

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES**

En este capítulo se recogen e interrelacionan de manera más global las conclusiones particulares que se presentaron en los capítulos 2 al 7, con el fin de tener una visión unificada de los aportes que hace la tesis al avance del conocimiento, tanto en términos metodológicos como en resultados obtenidos. Además, con base en la experiencia adquirida en este estudio y teniendo en cuenta que aún son muchos los aspectos que se deben trabajar para tener una mejor comprensión de los procesos de retracción y agrietamiento de arcillas, se plantean los temas, que a juicio del autor deben profundizarse en próximas investigaciones.

#### **8.1 Conclusiones específicas**

##### **8.1.1 Caracterización de la arcilla empleada**

El material que se utilizó en los diferentes ensayos fue una arcilla obtenida de la ciudad de Bogotá, caracterizada por ser de plasticidad y consistencia medias y actividad moderada. En la fracción arcillosa predomina la caolinita, seguida de esmectita y en menores proporciones illita y clorita. Clasifica en el sistema USCS como un suelo CH.

La caracterización básica de la arcilla se hizo sobre muestras inalteradas para conocer aspectos como la microestructura, las curvas de retención y las propiedades de compresibilidad. También se hicieron ensayos complementarios de caracterización con muestras reconstituidas ya que el material en estas condiciones se empleó para la mayor parte del programa experimental.

La microestructura de la arcilla que se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido en modo ambiental (ESEM). Se caracteriza por la presencia de arreglos de grupos de partículas, que se unen entre sí y conforman cadenas o montículos de mayor tamaño. Los poros que quedan entre los grupos de partículas o poros interagregados son de poco tamaño y por esta razón el suelo es de baja permeabilidad y poco susceptible a sufrir fenómenos de colapso.

Las curvas de retención se determinaron con diferentes técnicas pero los resultados más consistentes fueron los obtenidos mediante el psicrómetro de transistores. Con base en estas curvas se determinó que el valor de entrada de aire es de orden de 0.9 MPa y la humedad de desaturación está entre 25% y 30% (Figuras. 2.16 a 2.19). Además se observó una fuerte histéresis en las trayectorias de secado y de mojado.

Las características de compresibilidad se determinaron con ensayos edométricos convencionales y ensayos edométricos con succión controlada. El control de la succión se hizo por equilibrio de vapor, con sales y ácido sulfúrico a diferentes concentraciones y por ósmosis, empleando PEG 35000. La calibración de las succiones aplicadas por el PEG35000 a diferentes concentraciones no estaba disponible en la literatura y se adelantó en esta investigación.

La aplicación de ciclos de succión previos a los ciclos de carga indujo incrementos en la relación de sobreconsolidación de la arcilla y reducciones en las deformaciones volumétricas. Este comportamiento se ajusta al modelo comportamiento de suelos parcialmente saturados propuesto por Alonso et al (1990).

Respecto a las características de resistencia al corte de la arcilla reconstituida, se obtuvieron valores similares del ángulo de fricción interna en ensayos de compresión triaxial y de extensión triaxial ( $\phi'$  comp. =  $27.7^\circ$  y  $\phi'$  ext. =  $26.6^\circ$ ). La resistencia en condición residual, determinada en un ensayo de corte directo sobre una muestra previamente cortada, mostró reducción respecto a la condición pico ( $\phi'$  res. =  $18^\circ$ ) y la resistencia no drenada obtenida con ensayos de compresión simple, mostró un incremento exponencial a medida que se reducía la humedad.

### 8.1.2 Estado del arte sobre estudios de agrietamiento de suelos

El estado del conocimiento sobre los procesos de agrietamiento de arcillas por retracción es aún incipiente respecto a otros temas mucho más trabajados en la mecánica de suelos. Aspectos como las condiciones que dan inicio a una grieta y en particular la evolución espacial y temporal de esa grieta y su interrelación con otras grietas y con las condiciones de contorno, presentan todavía alto grado de incertidumbre, que debe irse reduciendo gradualmente con investigación básica y sistemática de las variables que intervienen en el fenómeno y con el ajuste de los modelos conceptuales y numéricos a los resultados de tales investigaciones.

