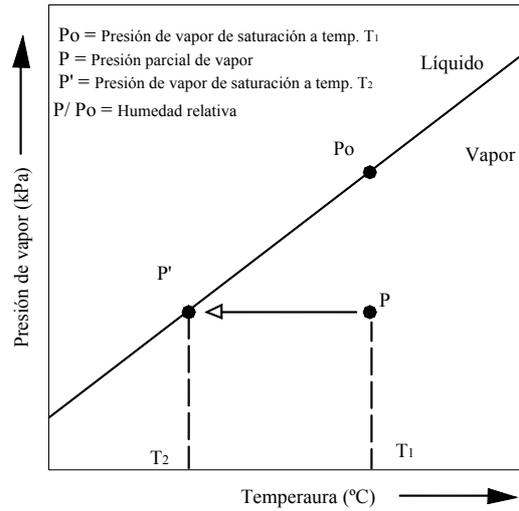


Figura 2.10 Principio de funcionamiento del psicrómetro.

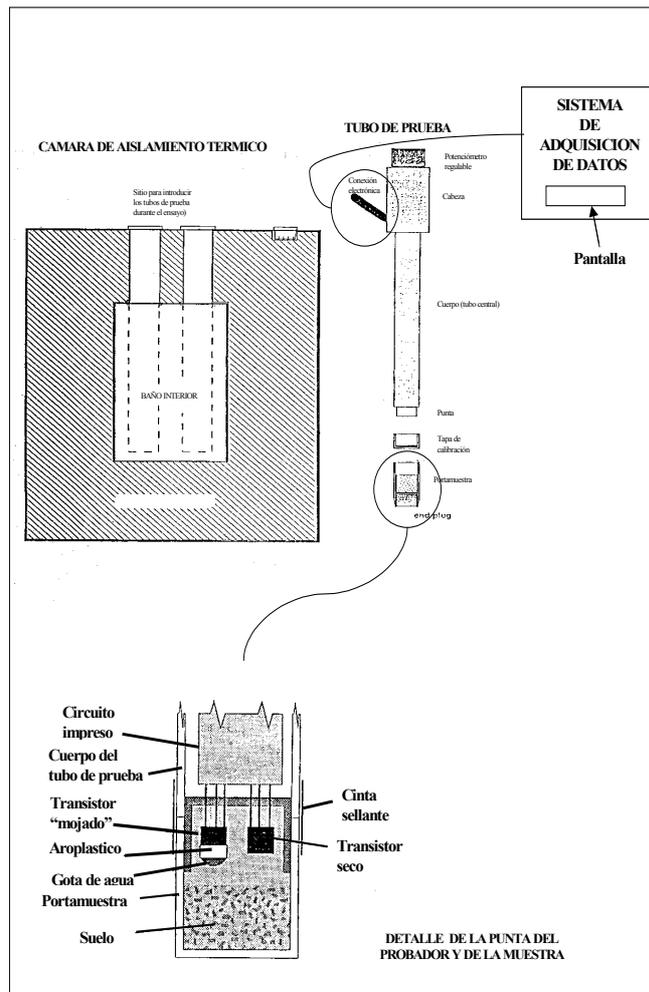


Figura 2.11 Esquema del Psicrómetro de transistores de marca SMI.

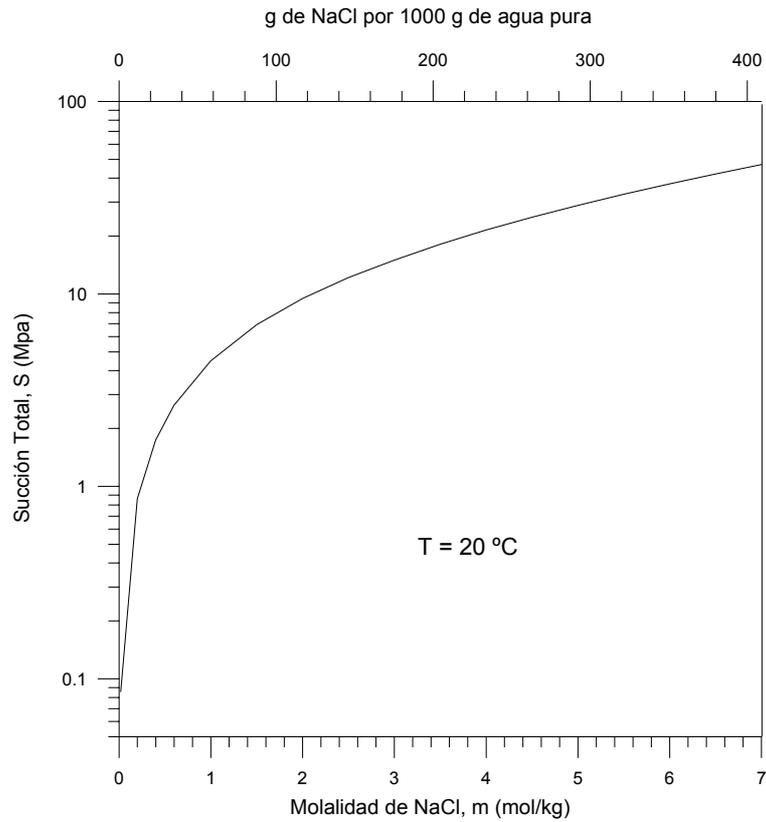


Figura 2.12 Succión total impuesta al suelo con diferentes concentraciones de cloruro de sodio (Romero, 1999).

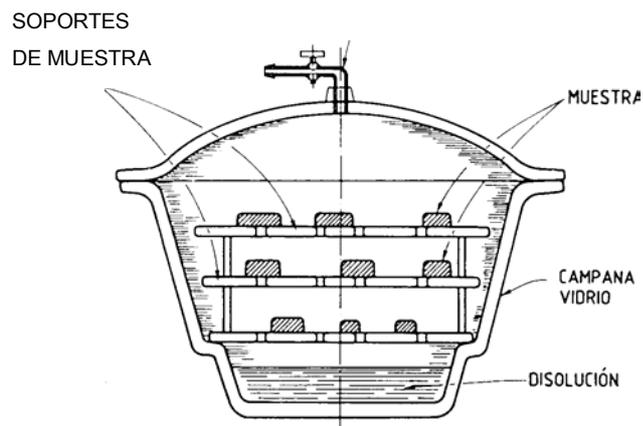


Figura 2.13 Campana de desecación para aplicar succión por equilibrio de vapor (Esteban, 1990; en Lloret, 1993).

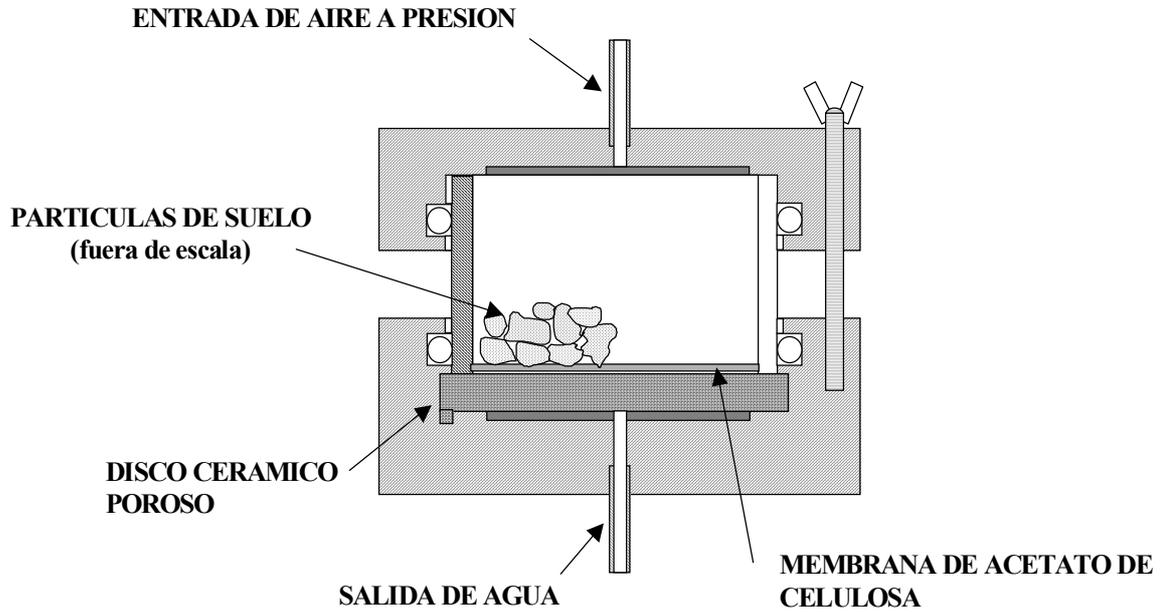


Figura 2.14 Esquema del equipo de placa de presión (Lloret, 1993).

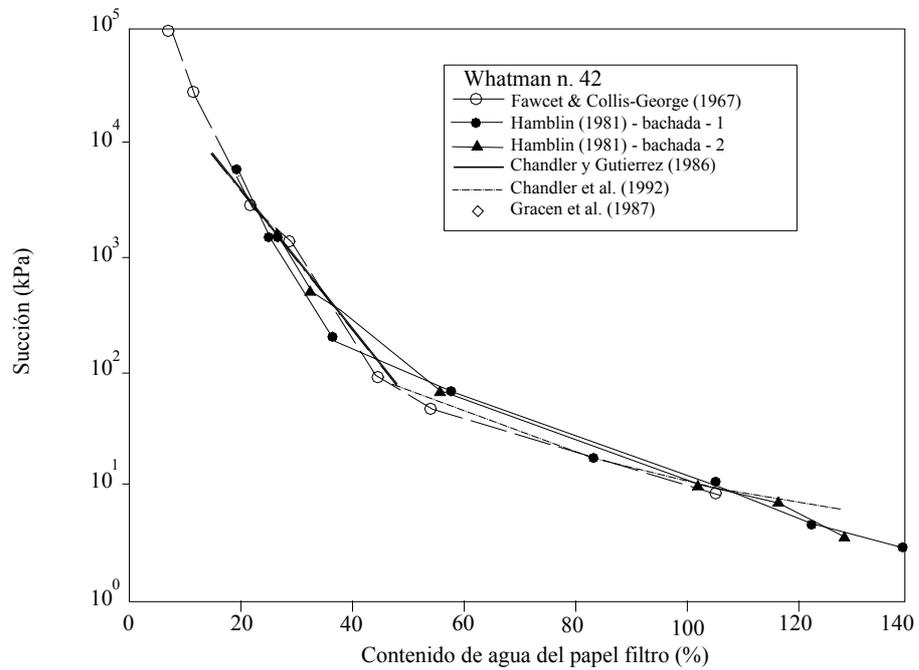


Figura 2.15 Curvas de calibración del papel filtro Whatman No 42 (Marinho, 1994).

