

CAPÍTULO 4

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

4.1 Introducción

La resistencia a la tracción en suelos es un parámetro que por lo general es bajo con respecto a la resistencia a la compresión y además depende de la succión actuante, por tal razón se suele despreciar en muchos análisis geotécnicos convencionales, donde se adoptan las condiciones más desfavorables, como son considerar el suelo saturado y las succiones nulas, sin embargo, para el estudio de ciertos comportamientos específicos, como es el caso del agrietamiento de suelos por desecación, la mayoría de los modelos propuestos involucran la resistencia a la tracción como una de las variables que deben conocerse.

Varios autores se han preocupado por el tema de la medición directa o indirecta de la resistencia a la tracción, sin embargo, en tales mediciones no se ha considerado la variación de la succión producida por las deformaciones que ocurren ante las cargas aplicadas y por lo tanto no es posible conocer el verdadero estado de tensiones del suelo en el momento de la rotura. En los ensayos reportados se considera que en el suelo actúa una succión media, que se determina al principio o al final del ensayo, la cual se puede medir directamente o se puede correlacionar con la humedad, mediante la curva de retención, sin embargo, es probable que este valor de succión difiera de la succión que se presenta en la zona de mayor tracción o que varíe de manera importante con las deformaciones inducidas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario medir simultáneamente la carga, la deformación y la succión, tal como se haría por ejemplo en el caso de un ensayo triaxial, con el fin de conocer el verdadero estado de tensiones del suelo en un momento dado.

En este capítulo se presentan los resultados de ensayos de tales características, realizados con muestras reconstituidas de la arcilla de Bogotá, que sirvieron para determinar aspectos importantes del comportamiento del suelo como son las relaciones deformación-succión, tensión-succión y tensión-deformación y en particular se propone un modelo de interpretación de la resistencia a la tracción en tensiones efectivas.

Para determinar la resistencia a la tracción se empleó un equipo que permite aplicar tracción directa al suelo, mediante carga controlada, al cual se le instaló un tensiómetro de respuesta rápida (Tensiómetro del Imperial College) y un pequeño LVDT, de esta forma fue posible medir simultáneamente tensión, deformación y succión. De manera complementaria y con el fin de verificar algunas hipótesis del modelo propuesto, se realizaron pruebas de tracción en deformación controlada. Estos ensayos, junto con los que se reportaron en el capítulo 2 consistentes en triaxiales drenados y no drenados de compresión y extensión, pruebas de

compresión inconfiada y ensayos de corte directo residual permiten hacer un análisis comparativo entre la resistencia a la tracción y la resistencia al corte.

4.2 Revisión de estudios de resistencia a la tracción en suelos

Al analizar los diferentes estudios de resistencia a la tracción, se puede observar que hay dos enfoques generales: el primero consiste en evaluar indirectamente la resistencia a la tracción a partir de conceptos de resistencia al corte y el segundo consiste en medir directamente la resistencia a la tracción (en tensiones totales) para diferentes condiciones de humedad, de succión o de índice de poros.

4.2.1 Evaluaciones indirectas basadas en criterios de resistencia al corte

Una de las explicaciones que se ha dado a la existencia de la resistencia a la tracción en suelos es el efecto de la cohesión entre las partículas, la cual, de acuerdo con Lambe y Whitman (1979) puede ser de dos tipos: la cohesión real (c'), producida por cementación natural o artificial entre las partículas y la cohesión aparente (c_{ap}), producida por la tensión capilar del agua de poros o succión (S). Según este modelo, la cohesión aparente corresponde al producto de la succión por la tangente del ángulo de fricción interna (ϕ'):

$$c_{ap} = S \tan \phi' \quad (4.1)$$

Y la cohesión total (c) que es la suma de la cohesión real más la cohesión aparente está dada por:

$$c = c' + S \tan \phi' \quad (4.2)$$

La cohesión aparente se ha denominado así porque su efecto se reduce o se pierde cuando aumenta la humedad del suelo, por tal razón, para estar por el lado de la seguridad, se desprecia como parámetro de resistencia en muchos problemas geotécnicos. En la formulación de Lambe y Whitman (1979) no se presenta una relación explícita entre la resistencia a la tracción y la cohesión total y por lo tanto no se tiene ninguna expresión de la resistencia a la tracción en términos de la succión.

En un diagrama de Mohr, como el que se muestra en la Figura 4.1, la resistencia a la tracción (σ_t) se puede expresar en términos de la cohesión real y del ángulo de fricción interna (ϕ') como:

$$\sigma_t = -c' \cot \phi' \quad (4.3)$$

Con esta representación, la resistencia a la tracción es el límite de posibles valores de tensión normal en tracción, sin embargo, de acuerdo con Baker (1981) aquí no se refleja el comportamiento real de la zona de tensión negativa que es no lineal y por esto propone que se limite la magnitud de la resistencia a la tracción a un cierto valor límite entre cero y $-c' \cot \phi'$.

Fredlund et al (1978) proponen que la resistencia al corte en un suelo no saturado se puede expresar como:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4.4)$$

Donde σ es la tensión total, u_w es la presión del agua de poros, u_a es la presión de aire en los poros, ϕ' describe el incremento de resistencia por efecto de la presión total $(\sigma - u_a)$ y ϕ^b describe el incremento de resistencia con la succión matricial $(u_a - u_w)$. En este caso, se define el intercepto de cohesión total (C) como la suma de la cohesión efectiva más la componente debida a la succión:

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4.5)$$

El término que hace diferente a las ecuaciones (4.2) y (4.5) es el valor del ángulo de resistencia, pues en el primer caso se emplea ϕ' mientras que en el segundo se emplea un ángulo menor ϕ^b que tiene en cuenta que la succión tiende a ser menos efectiva en la resistencia al corte que la compresión mecánica. Escario & Sáez (1986) muestran, a partir de ensayos de corte directo con succión controlada, que ϕ^b es muy próximo a ϕ' para estados cercanos a saturación y no es constante sino que disminuye a medida que aumenta la succión, hasta alcanzar un valor relativamente constante para succiones muy altas.

Con base en lo planteado por Baker (1981), Morris et al (1992) indican que los criterios comunes de rotura en compresión deben modificarse cuando se trata de tensiones de tracción, puesto que el valor absoluto de la resistencia a la tracción σ_t es mucho menor que aquel que se obtiene con (4.3), tal como se muestra en la Figura 4.2 y sugieren tomar $\sigma_t = -C/2$, donde C es la cohesión total. Adicionalmente indican que para ser conservador, en suelos que se secan a partir de una condición muy húmeda, tales como lodos, en (4.5) se puede asumir que $c' = 0$, con lo cual:

$$\sigma_t = -0.5 (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4.6)$$

Como se puede ver, en este caso la resistencia a la tracción se obtendría a partir de ensayos de rotura (tipo corte directo con succión controlada) y por lo tanto se trata de una estimación indirecta.

Snyder y Miller (1985) presentan un modelo de análisis de resistencia a la tracción en suelos no saturados, en el que se consideran dos casos: a) que el suelo sea uniforme, sin oquedades ni grietas y b) que el suelo tenga tales irregularidades. En el primer caso (Fig. 4.3a), la rotura por tracción en el suelo se presenta cuando la tensión efectiva es nula y para evaluarla emplean la ecuación en tensiones efectivas propuesta por Bishop (1961) para suelos no saturados, basada en la teoría de cohesión capilar:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (4.7)$$

Donde χ es un parámetro adimensional que depende del grado de saturación del suelo y las demás variables son las mismas definidas en (4.4). Si se considera la presión de aire como presión de referencia, igual a cero y la tensión efectiva nula, la tensión de tracción se obtiene despejando en (4.7) la tensión total:

$$\sigma_t = u_w \chi \quad (4.8)$$

Para el caso de suelos saturados $\chi = 1$ y por lo tanto, según este modelo, la resistencia a la tracción es equivalente a la succión. Snyder & Miller indican que “para propósitos prácticos, un suelo saturado se comporta como si estuviera inmerso libremente en un cuerpo de agua sometida a tracción”, sin embargo, como se muestra más adelante tal afirmación sólo se cumple si la succión es cero, puesto que en tal caso la resistencia a la tracción también es cero, sin embargo, si el suelo está saturado pero hay succión actuante, en general la resistencia a la tracción es muy inferior a la succión.

El segundo caso analizado por Snyder & Miller es el correspondiente a suelos que presentan oquedades o grietas internas (Fig. 4.3b), a las cuales se les atribuye la reducción de resistencia a la tracción, con respecto a la succión actuante. Este es un análisis que combina la formulación anterior de cohesión capilar con criterios de mecánica de fractura. Las principales conclusiones que obtienen de este análisis son que la resistencia a la tracción se reduce aproximadamente a la mitad de la evaluada con la teoría de cohesión capilar y que el modelo se ajusta mejor a los resultados experimentales reportados para suelos no saturados.

Towner (1987a) Considera que la resistencia a la tracción se puede entender de la misma forma que un ensayo de extensión en equipo triaxial, donde la presión de cámara ejerce una presión de confinamiento similar a la ejercida por la succión. Esta similitud es válida y compatible con el modelo capilar y con los conceptos de cohesión aparente, sin embargo, las verificaciones que se hacen son de tipo indirecto a partir de resultados de ensayos drenados de compresión triaxial, utilizando el modelo Cam Clay y algunas hipótesis de comportamiento que resultan difíciles de verificar.

Abu-Hejleh y Znidarčić (1995) en un estudio de agrietamientos calculan la resistencia a la tracción mediante una ecuación exponencial, determinada para una arcilla de China, basada en la resistencia al corte no drenada (s_u) y el índice de poros (e) como:

$$\sigma_t = F10^{(1.945-e/0.435)} \quad (4.9)$$

Donde F es un factor adimensional que representa el cociente entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión simple ($F = \sigma_t / s_u$) y debe obtenerse de manera independiente o adoptarse de otros estudios. En este caso se indica que F puede variar entre 0 y 0.5.

El principal problema de la ecuación (4.9) es que al no conocerse el valor de la succión, no es posible determinar el estado general de tensiones efectivas, sin embargo, en términos de tensiones totales este tipo de relaciones entre resistencia al corte y resistencia a la tracción pueden ser de utilidad práctica debido a la facilidad para realizar las pruebas de compresión.

Otro problema que se encontró en la ecuación (4.9) es que los autores no especifican las unidades en las cuales está expresada y si se asume que se trata de kPa (que son las unidades que emplean en los distintos cálculos), los valores que se obtienen de σ , son muy próximos a cero.

Ayad et al (1997) determinaron parámetros de resistencia a la tracción de una arcilla inalterada, usando un equipo triaxial de cilindro hueco, en el cual la muestra inicialmente se consolidaba de manera isotrópica y posteriormente se sometía a deformación radial plana, incrementando la presión interna y manteniendo las presiones vertical y de cámara constantes. En este caso midieron la presión de poros en la parte media de la muestra, lo cual permitía determinar el momento de la rotura, debido a la fuerte caída de presión que se presentaba en tal condición. Aunque se trata de un método interesante porque se trabaja en tensiones efectivas, las mediciones que se hacen no son directas ya que las presiones de poros son positivas y la tensión principal, que en este caso sería la presión interna sobre la muestra, actúa en sentido paralelo al plano de rotura y no en sentido perpendicular, como ocurre en una condición de tracción simple.

4.2.2 Mediciones directas de resistencia a la tracción

Farrel et al (1967) presentan ensayos de resistencia a la tracción sobre muestras de suelo reconstituido, compuesto por arcilla (12%), limo (17%), arena fina (50%) y arena gruesa (20%). Los ensayos se hicieron con muestras cilíndricas que se fijaron con pegamento (Araldite) a los extremos a una prensa de compresión inconfínada. Los autores reportan ensayos tanto de tracción como de compresión axial, ambos en condiciones de deformación controlada. Adicionalmente hicieron ensayos de flexión, con muestras prismáticas, con los cuales determinaron de forma indirecta la resistencia a la tracción.

Dentro de los resultados se presentan las curvas normalizadas de tensión-deformación para diferentes condiciones de humedad, la variación de la resistencia a la tracción con la humedad (y con la succión deducida) y la comparación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión inconfínada.

Towner (1987b) realizó mediciones de resistencia a la tracción en muestras reconstituidas de caolín a diferente humedad. El equipo que utilizó para los ensayos fue un molde conformado por dos piezas con extremos redondeados, adosado a un dinamómetro. La carga de tracción se aplicaba en forma manual hasta llegar a la carga máxima o de rotura (Figura 4.4). De manera complementaria se realizó la curva de retención de la arcilla para relacionar los datos de humedad y de succión. Dentro de los resultados que obtuvo se puede destacar que la resistencia a la tracción, como es de esperarse, disminuye con la humedad y especialmente que su valor es diferente del valor de la succión obtenida de la curva de retención.

Tang y Graham (2000) presentan un método para determinar resistencia a la tracción en suelos no saturados, utilizando un molde cilíndrico partido, al que se fija la muestra mediante un adhesivo de alta resistencia y posteriormente se somete a tracción hasta la rotura, midiendo los valores intermedios de carga y desplazamiento (Figura 4.5). Los ensayos reportados corresponden a tres grupos de muestras de arena-bentonita, a cada uno de los cuales se le impuso diferente nivel de succión (4.0 MPa, 6.5 MPa y 10 MPa), mediante la técnica de equilibrio de vapor. El resultado más importante que se muestra en este caso es que los valores

de resistencia a la tracción son muy inferiores a los de la succión total media existente en la muestra, pues los valores de la relación σ_v/S varían entre 6% (para $S = 4$ MPa) y 3% (para $S = 10$ MPa).

4.3 Programa de ensayos de laboratorio

Antes de entrar en el tema de los ensayos de resistencia a la tracción resulta conveniente volver sobre los modelos de retracción y agrietamiento de suelos y en particular sobre el modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995) que se describió en el capítulo 3, pues en este modelo se siguen las trayectorias de tensiones totales y efectivas hasta el agrietamiento y precisamente es este uno de los aspectos que se pretende explorar en esta investigación.

El seguimiento experimental de tales trayectorias se hizo mediante un ensayo de compresión unidimensional en la cámara triaxial. Este ensayo es bastante ilustrativo pero, como se explica posteriormente, no es posible ejercer tracción sobre el suelo y por lo tanto sólo se logra reproducir parcialmente las trayectorias, sin que se pueda llegar hasta el agrietamiento de la muestra.

Para poder inducir el agrietamiento es necesario realizar ensayos de tracción directa. En este estudio se desarrollaron dos series de ensayos: la primera y más importante consistió en pruebas de carga controlada con medida de deformación y succión y la segunda, en pruebas más convencionales de tracción, realizadas a deformación controlada, sin medición de succión.

Los resultados de estos ensayos se comparan con los obtenidos en las diferentes pruebas de resistencia al corte que se presentaron en el capítulo 2. Esto con el fin de analizar la respuesta del suelo en las distintas condiciones de carga y de evaluar un modelo que se propone para interpretar la resistencia a la tracción en arcillas saturadas.

4.3.1 Ensayo de compresión unidimensional en cámara triaxial para reproducir trayectorias de tensiones previas a la rotura por tracción.

Como un aspecto previo a los ensayos de tracción y con el propósito de verificar en laboratorio las trayectorias de desecación indicadas en la Figura 3.4 del modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995), se realizó un ensayo de consolidación unidimensional en la cámara triaxial, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

La muestra inalterada se preparó y se montó en el equipo siguiendo los pasos normales de cualquier prueba triaxial, pero en este caso se instaló un transductor de efecto Hall, previamente calibrado, para medir las deformaciones radiales de la muestra. Este transductor se pegó en la parte externa de la membrana con un pegamento comercial (Loctite®), verificando que las galgas de lectura quedasen ubicadas correctamente dentro del rango de calibración realizado.