Los estudios de agrietamiento de suelos se pueden clasificar de manera general en cinco categorías: estudios de morfología y evolución de grietas, estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos, estudio individual de variables que intervienen en la formación de grietas, modelos de inicio y propagación de grietas y estudios del comportamiento de suelos agrietados. En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las características de cada uno de los estudios indicados. De acuerdo con tal clasificación, en esta tesis se trabaja principalmente en dos temas: morfología y evolución de grietas y estudio individual de algunas variables que intervienen en el agrietamiento.

Dentro de los modelos de agrietamiento de suelos, el propuesto por Abu-Hejleh y Znidarcic (1995), es un modelo unidimensional que ofrece un panorama conceptual muy claro en términos de trayectorias de tensiones totales y efectivas, que se siguen en las etapas de consolidación y retracción, previas al agrietamiento y la condición de inicio de grietas depende de tales trayectorias y de la resistencia a la tracción, expresada en tensiones totales. La extensión de la grieta en profundidad se evalúa con base en el índice de poros, el cual va variando durante el proceso de desecación y alcanza gradualmente una condición crítica. La máxima profundidad de agrietamiento corresponde a la máxima profundidad hasta la cual se

alcanza tal condición crítica. En la presente tesis se propone que la condición de inicio de grieta no se evalúe en términos de tensiones totales sino de tensiones efectivas y este es uno de los aspectos importantes que se discuten en el capítulo 4.

El modelo de Konrad y Ayad (1997a) plantea una condición de inicio de grietas similar a la propuesta por Abu-Hejleh y Znidarcic (1995) pero en términos de una succión crítica que también depende de la trayectoria de tensiones y de la resistencia a la tracción en tensiones totales. En este modelo se propone que la profundidad máxima de la grieta se evalúe mediante criterios de LEFM.

Existen otros modelos físicos de agrietamiento pero que probablemente son menos generales que los dos enunciados anteriormente. El de Lee et al (1988) resulta interesante porque trata de determinar la dirección de agrietamientos a partir de criterios de mecánica de fractura y el de Morris et al (1992) que plantea diferentes alternativas para estimar profundidades de agrietamiento, todas ellas considerando que el suelo está en condición no saturada. El modelo de flujo a través de un suelo agrietado, propuesto por Bronswijk (1988) no entra a evaluar mecanismos de inicio ni de propagación de grietas sino que se estima una cierta área inicial de grietas, la cual varía en función de los cambios de succión en el suelo. Este es un enfoque que desde un punto de vista práctico puede resultar muy útil, para cálculos de infiltración o evaporación.

### **8.1.3 Resistencia a la tracción**

Los ensayos de tracción en carga controlada, con medición de la deformación y la succión permitieron establecer ciertas relaciones importantes entre estas tres variables (tensión, deformación, succión) que en su conjunto controlan la resistencia a la tracción del suelo. En general se notó que en las primeras etapas de carga el comportamiento de la arcilla en tracción tiende a ser rígido porque cuando trata de deformarse en extensión la succión se incrementa e induce contracción, por lo tanto la deformación neta es muy baja. Cuando la carga aumenta empiezan a localizarse las deformaciones en ciertas zonas que tienden a ser perpendiculares al eje de tracción y esto hace que la rigidez se reduzca sensiblemente.

La rotura que se presenta en los ensayos de carga controlada es súbita y ocurre a baja deformación mientras que en los ensayos de deformación controlada es gradual, presenta pico en la curva tensión-deformación y en general ocurre a mayor deformación.

En el intervalo de succiones estudiado (entre 0 y 400 kPa) donde el material permanece saturado, se encontró que la resistencia a la tracción se puede estimar a partir de un modelo en tensiones efectivas, algo similar al modelo de resistencia al corte de Mohr-Coulomb. De acuerdo con este planteamiento la rotura por tracción tiene características similares a la rotura por corte pero con dos diferencias importantes: en primer lugar, la succión, que actúa como presión de confinamiento es menos efectiva y menos uniforme que la presión mecánica porque después de que supera los 101 kPa puede ocurrir cavitación local en las zonas de mayor porosidad y esto induce la separación de las partículas y en segundo lugar, cuando hay extensión, las áreas de contacto entre partículas o grupos de partículas tienden a reducirse con el aumento de la deformación, de tal manera que no se alcanza a desarrollar toda la fricción que potencialmente existe en tales contactos, como sí ocurre en el caso de rotura por corte.