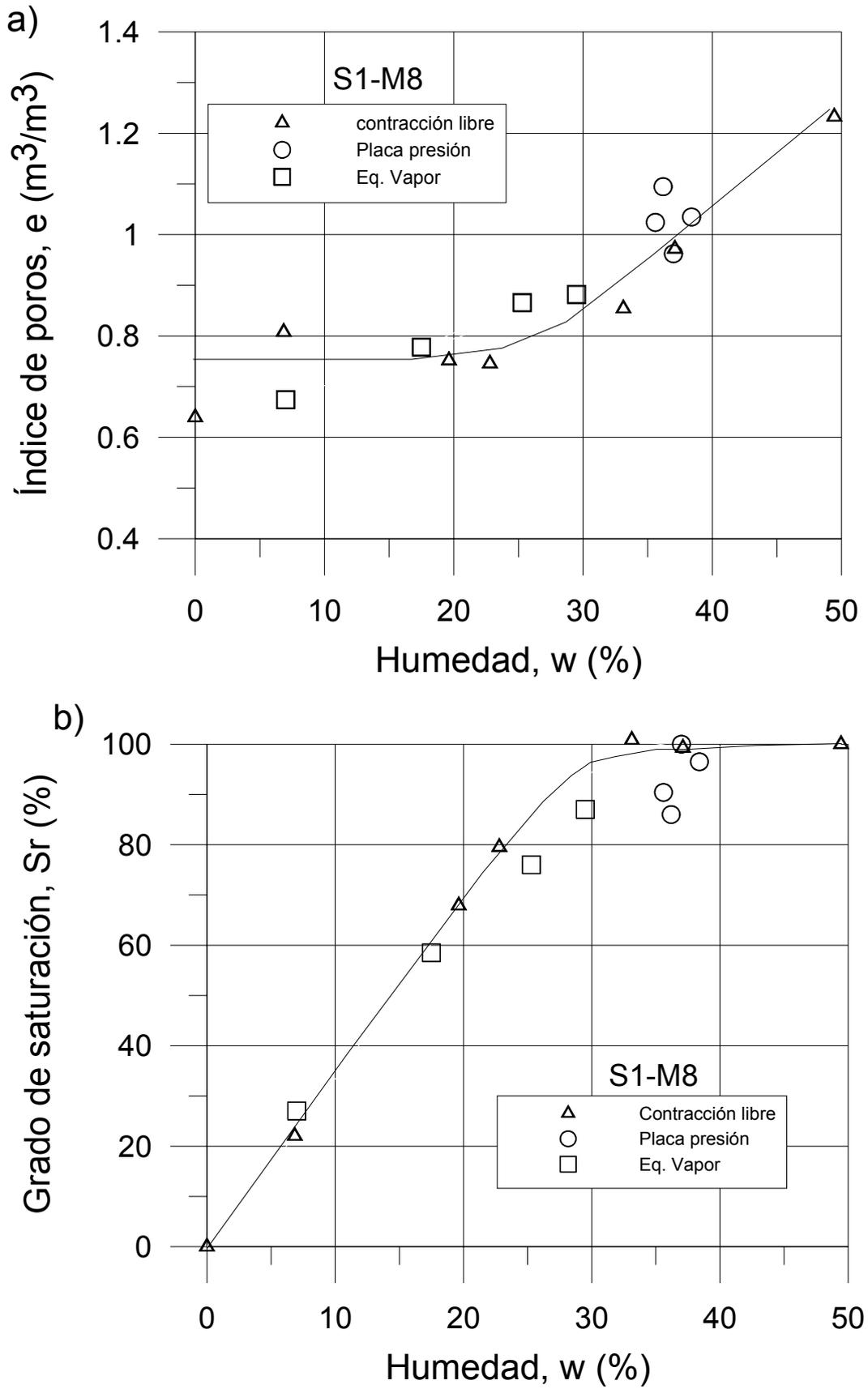


Figura 2.16 Retracción de la muestra S1-M8 por reducción de humedad: a) variación del índice de poros b) variación del grado de saturación.

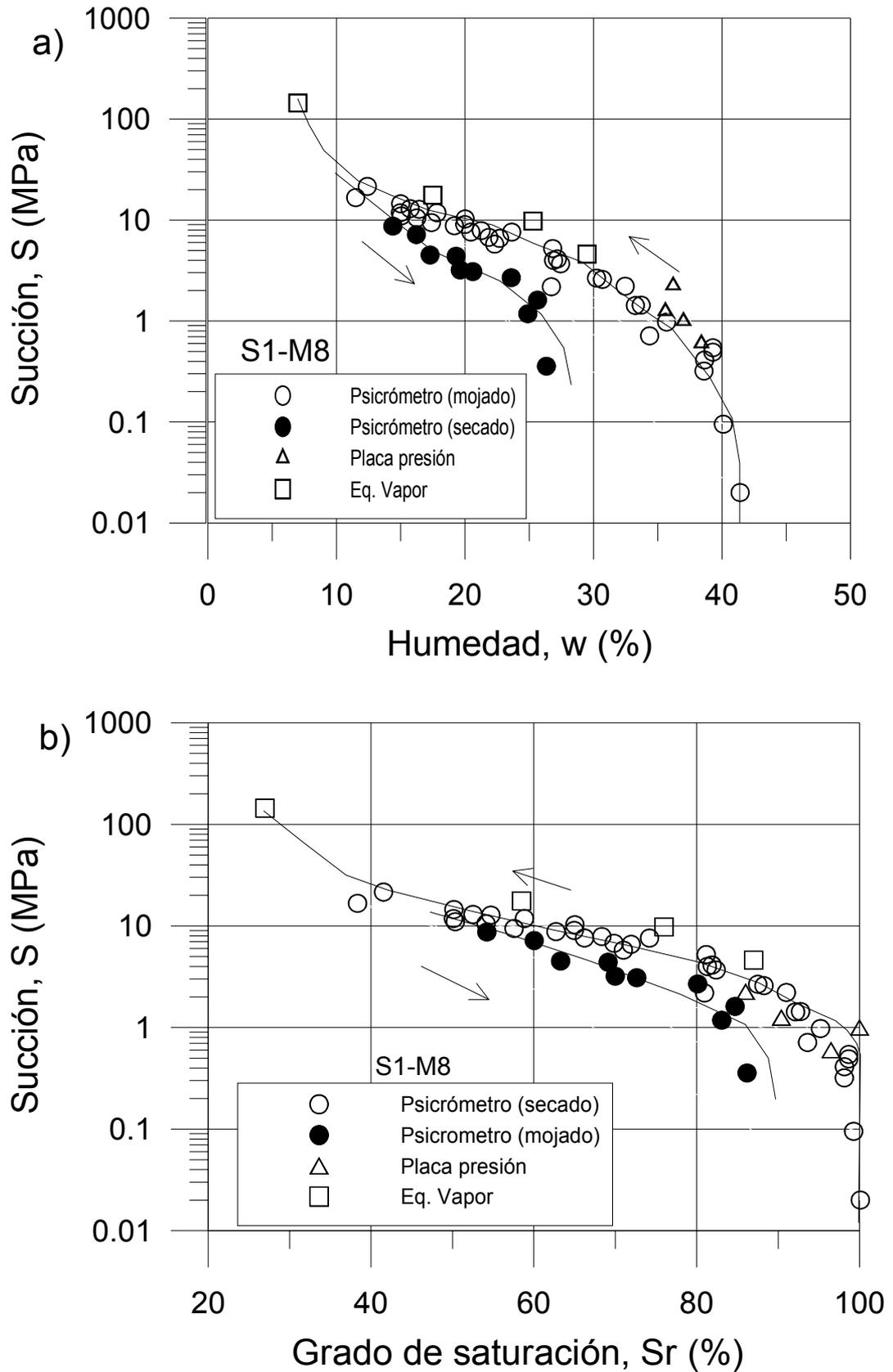


Figura 2.17 Curva de de retención de la muestra S1-M8: a) en términos de la variación de humedad b) en términos de la variación del grado de saturación.

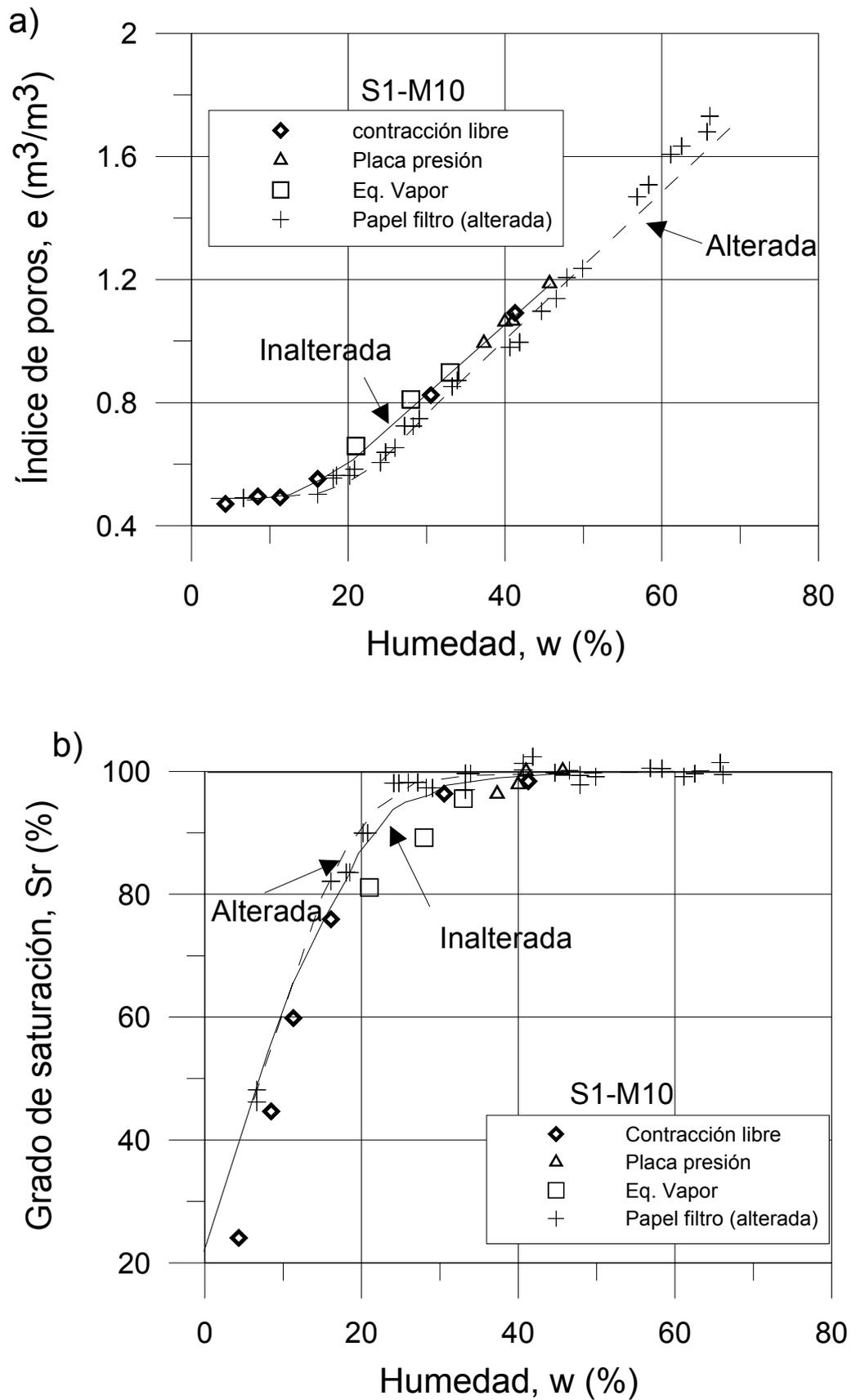


Figura 2.18 Retracción de la muestra S1-M10 por reducción de humedad para condiciones inalterada y alterada: a) variación del índice de poros b) variación del grado de saturación.