Se hizo la etapa normal de saturación de la muestra y posteriormente se aplicó una presión de cámara de 1600 kPa en condición no drenada, de tal manera que en tensiones totales se siguió la trayectoria O-W (Fig. 4.6). Al final de esta etapa la tensión efectiva se mantiene próxima a cero y tanto la presión de poros como la tensión total se ubican en el punto W y su valor es 1600 kPa. Esta sería la correspondiente condición inicial del modelo.

A partir de este punto se inicia la etapa de consolidación siguiendo la trayectoria W-K. Teniendo en cuenta que el equipo empleado (GDS) no tenía la opción de realizar esta trayectoria particular de manera automática, fue necesario hacerla de forma manual, para lo cual se debieron manipular las tensiones actuantes. En primer lugar, para mantener la tensión vertical constante (trayectoria de tensiones totales con pendiente $-3/2$), se debe tener en cuenta que tal tensión depende tanto de la presión de cámara (σ_c) como de la tensión desviadora que está dada por el cociente entre fuerza vertical (F) y área transversal (A):

$$\sigma_v = \sigma_c + \frac{F}{A} \quad (4.10)$$

Al inicio de esta etapa $F = 0$, pero luego la muestra se somete a compresión vertical a una tasa de desplazamiento constante y por lo tanto F tiende a aumentar. Como se requiere que la tensión vertical sea constante ($\Delta\sigma_v = 0$), es necesario entonces reducir la presión de cámara a medida que aumenta la tensión desviadora (F/A), así:

$$\Delta\sigma_c = -\frac{\Delta F}{A} \quad (4.11)$$

En segundo lugar se debe mantener la deformación radial nula y para esto se debe variar la presión de cola de forma que las lecturas de deformación radial se mantengan lo más próximas posibles de cero, esto es, si la muestra presenta tendencia a expandirse se reduce la presión de cola y si presenta tendencia a contraerse, se aumenta. Como se puede apreciar en la Figura 4.7, no fue fácil lograr que la deformación fuese nula, debido a que la respuesta en deformaciones es muy lenta en relación con los cambios de presión impuestos ya que el suelo es de baja permeabilidad.

Cuando se está cerca al punto K, la presión de poros es muy baja porque ya se está en la fase final de la etapa de consolidación unidimensional, por esta razón, el margen de maniobra con la presión de cola para mantener la deformación nula resulta muy bajo y además la permeabilidad del suelo es aún menor que en la fase inicial del ensayo, puesto que la porosidad se ha reducido. Como se ve en las Figuras 4.6 y 4.7, al final del ensayo, las deformaciones se salieron de control y las trayectorias cambiaron de curso. De todas formas, a pesar de que no se pudo llegar al punto final de consolidación, la trayectoria de tensiones efectivas permite determinar de manera razonable el valor de K_o que es una de las variables importantes para aplicar el modelo. Teniendo en cuenta que $\sigma_3 = K_o \sigma_1'$, el valor de K_o se puede expresar en términos de la pendiente de la trayectoria de tensiones efectivas (η), como:

$$K_o = \frac{3-\eta}{2\eta+3} \quad (4.12)$$

En este caso, los resultados obtenidos fueron: $\eta = 0.76$ y $K_o = 0.496$.

A partir del ensayo realizado resulta claro que pese a las dificultades indicadas, en el equipo triaxial es posible reproducir la etapa de consolidación unidimensional descrita en el modelo,

aunque obviamente, hubiese sido mucho más sencillo de realizar en una cámara edométrica con control de tensión lateral. Para continuar con la siguiente etapa sería necesario aplicar succión a la muestra, lo cual es factible, sin embargo no se puede mantener la condición de deformación lateral nula porque la succión hace que la muestra tienda a contraerse y no hay forma de impedir tal contracción como sí puede ocurrir en el terreno natural. Para hacer esto es necesario realizar otro tipo de ensayos como los de tracción con medida de succión, que se describen a continuación.

4.3.2 Ensayos de tracción en carga controlada

Las pruebas de resistencia a la tracción se hicieron en un equipo similar al descrito por Mikulich y Gudehus (1995), construido por Rodríguez (2002), consistente en dos piezas trapezoidales en los extremos y un conjunto de tres piezas rectangulares en la parte central. Una de las piezas trapezoidales permanece fija y la otra puede deslizarse libremente al aplicársele una fuerza externa. Las piezas de la parte central se retiran una vez que se ha moldeado la muestra y justo antes de iniciar el ensayo, pues este es el tramo de suelo que estará sometido a tracción (Figura 4.8).

Al montaje original de Rodríguez (2002) se le hicieron modificaciones como la instalación de un tensiómetro y de un LVDT para medir directamente sobre la muestra la succión y las deformaciones.

En este caso se utilizó un tensiómetro del Imperial College (Ridley & Burland, 1993, 1996), que es un equipo con el cual se puede medir directamente la succión para valores superiores a 100 kPa, cosa que no se puede lograr en los tensiómetros convencionales porque usualmente se presenta caída de la medición debido a que el sistema sufre cavitación (formación de burbujas de aire dentro del fluido), pérdida de adhesión entre el fluido y el instrumento (por presencia de impurezas de partículas sólidas) o paso de aire a través de la piedra porosa (Marinho, 1994).

En la Figura 4.9 se presenta un esquema del tensiómetro del Imperial College (IC), que es similar a un transductor de presión de poros convencional pero con algunos cambios importantes en su diseño, que tal como lo indica Dineen (1997) son:

- El reemplazo de la piedra porosa por una piedra cerámica de alto valor de entrada de aire (1500 kPa).
- La minimización del volumen de agua en el sistema y
- La saturación previa con altas presiones positivas (4000 kPa)

Con este equipo se pueden medir succiones hasta de 1500 kPa e incluso, si se hace una saturación especial consistente en ciclos de presurización y cavitación, se logra llegar a lecturas de succión superiores a los 2000 kPa (Tarantino et al, 2000).

La velocidad de respuesta del tensiómetro IC es muy rápida, Dineen (1997) reporta tiempos de estabilización de menos de 2 minutos para lecturas de succión que varían entre 0 y 1200 kPa.

Siguiendo las recomendaciones de Ridley y Burland (1996), en la presente investigación la saturación del tensiómetro se hizo aplicando una presión de 4000 kPa durante un tiempo mínimo de 24 h, luego se procedió a calibrarlo con el manómetro que trae el equipo, aplicando presiones positivas en un intervalo entre 0 y 2000 kPa. Adicionalmente, se decidió realizar una calibración más fina en el intervalo de interés, de 0 a 200 kPa, para lo cual se empleó una celda de presión, previamente calibrada con cargas muertas. El resultado de esta calibración se muestra en la Figura 4.10 y como se puede ver exhibe una muy buena linealidad.

Al calibrar con presiones positivas se asume que el comportamiento del diafragma donde está instalado el sensor de presión se comporta elásticamente y que por lo tanto tales medidas de presión positiva son igualmente válidas cuando se mide presión negativa (succión). Tarantino y Mongiovi (2003) estudiaron este comportamiento en un tensiómetro similar al del IC pero con algunas modificaciones donde podían aplicar presión en la parte posterior del tensiómetro, manteniendo la parte anterior a la presión atmosférica y concluyeron que la calibración en el rango positivo era prácticamente igual a la obtenida en el rango negativo (encontraron variaciones de máximo 10 kPa en un intervalo de medida de 1000 kPa y con algunos ajustes en la calibración esta diferencia podía reducirse a valores medios de 4 kPa).

La medida de las deformaciones se realizó con un pequeño LVDT instalado directamente sobre la parte central de la muestra (Figura 4.8), con este sistema se evitan posibles errores causados por deformaciones del equipo o de la muestra en sitios distintos a la zona de interés, que es la zona central, sometida a tracción, en particular se evitan las deformaciones que se presentan por el ajuste de la muestra a las paredes durante las primeras etapas de carga.

La aplicación de la fuerza de tracción se hizo colocando pequeñas cargas en un recipiente conectado mediante una cuerda y una polea a la pieza móvil del equipo de tracción (Figura 4.8). Las cargas se colocaban de manera muy cuidadosa y lenta, para no inducir fuerzas adicionales ni efectos inerciales y para permitir el tiempo necesario de respuesta de la lectura del tensiómetro. Los intervalos de carga oscilaron entre 20 y 200 g, dependiendo de la respuesta del suelo, en general las cargas mayores se aplicaron durante las primeras etapas y las menores cuando se estimaba que el suelo estaba cerca de la rotura. En el intervalo de succión que se trabajó, los tiempos de estabilización de la lectura del tensiómetro instalado en la arcilla variaban usualmente entre 30 y 60 s y la duración total de cada ensayo estaba entre 20 y 40 min.

Todos los ensayos se hicieron en un laboratorio con humedad y temperatura constantes. La preparación de las muestras se hizo agregando agua destilada al suelo hasta la humedad requerida, mezclando luego muy bien con espátula manual y posteriormente dejando homogenizar la humedad durante aproximadamente 24 horas.

Un aspecto muy importante que se debe tener claro en estos ensayos es saber si el suelo está saturado o no lo está, puesto que de ello depende que se pueda aplicar o no el principio de tensiones efectivas. Adicionalmente, de acuerdo con diferentes investigadores (Towner, 1987a, Bronswijk, 1988, Abu-Hejleh & Znidarčić, 1995, Lloret et al, 1998) las grietas de tracción que se producen durante el secado de suelos, se inician cuando éstos aún están en condición saturada o cuasisaturada, debido a los importantes cambios volumétricos que tienden a presentarse ante la pérdida de agua. Estos aspectos de saturación y humedad de agrietamiento se discuten con mayor detalle en los capítulos 6 y 7.

De acuerdo con las curvas de retención de la arcilla alterada en trayectoria de secado, el valor de entrada de aire es de aproximadamente 1000 kPa (Figura 2.19b), este valor corresponde a humedades (contenido gravimétrico de agua, w) superiores a 30% (Fig. 2.19a). Todos los ensayos se hicieron con humedades entre 38% y 64 % y por lo tanto se puede considerar que el suelo estaba saturado ($S_r = 1$). Esto también se puede confirmar en la curva de la Figura 2.18b que muestra la relación entre la humedad y el grado de saturación y con los bajos valores de succión inicial medidos en el tensiómetro, los cuales fueron en general inferiores a 200 kPa, es decir muy por debajo del valor de entrada de aire de la arcilla.

Al estar el suelo saturado, el valor de la humedad determina directamente el índice de poros (e) y la densidad (γ), puesto que:

$$e = wGs \quad (4.13)$$

$$\gamma = \frac{Gs \gamma_w (1 + w)}{1 + wGs} \quad (4.14)$$

Donde γ_w es el peso unitario del agua y G_s la gravedad específica ($G_s = 2.6$). A pesar de la relación interdependiente de las variables, con las dimensiones del molde, y la humedad previamente conocida, se verificaba que la densidad de la muestra instalada fuese igual a la calculada con (4.14), de esta manera se aseguraba mayor uniformidad en el montaje de la muestra y se evitaba la posible presencia de vacíos internos que podrían producir globalmente un comportamiento de material no saturado.

La muestra se colocaba en el molde, con ayuda de una espátula, controlando con un comparador, que la altura fuera igual en toda la superficie. Como ya se indicó, el tensiómetro tiene dimensiones muy pequeñas (aproximadamente 10 mm de diámetro por 15 mm de longitud), y esto hacía posible su introducción en la muestra, muy cerca de la zona central. Inicialmente se instaló de forma vertical, como se aprecia en la Figura 4.8b, pero luego se notó que la respuesta era mucho mejor si se colocaba en sentido horizontal, perpendicularmente al plano de rotura por tracción, como se muestra en el esquema de la Figura 4.8a, para ello se extraía cuidadosamente una porción de material y se instalaba el tensiómetro de tal forma que quedara en firme contacto con la muestra, después se volvía a rellenar y a nivelar la zona donde se había extraído el material.

Como se verá en el apartado 4.5, la ubicación del tensiómetro cerca del plano de rotura es muy importante para conocer las condiciones de tensión en ese plano, pues si se mide en un sitio diferente, la succión que se registra puede ser muy baja respecto a la real y esto afecta sensiblemente los resultados de la envolvente de resistencia propuesta.

Cuando ya se tenía la muestra nivelada, se instalaba el LVDT y una pequeña lámina de reacción que servía de punto de referencia de los desplazamientos, es decir, cuando la muestra sufría deformaciones variaba la distancia entre el LVDT y la lámina de referencia y así se podía registrar la lectura de desplazamiento. El LVDT se fijaba a la muestra mediante un pegamento rápido de alta resistencia y la lámina de reacción se anclaba y también se fijaba

con pegamento. La distancia inicial entre la base del LVDT y la lámina de reacción se tomó como longitud inicial para los cálculos de la deformación en la zona de tracción.

Después de instalar el tensiómetro y el LVDT, se dejaba en reposo la muestra durante aproximadamente 2 h, cubierta con un plástico para que se estabilizara la succión sin que se produjeran importantes pérdidas de humedad y posteriormente se daba inicio al ensayo. En total se hicieron 9 ensayos y durante cada uno de ellos se registraban simultáneamente medidas de carga aplicada, deformación y succión.

4.3.3 Ensayos de tracción en deformación controlada

Con el propósito de complementar la información respecto al comportamiento de los suelos en tracción y en particular de conocer el comportamiento de la curva tensión deformación después del pico de resistencia, se hicieron ensayos sobre el mismo suelo y con las mismas condiciones de preparación de la muestra pero a deformación controlada y sin medición de succión (estas pruebas se adelantaron en el laboratorio de Ingeominas en Bogotá y no se midió succión porque no se contaba con el tensiómetro IC).

En los ensayos de carga controlada el comportamiento después de la carga máxima no se puede evaluar debido a que la rotura se presenta de manera súbita y total, porque el trabajo acumulado, dado por el producto de la fuerza por el desplazamiento siempre es incremental, es decir, la carga aplicada siempre va en aumento y lo mismo ocurre con los desplazamientos, de tal forma que en la etapa final, cuando la velocidad de desplazamiento se incrementa, el trabajo tiende a infinito y por eso ocurre la rotura de forma tan rápida. En los ensayos de deformación controlada, los desplazamientos después del pico no pueden incrementarse libremente y lo que ocurre es una reducción de la carga necesaria para mantener el desplazamiento impuesto, por lo tanto se puede lograr un registro importante de tensión – deformación sin que se produzca rotura completa de la muestra.

El equipo utilizado fue similar al empleado en carga controlada, pero en este caso se construyó el molde en material acrílico y se montó sobre una máquina de corte directo, apoyado libremente sobre dos carriles de esferas, de tal forma que la fricción fuese la mínima posible. La velocidad de desplazamiento fue alta (1 mm/min.) para que el ensayo fuera rápido y se minimizara la pérdida de humedad. La fuerza se midió con una celda de carga de 1N de precisión y los desplazamientos con un LVDT ubicado sobre la muestra, de la manera similar que en los ensayos de carga controlada. En la Figura 4.11 se muestra el equipo de tracción empleado.

4.4 Análisis de resultados

4.4.1 Relaciones tensión-deformación –succión en ensayos de carga controlada

En la Figura 4.12 se presentan las curvas de tensión – deformación de 9 ensayos de tracción en carga controlada con medición de succión, cuya identificación y datos donde se resumen los resultados se muestran en la Tabla 4.1. Se puede apreciar en las distintas curvas que para los primeros intervalos de carga el suelo tiende a contraerse ligeramente, dando lugar a una pendiente (módulo elástico) negativa. Este comportamiento al parecer obedece a dos factores,

en primer lugar al procedimiento mismo del ensayo ya que cuando se liberan las piezas centrales del molde, el suelo tiende a sufrir retracción debido a que se eliminan las tensiones que impedían su movimiento y en segundo lugar a la pérdida de humedad del suelo, la cual ocurre a pesar de que los ensayos fueron de corta duración y se hicieron en condiciones de temperatura y humedad controladas.

