

CAPÍTULO 3

ESTUDIOS DE AGRIETAMIENTO DE SUELOS: ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción

El fenómeno del agrietamiento de suelos es un problema que actualmente no está totalmente claro y aunque hay numerosos estudios al respecto, no se dispone de un modelo que tenga aceptación general y que esté debidamente contrastado experimentalmente. Con el estado actual de conocimiento resulta difícil predecir con certeza aspectos como el punto de inicio de una grieta, su dirección y profundidad, su interrelación con otras grietas verticales y horizontales, los efectos de las condiciones de contorno en el agrietamiento, el comportamiento ante ciclos de humedecimiento y secado, la velocidad de avance horizontal y vertical, etc.

Existen sin embargo formulaciones que buscan resolver algunos de estos interrogantes y en particular plantean desde un punto de vista teórico, cuáles son los mecanismos y condiciones que gobiernan el inicio y propagación de grietas debidas a desecación del suelo o proponen criterios más generales para cuantificar características geométricas medias, tales como áreas o volúmenes de grietas que se pueden esperar en un terreno bajo ciertas condiciones particulares.

En este capítulo se presenta inicialmente una visión general del estado del conocimiento sobre el tema de agrietamiento de suelos, para lo cual se propone una clasificación de los tipos de estudios encontrados en la literatura, de acuerdo con su enfoque principal, posteriormente se entra a revisar y comentar los modelos de agrietamiento que se consideran más completos y de mayor interés para esta investigación. Cuatro de los modelos que se revisan corresponden a modelos físicos de inicio y propagación de grietas y uno a un modelo de flujo a través de un suelo agrietado. Buena parte de los temas que incluyen los modelos son los que se tratan con mayor profundidad en los capítulos siguientes de la tesis, como son la resistencia a la tracción, la aplicación de la mecánica de fractura y el estudio de aspectos morfológicos y de evolución de los agrietamientos tanto en muestras de laboratorio como a nivel microscópico.

3.2. Estado del conocimiento sobre el agrietamiento de suelos

Son múltiples los estudios que existen sobre problemas de agrietamiento de suelos y con el fin de tener un panorama general sobre el estado del conocimiento del tema, se tratará de hacer aquí una clasificación de los mismos con base en su enfoque principal, anticipando que muchos de ellos podrían formar parte de dos o más de las categorías seleccionadas. La clasificación comprende 5 categorías que son:

1. Estudios de morfología y evolución de grietas
2. Estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos
3. Estudio de variables individuales que intervienen en el agrietamiento de suelos
4. Modelos de inicio, propagación y distribución espacial de grietas
5. Estudios del comportamiento de suelos agrietados

Cada categoría se describe a continuación y en la Tabla 3.1 se presenta un resumen general, donde se indica además cuáles temas se tratan con mayor énfasis en la presente tesis.

3.2.1 Estudios de morfología y evolución de grietas

Este tipo de estudio tiene la finalidad de describir las características geométricas o morfológicas de las grietas presentes en un suelo, tales como su longitud, profundidad, inclinación, abertura, patrón de agrietamiento observado en planta y en profundidad, estrías de fricción, etc. También se trata de identificar la evolución de tales características morfológicas.

De acuerdo con la escala de evaluación se pueden distinguir cuatro tipos de estudios: a escala macro se hacen estudios identificación de grietas in-situ, algunos de ellos de carácter regional que incluyen la caracterización de grietas con longitudes hasta de varios kilómetros (ej. Holzer, 1984, Trejo y Martínez, 1991) o estudios más locales sobre agrietamientos del orden de metros o decenas de metros (ej: Juárez y Rico, 1969, Bligh, 1971, Orozco y Figueroa, 1991, Murillo et al, 1991). La caracterización morfológica de las grietas se emplea para plantear hipótesis sobre las posibles causas y evolución del problema. La cartografía de agrietamientos observado en planta es relativamente simple, sin embargo, se encuentra que hay cierta dificultad para determinar con certeza la geometría de las grietas en profundidad puesto que, tal como lo indican Morris et al (1992), resulta difícil medir tanto la profundidad de las grietas como su abertura sin que se alteren estas dimensiones por los procesos mismos de medición.