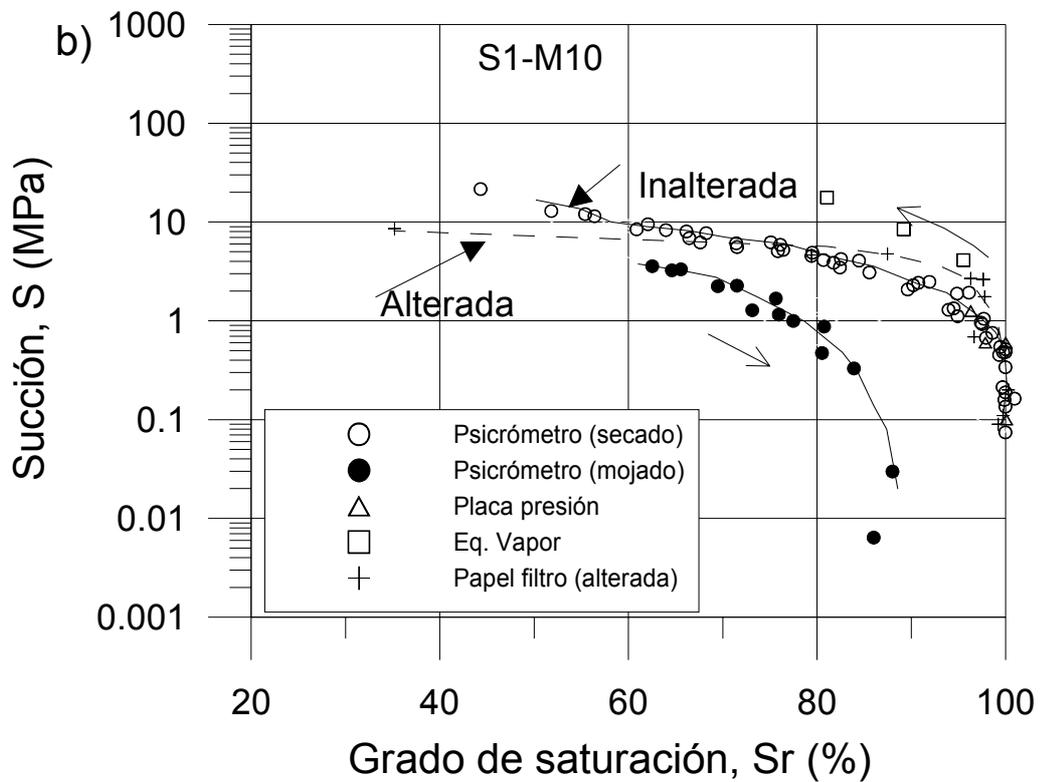
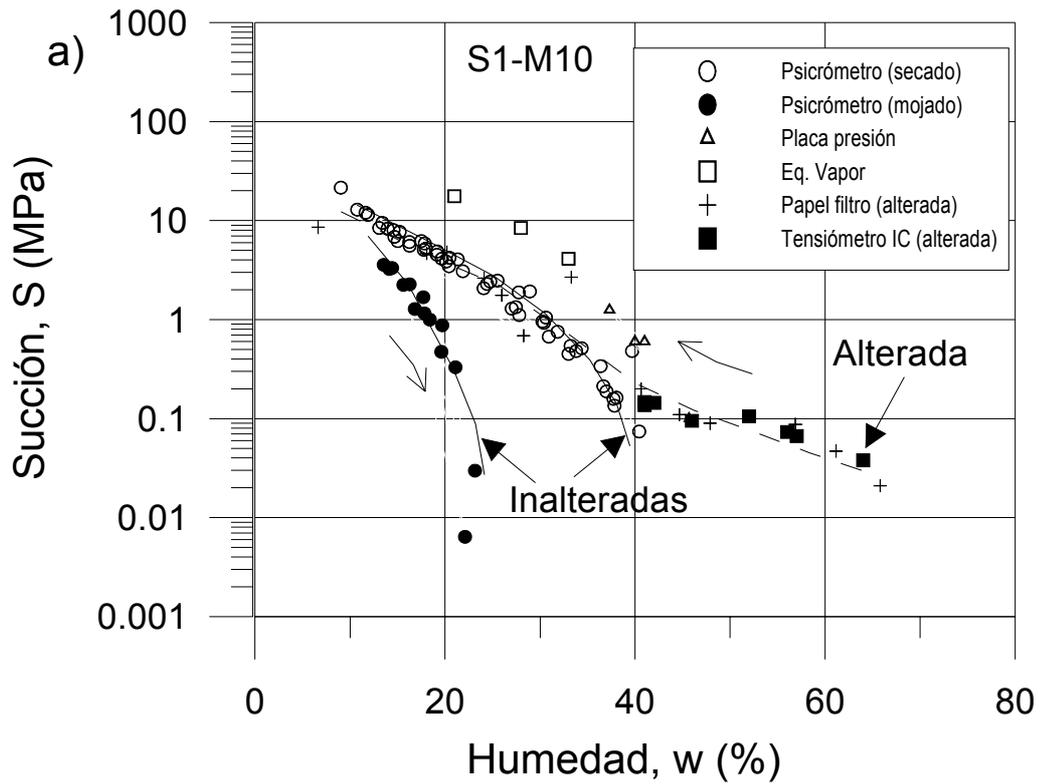


Figura 2.19 Curva de de retención de la muestra S1-M10 para condiciones inalterada y alterada: a) en términos de la variación de humedad b) en términos de la variación del grado de saturación.

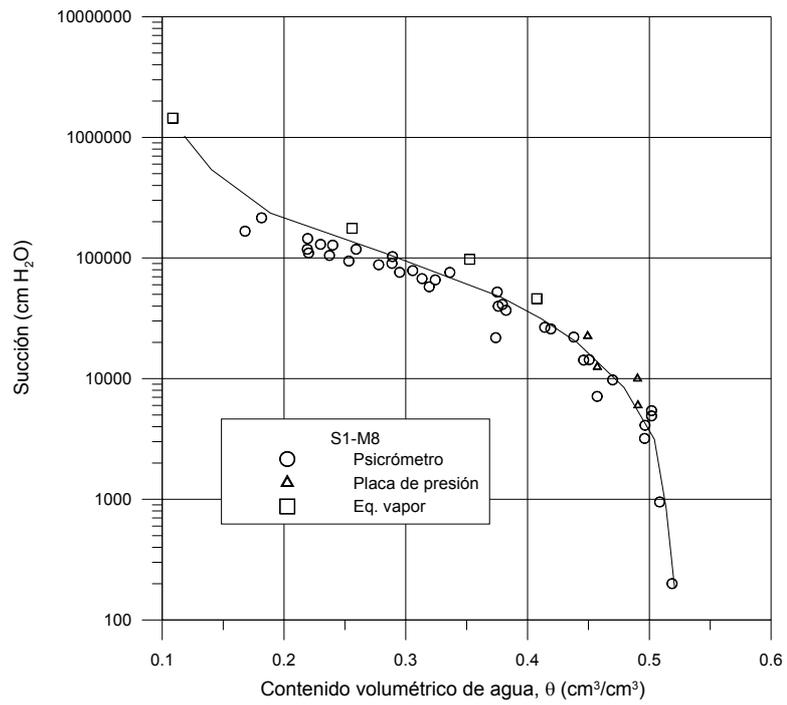


Figura 2.20 Curva de retención S1-M8 en términos del contenido volumétrico de agua.

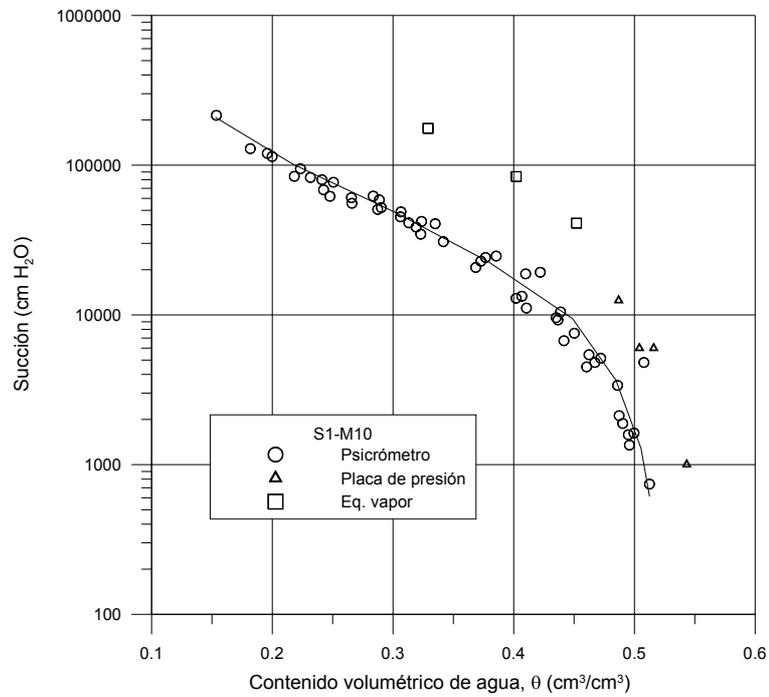


Figura 2.21 Curva de retención S1-M10 en términos del contenido volumétrico de agua.

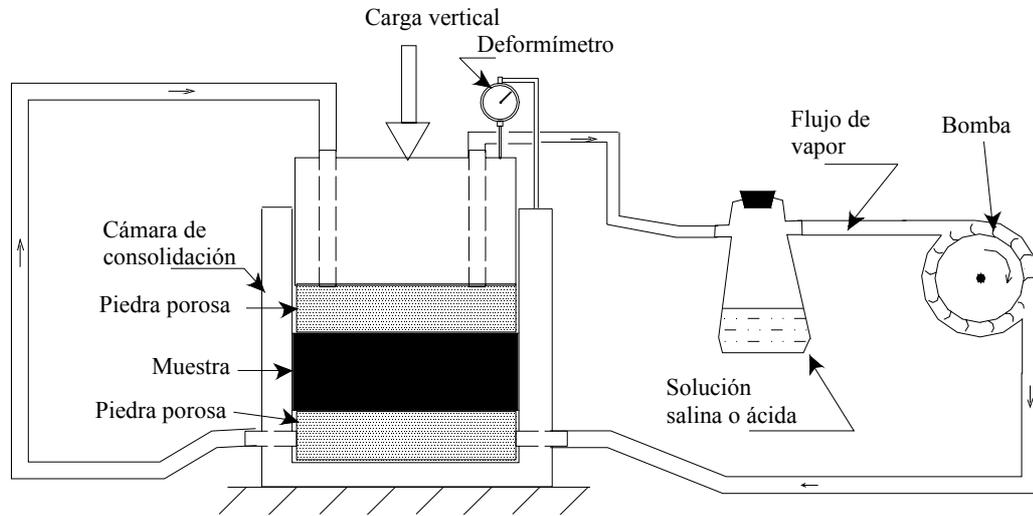


Figura 2.22 Esquema del edómetro con succión controlada por transferencia de vapor.

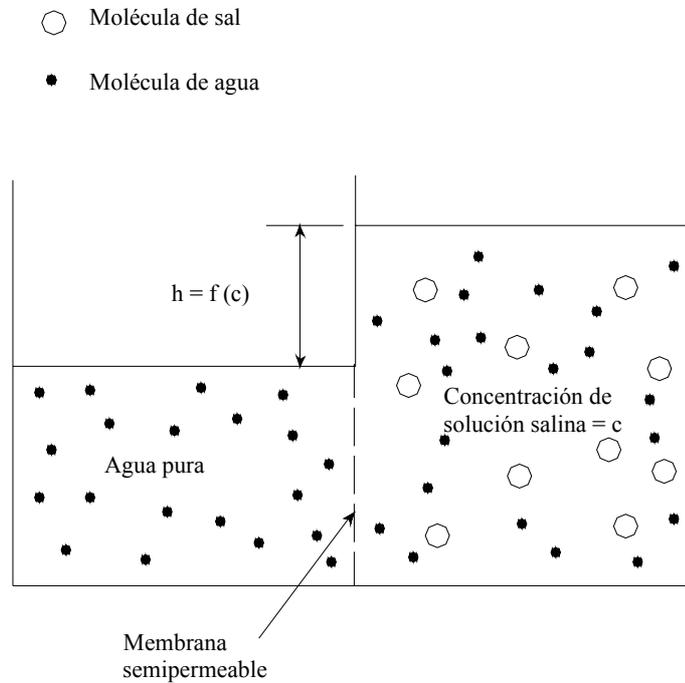


Figura 2.23 Esquema para mostrar el principio de ósmosis (Dineen, 1997).

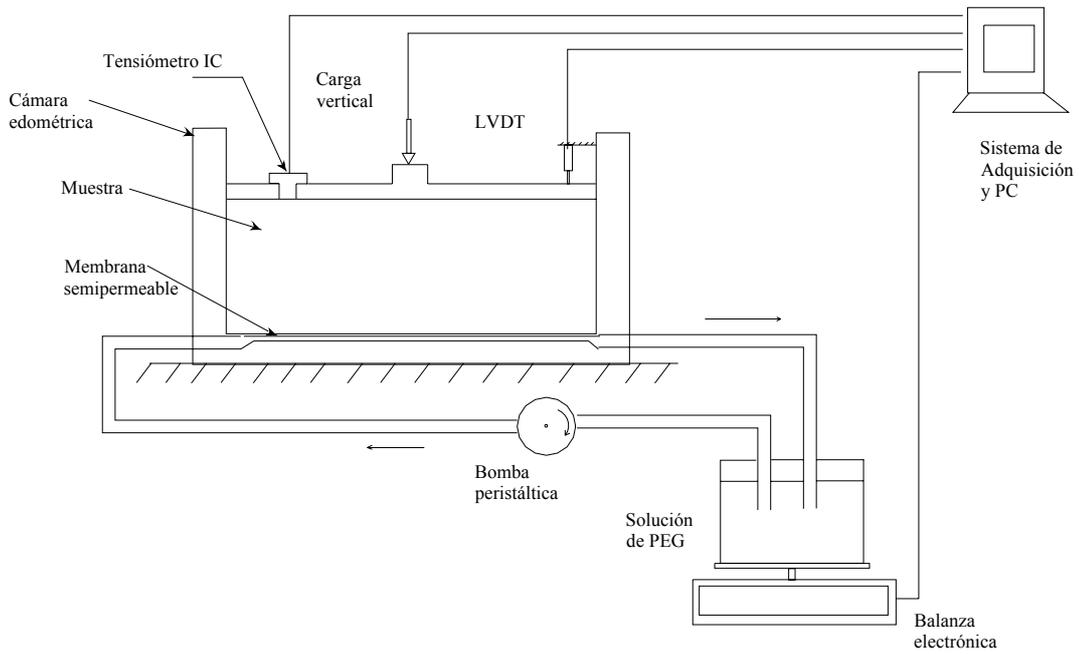


Figura 2.24 Esquema del edómetro con succión controlada por PEG.