El ángulo de la envolvente de resistencia a la tracción al parecer depende de las características y arreglo de las partículas de suelo y en general es mucho menor al que se obtiene en ensayos de resistencia al corte (compresión o extensión triaxial) en condición de carga pico y también es menor al que se obtiene en condición de resistencia residual o de gran deformación, esto tiende a apoyar la hipótesis de que en tracción se presenta un mecanismo de corte pero no desarrollado totalmente. Algunos estimativos preliminares de resistencia que se hicieron con los ensayos de retracción en moldes indican que para succiones mayores a las estudiadas en los ensayos de tracción directa, la envolvente es no lineal y probablemente tiende a un valor máximo a partir de cierta succión. Este comportamiento es similar al propuesto por Escario y Sáez (1986) para definir la envolvente de resistencia al corte en suelos parcialmente saturados.

Con base en el modelo planteado, la resistencia a la tracción depende del punto de intersección entre la trayectoria de tensiones efectivas y la envolvente de resistencia. Esta trayectoria es función de la succión actuante en el plano de rotura y la succión a su vez depende de las deformaciones de la muestra. A partir de este modelo se propone un procedimiento para determinar en términos de tensiones efectivas, las condiciones de inicio de agrietamiento de suelos por retracción unidimensional, como una alternativa a la propuesta en el modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995), que se expresa en tensiones totales. Adicionalmente el modelo permite explicar varios comportamientos como el agrietamiento súbito causados por rehidratación del suelo, el no agrietamiento cuando hay contracción libre o las diferencias en comportamiento de distintas muestras, dependiendo de la succión inicial y de la trayectoria seguida durante la desecación.

#### 8.1.4 Mecánica de fractura

Uno de los aspectos que se pretendía evaluar era si la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) tenía aplicabilidad en el estudio de agrietamiento de arcillas y los resultados muestran que efectivamente tanto los fundamentos teóricos como los métodos de ensayo ampliamente desarrollados por esta ciencia son aplicables para comprender los mecanismos de propagación de grietas y para estimar un intervalo razonable de variabilidad de los parámetros que definen las propiedades de agrietamiento del material, a pesar de que la arcilla estudiada presenta un comportamiento elastoplástico y no se ajusta totalmente a los criterios de validez de las pruebas que han sido desarrolladas para materiales mucho más rígidos y frágiles.

Los dos parámetros que se emplean para caracterizar un material en términos de LEFM son la tasa crítica de liberación de energía ( $G_{IC}$ ) y el factor de intensidad de tensiones ( $K_{IC}$ ). Estos parámetros se determinaron sobre muestras reconstituidas de la arcilla de Bogotá, a partir de ensayos tanto de carga controlada como de deformación controlada y se evaluaron por diferentes procedimientos de cálculo. Teóricamente si el material está en el rango elástico, tanto  $G_{IC}$  como  $K_{IC}$  son constantes del material, independientes de la longitud de la grieta y además, con la determinación de uno de ellos se puede obtener directamente el otro, siempre y cuando se conozcan también los parámetros elásticos ( $E$  y  $\nu$ ).

En los resultados de los ensayos se encontró que tanto  $G_{IC}$  como  $K_{IC}$  presentan cierta variabilidad con respecto a la longitud de la grieta y que los valores difieren dependiendo tanto del procedimiento de ensayo como del método de cálculo empleado, sin embargo, estos intervalos de variación no son muy significativos y permiten tener una idea razonable del

comportamiento del material, teniendo en cuenta la amplia variabilidad reportada para los mismos parámetros en diferentes tipos de suelos (ver Tabla 5.6).

Para el cálculo de  $K_{IC}$  por el método directo se emplearon dos ecuaciones: la propuesta por Srawley (1976) y la propuesta por la ASTM (1983) y en general los resultados más consistentes fueron aquellos que se obtuvieron con la ecuación de la ASTM. Por otra parte, los valores de  $K_{IC}$  obtenidos por el método de la complianza fueron en general más bajos que los obtenidos por el método directo (ver Tabla 5.5).

En los ensayos de deformación controlada, se obtuvieron valores de  $G_{IC}$  mayores que en los de carga controlada y esta diferencia se puede atribuir principalmente a la alta rigidez que exhibe el material en carga controlada, al parecer por efecto de las tensiones capilares que impiden la apertura de la grieta en las primeras etapas de carga.