Los estudios a escala intermedia corresponden a campos de prueba sobre el terreno natural, en los cuales se instala instrumentación tanto para controlar las variables meteorológicas como las condiciones de humedad, succión y deformación que se van presentando en el terreno. Este tipo de estudios permite conocer las condiciones de inicio de las grietas y los procesos de avance de las mismas en un determinado sitio de interés. Entre los trabajos de esta naturaleza se pueden citar los de Konrad y Ayad (1997b) y los de Fujiyasu et al (2000).

A escala de mayor detalle se encuentran los estudios realizados en lisímetros o tanques de prueba debidamente instrumentados y los ensayos de laboratorio sobre muestras que se someten a desecación. En el primer grupo se pueden mencionar los trabajos de Drumm et al (1997), Miller et al, 1998, Yesiller et al (2000) y Rodríguez (2002), donde además de la morfología de los agrietamientos se evalúan los efectos de las grietas en las condiciones de flujo a través del suelo. En el segundo grupo se encuentran por ejemplo los trabajos de Corte e Higashi (1960), Lau, (1987, citado por Kodikara et al, 2000) y Lloret et al (1998). En esta tesis se realizan ensayos de retracción en muestras de laboratorio con los cuales se busca caracterizar la morfología del agrietamiento de la arcilla de Bogotá y establecer relaciones entre las características de agrietamiento, las propiedades mecánicas medidas y las

condiciones de contorno impuestas por la forma de los moldes donde se confinan las muestras.

A escala microscópica existen varias investigaciones sobre la estructura y la fábrica de arcillas (ej: Collins y McGown, 1974, Grabowska-Olszewska et al, 1984, Mitchell 1993, Romero 1999). Sobre microagrietamientos de suelos producidos por desecación, el autor no encontró referencias, aunque sí hay estudios sobre microagrietamientos de arcillas inducidos por deformaciones de corte (Morgenstern y Tchalenko, 1967) y varios estudios de microagrietamientos en otros tipos de materiales como el hormigón, el acero y otras aleaciones (Bisschop y van Mier, 1999, Broek, 1986). La investigación sobre microagrietamiento de arcillas por desecación se considera de gran importancia para comprender el fenómeno a otras escalas y este es uno de los aspectos que se trabaja en la presente investigación.

3.2.2 Estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos

En estos casos las grietas se estudian como un efecto secundario asociado a un problema local específico. Dentro de los estudios de esta naturaleza se pueden considerar los producidos por subsidencia del terreno, los producidos por efecto de los árboles y los que se generan por eventos sísmicos o volcánicos. En el caso de los agrietamientos por subsidencia la causa principal es la desecación por extracción de agua subterránea, aunque también en algunas ocasiones la presencia de estructuras geológicas profundas como son fallas o contactos litológicos en zonas que sufren subsidencia, crean deformaciones no uniformes las cuales se manifiestan superficialmente como discontinuidades, escalones y grietas. Los estudios sobre este tema están muy relacionados con la evaluación morfológica de grietas a escala regional, descrita anteriormente.

Los estudios de deformaciones y agrietamientos del terreno producidos por presencia de árboles son relativamente abundantes, principalmente por los frecuentes y costosos deterioros que ocurren en estructuras vecinas a ellos. Los tipos de estudios comprenden patrones de desecación en la vecindad de árboles (Ej: Biddle, 1983), características de evapotranspiración de algunas especies y su efecto en las deformaciones (Ej: Williams y Pidgeon, 1983, Ravina, 1983, Blight, 1997, etc.), relaciones entre deterioro de estructuras y presencia de árboles (Ej: Beltrán, 1979, Driscoll, 1983, Holtz, 1983, Richards et al, 1983, Alonso y Lloret, 1995, etc.) y modelos numéricos que buscan simular los procesos de asentamiento por extracción de agua producida por las raíces (Ej: Mathur, 1999).