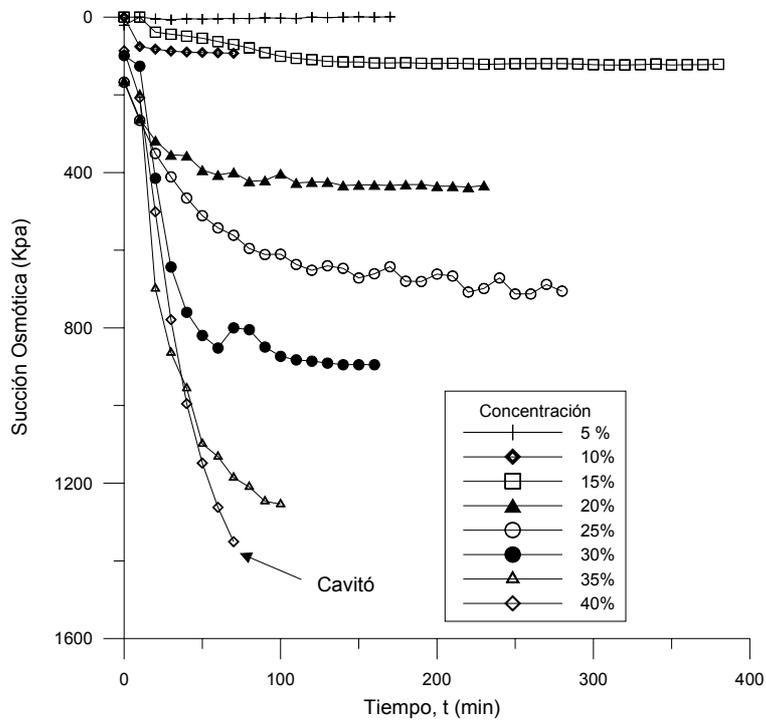


Figura 2.25 Variación de la succión medida en el tiempo para diferentes concentraciones de PEG 35.000.

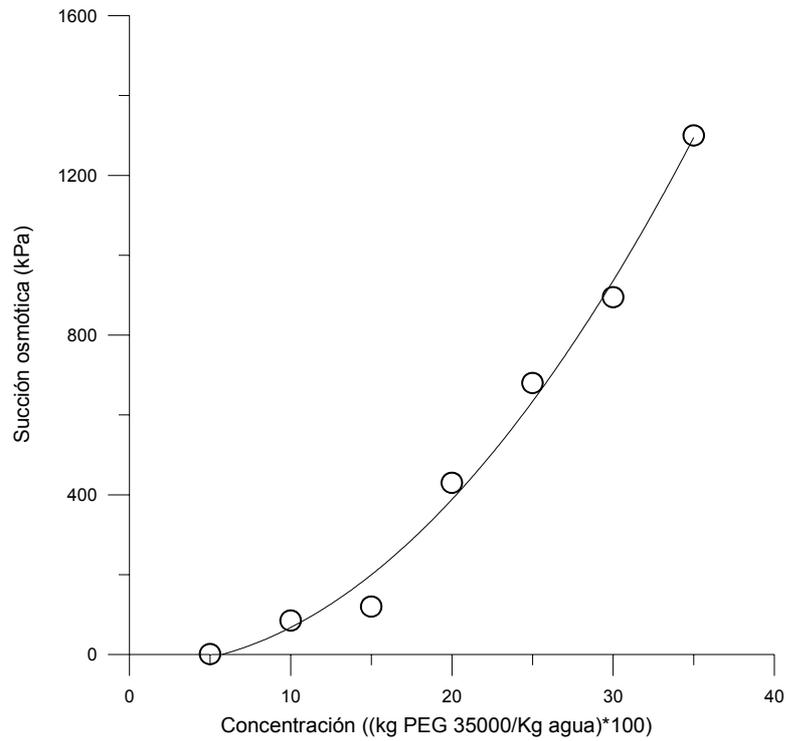


Figura 2.26 Curva de calibración de PEG 350.000 con tensiómetro IC y membrana Spectrum por 5.

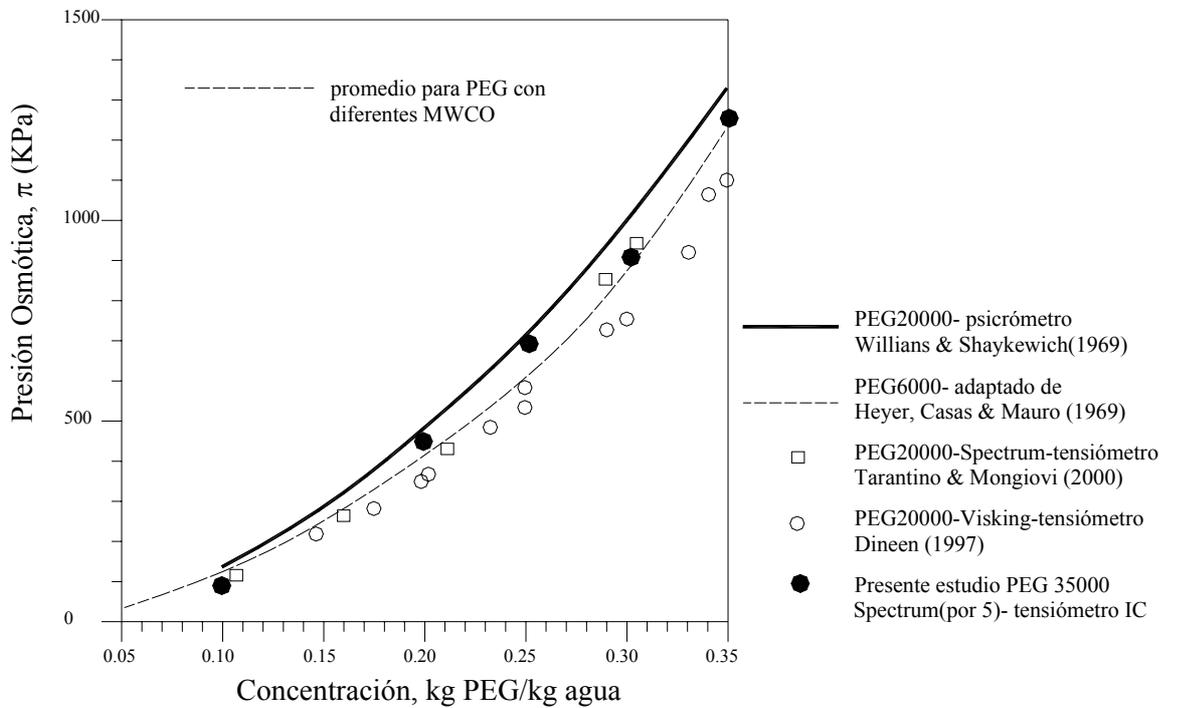


Figura 2.27 Comparación de la calibración de PEG 35.000 con otras calibraciones (Gens y Romero, 2000).

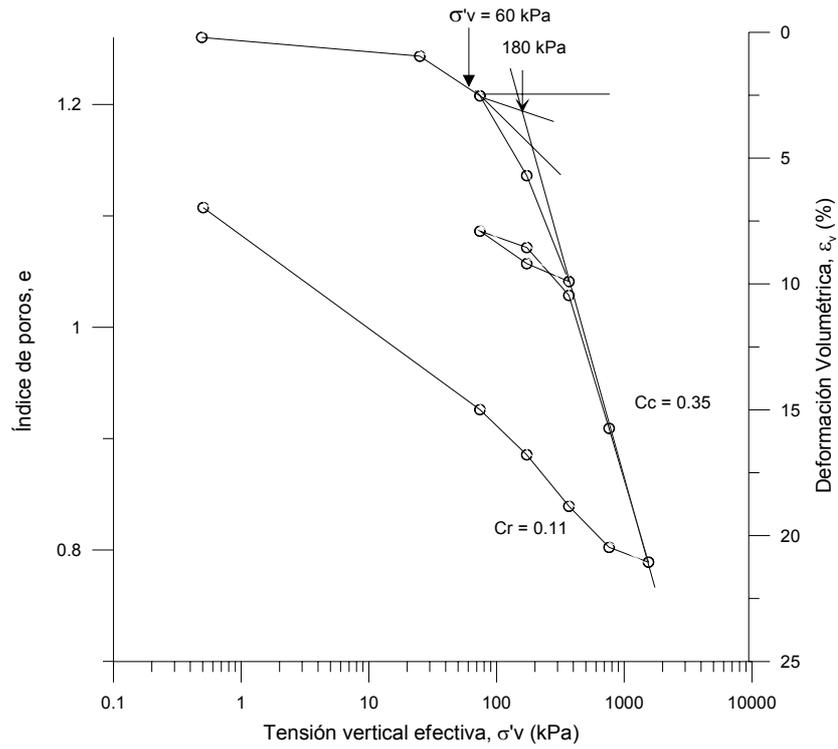


Figura 2.28 Curva de compresibilidad obtenida de ensayo edométrico convencional EDO-SAT.

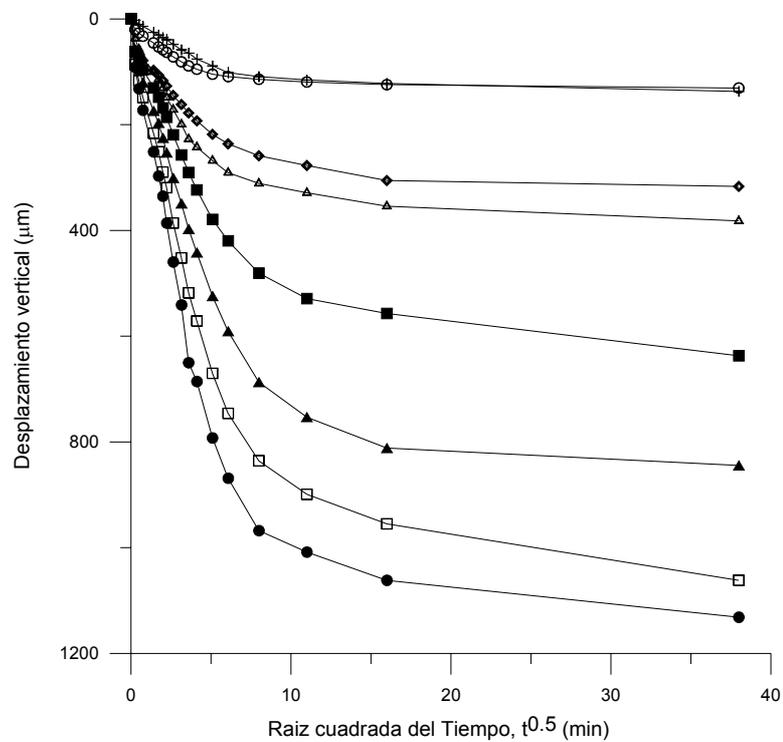


Figura 2.29 Deformación de la muestra en función de la raíz cuadrada del tiempo, para diferentes incrementos de carga, ensayo EDO-SAT.