Una dificultad común a todas las pruebas fue establecer la carga crítica o de inicio de extensión de grieta, debido a la no linealidad de las curvas de carga-desplazamiento. Los valores de carga crítica que se emplearon en este estudio corresponden a los del final del tramo elástico, sin embargo es necesario investigar para este tipo de materiales cuál es la verdadera carga que da inicio a la extensión de grieta y como se ven afectados los parámetros de fractura por efecto del comportamiento no lineal del suelo. En este sentido se hace necesario recurrir a la mecánica de fractura elastoplástica pero este análisis está fuera de los alcances de la presente investigación.

Una de las principales razones que justifica la utilización de la mecánica de fractura para evaluar propagación de grietas es que teóricamente la resistencia al agrietamiento se reduce al aumentar el tamaño de la estructura agrietada (Bazant y Planas, 1998), lo cual difiere de los criterios de rotura de las teorías clásicas donde la resistencia de un material es independiente del tamaño de la estructura. A partir de ensayos sobre muestras geoméricamente similares pero de diferentes tamaños se pudo verificar la validez de este efecto. Mediante los criterios de efecto de tamaño, se determinaron adicionalmente y de manera independiente los parámetros  $G_{IC}$  y  $K_{IC}$  de la arcilla y los resultados que se obtuvieron fueron un poco menores que los determinados previamente en los ensayos realizados con muestras de un solo tamaño (ver Tablas 5.4 y 5.5).

En definitiva, el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas puede ayudar a explicar los mecanismos de inicio de las grietas mientras que la mecánica de fractura permite analizar su propagación.

### **8.1.5 Estudio microscópico del agrietamiento de la arcilla**

Los criterios que se emplean en mecánica de fractura para determinar la estabilidad o inestabilidad de una grieta, consideran que el material tiene previamente un defecto, discontinuidad o microgrieta y que esta irregularidad es el punto de inicio de una grieta potencialmente más larga. Las observaciones al microscopio brindan una información muy útil para entender cómo son los mecanismos que dan origen a tales discontinuidades iniciales durante el proceso de desecación de la arcilla y cómo es la dinámica y morfología de su evolución con los cambios de humedad o de succión.

En esta investigación se emplearon dos tipos de microscopio: el microscopio óptico o lupa binocular y microscopio electrónico tanto en modo ambiental como en alto vacío. Las

observaciones realizadas en el microscopio electrónico ambiental (ESEM) son de gran utilidad porque con ellas se logra una gran amplificación de la imagen sin alterar las condiciones de humedad o de densidad de la muestra. Con el microscopio electrónico en condición de alto vacío las muestras sufren cierta alteración porque deben recubrirse con una película conductora y el alto vacío puede causar en ellas cierta retracción, sin embargo es útil para apreciar las etapas finales del agrietamiento cuando la humedad ya es muy baja, porque se logra una buena resolución de las imágenes. El microscopio óptico por su parte resulta conveniente para observar las etapas de propagación rápida o inestable de las grietas y para analizar evolución de los agrietamientos en los procesos de mojado, porque se tiene mayor campo visual y facilidades para desplazar la muestra manualmente.

Con base en las diferentes observaciones realizadas se definieron cuatro etapas típicas en el proceso de agrietamiento por desecación, cuya morfología en función de la humedad y de la succión se describe en la Figura 6.6. Como característica general del proceso se puede destacar de que las microgrietas aparecen en una condición muy temprana cuando la muestra está aún bastante húmeda, que después de las microgrietas iniciales aparecen nuevas microgrietas que evolucionan lentamente con la desecación, generalmente asociadas a la presencia de granos o grumos dentro de la arcilla y que después de una cierta succión el agrietamiento tiende a localizarse en una sola región, perpendicularmente al eje de tracción y se prolonga de manera muy rápida o inestable.

La morfología de los microagrietamientos es similar a la que se observa en grietas de tamaño intermedio e incluso en grietas de tamaño regional, lo cual revela un cierto comportamiento de tipo fractal o de autosimilitud a diferentes escalas de observación. Adicionalmente, la morfología de las microgrietas en la arcilla es parecida a la que se presenta durante la desecación de materiales como el mortero o el hormigón y esto permite inferir que por lo menos desde un punto de vista cualitativo, las metodologías que han sido desarrolladas para el análisis de grietas en materiales rígidos, pueden tratar de emplearse para el estudio de agrietamientos de la arcilla.