Las grietas que se producen por sismos se han reportado en múltiples casos, su estudio se emplea para evaluar las características e intensidad de los eventos y es tema de interés en ingeniería sísmológica. Las grietas que se producen por eventos volcánicos también han sido motivo de estudio, pues ellas dan indicio de características de los flujos y de los materiales que los conforman, además resulta indispensable considerarlas en los mapas de amenaza volcánica. Sus dimensiones son variables, por ejemplo en los levantamientos morfológicos del volcán Bandai en Japón, que hizo su última erupción en 1888, se reportan fisuras lineales entre 200 m y 2 km de longitud que se extienden verticalmente, con profundidades entre 2 y 7 m (Sekiguchi et al, 1997).

3.2.3 Estudio de variables individuales que intervienen en el agrietamiento de suelos

Estos son estudios muy específicos y en general de carácter investigativo, sobre las propiedades hidráulicas y mecánicas que intervienen en el agrietamiento de los suelos. Aquí se incluyen por ejemplo las investigaciones sobre características de retracción y expansión, los estudios de resistencia a la tracción y los estudios de mecánica de fractura. Respecto a los estudios de retracción y expansión, actualmente existen modelos conceptuales y técnicas experimentales y numéricas desarrollados a partir de la mecánica de suelos parcialmente saturados, donde la succión se incluye como una de las variables importantes que gobiernan el fenómeno, entre estos se pueden mencionar por ejemplo los trabajos de Lloret y Alonso (1980, 1985), Gili y Alonso (1988), Alonso et al (1990), Gens y Alonso (1992), Fredlund y Rahardjo (1993), Marinho (1994), Olivella et al (1995), Romero (1999), etc. Estos modelos y técnicas en general han sido desarrollados para medios continuos, por lo tanto sólo permiten evaluar las condiciones previas al agrietamiento o las condiciones de los bloques individuales que han sufrido agrietamiento pero que no presentan discontinuidades internas.

La resistencia a la tracción es una propiedad fundamental cuando se estudian las características de agrietamiento de cualquier material. En el capítulo 4 se presenta con detalle la discusión sobre los diferentes tipos de estudios de resistencia a la tracción en suelos y aquí simplemente se indica que tales estudios son relativamente escasos y que aún hace falta explorar sobre las relaciones entre tensión-deformación y succión. Este es uno de los aspectos que se investiga en la presente tesis.

Los estudios de mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) aplicados al agrietamiento de suelos, no son muchos, aunque en los últimos años se ha visto que este enfoque es promisorio para comprender los mecanismos de agrietamiento y en particular para evaluar las condiciones de prolongación de las grietas, por lo tanto se han comenzado algunas investigaciones sistemáticas (Konrad y Ayad, 1997a, Sture et al, 1999, Konrad y Cummings, 2001, Ávila et al 2002, etc.). En el capítulo 5 de esta tesis se hace una evaluación de la aplicabilidad de la LEFM a las arcillas de Bogotá y se determinan experimentalmente los respectivos parámetros. También se explora el tema del efecto de tamaño de mecánica de fractura que es un asunto poco estudiado desde el punto de vista geotécnico, a pesar de ser importante para establecer condiciones de estabilidad.

3.2.4 Modelos de inicio, propagación y distribución espacial de grietas en suelos

Estos modelos se pueden agrupar en tres categorías: modelos físicos unidimensionales de inicio y propagación de grietas, modelos físicos de distribución espacial de grietas y modelos probabilísticos de distribución espacial de grietas. En el apartado 3.3 se hace una revisión de los dos primeros modelos que fundamentalmente buscan determinar bajo qué condiciones se inicia una grieta, hasta dónde se profundizará y cuál será la distancia entre dos o más de las grietas que se forman. Los modelos probabilísticos pretenden simular tanto los mecanismos de inicio como de propagación de múltiples grietas, en múltiples direcciones, mediante algoritmos de crecimiento e interrelación que se basan en patrones de agrietamiento observados en muestras de laboratorio e in-situ, sobre distintos tipos de suelo, con lo cual se obtienen resultados relativamente similares a la condición real. Los hay de tipo bidimensional (ej: Moran y McBratney, 1997 y Horgan y Young, 2000) y de tipo tridimensional (ej: Chertkov y Ravina, 1998).