A medida que se van aplicando las cargas, éstas tienden a contrarrestar el efecto de la contracción que está experimentando el suelo, por lo tanto, para un intervalo intermedio de carga, el material exhibe un comportamiento bastante rígido que manifiesta un equilibrio entre la tensión aplicada, que trata de extender la muestra, y la succión, que trata de contraerla. Durante los intervalos finales de carga, el suelo sufre extensión y la pendiente de la curva se reduce sensiblemente hasta que llega a la rotura súbita. A excepción del ensayo A, correspondiente a la muestra más húmeda, que tuvo una deformación máxima de 1.5% antes de la rotura súbita, los demás ensayos presentaron deformaciones máximas en general muy bajas, inferiores al 0.4%.

En la Figura 4.13, correspondiente a las curvas de succión (S) en función de la tracción, se puede observar que a pesar de que el suelo estaba saturado, en todos los ensayos se registró succión y que la magnitud de la misma fue siempre superior al valor de la tensión de tracción máxima (σ_t). En la rotura el cociente entre las dos ($(\sigma_t/S)_f$) varió para las diferentes pruebas entre 0.23 y 0.34, además la succión mostró tendencia a incrementarse con la tensión aplicada, siguiendo trayectorias algo irregulares pero que guardan cierta semejanza con las trayectorias de tensiones efectivas en ensayos de compresión triaxial.

Otro aspecto interesante que se puede ver en esta gráfica es que la magnitud de la resistencia a la tracción (tensión máxima aplicada) tiende a ser mayor mientras mayor sea el valor de la succión actuante, esto se puede apreciar mejor en la Figura 4.14, donde se muestra que a pesar de que existe una cierta dispersión en los datos, para el intervalo de succiones estudiado, la relación entre la resistencia a la tracción y la succión en el momento de la rotura es de tipo lineal.

Con el propósito de comparar estos resultados con los de otros estudios, en la Figura 4.15, tomada de Snyder & Miller (1985), se muestran los datos de varios ensayos de tracción, en términos de la relación $(\sigma_t/S)_f$ (representada allí con la notación $F(\theta^*)$) y del grado de saturación S_r (representado con la notación θ^*). En esta figura se han incluido también los datos del presente estudio y los de Tang & Graham (2000). Estos últimos realizados sobre arenas, presentan relaciones de $(\sigma_t/S)_f$ de 0.06 a 0.03 para intervalos de succión de 4 a 10 MPa respectivamente.

En la gráfica se puede verificar que en todos los casos la magnitud de la tensión de tracción es en general muy inferior a la de la succión ($(\sigma_t/S)_f < 1$) y que tal diferencia se acentúa a medida que aumenta la succión. Adicionalmente, aunque se trata de diferentes tipos de material y de diferentes técnicas de ensayo, el intervalo inferior propuesto por Snyder & Miller en la Figura 4.15 (zona achurada inferior), para un suelo que presente oquedades o grietas iniciales, al parecer tiende a sobreestimar la resistencia a la tracción de los materiales ensayados, por lo menos en la zona próxima a saturación.

Ahora si se analizan las relaciones entre la deformación y la succión (Fig. 4.16), se ve que los incrementos de succión no siguieron un comportamiento uniforme en todos los ensayos pues se esperaba que a mayor succión inicial, fuera mayor el incremento de succión con la aplicación de las cargas pero en realidad en unos casos la succión se incrementó más que en otros, de forma irregular, tal como se muestra en la Figura 4.17. El otro aspecto que se nota en la Figura 4.16 y que resulta en general muy consistente con el comportamiento rígido del suelo en tracción, es que los mayores incrementos de succión en cada ensayo ocurren a deformaciones muy bajas y que cuando el suelo comienza a sufrir deformaciones crecientes, la succión tiende a estabilizarse.

El incremento irregular en la succión respecto a la succión inicial al parecer está muy relacionado con la distancia del tensiómetro al plano de rotura, pues cuando el tensiómetro estaba muy cerca de este plano los incrementos de succión registrados fueron en general mayores que en los casos que la rotura ocurría por un plano más alejado. Este hecho se notó en los diferentes ensayos e incluso varias pruebas fueron descartadas porque la rotura ocurría muy lejos del sitio donde estaba ubicada la punta del tensiómetro. Lo que se puede inferir aquí es que la zona donde se produce la rotura es una franja muy angosta, en la que ocurren los mayores incrementos de succión y estos incrementos se reducen drásticamente en muy corta distancia, como se muestra esquemáticamente y de forma preliminar en la Figura 4.18, pues para comprobarlo sería necesario hacer pruebas sistemáticas que permitan medir la variación de la succión con la distancia al plano de rotura por tracción.

Otro aspecto que en principio se consideró que podía influir en los incrementos no uniformes de succión en los diferentes ensayos, fue la posible aparición de microgrietas antes de que se presentara la rotura generalizada, puesto que si tales microgrietas ocurrían en sitios próximos a la punta del tensiómetro, los incrementos de succión registrados serían muy bajos, sin embargo, de acuerdo con la morfología y evolución de los micro y mesoagrietamientos que se describe en los capítulos 6 y 7 respectivamente, la tendencia general es que las microgrietas se inicien superficialmente y que sean de poca profundidad, por lo tanto, en estos ensayos la posición del tensiómetro estaría relativamente lejos de la zona de influencia de los microagrietamientos iniciales.

4.4.2 Relaciones tensión-deformación en ensayos de deformación controlada

En total se realizaron 11 ensayos, cuyos parámetros principales se indican en la Tabla 4.2. Las curvas tensión-deformación para humedades iniciales comprendidas entre 40.9% y 44.8% (ensayos a hasta f) se presentan en la Figura 4.19 y para humedades entre 51.2% y 64.1% (ensayos g hasta k) en la Figura 4.20.

Como ya se mencionó anteriormente, el aspecto fundamental de estas curvas, comparadas con las de carga controlada es que se puede tener información sobre el comportamiento del material después de que ha alcanzado la tensión máxima ya que en el caso anterior se presentaba rotura súbita una vez se llegaba a un cierto valor de carga. Este comportamiento post-pico indica que la rotura por tracción presenta cierta ductilidad ya que la caída de la resistencia no es muy abrupta en todos los casos y refleja un comportamiento similar al que se observa en pruebas de corte.

Otra diferencia es que en este caso no ocurre la contracción inicial de la muestra que se manifestaba en los ensayos de carga controlada al retirar las piezas centrales del molde,

debido a que el desplazamiento es controlado y sólo se permite en la dirección de la tracción. El módulo elástico en tracción (E_t) determinado con la tangente inicial de las curvas de las Figuras 4.19 y 4.20 se presenta en la Figura 4.21 en función de la humedad. Se observa alta dispersión de resultados pero con tendencia a un incremento exponencial del módulo con la reducción de la humedad.

La resistencia a la tracción en función de humedad final se presenta en la Figura 4.22 tanto para los ensayos de deformación controlada como para los de carga controlada. Aunque los datos presentaron bastante dispersión, definen tendencias que se pueden ajustar a curvas de tipo exponencial, en las que los mayores valores de resistencia corresponden a los menores valores de humedad, de manera análoga a lo que sucede con el módulo elástico. En ambos casos las tendencias son similares, pero en los ensayos de deformación controlada algunos valores de resistencia fueron un poco inferiores a los que se obtuvieron en carga controlada.

Las deformaciones correspondientes a las tensiones máximas ocurrieron a valores relativamente altos (entre 1% y 6%) y no mostraron una correlación clara con la humedad. En estos ensayos se obtiene mayor deformación en la tensión pico que en los de carga controlada porque como ya se indicó el sistema de aplicación de carga por ser rígido, impide que se presente contracción lo cual no ocurre en los de carga controlada, donde la contracción inicial es importante.

4.4.3 Relaciones entre resistencia a la tracción y resistencia a la compresión

Los ensayos de compresión en suelos son empleados de forma rutinaria y por esta razón, puede resultar conveniente conocer las relaciones entre la resistencia a la tracción (σ_t) y la resistencia a la compresión (σ_c). Estos resultados se presentan en la Figura 4.23a, donde los datos de compresión simple corresponden a los ensayos que se presentaron en el Capítulo 2, realizados con muestras de la arcilla reconstituida, compactada estáticamente a diferentes humedades y los datos de resistencia a la tracción incluyen tanto los obtenidos en los ensayos en deformación controlada como en carga controlada.

En esta figura los resultados de la resistencia a la compresión y a la tracción también se ajustaron a curvas exponenciales, puesto que para las humedades bajas la resistencia aumenta de manera muy notoria respecto a la que se presenta a humedades altas. En general, la resistencia a la tracción resultó inferior que la resistencia a la compresión, sin embargo, la diferencia entre las dos no fue tan amplia como se esperaba inicialmente, pues los valores de σ_t/σ_c variaron entre 0.4 y 0.7, para humedades entre 60% y 35% respectivamente (Fig. 4.23b). Este resultado al parecer puede explicarse por el papel que cumple la succión en cada caso: en los ensayos de compresión, la succión tiende a reducirse con la deformación y por lo tanto se reducen las tensiones efectivas mientras que en el caso de la tracción ocurre lo contrario.

Farrel et al (1967) en ensayos sobre suelos que presentan una gradación muy amplia, comprendida entre arena gruesa y arcilla, encontraron valores de resistencia a la tracción correspondientes aproximadamente a un 10% de los de resistencia a la compresión ($\sigma_t/\sigma_c = 0.1$), mientras que Law (1987, citado por Abu-Hejleh y Znidarčić, 1995) sugiere que la relación σ_t/σ_c tiene un valor máximo de 0,5. La baja relación reportada por Farrel et al,

respecto a la reportada por Law y a la que se encontró en el presente estudio, seguramente tiene que ver con el tipo de grano, pues como ya se vio, durante la tracción, la succión tiende a aumentar en la zona del plano de rotura y por lo tanto, los meniscos de agua que existen entre las partículas de grano grueso o intermedio, pueden perderse de forma mucho más fácil que en un suelo netamente arcilloso. A partir de evaluaciones del módulo de ruptura, Nichols y Grismer (1997) también deducen que la relación propuesta por Ferrel et al es muy baja.

4.5 Modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas

Como se mostró en la Figura 4.14 existe una relación directa entre la succión actuante y la resistencia a la tracción de la arcilla. Este comportamiento indica que al parecer la succión ejerce un papel similar al de la presión de confinamiento en ensayos de resistencia al corte, en los cuales, de acuerdo con la ecuación de Morh-Coulomb, a mayor presión efectiva de confinamiento mayor es la resistencia. Con base en esto y de manera análoga a lo planteado por Towner (1987a), un ensayo tracción directa realizado en un suelo saturado podría asemejarse al de una prueba de extensión en equipo triaxial, considerando que la succión cumple una función similar a la presión efectiva de confinamiento y la tracción aplicada corresponde a la tensión desviadora.

Siguiendo esta hipótesis, si se adoptan las compresiones como positivas, un ensayo de tracción directa se puede representar en términos de círculos de Mohr como se indica en la Figura 4.24, donde la tensión de confinamiento (σ_c) es cero y la tensión desviadora (σ_d) es negativa, de tal manera que forman un círculo de tensiones totales, ubicado a la izquierda del diagrama. El círculo de tensiones efectivas es del mismo tamaño que el de totales, se ubica a la derecha y la separación entre los dos corresponde al valor de la succión (S).

En términos de la formulación de Lambe, y recordando que $\sigma_c = 0$, las ecuaciones que describen la trayectoria de tensiones totales son:

$$s = \frac{-\sigma_d + \sigma_c}{2} = -\frac{\sigma_d}{2} \quad (4.15)$$

$$t = \frac{-\sigma_d - \sigma_c}{2} = -\frac{\sigma_d}{2} \quad (4.16)$$

Y las de tensiones efectivas:

$$s' = s - u_w = -\frac{\sigma_d}{2} + S \quad (4.17)$$

$$t' = t \quad (4.18)$$

De esta forma, como se muestra en la Figura 4.25, la trayectoria de tensiones totales se puede representar por la línea AB, cuya pendiente es 1:1, mientras que la trayectoria de tensiones efectivas, al estar separada de la de totales por el valor de la succión, sigue una trayectoria que es variable, dependiendo de cómo se modifique la succión durante el ensayo, por ejemplo, si el material parte del punto C, separado de A por una succión inicial (S_0), puede seguir las trayectorias CD, CE, CF u otra trayectoria irregular hasta que finalmente se llega a la

condición de rotura, en cuyo caso la succión es la succión final (S_f) y la tensión desviadora es la resistencia a la tracción ($-\sigma_d = \sigma_t$). La trayectoria de tensiones efectivas seguida entre la succión inicial y la final se puede representar por el ángulo β .

De acuerdo con los resultados de los ensayos de tracción, si se interpolan todos los puntos de rotura determinados para diferentes valores de succión, se obtiene una línea recta que se podría denominar envolvente de resistencia efectiva en tracción, la cual define un ángulo con la horizontal (α'_t) que conceptualmente puede ser similar al ángulo (α) que se obtiene en ensayos de resistencia al corte, aunque como se indica más adelante, su valor es mucho menor y los mecanismos que intervienen no necesariamente son los mismos.

Las trayectorias de tensiones efectivas de los ensayos de tracción en carga controlada realizados en este estudio se presentan en la Figura 4.26 y corresponden a las pruebas A, B, C, D, E, F, G, H e I. En ella se puede observar que la unión de los puntos de rotura define relativamente bien la envolvente cuyo ángulo (α'_t) es de aproximadamente 9° .

Además de las trayectorias de los ensayos de tracción, en la Figura 4.26 se presentan las trayectorias de tensiones efectivas de los ensayos triaxiales de extensión y de compresión que se describieron en el Capítulo 2, sólo que en este caso no se representan en las trayectorias de Cambridge sino en las de Lambe. Todos estos ensayos que se hicieron sobre la misma arcilla reconstituida a diferentes presiones efectivas de confinamiento fueron:

- 6 ensayos de compresión triaxial, consolidados no drenados, con medición de presión de poros, identificados como C-1 a C-6.
- 2 ensayos de compresión triaxial, consolidados drenados, designados como D-1 y D-2.
- 5 ensayos de extensión triaxial, consolidados no drenados, con medición de presión de poros, designados como E-1 a E-5.

A excepción de las pruebas C-5 y C-6, que probablemente sufrieron alguna alteración durante el montaje o la ejecución de la prueba, los demás ensayos de compresión tanto drenados como no drenados presentaron resultados consistentes que permiten definir una envolvente de resistencia (α) de aproximadamente 25° y un intercepto de cohesión nulo. Los ensayos de extensión también presentaron resultados consistentes y definen una envolvente de resistencia de aproximadamente 24° .

Estos ángulos son muy superiores a los de la envolvente de tracción, además, el ángulo de fricción interna obtenido en el ensayo de corte directo residual ($\phi'_{res} = 18^\circ$, Fig. 2.53) que representa un límite inferior de resistencia a grandes deformaciones, también resultó mayor que el que se obtuvo en tracción.

Como ya se indicó anteriormente, los efectos de la succión y de la presión mecánica son iguales cuando el suelo está saturado, esto es válido y ha servido para explicar por ejemplo la equivalencia del valor de la resistencia al corte no drenada, obtenida en ensayos de compresión inconfiada y en ensayos triaxiales no consolidados no drenados (UU) a

diferentes presiones de cámara (concepto de $\phi = 0$), además la equivalencia se ha demostrado en ensayos de compresibilidad (Bligh, 1965) o en ensayos de corte directo (Escario y Sáez, 1986), en los cuales en estados saturado o próximo a saturación, el valor del ángulo de fricción ϕ' (debido a la presión mecánica) es similar al ángulo ϕ^b (debido a la succión).

Con base en esta equivalencia entre la presión de confinamiento y la succión, podría esperarse que las envolventes de tracción y de extensión coincidieran, sin embargo esto no sucede y como ya se vio, la de tracción es muy inferior a la de extensión en equipo triaxial.