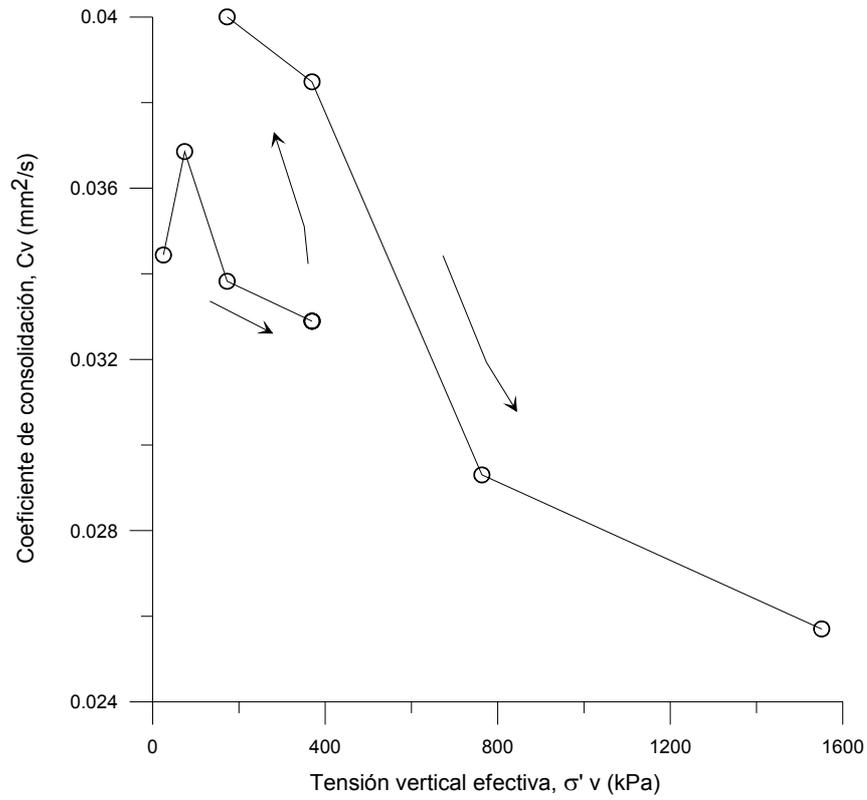


Figura 2.30 Coeficiente de consolidación a diferentes valores de tensión vertical, ensayo EDO-SAT.

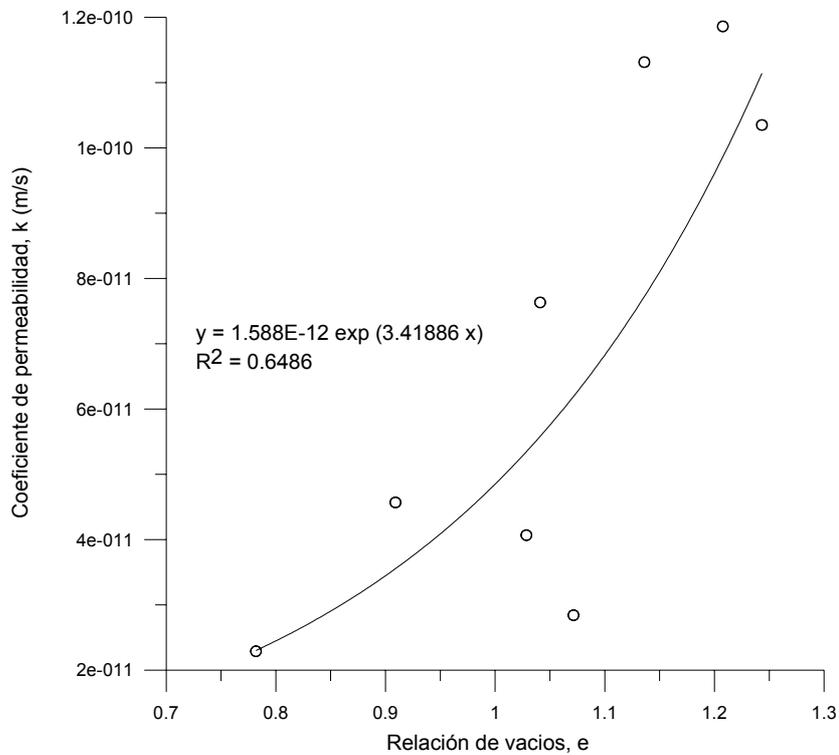


Figura 2.31 Variación del coeficiente de permeabilidad con el índice de poros, ensayo EDO-SAT.

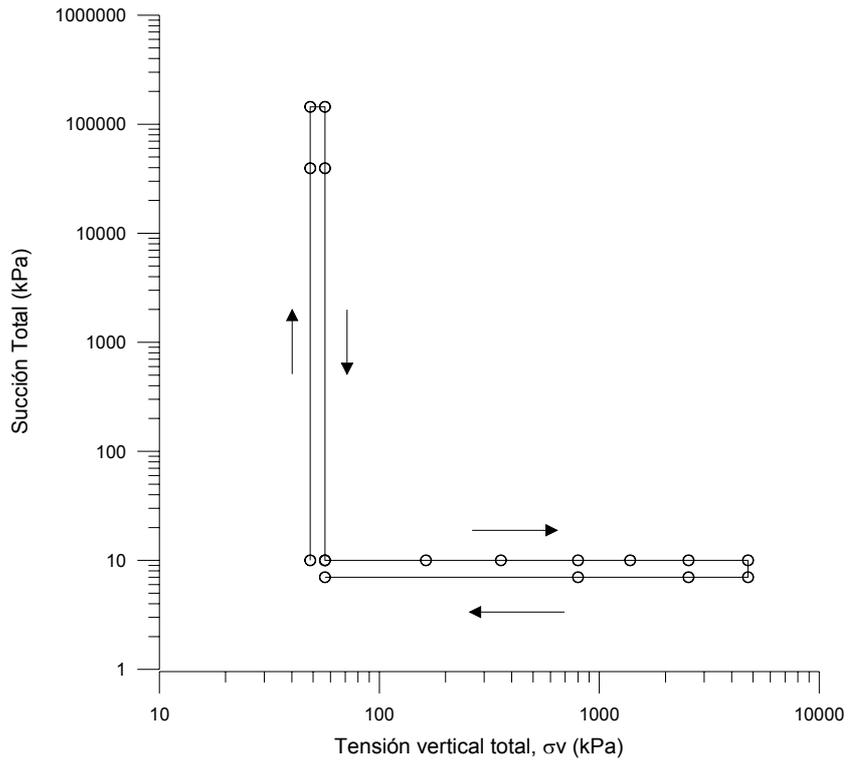


Figura 2.32 Trayectoria de tensiones del ensayo EDO-TRV.

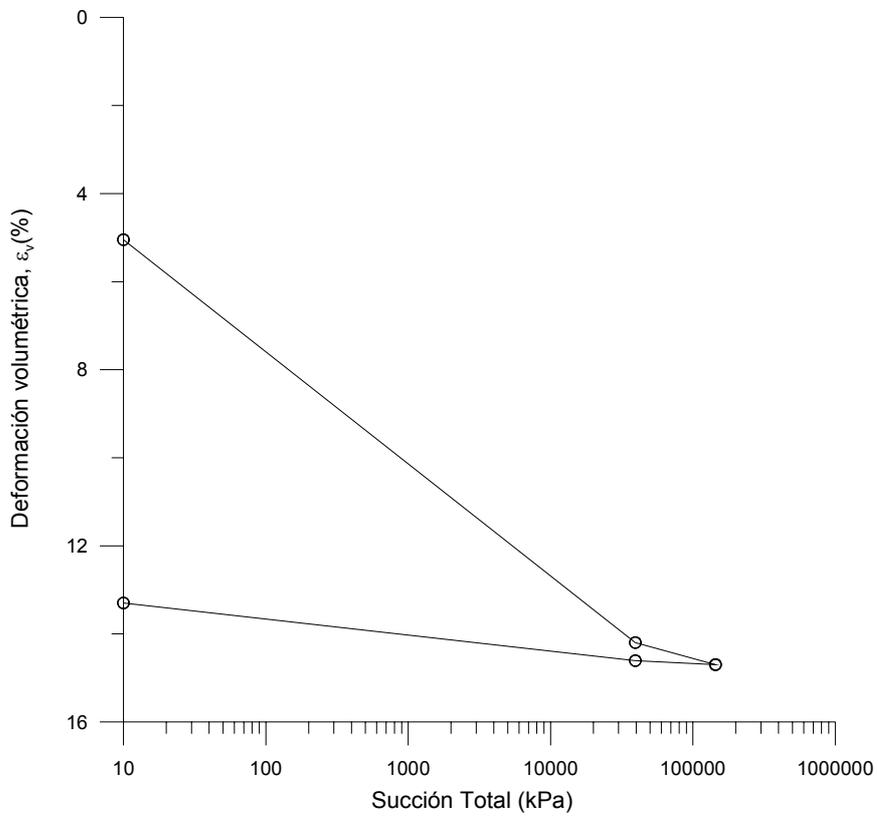


Figura 2.33 Deformación volumétrica producida por la aplicación de succión en ensayo EDO-TRV.

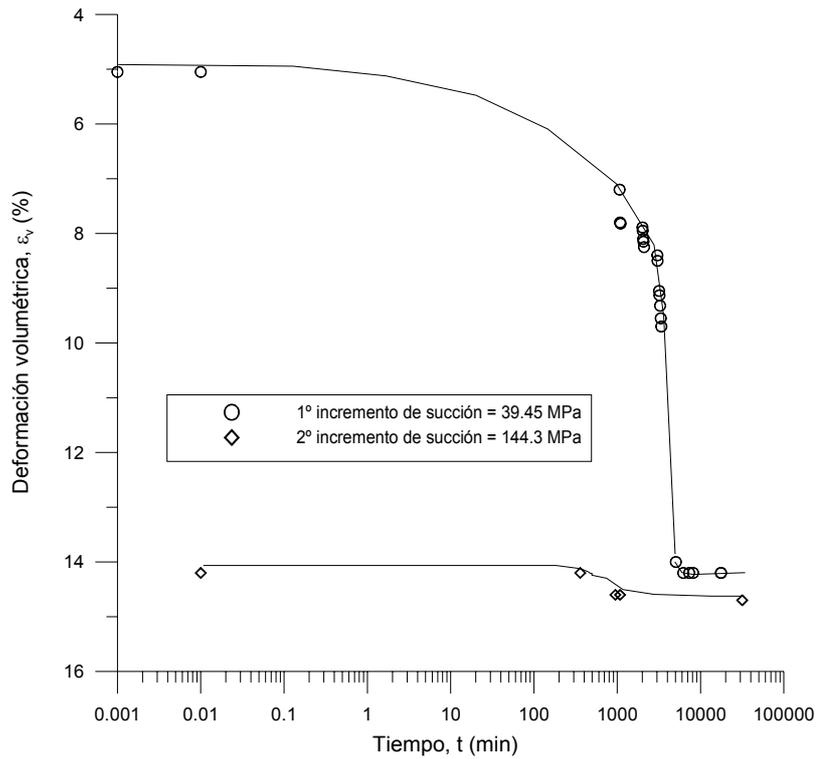


Figura 2.34 Variación de la deformación en función del tiempo para diferentes incrementos de succión en ensayo EDO-TRV.

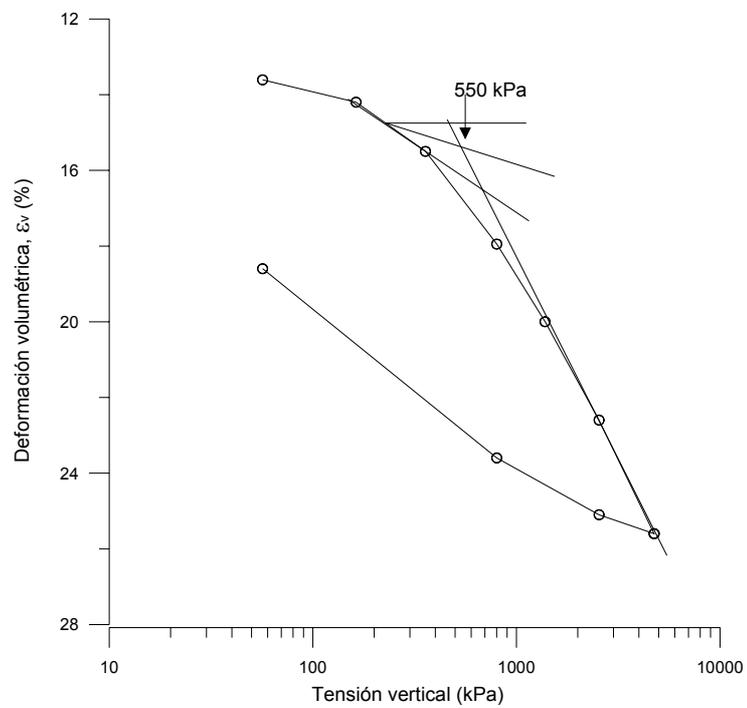


Figura 2.35 Deformación volumétrica producida por aplicación de carga vertical después de un ciclo de succión máxima de 144.3 MPa, en ensayo EDO-TRV.