A partir de las observaciones realizadas, se plantea un posible mecanismo de avance de las microgrietas, consistente en considerar que en la punta de las mismas la tensión máxima es asumida por un pequeño volumen de arcilla similar a una fibra o a una columna y que sobre esta fibra se ejerce tracción hasta que ocurre la rotura bien sea porque desde un principio la tensión aplicada es mayor a la resistencia a la tracción del suelo o porque las deformaciones de extensión causan reducción de la sección transversal de la fibra hasta que finalmente se supera su resistencia a la tracción y entra en rotura. Esto hace que la grieta avance y que entre en tracción otro tramo de suelo al que le ocurre un fenómeno similar. El mecanismo planteado es localmente compatible con los criterios de resistencia a la tracción que se discutieron en el capítulo 4 y globalmente con los criterios de la LEFM en términos de que el avance o detención de la grieta dependen de  $G_{IC}$  o de  $K_{IC}$ , es decir, aquí se intenta mostrar el enlace que existe entre los conceptos de resistencia a la tracción y los de mecánica de fractura.

Respecto a las condiciones de restricción a la contracción, se observó que cuando la restricción es uniaxial, se tiende a generar una grieta perpendicular al eje de tracción, cuando es biaxial tienden a aparecer dos grietas, cada una perpendicular al eje de tracción y cuando hay mayor restricción en una dirección que en la otra aparecen grietas diagonales e irregulares. Esto muestra cómo influyen de manera importante las condiciones de contorno en el patrón general de agrietamiento.

La rehidratación de las muestras agrietadas induce ampliación muy rápida de las grietas existentes y la generación de nuevos microagrietamientos, sin embargo, después de algunos minutos las grietas tienden a cerrarse totalmente porque disminuye la succión que es la causante de las tensiones de tracción. Esta dinámica de apertura y cierre de grietas tiene importantes efectos sobre las propiedades hidromecánicas de la arcilla.

### 8.1.6 Morfología del agrietamiento en muestras de tamaño intermedio

El estudio de agrietamientos en muestras de tamaño intermedio es complementario al estudio microscópico y en este sentido, la condición de inicio de grieta debe definirse con base en la escala que se esté analizando, pues por ejemplo al microscopio un suelo puede lucir muy agrietado pero a simple vista tener una apariencia totalmente uniforme y continua, así mismo, una pequeña grieta que en un ensayo de laboratorio puede ser muy significativa, probablemente tiene muy poco significado cuando se están analizando patrones regionales de agrietamiento. En este estudio se emplearon tres tipos de moldes para inducir el agrietamiento por desecación de la arcilla y para cada uno de ellos se definió una longitud mínima de discontinuidad como condición de inicio de grieta. Aunque tal definición es arbitraria, se trató de que fuera proporcional al tamaño del molde y que en la práctica su apariencia representara una verdadera grieta y no una discontinuidad aparente dada por la rugosidad superficial o por la formación de grumos en la arcilla.

En los ensayos se determinó que la humedad de agrietamiento de las muestras dependía principalmente y en su orden, del tipo de molde, de la humedad a la cual se iniciaba la desecación y de la tasa de desecación. Si el molde ejerce una restricción efectiva, la muestra se agrieta rápidamente y por lo tanto a alta humedad, mientras que si la restricción del molde es baja, el suelo se puede contraer sin agrietarse y sólo después de una pérdida importante de agua aparecen las grietas. Para un mismo tipo de molde la humedad de agrietamiento es proporcional a la humedad inicial e inversamente proporcional a la tasa de desecación.

En los moldes que ejercían buena la restricción a la contracción, la arcilla comenzaba a agrietarse en condición saturada y a humedades comprendidas entre los límites líquido y plástico. En los moldes de restricción menos efectiva el grado de saturación al inicio del agrietamiento estaba entre el 85% y el 100% y en varios casos las humedades eran inferiores al límite plástico.

El hecho de que las muestras que presentan poca restricción logren reducir su humedad o su succión sin agrietarse es compatible con el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas, pues en tal caso la trayectoria tiene una pendiente muy baja y sólo cuando el suelo se hace más rígido aumenta la pendiente hasta que finalmente alcanza la envolvente de resistencia.