Todo esto indica que al parecer los mecanismos de rotura en extensión (con presión mecánica de confinamiento y presión de poros positiva) y en tracción (con presión mecánica de confinamiento nula y presión de poros negativa), aunque presentan similitudes, no son iguales, puesto que en el primer caso se trata de un mecanismo netamente de corte, en el que intervienen tanto la fricción entre partículas como la dilatación, mientras que en el segundo caso, hay un mecanismo combinado de tensión capilar y de corte pero que no se alcanza a desarrollar completamente.

A pesar de estas diferencias, los resultados obtenidos muestran que es posible determinar un ángulo de resistencia a la tracción y que por tal motivo podría ser viable para su análisis la aplicación de un modelo de tipo friccional.

Una justificación para aplicar este tipo de modelo es que a diferencia del modelo capilar, propuesto por Snyder & Miller (1985), en el cual las partículas son teóricamente esféricas y los contactos entre ellas son puntuales, en una arcilla remoldeada los contactos entre partículas involucran áreas relativamente grandes, debido a su estructura conformada por paquetes de láminas superpuestas, de forma tal que al aplicarse tracción, hay unas zonas del material en donde algunas partículas tratan de deslizarse sobre otras, desarrollándose así cierta fricción, que es proporcional a la tensión de confinamiento ejercida por la succión.

El posible mecanismo de rotura por tracción que se presenta en el plano de mayor debilidad, sería el siguiente: inicialmente el material tiene una cierta succión, la cual actúa como presión isotrópica de confinamiento (Figura 4.27a), al aplicársele tracción, los paquetes que conforman las partículas de arcilla tienden a orientarse paralelamente al eje de tracción. Simultáneamente con el incremento de tracción, ocurre desplazamiento relativo de unas partículas respecto a las adyacentes y por lo tanto aumenta la tensión capilar que trata de mantenerlas unidas (Figura 4.27b).

Si la tensión capilar en las zonas donde tratan de separarse las partículas pudiera crecer indefinidamente, la resistencia a la tracción debería ser igual a la succión en ese sitio, sin embargo, como ya se mencionó, la resistencia a la tracción es mucho menor, lo cual implica que justo antes de la rotura, el agua en tracción puede sufrir cavitación local por la presencia de irregularidades geométricas microestructurales que inducen el rompimiento de unos cuantos enlaces entre los paquetes de arcilla, además, la reducción de resistencia también parece estar asociada al eventual fraccionamiento que presentan algunos paquetes individuales de arcilla al sufrir elongación y reducción de su sección transversal (Figura 4.27c), de manera similar a lo indicado por Broek (1987) para explicar el mecanismo de rotura en metales sometidos a tracción pura.

A pesar de que se presente tal fraccionamiento y separación local de partículas, el suelo aún cuenta con cierta resistencia a la tracción que en parte es debida a la tensión capilar media que prevalece en el plano de rotura y en parte es debida a la fricción entre grupos de partículas adyacentes, sin embargo esta fricción no puede desarrollarse totalmente porque a medida que aumentan los desplazamientos, se reducen las superficies de contacto, hasta que finalmente se presenta la rotura completa por tracción. Las superficies de rotura típicas tienen forma de láminas paralelas, con extremos muy angostos que presentan intercalaciones y dan la apariencia de un diente de sierra (Figura 4.27d).

Un aspecto que resulta fundamental es definir si se puede aplicar o no el principio de tensiones efectivas para el análisis de resistencia a la tracción. La respuesta no es totalmente clara puesto que de acuerdo con lo observado en el microscopio y en muestras de laboratorio sometidas a desecación (ver capítulos 6 y 7), globalmente el suelo permanece saturado hasta que se produce la rotura y esto coincide con la mayoría de los modelos propuestos de resistencia a la tracción, sin embargo, al analizar el posible mecanismo de rotura antes descrito, es probable que se produzca cierta desaturación local en algunos puntos del plano de rotura.

Si se considera que la rotura ocurre en un tiempo muy corto y que se desarrolla como un mecanismo progresivo, el hecho de que la desaturación local se presente justo al inicio de este proceso y no antes, podría permitir la aplicación del principio de tensiones efectivas para el análisis de resistencia a la tracción, considerando que en general se mantiene la continuidad de la fase líquida en los poros y que la succión media que prevalece es la responsable del confinamiento necesario para mantener en contacto entre las partículas hasta que ocurre su separación total.

Si esto es así y se acepta además que es posible aplicar un criterio de rotura de tipo friccional, similar al de Mohr-Coulomb, la resistencia a la tracción se puede expresar en términos de la trayectoria de tensiones efectivas (Fig. 4.25) como:

$$\sigma_t = \frac{2S_0 \tan \alpha'_t}{\tan \alpha'_t \cot \beta - 1} = \frac{2S_0 \operatorname{sen} \phi'_t}{\operatorname{sen} \phi'_t \cot \beta - 1} \quad (4.19)$$

En las expresiones anteriores obtenidas por semejanza de triángulos, $\beta > \alpha'_t$, ϕ'_t es el ángulo de resistencia efectiva en tracción y se relaciona con α'_t mediante la expresión $\operatorname{sen} \phi'_t = \tan \alpha'_t$. Los valores numéricos que se obtienen de σ_t son negativos porque tratan de extender el material y como ya se indicó se asume que la compresión es positiva.

Teniendo en cuenta que con los datos actualmente disponibles no se pudo determinar un criterio razonable de variación de β para los diferentes valores de succión inicial, una primera aproximación sería asumir $\beta = 90^\circ$, pues esta es una trayectoria vertical que representa de cierta manera un valor medio de las trayectorias observadas en los ensayos. Si se adopta esta trayectoria, la resistencia a la tracción, a partir de (4.19) estaría dada por:

$$\sigma_{t_{90}} = -2S_0 \tan \alpha'_t = -2S_0 \operatorname{sen} \phi'_t \quad (4.20)$$

En una condición de retracción, sin deformación lateral, el valor de β está dado por la línea K_0 , que en el espacio s-t corresponde a:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1 - k_0}{1 + k_0} \right) \quad (4.21)$$

El valor de K_0 que se midió en el ensayo de compresión sin deformación radial fue $K_0 = 0.496$, este valor es inferior al que obtendría con la expresión $k_0 = 1 - \text{sen}\phi'$, pues en este caso, con $\phi' = 25^\circ$, $K_0 = 0.577$.

Adoptando el K_0 medido de 0.496, se obtiene $\beta = 18.6^\circ$. Este valor de β es muy inferior al que se determinó en los ensayos de tracción, posiblemente porque en tales ensayos sí ocurrió deformación lateral y porque como ya se indicó, la succión en el propio plano de rotura puede ser superior a la succión media que se determina con el tensiómetro. Se ve aquí que si la succión real es superior a la succión medida, el ángulo de la envolvente de resistencia real (α'_i) es menor que el calculado, de ahí la importancia de registrar la variación de la succión lo más cerca posible del plano de rotura para conocer la verdadera trayectoria (β).

En la Figura 4.28 se presentan los valores de resistencia a la tracción estimada para $\beta = 18.6^\circ$ (ecuación 4.19) y para $\beta = 90^\circ$ (ecuación 4.20), en ambos casos adoptando un ángulo $\alpha'_i = 9^\circ$. Se aprecia en esta figura que las estimaciones hechas con $\beta = 90^\circ$ se ajustan razonablemente a los valores medidos, mientras que con $\beta = 18.6^\circ$ los valores estimados son cercanos al doble de los medidos.

Si la succión real en el plano de rotura es mayor que la succión medida, es decir si el material sigue por ejemplo la trayectoria K_0 , con $\beta = 18.6^\circ$, entonces la envolvente de resistencia se reduce de 9° a 6° aproximadamente. Esto se puede ver en la Figura 4.29 donde es claro el ajuste entre los valores medidos y los calculados para $\alpha'_i = 6^\circ$ y $\beta = 18.6^\circ$. Con estos valores de α'_i entre 6° y 9° se acota la probable variabilidad de la envolvente efectiva de resistencia a tracción en el intervalo de succiones estudiado.

4.6 Criterio de inicio de grietas basado en el modelo de resistencia a la tracción

Como se vio en el capítulo 3, los modelos de agrietamiento de suelos por desecación como el de Abu-Helejh y Znidarčić (1995) o el de Konrad et al (1997a), consideran que las grietas se inician en condición de suelo saturado, cuando $\sigma_h = -\sigma_t$, es decir que el criterio de rotura se basa en tensiones totales y posteriormente se asocia este resultado con la trayectoria de tensiones efectivas.

Con el modelo de resistencia a la tracción que aquí se presenta, la condición de rotura se determina directamente en tensiones efectivas, que son las que realmente gobiernan el proceso, y a partir de esto se puede determinar la succión final y la correspondiente resistencia a la tracción. Este cambio conceptual es importante porque con los modelos disponibles se

parte de un valor fijo de resistencia a la tracción que ha sido medido para una cierta succión, que no necesariamente coincide con la succión final a la cual ocurre el agrietamiento, puesto que como se vio esta ésta depende de las trayectorias de tensiones seguidas.

En un diagrama de Lambe el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas se puede introducir directamente como se presenta por ejemplo en la Figura 4.31a, donde se muestra el esquema de trayectorias seguidas en un proceso de retracción unidimensional, para una condición de $\sigma_v = 0$. En este caso el suelo está inicialmente en el punto A, con cierta succión (S_0), la trayectoria de tensiones efectivas sigue la línea Ko (línea A-B) y forma con la horizontal un ángulo β dado por (4.21). Cuando esta trayectoria se toca en el punto B con la envolvente de resistencia que tiene un ángulo α'_t , se produce la rotura (criterio de rotura en tensiones efectivas). A partir de este punto, tal como lo plantean los modelos, se puede determinar la succión final o crítica (S_f) que corresponde a la distancia B-C. El punto C se determina mediante la intersección entre una línea horizontal trazada desde B y la trayectoria de tensiones totales y conocido C se puede determinar la resistencia a la tracción, en el punto D, trazando la línea C-D, que tiene una pendiente de 1:1. Analíticamente el valor de σ_t se puede determinar con (4.19) y por semejanza de triángulos se puede obtener la succión final, que estaría dada por:

$$S_f = S_0 + \frac{\sigma_t}{2}(1 + \cot \beta) \quad (4.22)$$

Si se considera ahora una situación de desecación en donde el suelo parte de un estado semifluido o lodo y está sometido a una tensión vertical constante, la trayectoria de tensiones es como se muestra en la Figura 4.31b. Al principio del proceso las tensiones efectivas que actúan sobre el lodo son cero porque toda la tensión la asume el agua, por lo tanto la trayectoria de tensiones efectivas parte del punto O, mientras que la trayectoria de tensiones totales parte del punto A. La distancia O-A es igual a la presión de poros e igual a la tensión vertical.

En los tramos A-E (en tensiones totales) y O-E (en tensiones efectivas) ocurre la consolidación unidimensional del suelo, con presiones de agua positivas y tensiones horizontales también positivas o de compresión, que se van reduciendo gradualmente. A partir del punto E se inicia la desecación porque las presiones de agua comienzan a volverse negativas, sin embargo las tensiones horizontales (totales) aún son positivas hasta el punto P, donde se hacen cero porque la trayectoria de tensiones totales toca la línea $\sigma_h = 0$.

El proceso de desecación continúa y la tensión horizontal se hace cada vez más negativa hasta que alcanza la resistencia máxima en el punto C. Igual que en el caso anterior, la posición de este punto depende de la trayectoria de tensiones efectivas y del ángulo α'_t , por lo tanto se debe encontrar primero la resistencia a la tracción en tensiones efectivas que se presenta en el punto B, dado por la intersección entre la trayectoria de tensiones efectivas y la envolvente de resistencia en tracción. En este caso el origen de la envolvente se debe ubicar en el punto P, pues es a partir de ese punto donde las tensiones horizontales comienzan a ser de tracción.

4.7 Conclusiones

- Los estudios de tracción presentan dos enfoques. El primero de ellos se basa en la determinación indirecta de la resistencia a la tracción a partir de parámetros de resistencia al corte y el segundo en la determinación directa de la resistencia a la tracción en tensiones totales.
- En este estudio se realizaron determinaciones directas de resistencia a la tracción mediante ensayos de carga controlada y de deformación controlada. En el primer caso se adecuó un equipo al que se le instaló un LVDT para medir deformaciones directamente sobre la muestra y un tensiómetro de respuesta rápida (Tensiómetro del Imperial College), para medir la variación de la succión con los incrementos de carga. Los ensayos de deformación controlada se hicieron en un molde especialmente construido para acoplarlo a una máquina de corte directo, con la que se aplicaba un desplazamiento a velocidad constante. En este caso también se midieron las deformaciones con un LVDT instalado directamente sobre la muestra y variaciones de carga con una celda de carga de alta sensibilidad.
- En los ensayos realizados se pudo verificar que la tensión de tracción, la deformación y la succión son tres variables íntimamente acopladas, que a su vez dependen de los cambios de humedad. Debido a este hecho, el suelo tiende a presentar un comportamiento relativamente rígido cuando experimenta tensiones de tracción, ya que éstas tienden a separar unas partículas de las otras, pero tal separación induce a su vez un aumento en la succión, que causa un efecto contrario, es decir, que tiende a reunir nuevamente las partículas, dando como resultado una deformación neta muy baja. Después de cierto valor de carga el comportamiento se hace menos rígido.
- En los ensayos de carga controlada la rotura se presentó de manera súbita y a muy baja deformación, mientras que en los de deformación controlada la rotura fue gradual y los picos de resistencia ocurrieron a deformaciones superiores a los que se obtuvieron en los ensayos de carga controlada.
- Al comparar los valores de resistencia a la tracción con los de resistencia a la compresión simple, se encontró que su magnitud no siempre es despreciable, ya que para humedades altas ($w \approx 60\%$), la resistencia a la tracción puede llegar a ser hasta un 40% de la resistencia a la compresión y para humedades medias ($w \approx 40\%$), hasta un 70%. Tanto en compresión como en tracción, la resistencia se reduce exponencialmente con el aumento de la humedad.
- Con base en los resultados de los ensayos de tracción con mediada de succión se propone un modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas que guarda cierta similitud con los modelos de resistencia al corte de tipo Mohr-Coulomb. De acuerdo con el modelo propuesto, el suelo presenta un ángulo efectivo de resistencia a la tracción (ϕ'_t) y la resistencia máxima alcanzada en tracción depende de la succión inicial y de la trayectoria de tensiones efectivas que se siga hasta tocar tal envolvente. Los resultados mostraron que ϕ'_t es bastante menor que ϕ' determinado en ensayos triaxiales tanto de compresión como de extensión.

