

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes y justificación de la investigación

Los fenómenos de retracción y agrietamiento de suelos arcillosos pueden estar asociados a períodos prolongados de sequía, a explotación de agua subterránea, a presencia de árboles de alta demanda hídrica, etc. y en muchos casos afectan de manera importante a obras civiles apoyadas sobre ellos, puesto que las deformaciones excesivas inciden en la funcionalidad de las estructuras e incluso pueden llevarlas al colapso. En terrenos montañosos, terraplenes, cortes y presas, el agrietamiento de suelos es un factor que puede ser crítico para la estabilidad de los taludes porque las grietas representan una zona de debilidad y a través de ellas puede infiltrarse agua y reducir la resistencia del suelo o puede acumularse agua en las grietas y causar empujes hidrostáticos desfavorables a la estabilidad (Lambe & Withman, 1979, Baker, 1981, Bagge, 1985, Lee et al, 1988).

En varias partes del mundo se han identificado problemas de agrietamiento severos de suelos, muchos de ellos se relacionan con procesos de subsidencia, causados por descensos importantes en los niveles de las aguas subterráneas, por ejemplo, Holzer (1984) reporta más de 14 áreas afectadas en los Estados Unidos, con grietas que tienen longitudes de decámetros hasta kilómetros. En México los problemas de agrietamiento se han presentado en varios sitios, dentro de los cuales se destacan los de la ciudad de Aguascalientes (Aranda, 1991), los de Querétaro (Trejo y Martínez, 1991) y los Ciudad de Mexico (Juárez y Rico, 1969, Orozco y Figueroa, 1991, Murillo et al, 1991).

Además de los casos anteriores de agrietamiento de suelos, que probablemente son de los más notorios reportados en la literatura, en muchos otros lugares se presentan fenómenos similares aunque de menor magnitud. Hay por ejemplo buena documentación sobre los agrietamientos de la arcilla de Londres (Skempton, et al, 1969, Fookes y Parrish, 1968, Costa-Filho, 1984), sobre patrones de grietas en el sureste de Inglaterra (Fookes y Denness, 1969,) y sobre numerosos problemas de retracción en varios sitios del mundo causados por la presencia de árboles (ej. Driscoll, 1983, Richards et al, 1983, Holtz, 1983, Williams y Pidgeon, 1983, Biddle, 1983, Ravina, 1983, Alonso y Lloret, 1995, etc.).

En el sector noroccidental de la ciudad de Bogotá, comenzaron a aparecer grietas superficiales hace aproximadamente 15 años, que de acuerdo con la descripción de los habitantes del lugar han ido aumentando gradualmente de tamaño y densidad, con notoria aceleración en los últimos cinco años. Esta es una zona predominantemente rural, donde existe intensiva explotación de agua subterránea que se utiliza para la ganadería y la agricultura, especialmente para el cultivo industrial de flores. Actualmente se registran en algunos sitios grietas hasta 20 m de longitud, 2 m de abertura y más de 6 m de profundidad (Vesga et al,

2003, Ávila, 2003). Estas grietas han causado daños en las carreteras de la zona y están afectando drásticamente el uso de las tierras porque hacen peligroso el tránsito de personas y animales y reducen el área cultivable, lo cual representa un deterioro ambiental muy importante que además influye negativamente en el valor comercial de los terrenos.

En la zona urbana, que tiene características geológicas similares a la de la zona rural antes descrita, el problema es menos severo, sin embargo, se ha observado en muchos suelos superficiales la presencia de pequeños agrietamientos que al parecer están relacionados con la desecación regional del terreno, lo cual se manifiesta en descensos generalizados del nivel freático y reducciones importantes de los niveles piezométricos más profundos, pues de acuerdo con las mediciones realizadas en piezómetros múltiples instalados en diferentes sitios de la ciudad, se han detectado reducciones de presión hidrostática de más de 20 m. en los últimos 8 años (Ávila, 1998, 2003).