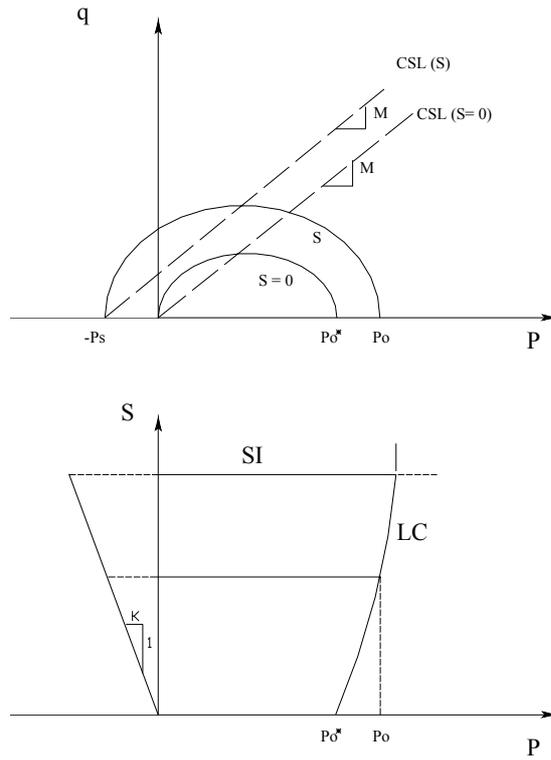


Figura 2.36 Superficies de fluencia en el espacio p, q, s , (Alonso et al, 1990).

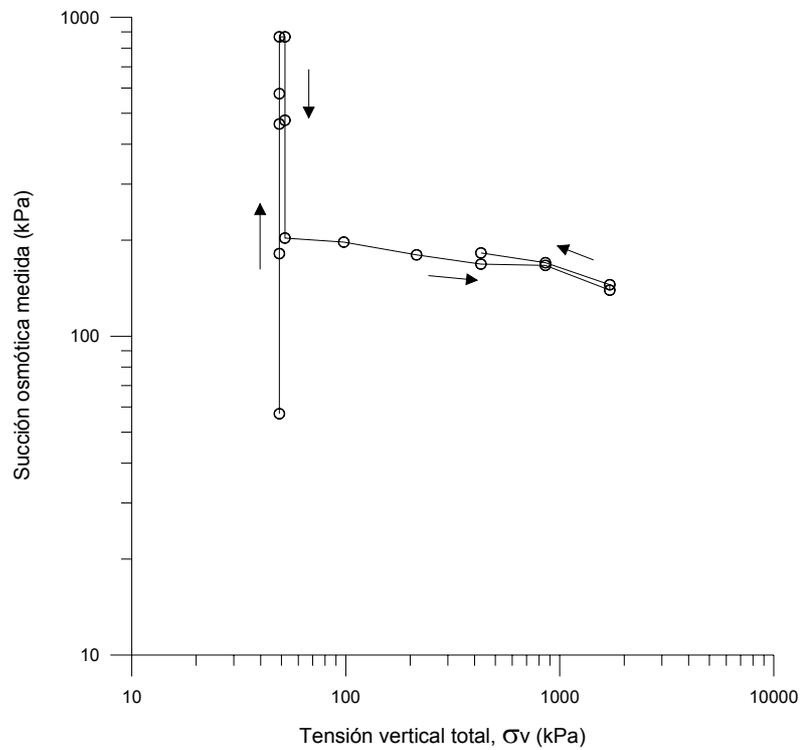


Figura 2.37 Trayectoria de tensión-succión del ensayo EDO-PEG.

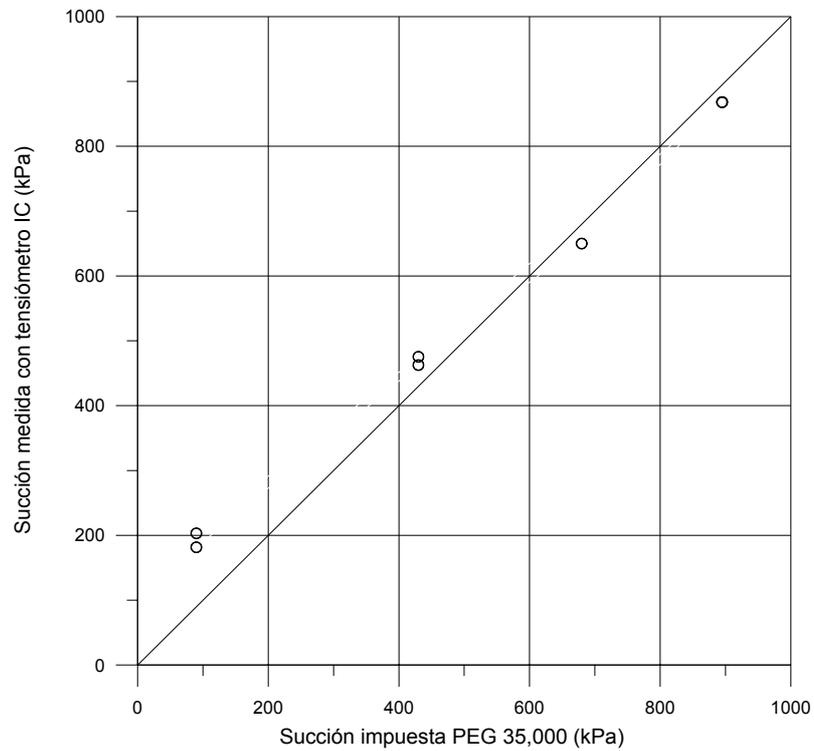


Figura 2.38 Comparación entre la succión impuesta con PEG 35.000 y la medida en el tensiómetro IC. Ensayo EDO-PEG.

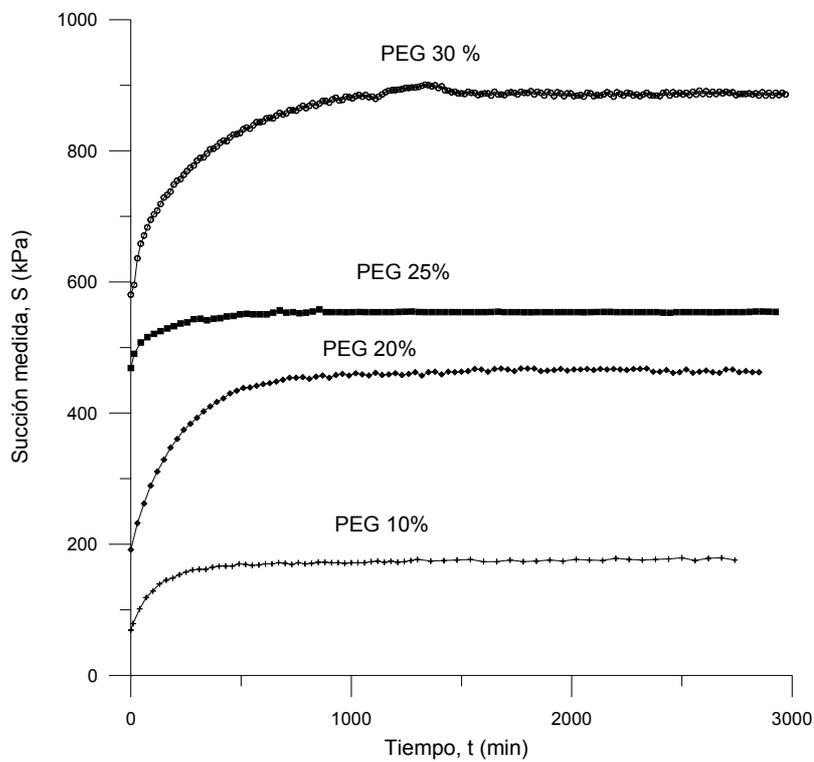


Figura 2.39 Variación de la succión con el tiempo en trayectoria de secado, ensayo EDO-PEG.

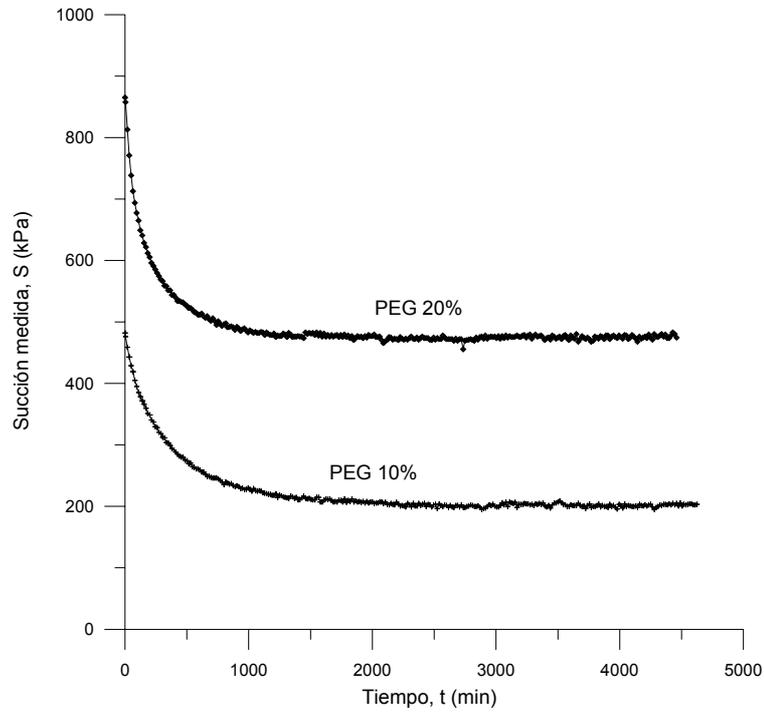


Figura 2.40 Variación de la succión con el tiempo en trayectoria de mojado, ensayo EDO-PEG.

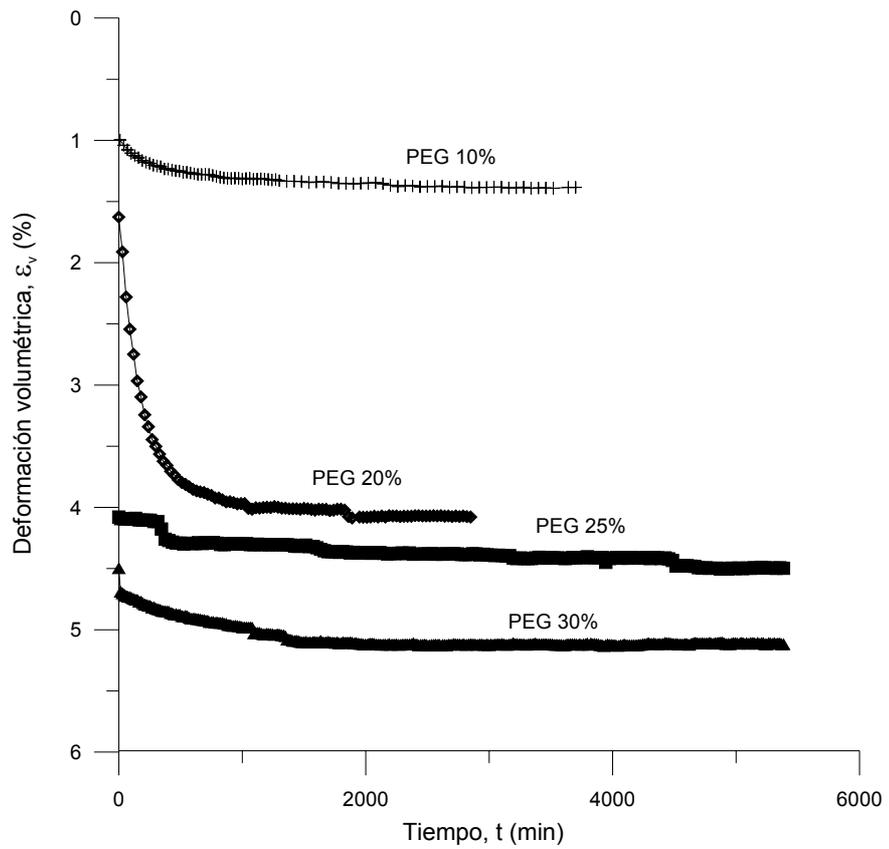


Figura 2.41 Variación de la deformación en el tiempo para diferentes concentraciones de PEG. Ensayo EDO-PEG.