- El mecanismo de rotura propuesto considera que entre las partículas laminares de arcilla tiende a presentarse fricción, cuando éstas tratan de desplazarse unas respecto a las otras por efecto de las fuerzas de tracción actuantes. En este caso la succión actúa como tensión de confinamiento pero debido a irregularidades o microagrietamientos puede perderse su continuidad y por esta razón la resistencia es menor que en un ensayo de corte, además, a medida que aumenta la deformación disminuye el área efectiva de contacto entre partículas o grupos de partículas y esto también reduce la resistencia.
- A partir del modelo propuesto se plantea un procedimiento para determinar las condiciones de inicio de agrietamiento en un proceso de retracción unidimensional como el planteado por Abu-Hejleh y Znidarčić (1995), pero en este caso se considera que la rotura en tracción no está definida en tensiones totales, como lo plantea el modelo original, sino en tensiones efectivas, lo cual constituye un cambio conceptual importante en la formulación.

| ENSAYO | w_o (%) | w_f (%) | S_o (kPa) | S_f (kPa) | ΔS (kPa) | $\Delta S/S_o$ (%) | Def final (%) | σ_t (kPa) |
|--------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| A | 64,0 | 62,8 | 37 | 37,04 | 0,04 | 0,11 | 0,68 | 5,68 |
| B | 60,8 | 60,0 | 46 | 57,2 | 11,2 | 24,35 | 0,38 | 19,5 |
| C | 57,1 | 56,6 | 64 | 66,7 | 2,7 | 4,22 | 0,162 | 20,2 |
| D | 56,2 | 55,3 | 65 | 70,8 | 5,8 | 8,92 | -0,01 | 25,6 |
| E | 41,0 | 40,3 | 81 | 114,2 | 33,2 | 40,99 | 0,058 | 40,2 |
| F | 52,1 | 51,2 | 103 | 105,3 | 2,3 | 2,23 | 0,652 | 28,51 |
| G | 41,1 | 40,5 | 115 | 147,2 | 32,2 | 28,00 | 0,024 | 34,3 |
| H | 42,2 | 41,1 | 138 | 144,8 | 6,8 | 4,93 | 0,228 | 45,8 |
| I | 38,0 | 37,2 | 180 | 187,8 | 7,8 | 4,33 | 0,132 | 48,2 |

Tabla 4.1 Datos resumen de los ensayos de tracción en carga controlada con medida de succión.

| Ensayo | w_o (%) | w_f (%) | Def.pico (%) | σ_t (kPa) |
|--------|-----------|-----------|-----------------|------------------|
| a | 40,9 | 40,0 | 1,6 | 40,0 |
| b | 46,0 | 45,5 | 3,5 | 36,5 |
| c | 45,8 | 45,3 | 1,8 | 32,4 |
| d | 46,2 | 45,8 | 1,8 | 32,9 |
| e | 45,7 | 44,9 | 3,1 | 30,4 |
| f | 44,8 | 43,9 | 6,0 | 27,0 |
| g | 51,2 | 50,8 | 3,6 | 17,9 |
| h | 50,4 | 49,9 | 3,5 | 15,0 |
| i | 57,0 | 56,6 | 0,8 | 17,6 |
| j | 59,1 | 58,5 | 1,2 | 11,9 |
| k | 64,1 | 63,5 | 2,8 | 8,0 |

Tabla 4.2 Datos resumen de los ensayos de tracción en deformación controlada.

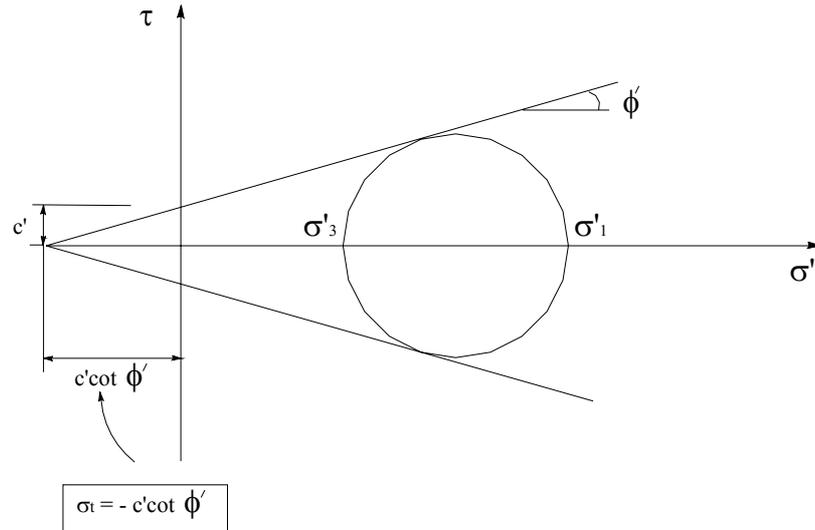


Figura 4.1 Representación de la resistencia a la tracción en función de la cohesión y el ángulo de resistencia al corte de Mohr-Coulomb.

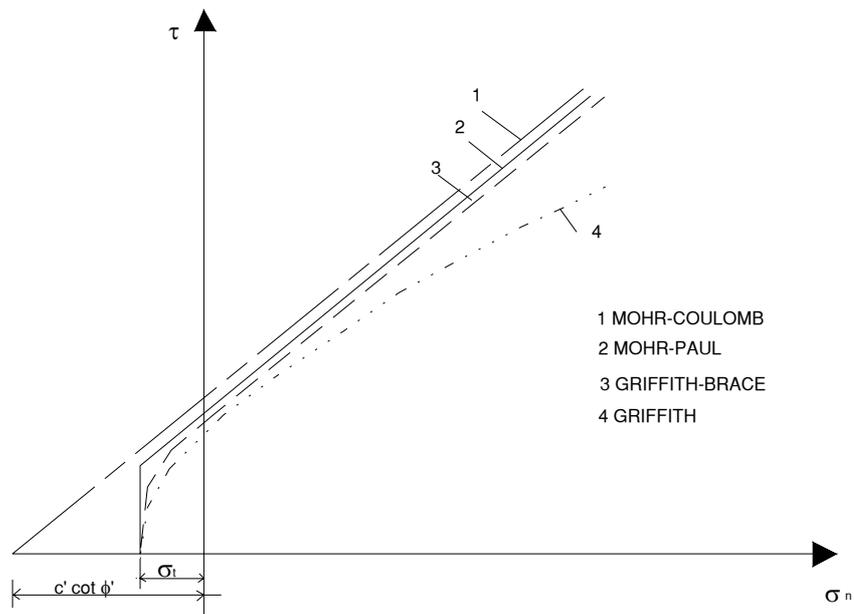


Figura 4.2 Resistencia a la tracción a partir de envolventes de resistencia en compresión (de Lee & Ingles: en Morris et al, 1992).

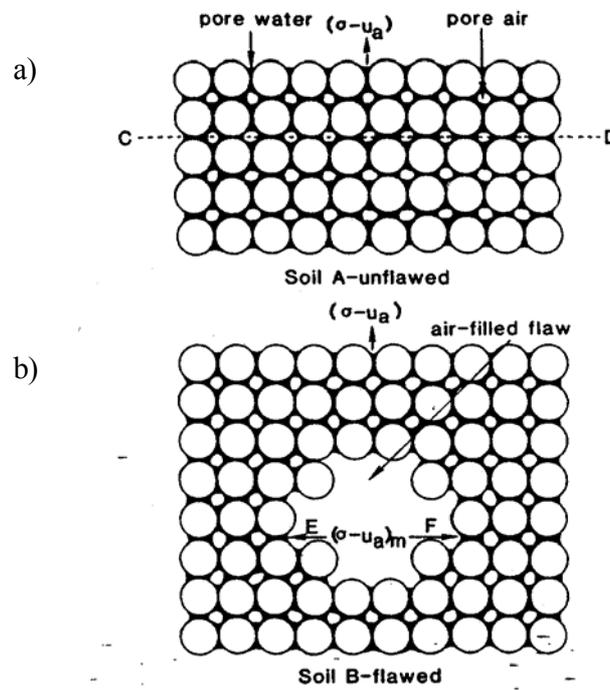


Figura 4.3 a) modelo capilar sin oquedades ni grietas, b) con oquedades (de Snyder & Miller, 1985).

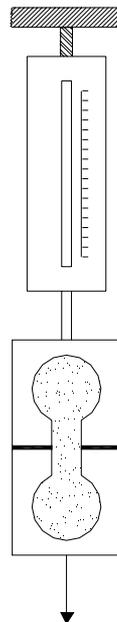
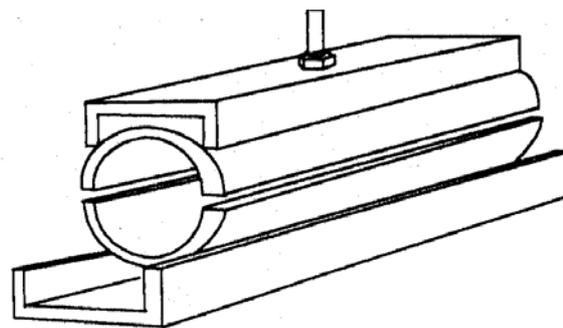
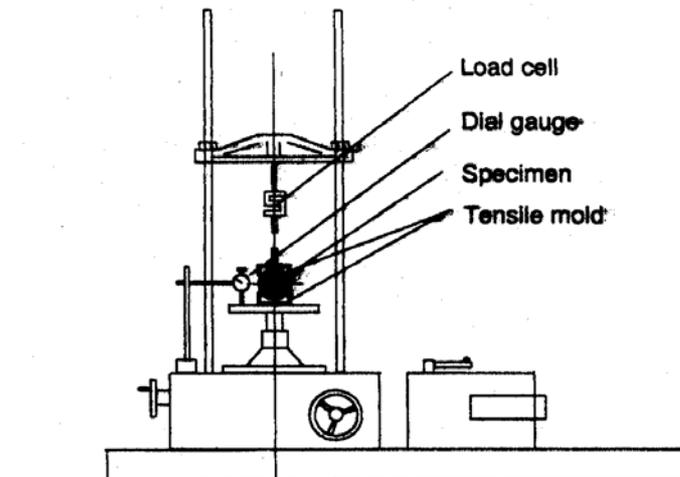


Figura 4.4 Equipo de medición de resistencia a la tracción usado por Towner (1987b).



—Oblique view of tensile mold.



—Side view of tensile mold and load frame.

Figura 4.5 Equipo de medición de resistencia a la tracción usado por Tang y Graham (2000).

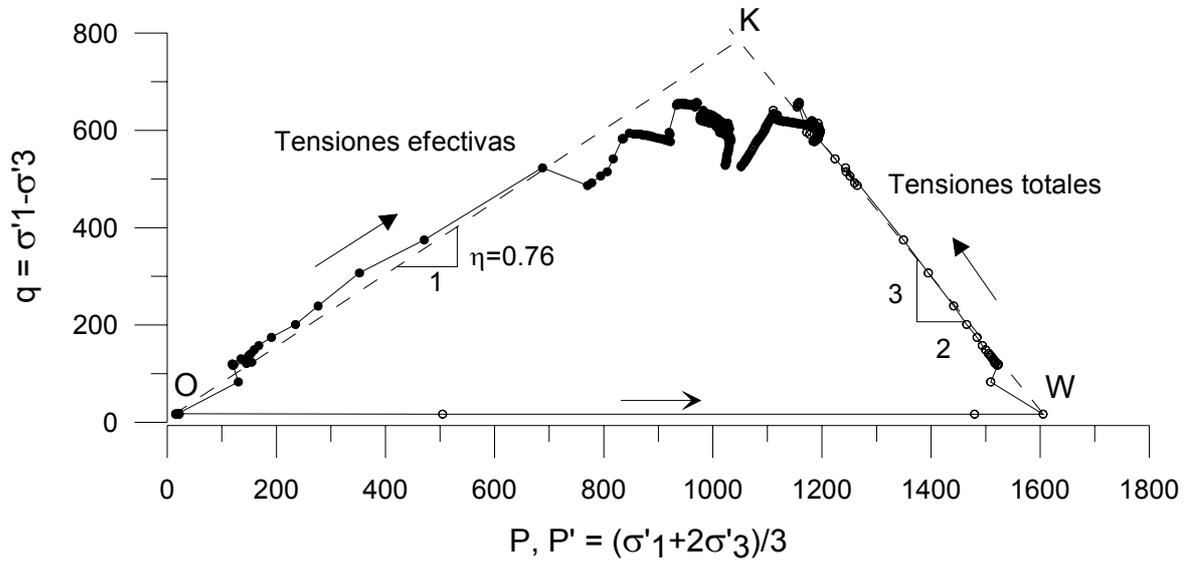


Figura 4.6 Trayectoria seguida en ensayo de compresión K_0 en equipo triaxial sobre la arcilla de Bogotá.

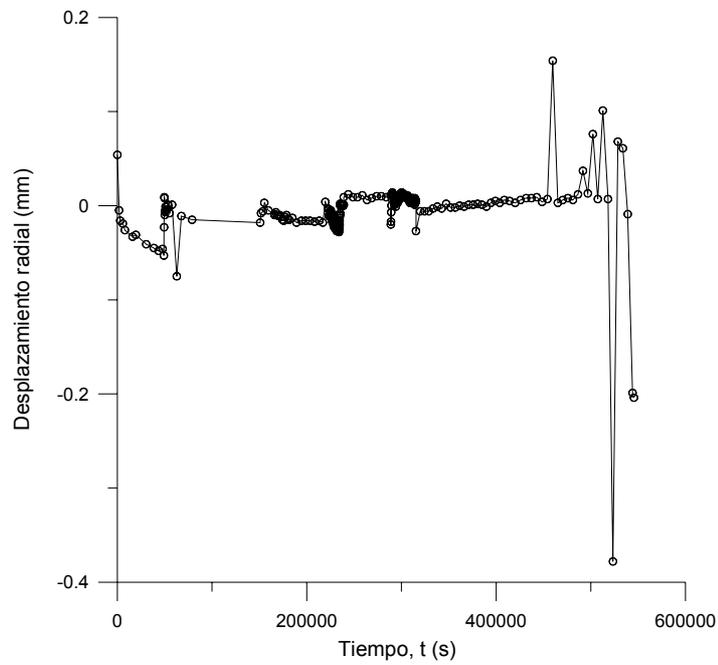


Figura 4.7 Variación de la lectura de desplazamiento radial durante el ensayo de compresión K_0 en equipo triaxial.

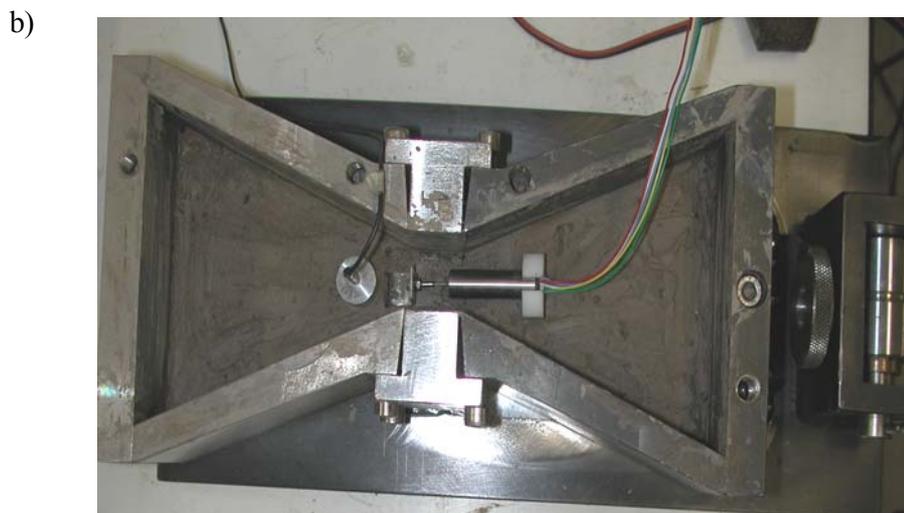
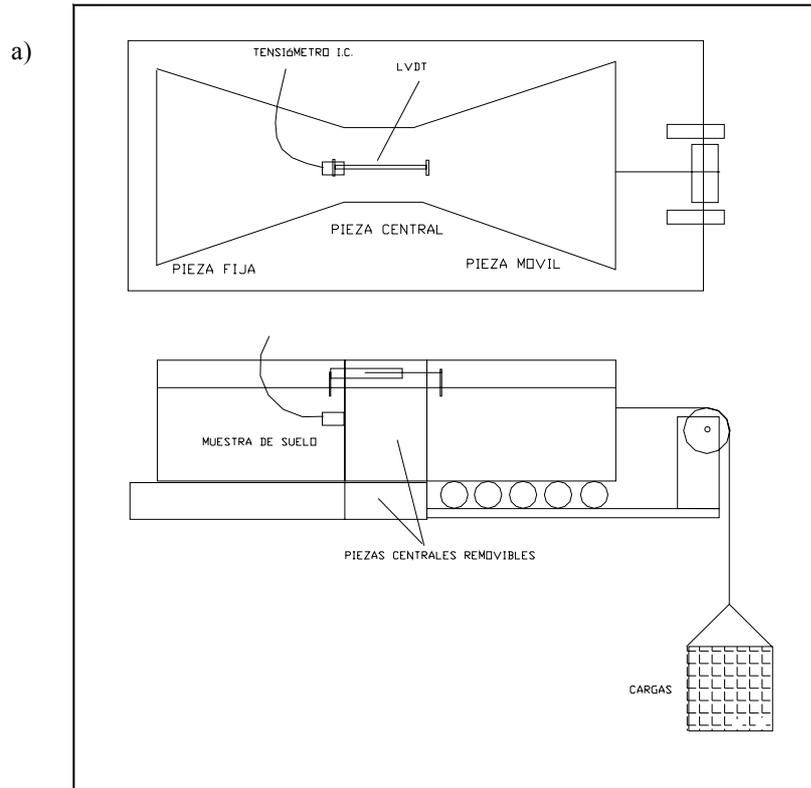


Figura 4.8 Equipo para ensayo de tracción directa en carga controlada, con medida de deformación y succión. a) esquema general del montaje, b) detalle del molde y la instrumentación.