Un fenómeno adicional y muy notorio tanto en la zona urbana como en la rural, es el de las deformaciones superficiales del terreno, causadas por la presencia de árboles de gran tamaño. Este problema que se manifiesta en ondulaciones y deterioros recurrentes en las vías, asentamientos diferenciales en viviendas, rotura de tuberías, etc., ha implicado cuantiosas inversiones en reparaciones y mantenimiento. En muchas ocasiones estas deformaciones están acompañadas por la aparición de grietas superficiales.

Otro campo donde los agrietamientos de arcilla representan un problema muy significativo es el de las barreras para aislamiento de residuos contaminantes, puesto que a través de las grietas se pueden producir infiltraciones tanto de líquidos como de gases que son perjudiciales para el medio ambiente y reducen considerablemente la vida útil de los sitios de depósito. Recientemente ésta ha sido una de las preocupaciones cuando se estudian las barreras de arcilla para el almacenamiento subterráneo de residuos radiactivos, puesto que por procesos de degradación biológica de materiales orgánicos y de corrosión anaeróbica de metales dentro del repositorio, se pueden generar altas presiones de gas que inducen agrietamiento progresivo de la arcilla saturada, con el eventual paso de gas contaminado hacia la biosfera (Horseman et al, 1999, Graham et al, 2002).

Considerando ahora los mecanismos que dan origen a los agrietamientos por desecación, se puede decir que en términos generales, éstos se producen cuando el suelo tiende a contraerse debido a la reducción de humedad, pero esa contracción resulta restringida por las condiciones de contorno, de tal manera que las tensiones que impiden la contracción superan la resistencia a la tracción del suelo. Este mecanismo que aparentemente es simple resulta en realidad bastante complejo cuando se trata de formular un modelo general que permita hacer predicciones del proceso y definir aspectos como condición de inicio de las grietas, dirección de avance, profundidad, abertura, evolución de los agrietamientos con los cambios de succión, etc. Además la presencia de las grietas genera a su vez cambios drásticos en propiedades como la permeabilidad, la compresibilidad o la resistencia y dificulta los análisis numéricos puesto que debido a las discontinuidades, no es posible aplicar directamente la mecánica de los medios continuos que se emplea para la mayoría de los análisis geotécnicos convencionales.

Al analizar diferentes modelos de agrietamiento por desecación (Morris et al, 1992, Abu-Hejleh y Znidarcic, 1995, Konrad y Ayad, 1997a) se pueden identificar ciertas propiedades del suelo que se requieren para hacer el seguimiento al fenómeno, como son las características

de deformabilidad ante los cambios de succión, la resistencia a la tracción y en algunos casos, los parámetros de mecánica de fractura. Una parte importante de esta investigación se orienta hacia el análisis de estos parámetros y hacia la determinación experimental de los mismos para la arcilla de Bogotá, utilizando para ello diferentes equipos y técnicas de ensayo.

Para evaluar la respuesta del suelo frente a los cambios de succión es necesario determinar la curva de retención del suelo, con la cual se pueden conocer aspectos como la evolución de la humedad, el índice de poros y el grado de saturación a medida que el suelo sufre desecación o se humedece. Mediante esta curva se puede determinar por ejemplo la succión para la cual el suelo comienza a desaturarse y esto es esencial para saber si un cierto proceso de agrietamiento que se inicia a una determinada succión, ocurre en condición de suelo saturado o no y así mismo, si se puede utilizar el principio de tensiones efectivas o si por el contrario, es necesario acudir a un modelo de suelos parcialmente saturados.

De manera complementaria a la curva de retención, es conveniente conocer las propiedades del suelo cuando hay cambios tanto en succión como en carga y esto se puede hacer mediante ensayos edométricos de succión controlada. Los resultados que se obtienen con este tipo de ensayos sirven para analizar aspectos como cambios en los módulos de compresibilidad o en la relación de sobreconsolidación, producidos por incrementos de succión. Adicionalmente, si tienen suficientes trayectorias de carga y de succión, se pueden determinar los parámetros necesarios para aplicar un modelo elastoplástico de suelos parcialmente saturados como el de Alonso et al (1990), que resultaría útil para analizar en próximas investigaciones el comportamiento del suelo en etapas posteriores al agrietamiento inicial, cuando en general se encuentra en condición no saturada.