Para cuantificar la magnitud de los agrietamientos en las muestras de bandeja se empleó el método del factor de intensidad de tensiones o *Crack Intensity Factor (CIF)* que es el área de grietas dividida por el área total de la muestra en un instante dado. Los valores que se midieron mediante imágenes digitalizadas variaron entre 0.4 para una muestra poco agrietada y 11.2 para una muestra muy agrietada.

El comportamiento que presentaron las muestras al agregársele agua, dependía de las condiciones de agrietamiento en ese momento. En las muestras que presentaban agrietamiento

moderado, la hidratación generaba nuevas grietas y por lo tanto aumentaba el CIF, mientras que si el agrietamiento al momento de agregarse agua era muy severo el CIF se mantenía más o menos constante porque en términos de áreas, la aparición de nuevas grietas se compensaba con la expansión del material y la reducción de la abertura en las grietas existentes.

## 8.2 Conclusión General

Dentro de los aportes más relevantes que se lograron en esta investigación se pueden mencionar los siguientes: en primer lugar el análisis morfológico de los agrietamientos permitió identificar, a diferentes escalas, características importantes sobre los mecanismos de inicio y propagación de grietas, tales como la formación de microgrietas en etapas muy tempranas, cuando el suelo está saturado y tiene alta humedad; la dinámica de avance de las microgrietas, cuya influencia no siempre es significativa puesto que los agrietamientos finales dependen fundamentalmente de las restricciones a la contracción libre impuestas por las condiciones de contorno; las relaciones entre las condiciones de inicio y avance de grietas con otras variables como la humedad inicial, la tasa de desecación y las condiciones de restricción a la contracción y la comparación entre los procesos de agrietamiento de la arcilla con los observados en otros materiales como el hormigón y el acero, donde se identificaron bastantes similitudes morfológicas.

Otro de los aportes de la tesis es la formulación del modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas, aplicable al caso de las arcillas saturadas, puesto que con este modelo se logra plantear el mecanismo de inicio de las grietas en términos de tensiones efectivas, que son las que realmente controlan la resistencia del suelo, pues en los modelos existentes a pesar de que se tienen en cuenta las trayectorias de tensiones totales y efectivas, la resistencia a la tracción se plantea exclusivamente en tensiones totales y esto crea inconvenientes puesto que no hay una correspondencia entre la succión de agrietamiento que se trata de obtener y la resistencia a la tracción que se asume constante y está definida desde el principio.

En cuanto al tema de la mecánica de fractura lineal elástica, se pudo identificar que su marco teórico, relacionado con las condiciones de avance o de estabilidad de las grietas, tanto en términos de energía como de tensiones, es muy aplicable para comprender los procesos de agrietamiento que ocurren en las arcillas. Los parámetros de fractura que se obtuvieron en los distintos ensayos realizados sobre la arcilla, representan intervalos razonables de variabilidad que en términos prácticos permiten su caracterización y diferenciación con otros tipos de suelos, sin embargo, debido a la no linealidad y alta plasticidad de la arcilla, estos parámetros no son propiamente constantes del material y por lo tanto si se pretende hacer una evaluación más rigurosa, es necesario acudir a la mecánica de fractura elastoplástica.

El efecto de tamaño de mecánica de fractura tiene gran importancia para evaluar las condiciones de agrietamiento de un material y constituye tal vez, la principal razón para que sea necesario aplicar la mecánica de fractura en el análisis de agrietamientos. En esta tesis se comprobó, mediante ensayos la validez del efecto de tamaño y asimismo se obtuvieron parámetros de mecánica de fractura a partir de la ley de efecto de tamaño de Bazant (1984).

En síntesis, considerando que los agrietamientos de arcillas por desecación son bastante complejos, lo que se logró en la presente investigación fue caracterizar de manera sistemática algunas de las variables más importantes que intervienen en los procesos y dilucidar ciertos aspectos conceptuales sobre los mecanismos que gobiernan el fenómeno.



### 8.3 Recomendaciones para futuras investigaciones

El ideal de un modelo general de agrietamiento sería poder conocer a partir de ciertos parámetros intrínsecos del suelo, determinados en laboratorio y de variables extrínsecas como las cargas aplicadas, las condiciones atmosféricas y las condiciones de contorno, cómo es el proceso de retracción de la arcilla en términos de tensiones y deformaciones, en qué momento y dónde se inician los agrietamientos, hasta qué profundidad llegan, dónde aparecen nuevas grietas y cómo evolucionan los agrietamientos en el tiempo o ante determinadas variaciones de las condiciones externas.