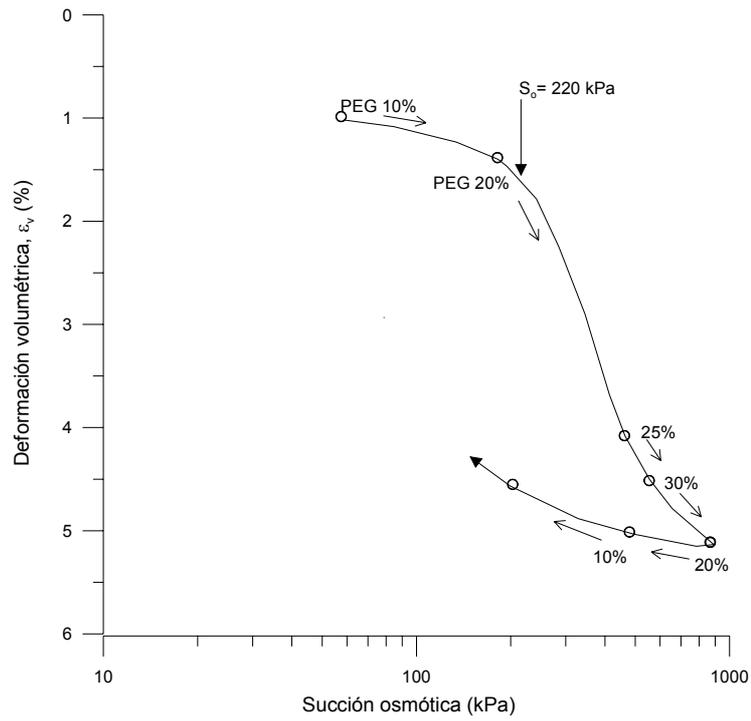


Figura 2.42 Deformación al final de cada incremento de succión osmótica en ensayo EDO-PEG.

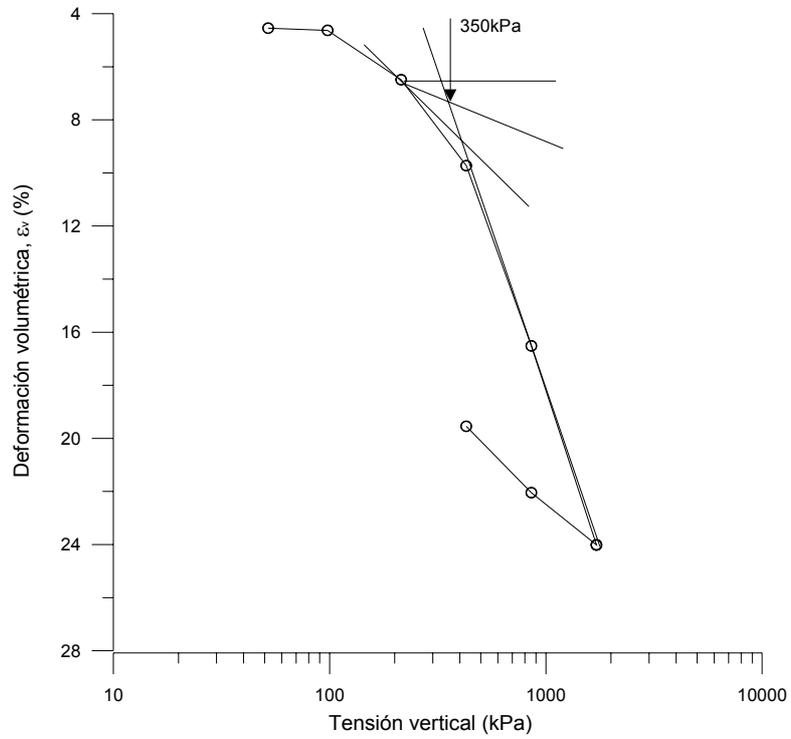


Figura 2.43 Deformación producida por la aplicación de tensión vertical en ensayo EDO-PEG.

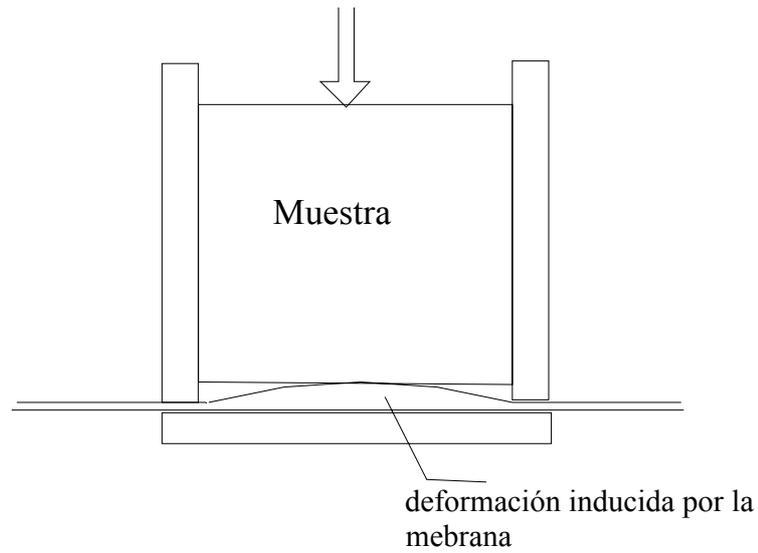


Figura 2.44 Esquema de la deformación inducida por la membrana en la parte inferior de la muestra en ensayo EDO-PEG.

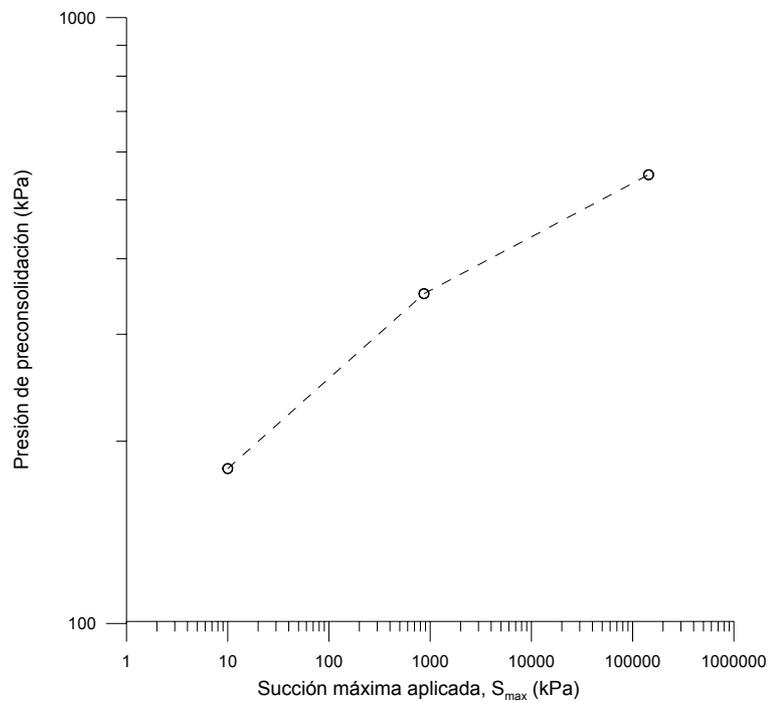


Figura 2.45 Presión de preconsolidación para diferentes valores máximos de succión en ensayos EDO-SAT, EDO-TRV Y EDO-PEG.

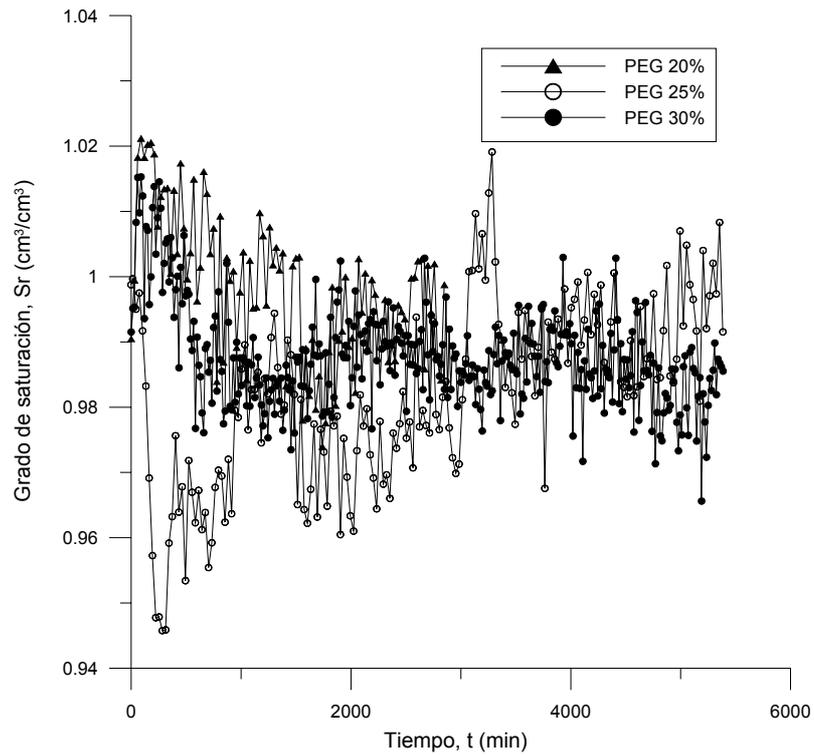


Figura 2.46 Variación del grado de saturación en el tiempo, ensayo EDO-PEG.

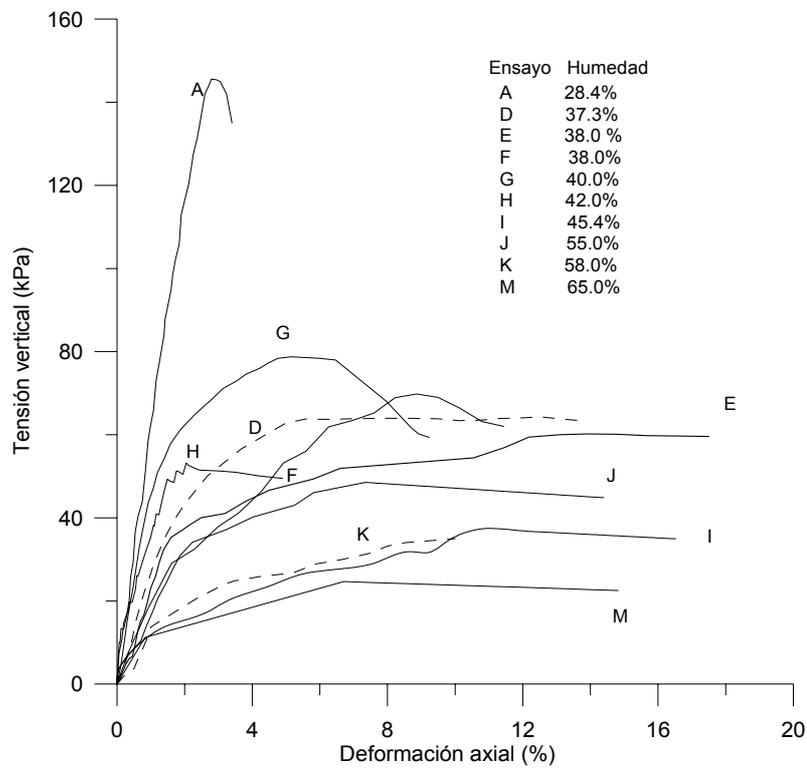


Figura 2.47 Curvas tensión-deformación de ensayos de compresión simple en muestras reconstituidas, compactadas a diferente humedad.

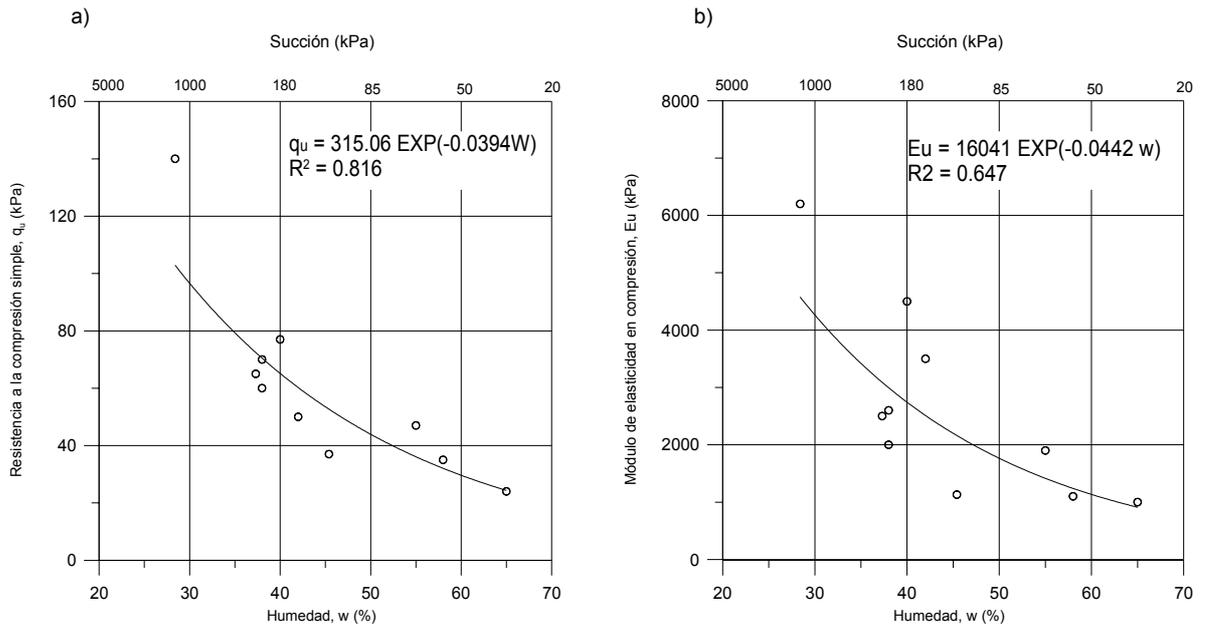


Figura 2.48 Variación de la resistencia a la compresión simple y del módulo de elasticidad en función de la humedad y la succión.