Respecto a la resistencia a la tracción del suelo, se puede decir que es un parámetro indispensable para establecer las condiciones de tensión que dan inicio a las grietas, pero en realidad su estudio ha sido relativamente escaso y se requiere de mayor investigación básica, principalmente para explorar sobre los mecanismos de rotura en tracción, conocer cómo es la influencia de la succión en la resistencia, evaluar las relaciones entre tensión de tracción, succión y deformación y verificar algunas relaciones propuestas entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión. En este sentido es indispensable hacer un amplio trabajo experimental con medición directa de las diferentes variables que intervienen.

En cuanto a la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM), algunos modelos acuden a ella para estimar el avance de las grietas de tracción (Lee et al, 1988, Morris et al, 1992, Konrad y Ayad, 1997a). En estos casos no se intenta identificar el mecanismo ni las condiciones de inicio de las grietas sino la estabilidad o el avance de las mismas cuando ya han sido formadas y para esto es necesario determinar, mediante ciertos ensayos de laboratorio, los parámetros de fractura de la arcilla.

Teniendo en cuenta los importantes desarrollos teóricos y experimentales que tiene la LEFM se consideró conveniente hacer una revisión general de sus principios básicos y determinar, mediante un adecuado programa experimental, los parámetros de fractura de la arcilla de Bogotá y en general, evaluar las posibilidades y limitaciones que tiene esta ciencia, para ser aplicada al estudio de agrietamiento de arcillas. Sin duda, la mecánica de fractura abre un panorama muy interesante y bastante racional para abordar el problema de la propagación de los agrietamientos tanto en términos de balance de energía como de distribución de tensiones y deformaciones e incorpora un aspecto esencial del comportamiento que es el denominado

efecto de tamaño de mecánica de fractura (Bazant, 1984). Este tema merece atención especial porque a diferencia de lo que se determina mediante las teorías clásicas de resistencia de materiales, cuando hay fracturas, tanto la tensión máxima resistente como la deformabilidad del elemento fracturado dependen del tamaño del mismo elemento, lo cual tiene fuertes implicaciones de tipo práctico al analizar la estabilidad de grandes estructuras o importantes volúmenes de suelo que sufren agrietamiento. Cuando se estudia la propagación de grietas en las barreras de arcilla de los depósitos de residuos radiactivos, la mecánica de fractura puede ser una herramienta de gran utilidad para analizar tanto los procesos de avance lento o estable de las grietas producido por altas presiones internas de gas, como las condiciones de avance inestable que pueden dar origen al paso de los gases contaminados a través de la arcilla.

Con el propósito de lograr una mejor comprensión de los mecanismos y características del agrietamiento de las arcillas, es muy conveniente que además de las propiedades descritas anteriormente se analicen aspectos morfológicos de los procesos de inicio y evolución de las grietas a diferentes escalas y que se estudien los efectos de otras variables que intervienen, como la humedad inicial, la humedad de agrietamiento, la tasa de desecación, las condiciones de contorno, etc. Este tipo de evaluaciones permite conocer aspectos como la evolución típica de los microagrietamientos a diferentes humedades, la humedad y grado de saturación al momento de inicio de las grietas, las relaciones existentes entre las características de restricción a la contracción y las condiciones de inicio y orientación de las grietas, el efecto de hidratar un suelo agrietado, etc.

Sólo con el estudio sistemático de los mecanismos y variables que intervienen en los procesos de agrietamiento de suelos por desecación se puede avanzar en la comprensión integral del fenómeno y de esta manera reducir un importante margen de incertidumbre que aún persiste en los modelos de predicción existentes.