Considerando la gran dificultad que representa predecir con los modelos netamente físicos las condiciones reales de agrietamiento tanto bidimensional como tridimensionalmente, los métodos probabilísticos brindan una posibilidad interesante de aproximación desde el punto de vista práctico, sin embargo, el problema es que actualmente ellos no tienen en cuenta de manera explícita, variables importantes ya mencionadas que intervienen en el agrietamiento de los suelos, como son las características de retracción, la resistencia a la tracción ni la mecánica de fractura. Probablemente un modelo combinado sería mucho más acertado, pero para esto se requiere de mayor investigación básica de tales variables.

3.2.5 Estudios del comportamiento de suelos agrietados

En estos casos se estudian los efectos de las grietas sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, sin que el interés principal sea explorar sobre las causas de tales agrietamientos. Dentro de este enfoque general se pueden distinguir dos tipos de estudios: aquellos que tienen que ver directamente con la alteración de las propiedades hidromecánicas, tales como la resistencia al corte, la permeabilidad y la deformabilidad (ej: Skempton, 1964, Lo, 1970, Costa Filho, 1984, Vallejo, 1987, Khalili-Naghadeh y Valliappan, 1995, etc.) y aquellos que tienen que ver con el flujo que se presenta a través de las grietas, mediante modelos como el de Bronswijk (1988), que se describe con mayor detalle en el apartado 3.3.2.

3.3. Revisión de algunos modelos físicos de agrietamiento y de flujo

Existen varios modelos físicos que buscan interpretar y simular los procesos de inicio de grietas, calcular la profundidad máxima de agrietamiento y estimar la separación o distancia entre grietas. Aquí se analizan cuatro de ellos que en general representan el panorama actual del estado del conocimiento sobre el tema: modelos de Lee et al (1988), Morris et al (1992), Abu-Hejleh y Znidarčic (1995) y Konrad y Ayad (1997a). También se describe un modelo de flujo en el que se tiene en cuenta el efecto del agrietamiento y la contracción de la arcilla (modelo de Bronswijk, 1988). Es importante mencionar que previo a estos modelos generales existían varias propuestas y formulaciones sobre los mecanismos que gobiernan el agrietamiento de arcillas y que sirvieron de base a los desarrollos más recientes, entre ellos se pueden citar por ejemplo trabajos de Juárez (1959), Bligh (1971, 1997), Baker, (1981), Bouma y De Laat (1981) y Belmans et al (1983). Además hay trabajos teóricos muy importantes sobre mecanismos de fractura en materiales rígidos como los de Irwin (1957) y Lachenbruch (1961) que han sido retomados por las teorías modernas para explicar mecanismos de propagación de grietas en suelos.

3.3.1 Modelo de Lee et al (1988)

Este es un modelo desarrollado para evaluar numéricamente la dirección de propagación de grietas. El modelo considera que a partir de la punta de una grieta existente, su propagación se presenta en dirección normal a la máxima tensión circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$) actuante, que de acuerdo con lo planteado por Erdogan y Sih (1963), al momento de inicio del agrietamiento esta tensión se evalúa como:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{\max} \sqrt{2\pi r} = K_{IC} \quad (3.1)$$

Donde K_{IC} es el factor de intensidad de tensiones crítico o tenacidad a la fractura, empleado en mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) y r es cualquier longitud radial a partir de la punta de la grieta, en la dirección θ_o , que es la dirección donde actúa $(\sigma_{\theta\theta})_{\max}$.

K_{IC} lo determinan a partir de la tasa crítica de liberación de energía (G_{IC}), mediante la expresión:

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (3.2)$$

Donde E es el módulo de Young y ν la relación de Poisson.

Los autores presentan un procedimiento para determinar en laboratorio G_{IC} sobre una muestra de arcilla, que probablemente es el primero reportado en la literatura sobre este tipo de material (para mayor información, en el capítulo 5 se presentan los detalles de la prueba).