Teniendo en cuenta que los modelos de esta naturaleza son los requeridos para la aplicación en múltiples problemas de ingeniería geotécnica, hacia allá deberían orientarse las futuras investigaciones, para lo cual es necesario continuar los estudios sistemáticos de los mecanismos y las variables que intervienen en el agrietamiento por desecación, con el fin de poder incorporar estos resultados en la mejora de los modelos disponibles, algunos de los cuales se discutieron en el capítulo 3.

Buena parte de la presente investigación se orientó en ese sentido pero aún es necesario profundizar en varios temas como los que se indican a continuación:

#### 8.3.1 Caracterización de la arcilla

Sería conveniente realizar observaciones sistemáticas en el microscopio electrónico de modo ambiental (ESEM) sobre muestras sometidas a diferentes trayectorias controladas de humedecimiento y secado. En este caso es necesario controlar en la cámara del microscopio tanto la humedad relativa como la temperatura. Estos análisis deberían complementarse con ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio, de tal manera que, junto con las curvas de retención, ya determinadas, se pueda contar con una información más precisa sobre la evolución microestructural y los cambios en la porosidad y en el grado de saturación, debidos a los cambios de succión o de humedad de la arcilla.

Con el fin de tener una caracterización más completa de la arcilla que permita tener suficientes parámetros, necesarios para la aplicación general de un modelo elastoplástico para suelos parcialmente saturados, es conveniente realizar ensayos triaxiales de succión controlada, con diferentes trayectorias de tensión-succión. Aquí podría ser útil la aplicación de la succión mediante PEG, previendo suficiente tiempo de estabilización de la misma.

Otros ensayos complementarios que serían de interés son los de corte directo con succión controlada, para evaluar la variación de la envolvente de resistencia con la succión, ensayos de corte anular para determinar de manera precisa el valor del ángulo de resistencia residual de la arcilla y la medición de la succión en ensayos de compresión simple mediante la instalación de tensiómetros de respuesta rápida (tipo Imperial College), con lo cual se puede comparar la variación de la presión de poros en la parte media de la muestra con la variación de la succión que se midió en los ensayos de tracción.

### 8.3.2 Resistencia a la tracción

Sobre este tema es conveniente profundizar en la investigación básica que permita refinar el modelo propuesto de resistencia a la tracción en tensiones efectivas. En este sentido es importante realizar ensayos sistemáticos que permitan determinar la variación de la succión respecto a la distancia al plano de agrietamiento, pues los ensayos hechos hasta ahora muestran que efectivamente se presenta un gradiente importante de succión (Fig. 4.18) pero esta variación debe cuantificarse de manera más precisa para poder hacer las debidas correcciones por ubicación del tensiómetro respecto al plano donde se produce la rotura final y para calcular de mejor manera el estado de tensiones efectivas y las respectivas trayectorias seguidas hasta la rotura por tracción.

Respecto al desarrollo de equipos, en futuras investigaciones sería útil contar con un sistema que permita controlar la humedad relativa del ambiente donde está la muestra sometida a tracción, con el fin de poder realizar trayectorias tanto de secado como de mojado y analizar las variaciones asociadas en succión, tensión y deformación. Otro desarrollo que resulta de interés es el de un equipo que permita la aplicación de tensión biaxial, con lo cual se podría profundizar sobre los efectos de combinación de tensiones de tracción y su relación con la orientación de los planos de agrietamiento.

Finalmente es necesario tratar de integrar el comportamiento del suelo en tracción con un modelo más general de comportamiento elastoplástico, donde se tenga en cuenta tanto la evolución de la resistencia con los cambios de succión como los efectos importantes de la localización de las deformaciones en los sectores próximos al plano de agrietamiento. Hasta la rotura el modelo se podría plantear dentro de un esquema de la mecánica del medio continuo, sin embargo para el análisis del material ya agrietado es necesario acudir a modelos discretos y a criterios de la mecánica de fractura.