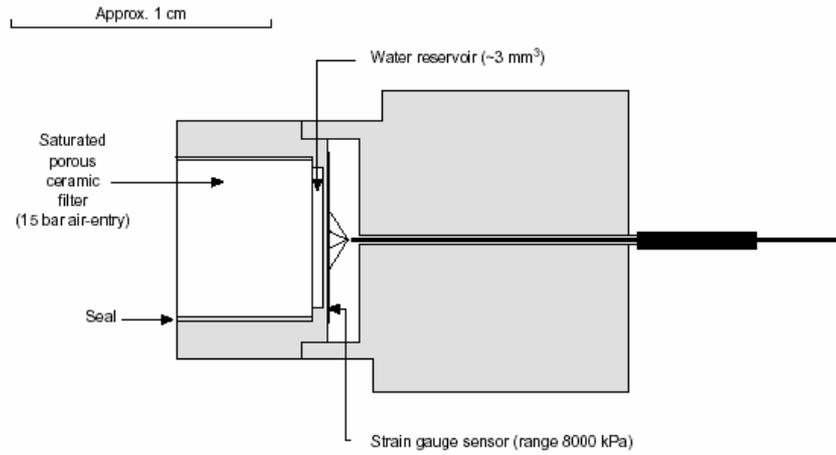


Figura 4.9 Esquema del tensiómetro del Imperial College (Ridley y Burland, 1996).

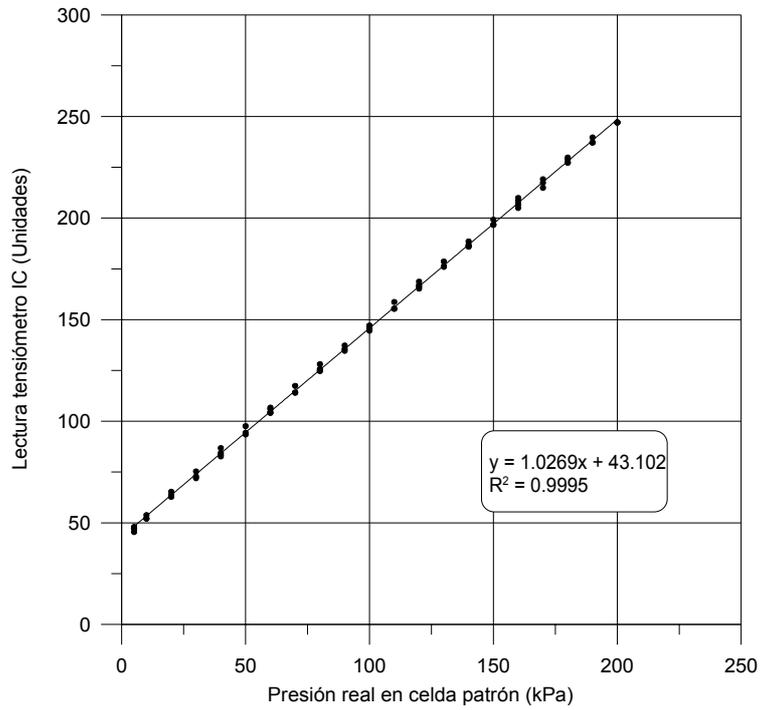


Figura 4.10 Calibración del tensiómetro del IC en el rango de 0 a 200 kPa.



Figura 4.11 Equipo para ensayo de tracción a deformación controlada con medida de carga y deformación adaptado en una máquina de corte directo: a) vista lateral del equipo, b) vista superior del equipo, c) detalle de la muestra en la rotura.

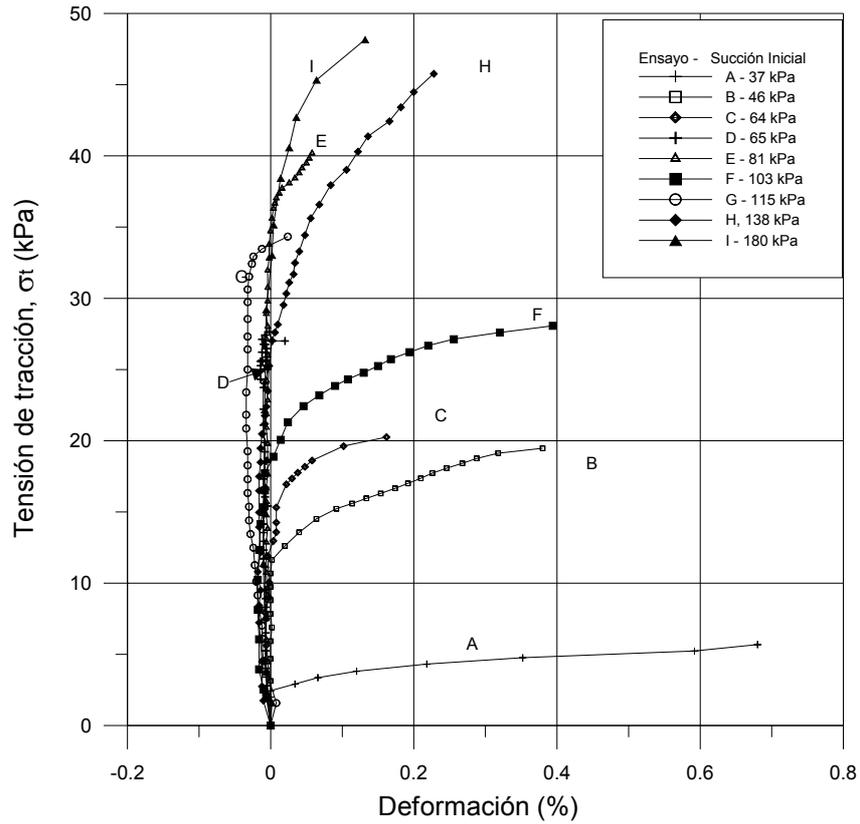


Figura 4.12 Curvas de deformación – tensión de tracción para diferentes condiciones iniciales de succión (ensayo de tracción en carga controlada).

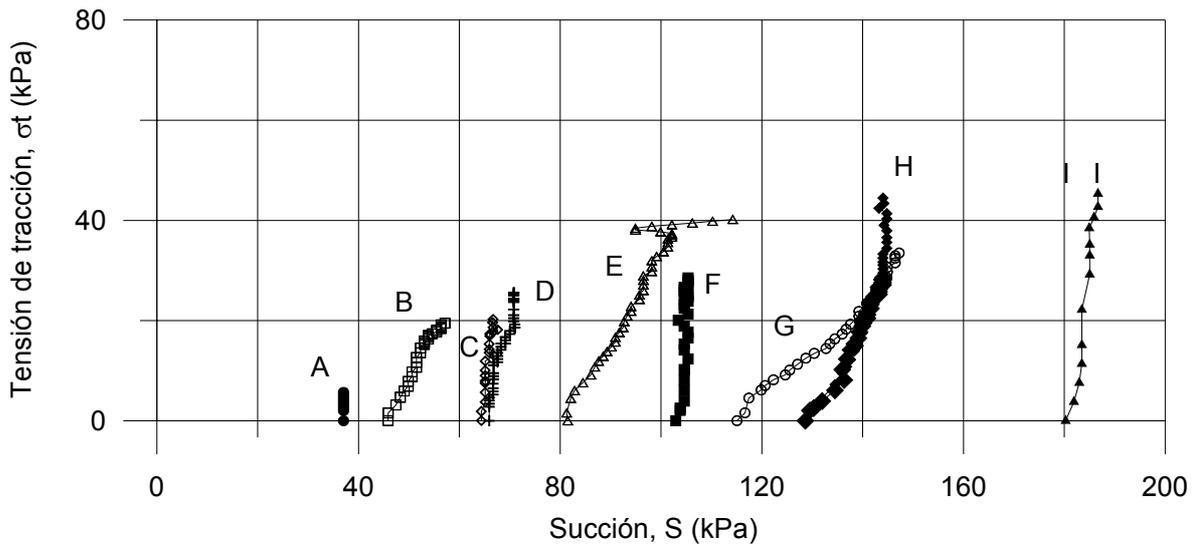


Figura 4.13 Curvas de succión – tensión de tracción (ensayo de tracción en carga controlada).

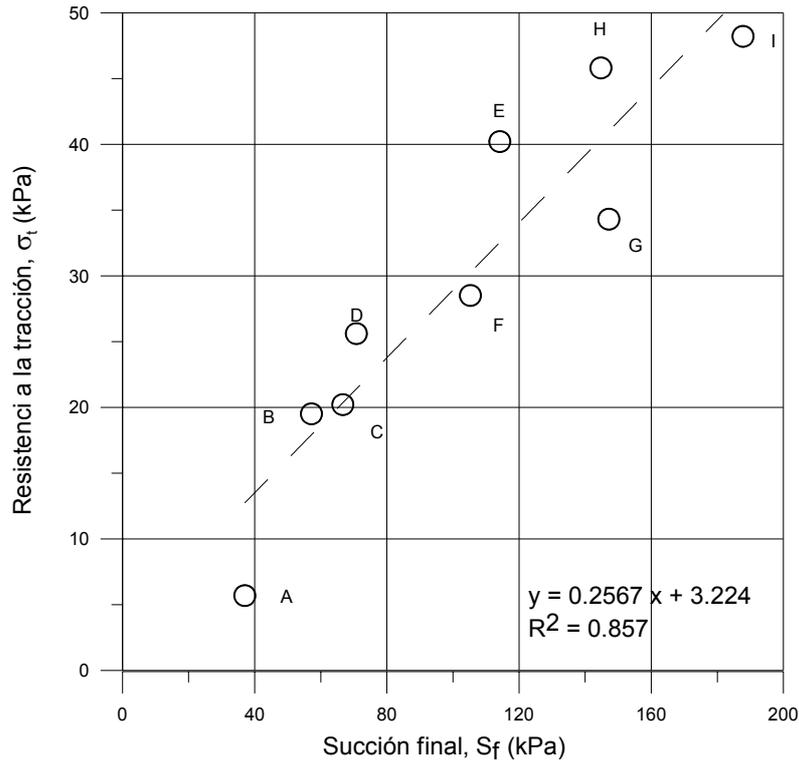


Figura 4.14 Resistencia a la tracción en función de la succión final en ensayos de tracción en carga controlada.

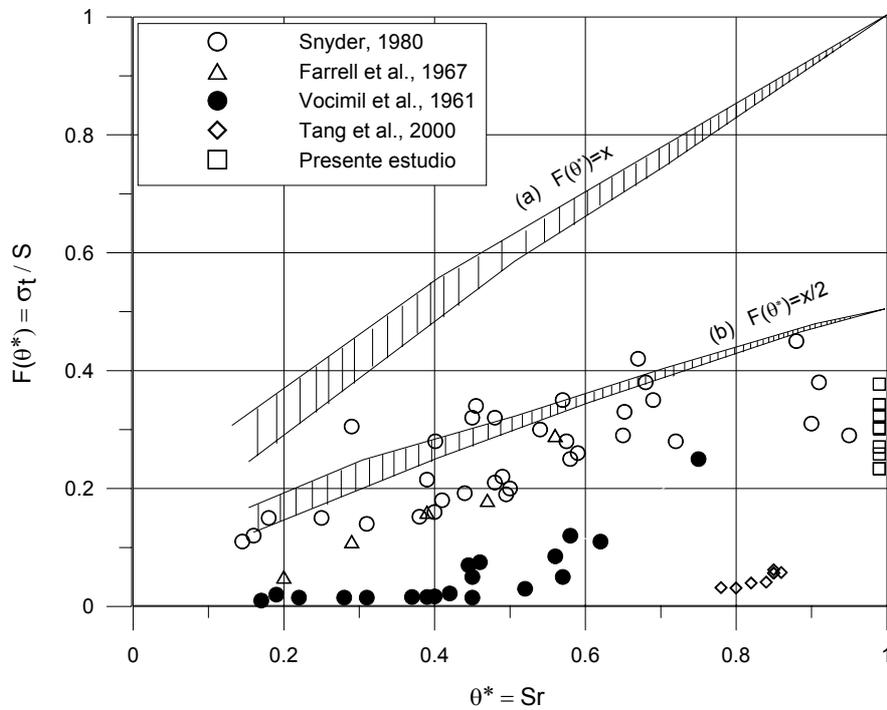


Figura 4.15 Comparación de datos de resistencia a la tracción en función de la succión (S) y del grado de saturación (Sr) e intervalos teóricos de variación según el modelo de Snyder y Miller (Snyder y Miller, 1985).

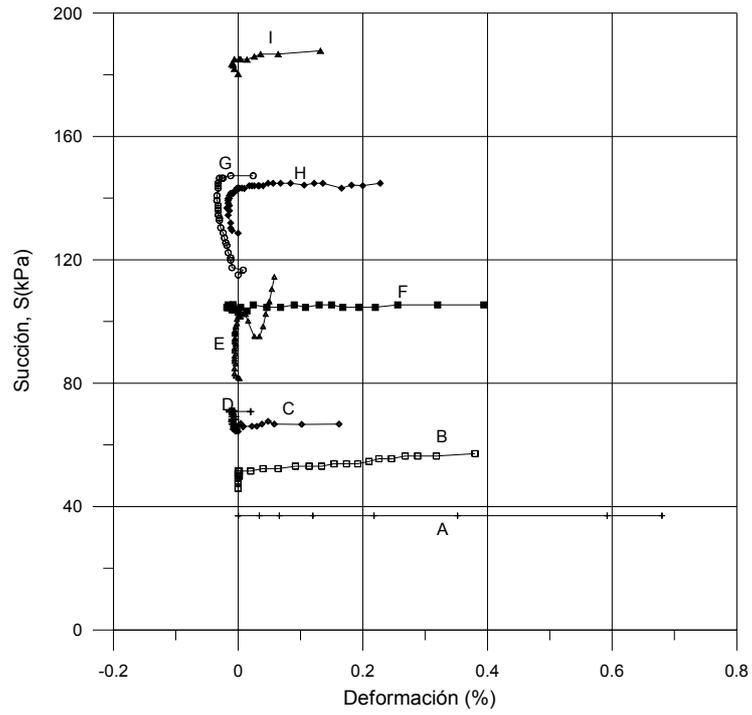


Figura 4.16 Curvas de deformación - succión (ensayo de tracción en carga controlada).

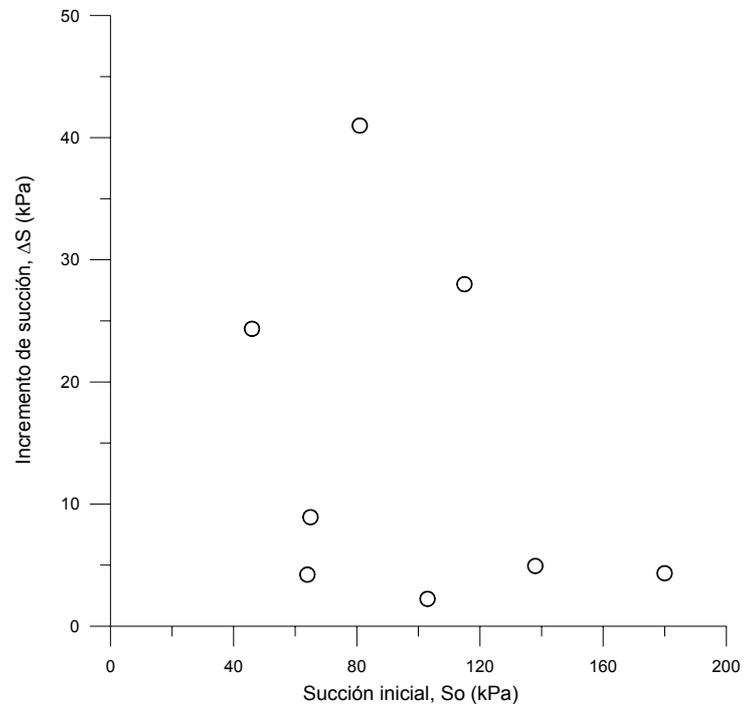


Figura 4.17 Incremento irregular de la succión respecto a la succión inicial (ensayos de tracción en carga controlada).