## **1.2 Objetivos y alcances del estudio**

Son múltiples las variables que intervienen en los mecanismos de retracción y agrietamiento de suelos y su estudio sistemático es aún escaso. Tales variables están íntimamente relacionadas entre sí, son muy dependientes de las condiciones de contorno y particularmente se modifican de forma drástica durante la evolución de los procesos, puesto que las discontinuidades inducen fenómenos de localización de deformaciones, variaciones de las condiciones generales de tensión, cambios en la succión, variación de la permeabilidad, etc. Por esta razón, el problema resulta bastante complejo y en muchos casos, para evaluar comportamientos, es necesario recurrir a simplificaciones importantes o asumir valores que no tienen mucha justificación teórica o experimental. En este sentido, el objetivo general de la presente investigación es profundizar en el conocimiento de los mecanismos y variables más relevantes que intervienen en los procesos de agrietamiento de suelos arcillosos por fenómenos de retracción.

Este objetivo general incluye varios objetivos específicos dentro de los cuales se destacan los siguientes: evaluar las características de resistencia a la tracción de los suelos arcillosos incluyendo relaciones poco investigadas entre tensión, deformación y succión; verificar la posible aplicabilidad de la mecánica de fractura a los problemas de propagación de grietas en suelos arcillosos e investigar sobre los procesos morfológicos de la retracción y el agrietamiento de la arcilla a escala microscópica y escala intermedia.

La investigación es fundamentalmente de carácter experimental y requirió de la construcción o adecuación de algunos equipos para realizar pruebas no convencionales. Con los resultados que se obtienen se espera mejorar aspectos conceptuales importantes para la comprensión de los mecanismos de retracción y agrietamiento de suelos, ampliar la base de datos sobre diferentes variables que intervienen en tales mecanismos y tener información básica para el conocimiento particular de la arcilla de Bogotá que permita en un futuro hacer predicciones sobre evolución de los problemas de deformación y agrietamiento que la afectan.

Buena parte del estudio está basada en algunos modelos propuestos sobre inicio y propagación de grietas producidas por desecación. Aquí se discute sobre tales modelos y fundamentalmente se hace trabajo experimental sobre las variables individuales que en ellos intervienen, incluso en algunos casos se proponen ciertas modificaciones conceptuales a los modelos existentes, sin embargo se sale de los alcances de la presente investigación la comparación sistemática de resultados numéricos y experimentales de los diferentes modelos, pues se considera que esta es una etapa posterior, en la cual, como ya se indicó, se producen interrelaciones complejas y por lo tanto es necesario tener previamente una buena comprensión de los fenómenos físicos en su forma más simple y datos que permitan adelantar de manera apropiada la modelación.

### **1.3 Organización de la tesis**

La tesis se dividió en ocho capítulos, en cada uno de los cuales se intenta plantear y desarrollar un tema específico. El esquema general que se trató de seguir en la mayoría de los capítulos comprende en primer lugar una pequeña introducción, donde se plantea el problema que se quiere estudiar y la descripción del proceso propuesto para desarrollarlo, después se revisa el estado del conocimiento sobre el tema y se discuten los aspectos en los que se considera necesario profundizar, posteriormente se entra a la descripción metodológica detallada del programa experimental, luego se muestran los resultados obtenidos con sus respectivos análisis y comentarios y finalmente se hacen las conclusiones particulares del capítulo. Las tablas y figuras se presentan en orden consecutivo al final de cada capítulo.

En el capítulo primero se plantean los antecedentes y la justificación de la investigación, los objetivos que se buscan y la organización metodológica empleada.

En el capítulo 2 se hace la caracterización de la arcilla que se utiliza en la investigación, aquí se presenta en primer término su entorno geológico, luego se presentan los intervalos de variación de sus propiedades geotécnicas generales, determinadas en ensayos convencionales, como son: humedad natural, tamaño de granos, plasticidad, densidad, índice de poros, grado de saturación y resistencia no drenada. Posteriormente se describen las propiedades mineralógicas y microestructurales de la arcilla, evaluadas estas últimas mediante microscopio electrónico de barrido en modo ambiental (ESEM).