### 8.3.3 Mecánica de fractura

Todos los ensayos de LEFM realizados en la presente investigación se adelantaron a una humedad aproximadamente constante que varió entre 36% y 37%. Teniendo en cuenta que la humedad de inicio de los agrietamientos no es una constante sino que, como se vio en los capítulos 6 y 7, depende de factores como la humedad inicial, la tasa de desecación o las condiciones de restricción a la deformación, es necesario que los parámetros de LEFM también se tengan para diferentes humedades con el fin de poder aplicarlos para las condiciones apropiadas de inicio de grieta. Resultaría conveniente también hacer ensayos de fractura sobre muestras inalteradas o sobre muestras reconstituidas en edómetro a partir de lodos y tratar de estimar o medir los valores de succión que se generan durante la extensión de la grieta, esto podría conducir a la obtención de los parámetros de fractura en tensiones efectivas, de manera similar a lo que se hizo con el modelo de resistencia a la tracción ya que las dos variables están íntimamente relacionadas.

Considerando los problemas de no linealidad en las curvas de tensión – desplazamiento, detectados en muchos ensayos, resulta conveniente explorar el análisis de resultados en términos de la mecánica de fractura no lineal o de la mecánica de fractura elastoplástica. Un posible punto de inicio sería hacer evaluaciones de la integral J (Rice, 1968) para evaluar la energía de fractura a partir de las curvas determinadas y analizar los modelos de grieta

cohesiva (Barenblatt, 1962, Dugdale, 1960), que por sus características constituyen campos muy promisorios para analizar el comportamiento de este tipo de arcillas.

Otro tema interesante de explorar es el análisis distribuido de grietas, que a diferencia del análisis discreto aquí estudiado, permite la aplicación de criterios de mecánica de fractura partiendo de una condición de medio continuo, es decir, sin que necesariamente haya ocurrido previamente un cierto agrietamiento. En este sentido sería conveniente estudiar el modelo de banda de agrietamiento, propuesto por Bazant (1976) y Bazant y Cedolin (1983) y el modelo normal/cortante propuesto por Carol et al (1997). Este último incluye además análisis de fractura en el modo II o de cortante.

### **8.3.4 Morfología y evolución de agrietamientos**

Los análisis sistemáticos de inicio, avance y distribución preferencial de agrietamientos en función del tipo de suelo, de las condiciones de restricción y de las tensiones impuestas vale la pena seguirlo explorando a diferentes escalas, mediante ensayos similares a los que se plantearon en esta investigación, pero sobre muestras inalteradas. Además en estos casos también resultaría conveniente hacer trayectorias controladas de secado y humedecimiento, mediante el control de la humedad relativa del ambiente donde están las muestras.

Para explorar orientación y alcance de grietas en profundidad y la posible aparición de grietas horizontales, se pueden hacer ensayos de desecación en lisímetros o en moldes grandes con paredes transparentes, adecuadamente instrumentados para controlar tanto las condiciones ambientales externas como la variación de humedad, succión y deformación dentro de la masa de suelo. Este tipo de estudios junto con exploraciones detalladas in-situ, son necesarios para calibrar y ajustar los modelos de agrietamiento disponibles.

### **8.3.5 modelación numérica**

Con los datos disponibles sobre parámetros de retracción, resistencia a la tracción y mecánica de fractura y con los nuevos resultados que se obtengan es conveniente hacer seguimiento numérico de algunos ensayos simples de agrietamiento por retracción unidireccional y bidireccional, para tratar de predecir aspectos como el momento de inicio de grietas, la humedad y la succión de agrietamiento, los sitios probables de inicio y de dirección de avance de las grietas. Posteriormente se puede ir aumentando el grado de complejidad para tratar de predecir comportamientos bidimensionales, con base en los modelos que se discutieron en el capítulo 3. Aquí resultaría interesante profundizar la investigación en los análisis probabilísticos de orientación de grietas y tratar de integrar estos conceptos con los parámetros físicos medidos en laboratorio.

Para tener en cuenta de manera consistente los efectos de la presencia de grietas en las variaciones de tensión, deformación y flujo, es necesario introducir modificaciones a los programas que han sido desarrollados para hacer análisis de comportamiento elastoplástico en suelos saturados y parcialmente saturados pero que están basados en la mecánica del medio continuo. En este sentido vale la pena aprovechar varios procedimientos que ya están implementados en códigos de elementos finitos, basados en la mecánica de fractura.