Para la evaluación numérica de propagación de la grieta emplearon una malla de elementos finitos triangulares (Fig. 3.1a). En la parte media de cada uno de los elementos que están alrededor de la punta de la grieta se calcula la tensión circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$) y se obtiene la variación de esta tensión para diferentes ángulos respecto al eje de la grieta, es decir, que se puede hacer una curva de ($\sigma_{\theta\theta}$) contra θ . Esta curva se ajusta a una ecuación cúbica, se deriva y se iguala a cero para determinar el valor máximo de la tensión circunferencial $(\sigma_{\theta\theta})_{\max}$ y su respectiva orientación (θ_o). Luego se determina $(\sigma_{\theta\theta})_{\max} \sqrt{2\pi r}$ y se compara con K_{IC} obtenido en el laboratorio. La grieta se extiende en la dirección prevista siempre y cuando $(\sigma_{\theta\theta})_{\max} \sqrt{2\pi r}$ sea mayor que K_{IC} y en tal caso, la punta pasa a su nueva posición X, mientras que el nodo O se separa en los nodos O' y O'' (Fig. 3.1b).

Respecto al inicio del agrietamiento, los autores lo evalúan mediante el criterio de la resistencia a la tracción, para lo cual comparan las tensiones principales con los valores experimentalmente determinados de resistencia a la tracción.

Finalmente se presentan dos ejemplos de aplicación del modelo: el primero el de un terraplén rígido sobre estratos de arcilla blanda y el segundo el de un corte vertical en arcilla. En ambos casos evaluaron la sensibilidad de la evolución de los agrietamientos a las propiedades de los materiales y a la geometría del problema donde muestran que el modelo reproduce de forma razonable la evolución de los agrietamientos.

3.3.1.1 Cometarios al modelo de Lee et al (1988)

Se puede afirmar que este modelo presenta tres aportes importantes: el primero consiste en el hecho de involucrar la mecánica de fractura en la evaluación de la propagación de los

agrietamientos en arcillas, el segundo en presentar una metodología para determinar G_{IC} en arcilla (aunque con ciertas limitaciones al no poderse determinar con precisión la posición de avance de la punta de la grieta, como se discute en el capítulo 5) y el tercero en proponer un criterio objetivo para estimar la posible dirección de propagación de grietas.

En cuanto al criterio de inicio de grietas se considera como un problema en tensiones totales, dado en función de un parámetro único que es la resistencia a la tracción, pero no se hace ningún tipo de referencia respecto a la trayectoria de tensiones seguida hasta la rotura ni respecto al efecto de la succión.

3.3.2 Modelo de Morris et al (1992)

Estos autores presentan un análisis de tres posibles enfoques para evaluar la propagación de grietas en suelos: teoría lineal elástica, mecánica de fractura lineal elástica y relaciones de resistencia al corte.

Fundamentalmente derivan las expresiones de tensión horizontal que se obtendrían por cada uno de los métodos y las igualan a la resistencia a la tracción del suelo. Para la evaluación de las tensiones se considera que el suelo está parcialmente saturado y el análisis lo hacen con base en las formulaciones de Fredlund & Morgenstern (1976) y de Fredlund (1979). A partir de la tensión horizontal y de la resistencia a la tracción del suelo deducen la profundidad de agrietamiento. A continuación se presenta una breve descripción de cada formulación:

a) Formulación basada en teoría elástica: presentan tres expresiones para calcular la profundidad de agrietamiento: la primera considerando succión y resistencia a la tracción constantes, la segunda considerando la resistencia constante y la succión disminuyendo linealmente con la profundidad y la tercera considerando la succión variable y la resistencia a la tracción también variable en función de la succión matricial en la punta de la grieta. El criterio de agrietamiento consiste en comparar la resistencia a la tracción del suelo y la tensión horizontal actuante. Esta tensión es función de la succión, del módulo de elasticidad debido a cambios en tensiones totales (E) y del módulo de elasticidad debido a cambios de succión (H). Por lo tanto, las expresiones para evaluar profundidad de agrietamiento involucran la succión actuante, los parámetros elásticos, la resistencia del suelo y de la profundidad del nivel freático.