Después de esta caracterización que se podría denominar convencional, se entra ya a evaluar aspectos relacionados con las características de retracción de la arcilla, donde la succión juega un papel esencial debido a que las variaciones de succión son las responsables de los cambios volumétricos que se producen durante los procesos de desecación. Para este tipo de evaluaciones se emplearon varios equipos y procedimientos de uso frecuente en la caracterización de suelos parcialmente saturados. Inicialmente se determinan, mediante

diferentes técnicas, las curvas de retención de la arcilla tanto en condición inalterada como remodelada. Estas curvas brindan información básica respecto a la evolución de parámetros como la humedad, el índice de poros o el grado de saturación, en función de los cambios de succión.

Complementario a las curvas de retención se hacen ensayos edométricos que incluyen pruebas convencionales como pruebas con succión controlada. En estas últimas se emplearon dos técnicas de aplicación de succión: mediante equilibrio de vapor y mediante ósmosis, utilizando polietilén glicol (PEG) y en ambos casos se hicieron ciertas trayectorias de carga y de succión. Los resultados obtenidos de estos ensayos permiten determinar los parámetros de compresibilidad de la arcilla y evaluar los efectos de la succión en la deformabilidad del suelo, información necesaria para cualquier análisis numérico posterior.

Finalmente en este mismo capítulo se determinan características de resistencia de la arcilla reconstituida mediante ensayos triaxiales de compresión y de extensión, ensayos de compresión simple y ensayos de corte directo. Estos resultados se utilizan posteriormente en el capítulo 4 para analizar y comparar la resistencia a la compresión con la resistencia a la tracción.

En el capítulo 3 se hace una revisión del estado del arte sobre los estudios de agrietamiento de suelos y con base en esto se plantea una clasificación de los mismos en cinco categorías, cada una de las cuales se discute brevemente para luego entrar más a fondo en la revisión de los modelos físicos que tienen que ver con los mecanismos de inicio y propagación de grietas y con el flujo a través de suelos agrietados. Aunque hay numerosos estudios sobre agrietamiento, sólo hay unos cuantos modelos relativamente generales y aquí se describen y comentan los cinco, que de acuerdo con lo estudiado por el autor, se pueden considerar los más completos desde un punto de vista conceptual.

El capítulo 4 aborda el tema de la resistencia a la tracción. En primer lugar se hace una revisión de los estudios sobre el tema y posteriormente se entra en la fase experimental, consistente en ensayos de tracción directa sobre muestras reconstituidas de la arcilla, preparadas a diferentes humedades iniciales. Se hicieron dos tipos de ensayos: de carga controlada y de deformación controlada. En los de carga controlada se aplicaban pequeños incrementos de carga y se medían las deformaciones de la muestra mediante un LVDT y la succión, mediante un pequeño tensiómetro de lectura rápida (tensiómetro del Imperial College, Ridley y Burland 1993, 1996). En los ensayos de deformación controlada se aplicaba una velocidad de desplazamiento constante y se medía la tensión con una celda de carga y la deformación con un LVDT. Los resultados obtenidos permiten conocer características interesantes de los suelos sometidos a tracción, como la resistencia a la tracción directa en diferentes condiciones de humedad o de succión, las relaciones tensión-deformación-succión, las relaciones entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión, etc.

Con base en los resultados de estos ensayos se propone un modelo nuevo de análisis de la resistencia a la tracción que permite introducir ciertas mejoras de tipo conceptual para la comprensión de los mecanismos de inicio de grietas en términos de tensiones efectivas, puesto que en los modelos existentes siempre se ha trabajado el tema de la resistencia a la tracción en tensiones totales.