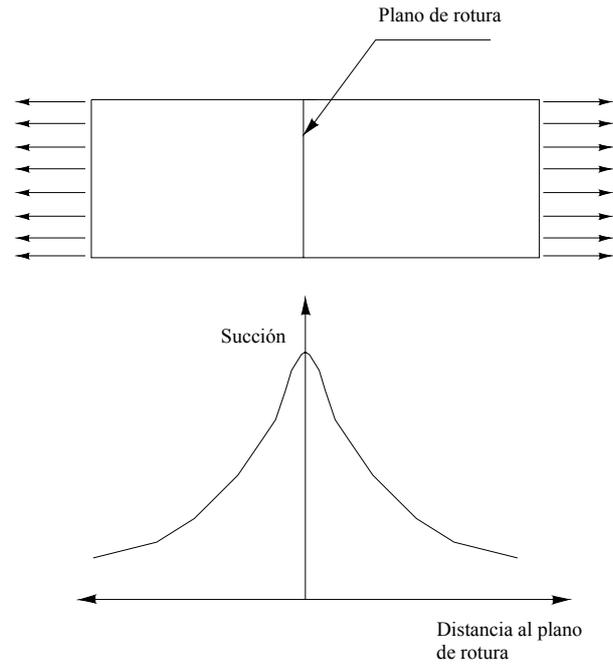


Figura 4.18 Esquema de una probable distribución de los incrementos de succión respecto al plano de rotura por tracción.

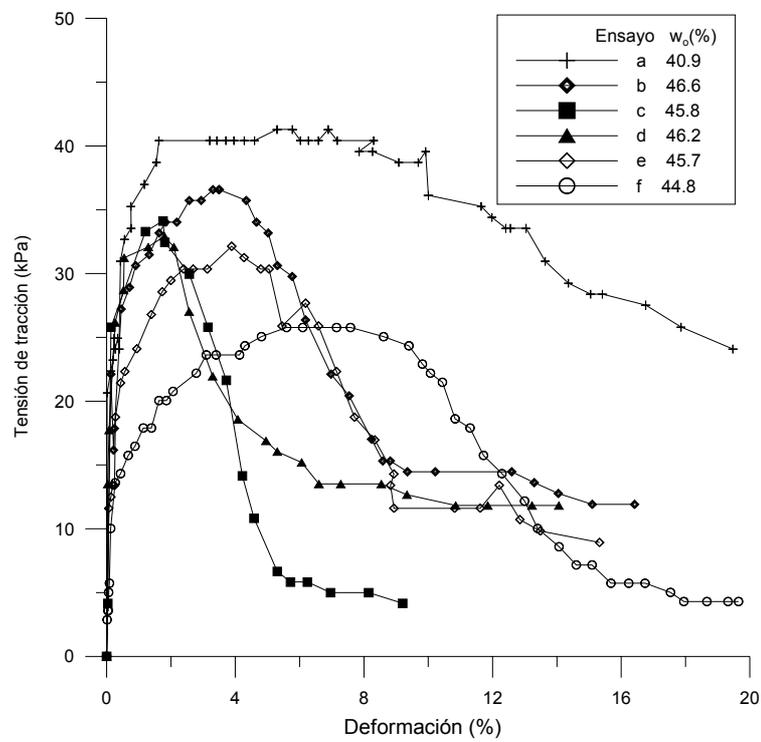


Figura 4.19 Curvas de tensión – deformación de los ensayos (a) hasta (f) en tracción a deformación controlada.

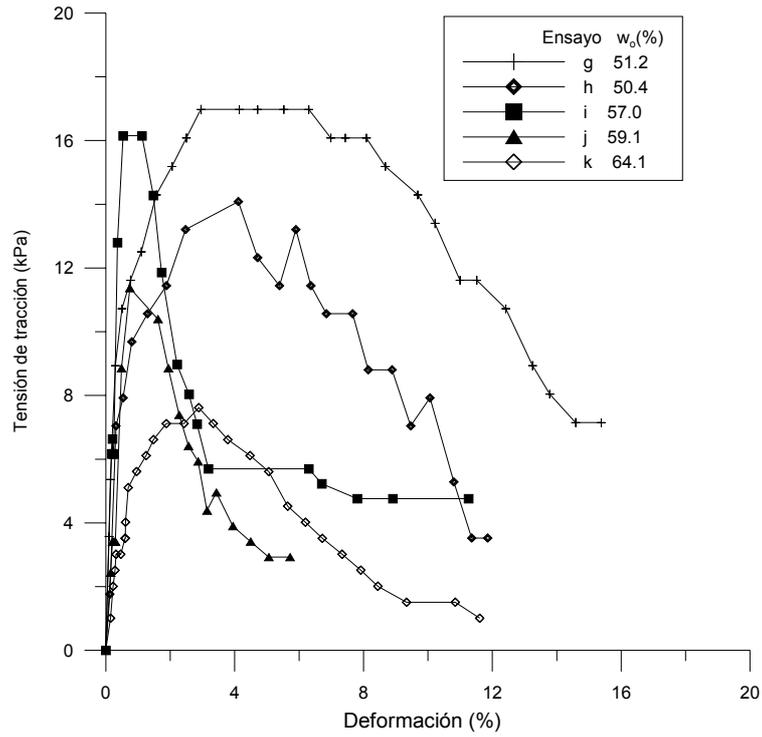


Figura 4.20 Curvas de tensión – deformación de los ensayos (g) hasta (k) en tracción a deformación controlada.

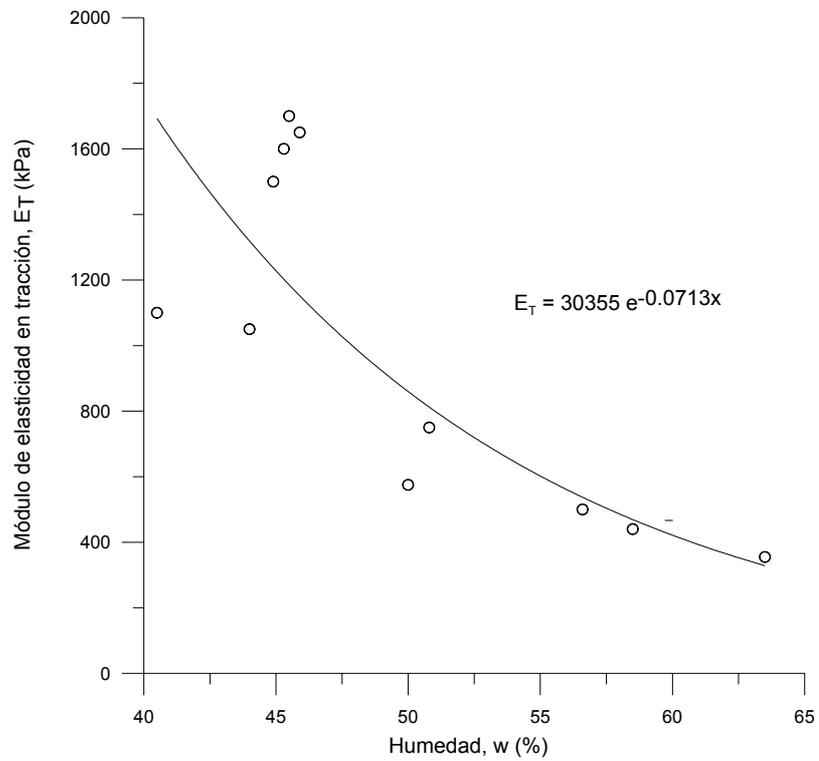


Figura 4.21 Módulo de elasticidad en tracción en función de la humedad.

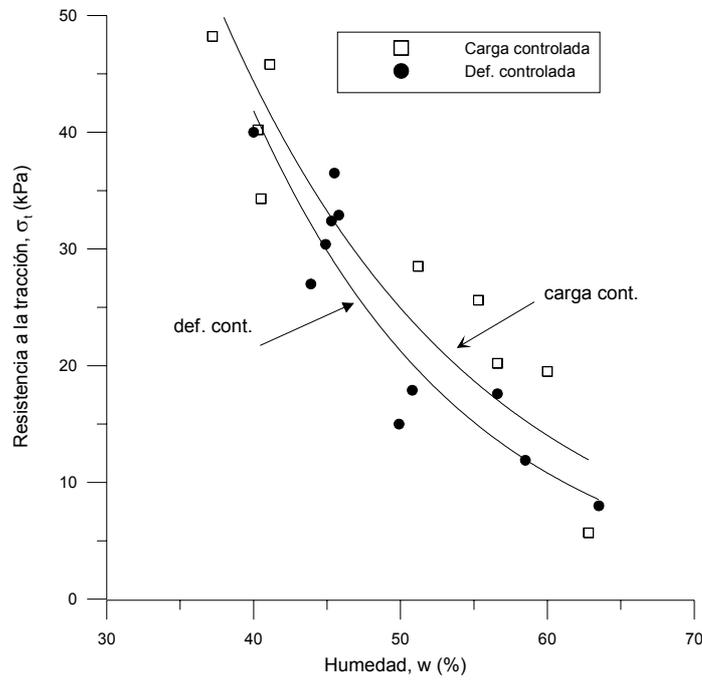


Figura 4.22 Comparación de resultados de resistencia a la tracción en función de la humedad, obtenidos en ensayos de carga controlada y de deformación controlada.

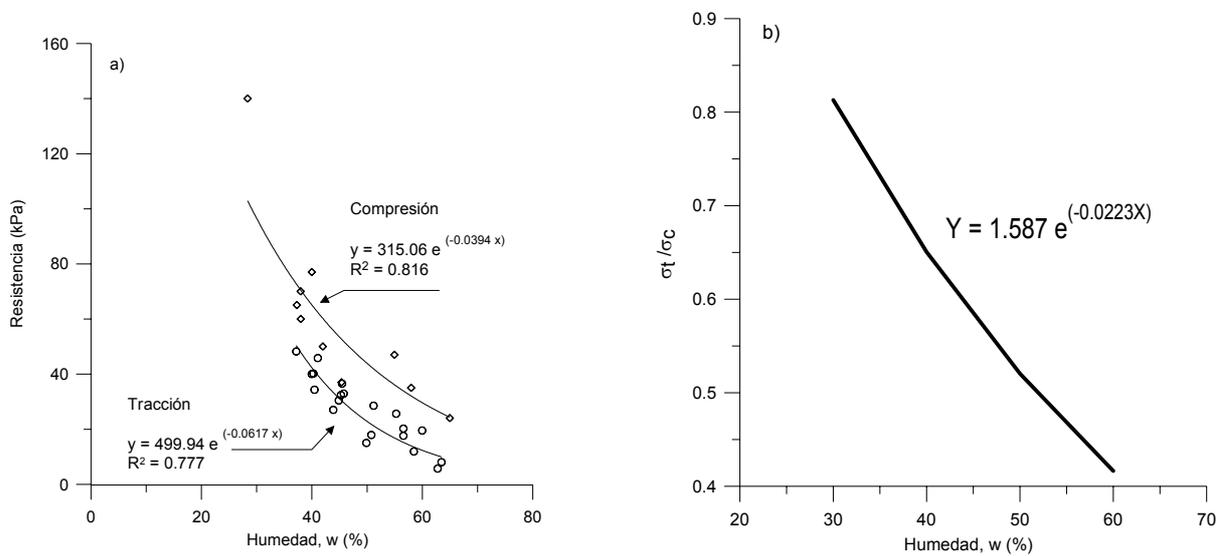


Figura 4.23 a) Comparación entre resultados de resistencia a la compresión simple y resistencia a la tracción para diferentes humedades b) variación de la relación σ_t / σ_c en función de la humedad.

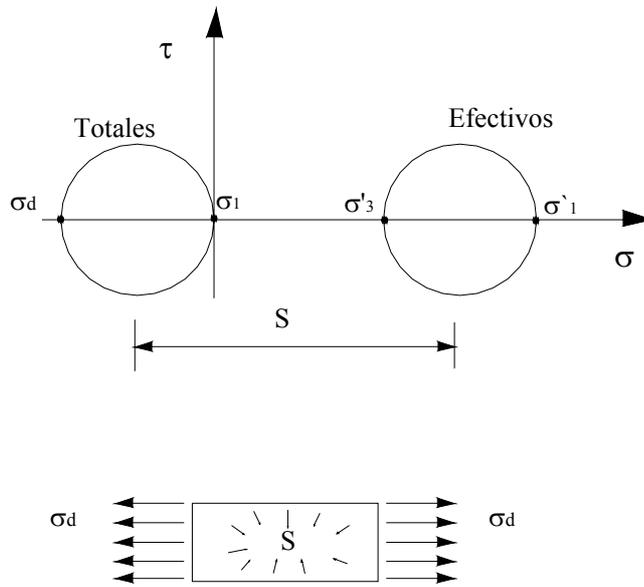


Figura 4.24 Representación en círculos de Morh de las condiciones de tensión en el ensayo de tracción.