b) Formulación basada en LEFM: evalúa la profundidad de agrietamiento con base en la comparación entre el factor de intensidad de tensiones (K_I) y el factor de intensidad de tensiones crítico (K_{IC}). El primero se calcula con la tensión horizontal actuante (variable con la profundidad) y el segundo, que es una propiedad del material, lo calculan a partir de la energía de superficie, para lo cual acuden a intervalos de valores típicos reportados para suelos.

c) Formulación basada en la resistencia al corte: Aquí se evalúan tres posibles casos:

- el primero se basa en los planteamientos de Bagge (1985) que considera el agrietamiento como un mecanismo relacionado con una transición entre rotura por tracción y por corte. En un plano $(p-u_a) - q$ como se muestra en la Figura 3.2, la sección AB representa la línea de rotura en tracción y la sección BC, con pendiente M, la línea de rotura en corte. El punto B corresponde a un estado a partir del cual la tensión

vertical se hace suficientemente grande como para evitar que ocurra la rotura por tracción, de tal manera que la línea BD con pendiente $-3/2$ representa la tensión vertical efectiva a la profundidad máxima de agrietamiento o profundidad crítica z_c . Entonces, conocida la resistencia a la tracción (σ_t) y la envolvente de rotura por corte, se pueden localizar los puntos B y D y a partir de D, se calcula la profundidad crítica ya que $D = \gamma z_c$, donde γ es el peso unitario del suelo.

- El segundo caso es similar al anterior, pero ahora la resistencia a la tracción ya no es constante sino que varía en función de la succión, como $\sigma_t = -0.5(u_a - u_w) \tan \phi^b \cot \phi'$, donde $(u_a - u_w)$ es la succión matricial, ϕ^b es el ángulo de variación de la resistencia en función de la succión y ϕ' es el ángulo de fricción interna.
- El tercer caso corresponde a una extensión de un análisis tipo Rankine, en el que se considera que la rotura ocurre por corte cuando la tensión principal menor tiende a hacerse más negativa que la resistencia a la tracción (Fig. 3.3).

Al comparar los resultados de los diferentes procedimientos aplicados a un mismo problema, los autores concluyen que la solución elástica, la solución tracción-cortante y la solución de Rankine modificada son similares, mientras que los obtenidos por LEFM predicen profundidades de grietas mayores.

3.3.2.1 Comentarios al modelo de Morris et al (1992)

Probablemente lo más importante de destacar de este trabajo es el amplio panorama que presentan los autores para abordar desde un punto de vista teórico el problema de la profundidad de agrietamientos, en términos de las propiedades del suelo y el perfil de succión actuante. Además del desarrollo matemático de cada uno de los métodos, los resultados numéricos que presentan son de utilidad para comparar unos con otros y para evaluar sensibilidad de cada método a ciertos parámetros como la succión y la profundidad del nivel freático.

La principal objeción que se le ha hecho a estas formulaciones es que el suelo se considera no saturado cuando se ha demostrado por varios investigadores que el agrietamiento superficial ocurre en una fase de contracción inicial, para la cual, a pesar de que exista succión, el suelo está saturado, por lo tanto las ecuaciones no podrían usarse para predecir inicio de grietas ni profundidad inicial de propagación, aunque podrían ser de utilidad para evaluar inicio y propagación de grietas secundarias o de aquellas que se presentan cuando la humedad se ha reducido lo suficiente como para llevar al suelo a un estado no saturado (Konrad y Ayad, 1997a).

En el análisis basado en mecánica de fractura el factor de intensidad de tensiones crítico (K_{IC}) se calcula con base en la energía de superficie. Este es un parámetro difícil de medir y sólo se cuenta en la literatura con algunos estimativos muy amplios y por lo tanto es más conveniente medirlo directamente por alguno de los métodos que discuten en el capítulo 5.

La formulación del modelo de transición entre tracción y cortante, donde se muestran las trayectorias de tensiones, presenta cierta similitud con un modelo más desarrollado de desecación y agrietamiento, como es el de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995) que se discutirá enseguida.