El capítulo 5 comprende en primer lugar una revisión de conceptos básicos de mecánica de fractura lineal elástica (LEFM), necesarios para lograr suficiente comprensión de los fundamentos teóricos de la misma y para conocer la nomenclatura y los tipos de pruebas que se plantean. Aquí se estudian aspectos como la transformación de energía elástica en energía de superficie, la tensión de fractura de Griffith, las diferencias desde el punto de vista energético entre procesos de agrietamiento en carga controlada y en deformación controlada y en particular se revisan los conceptos de tasa crítica de liberación de energía y factor de intensidad de tensiones crítico pues estos son los dos parámetros fundamentales de la LEFM que sirven para saber si una grieta de determinada longitud inicial permanecerá estable o se prolongará bajo ciertas condiciones de tensión.

Después de esta revisión teórica se presentan los procedimientos y resultados de varios ensayos realizados, con los cuales se determinaron parámetros básicos de LEFM. Estos ensayos se hicieron sobre muestras reconstituidas y se llevaron a rotura en condiciones de carga controlada y de deformación controlada. De manera complementaria se estudia el efecto de tamaño de mecánica de fractura, para lo cual se presentan inicialmente sus fundamentos teóricos y luego se describen los ensayos que se realizaron y los resultados obtenidos. En este caso las pruebas se hicieron con muestras geoméricamente similares pero de tres tamaños diferentes. Los resultados de los distintos métodos de ensayo y de cálculo se analizan y se comparan con los obtenidos para otros tipos de suelos, así mismo se identifican algunos problemas relacionados con la no linealidad del comportamiento de la arcilla, lo cual constituye una de las limitantes principales para la aplicación directa de la LEFM al análisis de grietas en suelos.

En el capítulo 6 se presenta un estudio microscópico de los agrietamientos, basado en la descripción morfológica de los procesos de inicio y propagación de microagrietamientos observados en el microscopio electrónico y en el microscopio óptico. Aquí se trabajó con muestras reconstituidas que se instalaron en un pequeño molde, cuya forma impedía la libre retracción e inducía el agrietamiento de la arcilla a medida que perdía humedad. Las características morfológicas observadas en las diferentes etapas del proceso de secado se asociaban a los cambios de humedad y de succión. Aquí se estudia además el efecto de la rehidratación del suelo en la evolución de los agrietamientos y los efectos de la restricción a la contracción impuesta por la forma del molde. Al final se plantea un posible mecanismo de avance de las grietas, basado en las observaciones micromorfológicas y en ciertos conceptos de mecánica de fractura.

El capítulo 7 es complementario al anterior, pues se analiza visualmente y de manera directa la morfología de los agrietamiento en muestras sometidas a desecación. En este caso obviamente las muestras fueron de mayor tamaño y se utilizaron diferentes moldes para su fabricación. Los ensayos consistieron en dejar desecar muestras reconstituidas de arcilla e ir observando a diferentes tiempos su evolución. Simultáneamente se registraban las variaciones de humedad de la muestra y de humedad relativa y temperatura del ambiente. Aquí se determinaron parámetros importantes como variación de la tasa de desecación, condiciones de inicio de las grietas visibles, efecto de las condiciones de frontera impuestas por los distintos moldes y respuesta de los agrietamientos ante la rehidratación del suelo. Además, a partir del análisis de fotografías que se digitalizaron, se determinó cuantitativamente la evolución de grado de agrietamiento.

Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones generales de la investigación, donde se recogen de manera más amplia e interrelacionada las conclusiones que se presentaron en cada uno de los capítulos precedentes. Además se plantean las recomendaciones para futuros estudios sobre el tema donde se resaltan, entre otras, la necesidad de continuar la línea de investigación básica de las variables que intervienen en el agrietamiento, analizar el tema de la mecánica de fractura elastoplástica para tener en cuenta la no linealidad del material y realizar modelación numérica de procesos de retracción y agrietamiento, partiendo de casos muy simples como los que aquí se trabajaron de forma experimental.