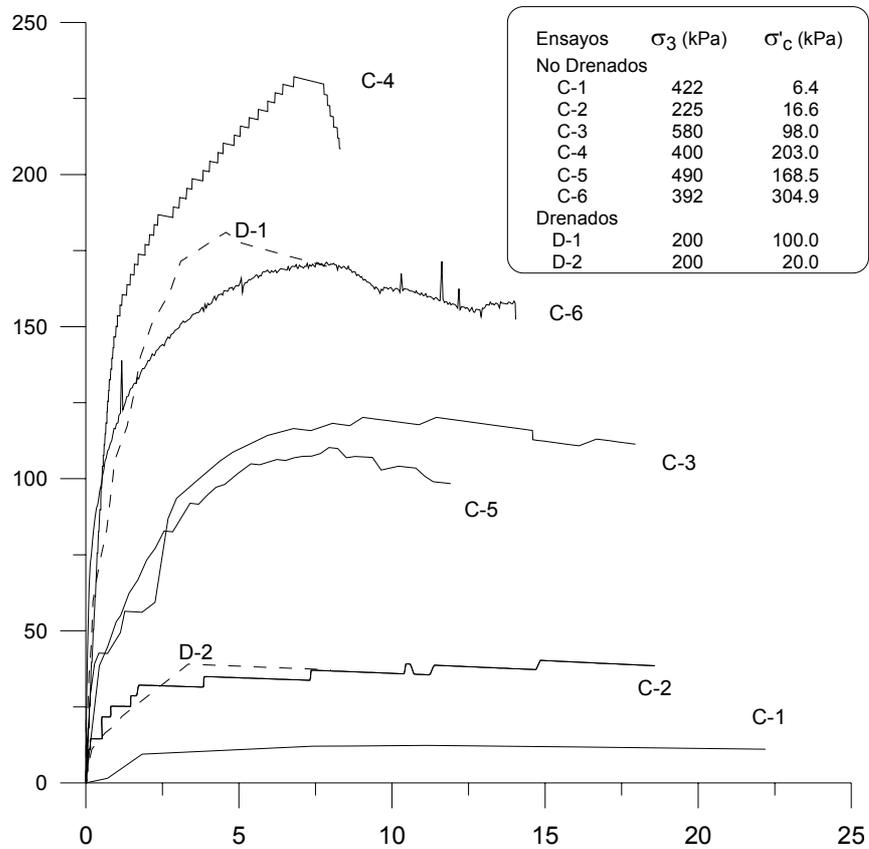


Figura 2.49 Curvas tensión-deformación de ensayos triaxiales de compresión.

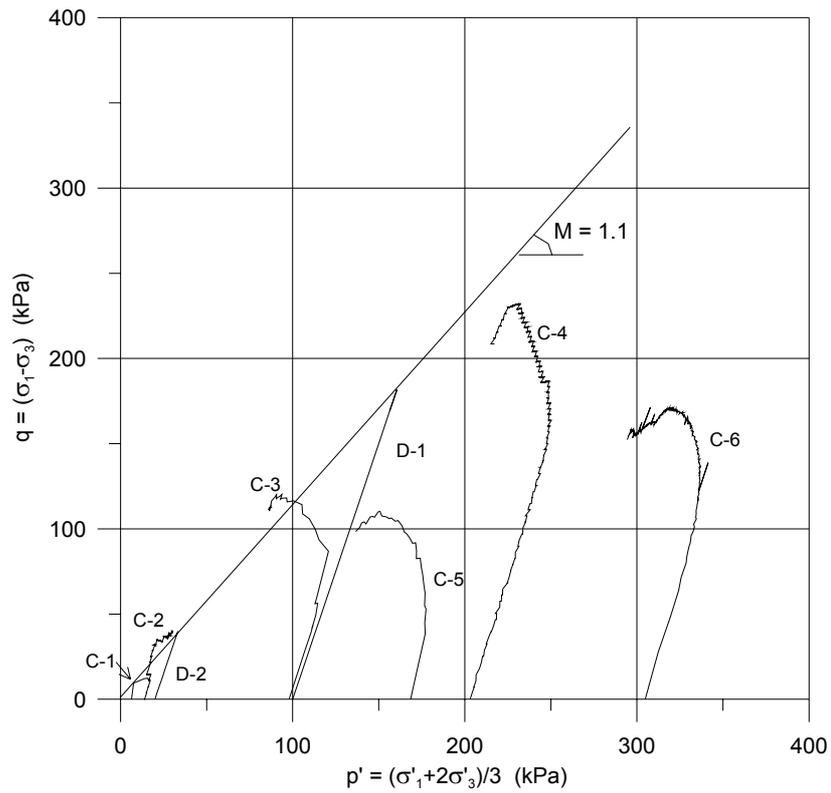


Figura 2.50 Trayectorias de tensiones efectivas de ensayos triaxiales de compresión.

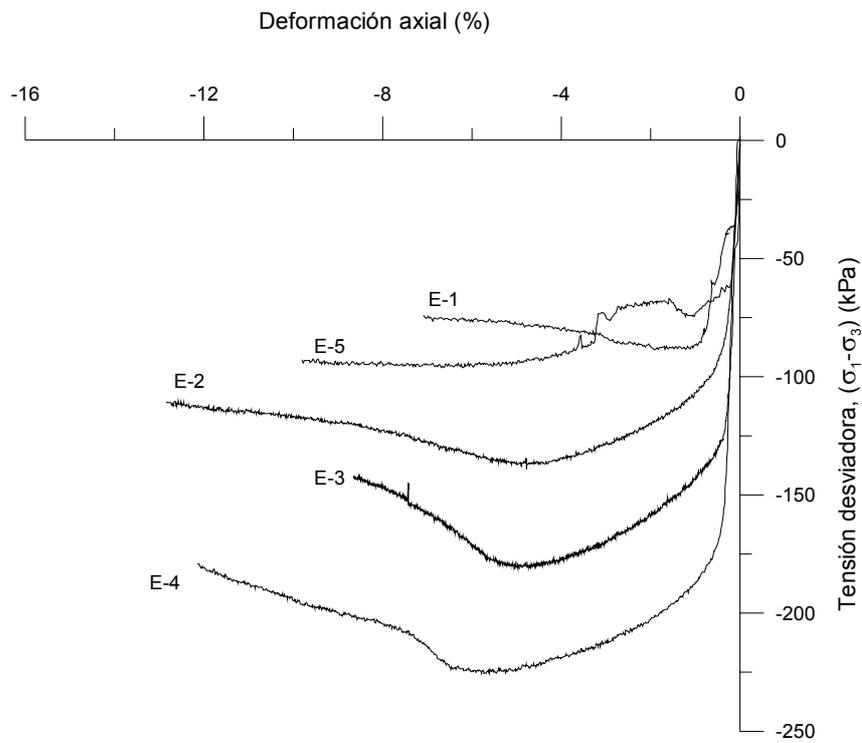


Figura 2.51 Curvas tensión-deformación de ensayos triaxiales de extensión.

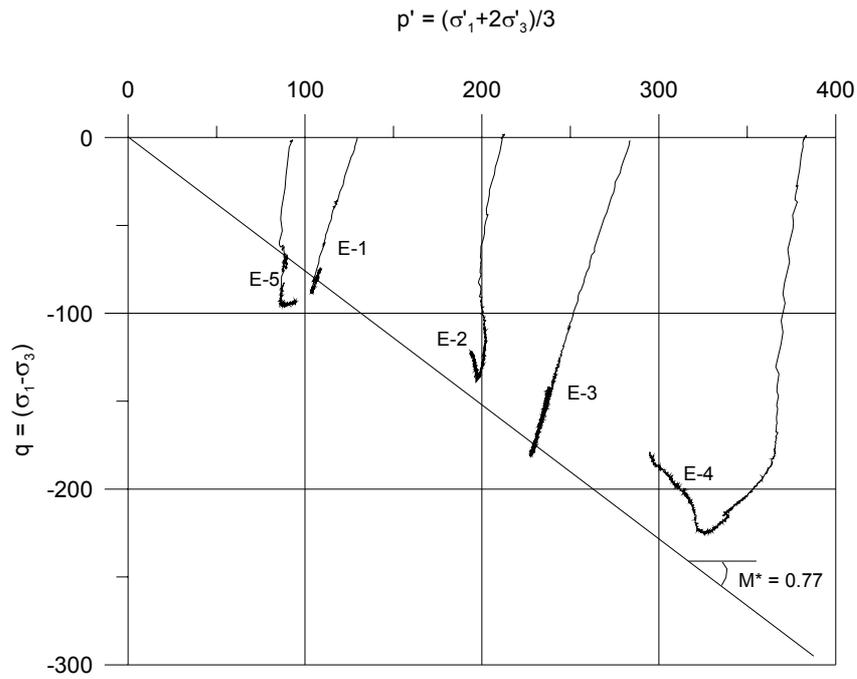


Figura 2.52 Trayectorias de tensiones efectivas de ensayos triaxiales de extensión.

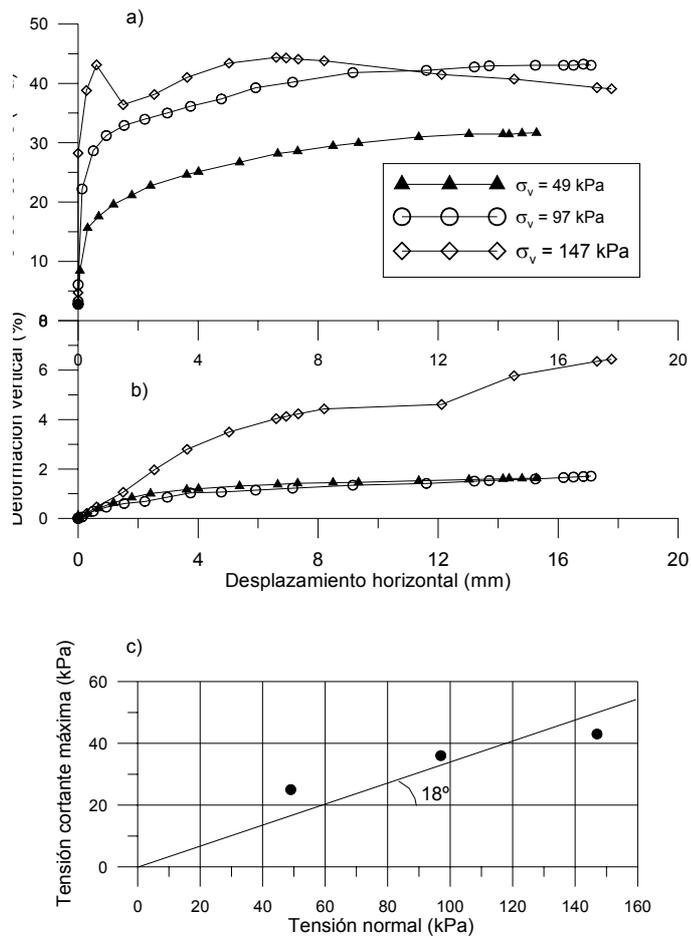


Figura 2.53 Resultados de ensayo de corte directo residual sobre material remoldeado y previamente cortado por la superficie de rotura.