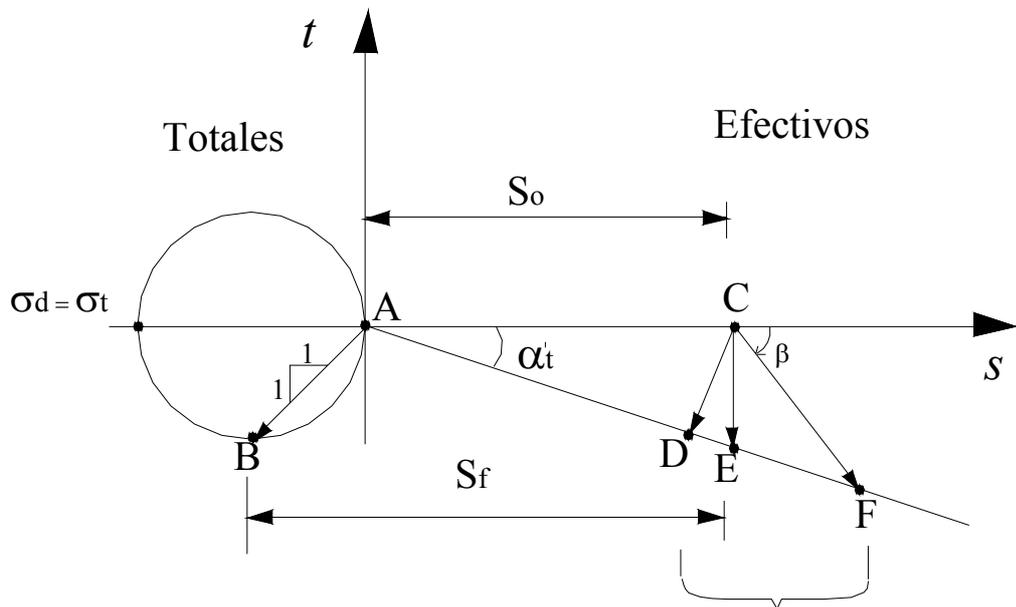
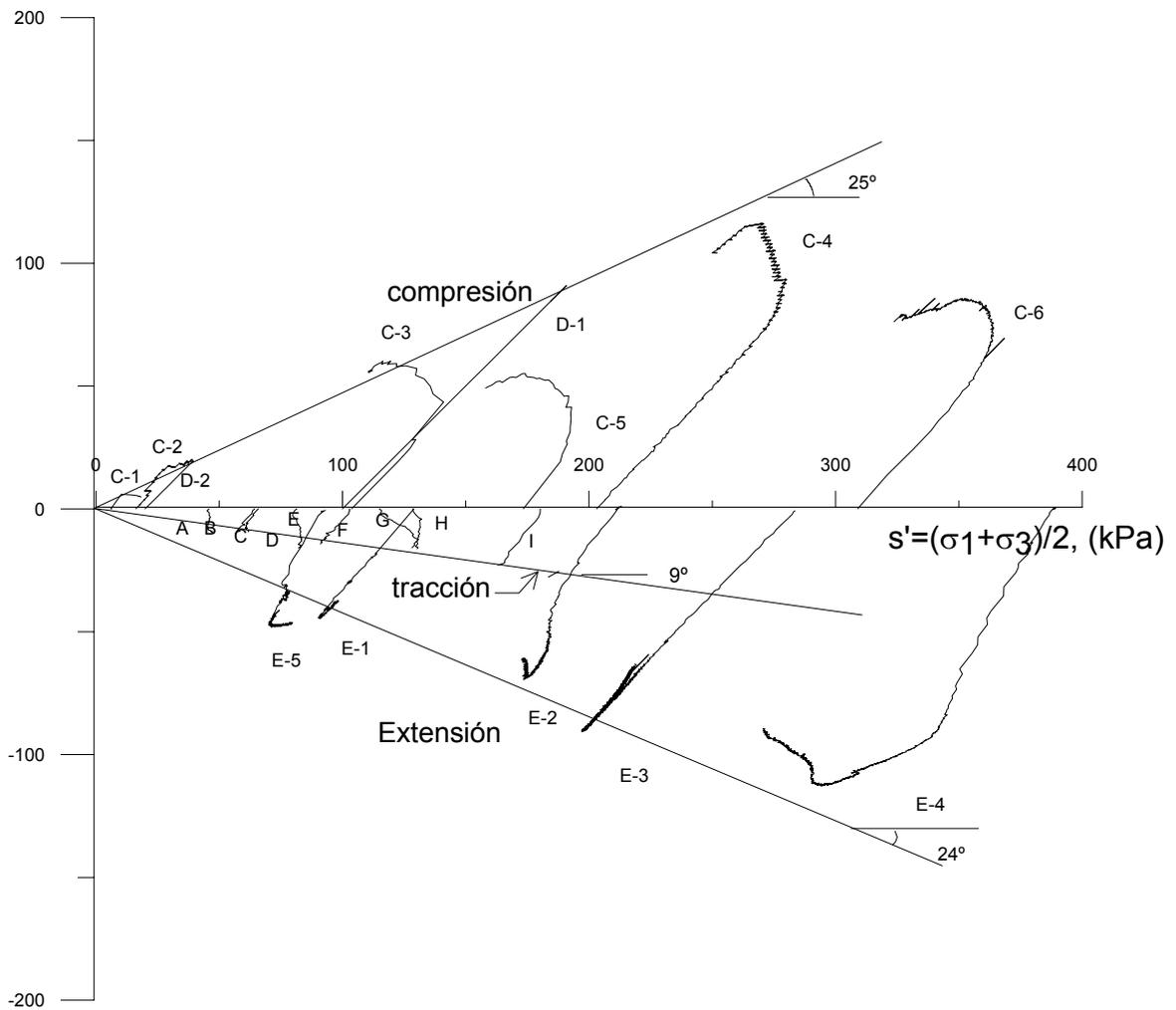


Figura 4.25 Esquema de las trayectorias totales y efectivas en un ensayo de tracción directa con medición de succión.

$$t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \text{ (kPa)}$$



Nota:

- A a I Tracción directa en carga controlada
- E-1 a E-5 No drenados de extensión en equipo triaxial
- C-1 a C-6 No drenados de compresión en equipo triaxial
- D-1 y D-2 Drenados de compresión en equipo triaxial

Figura 4.26 Comparación entre trayectorias de tensiones obtenidas en ensayos de tracción directa y de compresión y extensión en equipo triaxial.

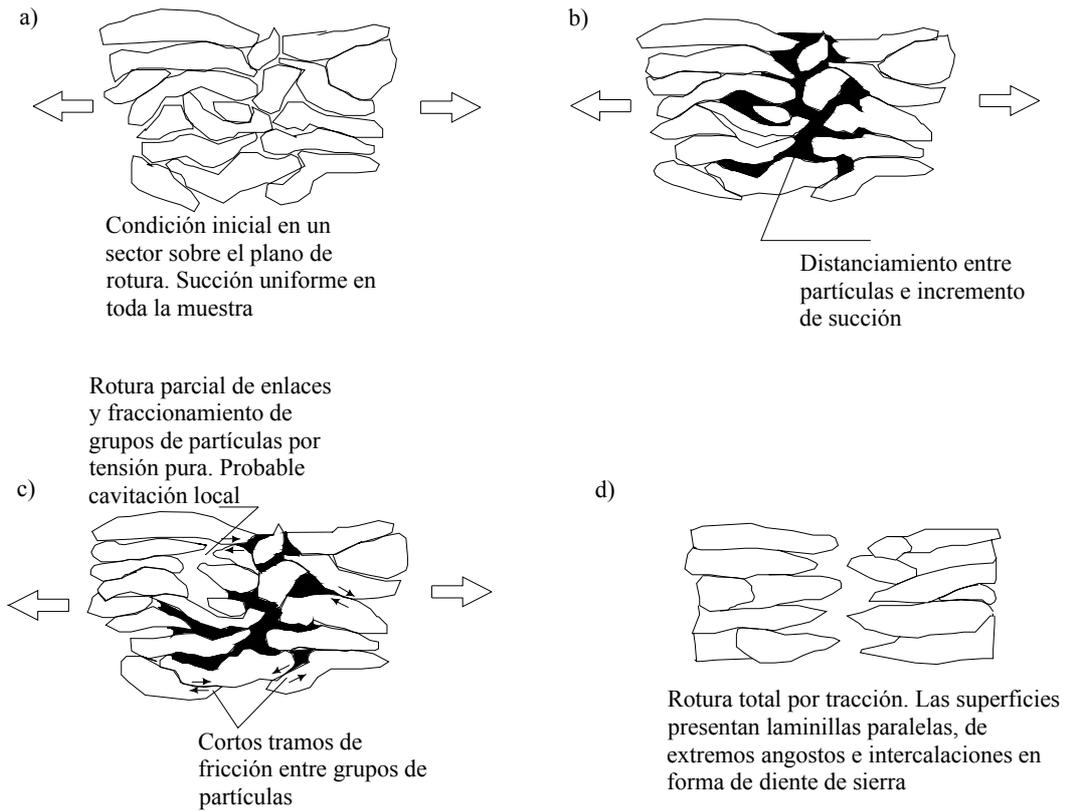


Figura 4.27 Esquema de las etapas que se presentan durante la rotura por tracción.

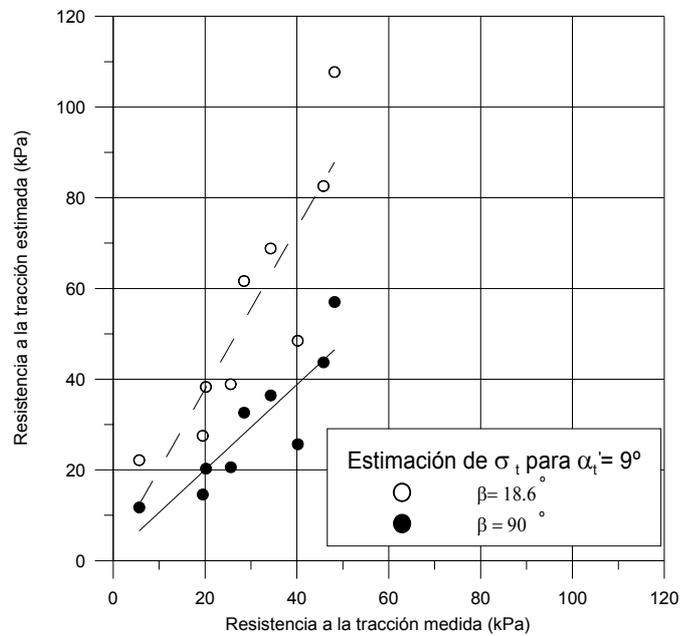


Figura 4.28 Comparación entre la resistencia a la tracción medida y la estimada, para $\alpha_i = 9^\circ$.

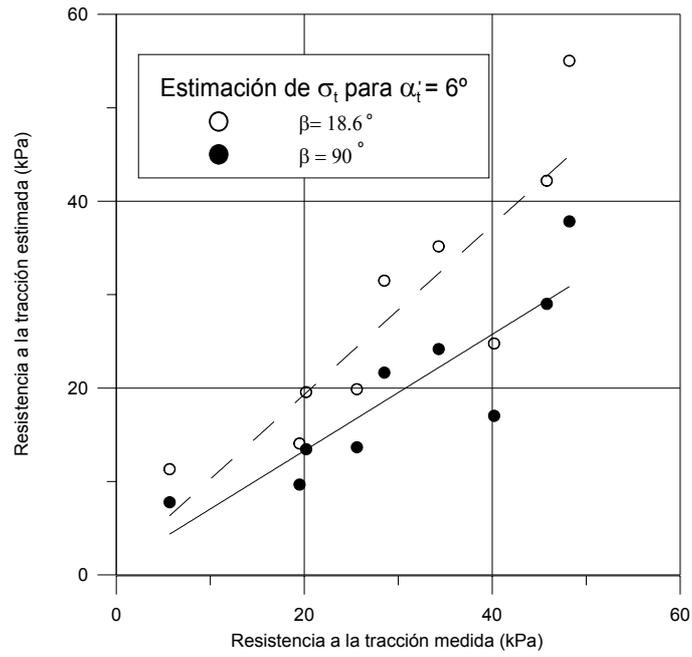


Figura 4.29 Comparación entre la resistencia a la tracción medida y la estimada, para $\alpha_i = 6^\circ$.

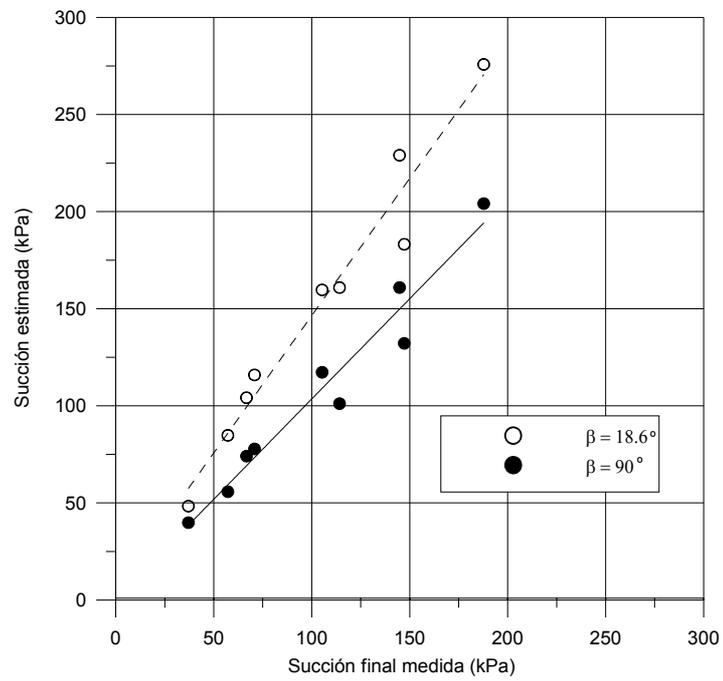


Figura 4.30 Comparación entre la succión final medida y la estimada.

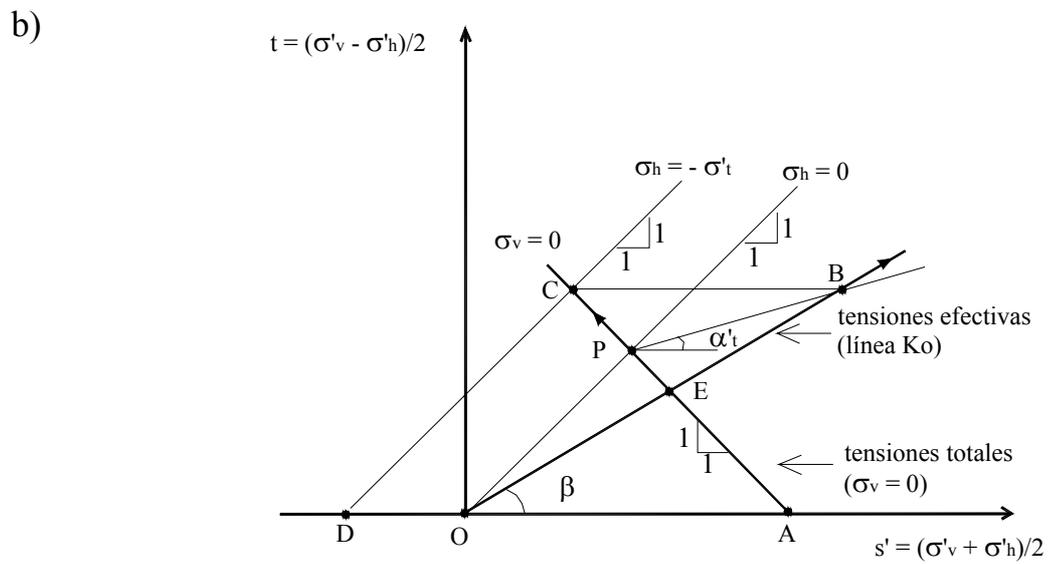
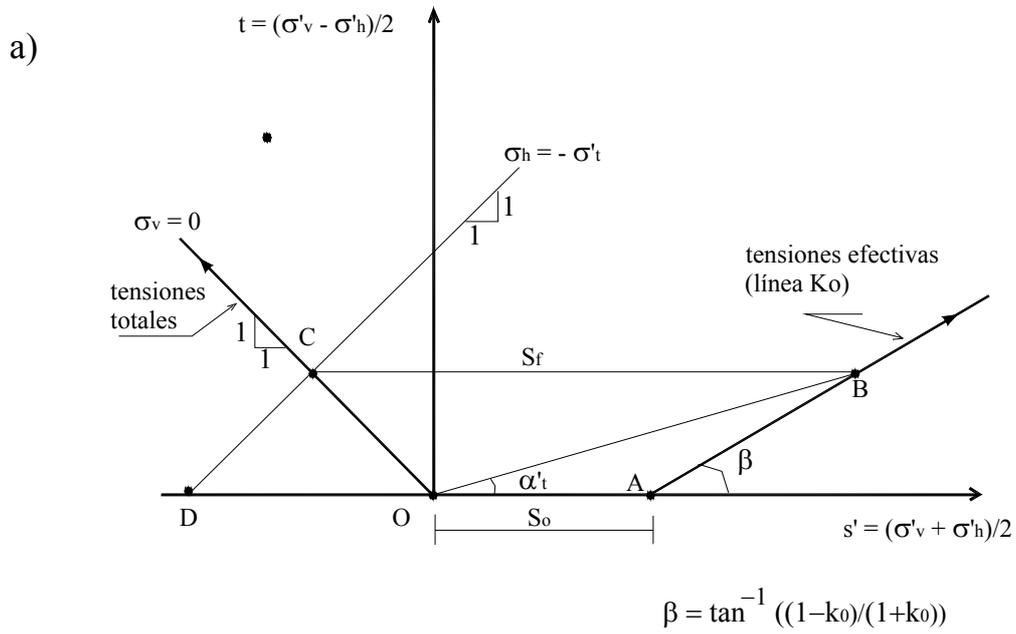


Figura 4.31 Criterio de inicio de grietas por desecación, utilizando el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas: a) tensión vertical nula, b) tensión vertical constante y mayor que cero.