Finalmente, el planteamiento que presentan de variación de la resistencia a la tracción con la succión para evaluar profundidad de agrietamiento es más razonable que el que considera tal resistencia uniforme ya que la resistencia a la tracción debe aumentar cuando aumenta la succión, es decir, aumenta a medida que el suelo se va desecando. Este comportamiento se discute en detalle en el capítulo 4.

3.3.3 Modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995)

Este modelo es el primero que presenta una formulación del proceso de consolidación, desecación y agrietamiento en términos de trayectorias de tensiones totales y efectivas, involucrando la succión y considerando el suelo en condición saturada.

Se plantean cuatro etapas del proceso correspondientes a las que sufriría un suelo en el campo después de su depósito:

- a) consolidación bajo compresión unidimensional
- b) contracción unidimensional
- c) propagación de grietas verticales, con relajación de tensiones de tracción y
- d) contracción tridimensional

En la Figura 3.4 se presentan estas etapas para un elemento de suelo típico: al inicio de la consolidación, el suelo es un lodo que está en condición semifluida y la tensión efectiva que actúa sobre el elemento es cero (punto O), mientras que la tensión total se localiza en el punto W. La presión de poros inicial es positiva, su valor es igual a la tensión vertical total y se representa en la gráfica por la distancia entre O y W. Debido a la consolidación y desecación esta presión positiva decrece, mientras que el elemento sufre contracción unidimensional, es decir, su deformación lateral neta es igual a cero y por lo tanto, en tensiones efectivas debe seguir la trayectoria de la línea K_0 , donde K_0 es el coeficiente de presión lateral de tierras en reposo. Si la tensión vertical permanece constante, la trayectoria tiene una pendiente $-3/2$ y el proceso de consolidación unidimensional está representado en tensiones totales por la línea WK y en tensiones efectivas por la línea OK. A lo largo de la línea KM, de tensiones totales y de la línea KB de tensiones efectivas, la presión de poros es negativa y el suelo sufre contracción unidimensional.

El modelo considera que el suelo comienza a agrietarse durante la contracción unidimensional cuando la tensión lateral total en la punta de la grieta se hace igual a la resistencia a la tracción del suelo:

$$-\sigma_h = \sigma_t \quad (3.3)$$

Donde σ_h es la tensión lateral total y σ_t es la resistencia a la tracción. Esta tensión lateral se desarrolla debido a la restricción en la deformación lateral que tiene el suelo.

Si el suelo no tiene resistencia a la tracción, las grietas verticales se pueden abrir cuando la tensión horizontal total se hace cero, es decir en el punto N de la Figura 3.4. En este momento el estado efectivo de tensión corresponde al punto Z, para el cual la tensión lateral efectiva es de compresión e igual a la succión actuante. Si el suelo tiene alguna resistencia a la tracción, se requiere mayor succión para generar el agrietamiento y en tal caso se presentaría en el punto M de tensiones totales y en el punto B de tensiones efectivas. En este momento se llega a un índice de poros denominado índice de poros de agrietamiento o crítico (e_{cr}) y a una tensión vertical efectiva denominada tensión efectiva de agrietamiento (σ'_{cr}).

Cuando se produce el agrietamiento en el punto M, se reduce la tensión lateral total hasta un valor cero, siguiendo la trayectoria MN, en este momento se abren completamente las grietas, formando columnas independientes de suelo. Si se asume que no hay cambios de succión durante el desarrollo de las grietas, la trayectoria de tensiones efectivas seguida durante el proceso de relajamiento de la tensión horizontal se puede representar por BV, paralela a MN. En las trayectorias MN ó BV hay descarga y los autores consideran que se puede desprestigiar cualquier cambio volumétrico asociado con el desarrollo de las grietas, pues su magnitud es muy baja comparada con los cambios de volumen en compresión, principalmente en la compresión tridimensional que sufren las columnas de suelo después del agrietamiento, cuya trayectoria corresponde a la línea VS. Adicionalmente al desprestigiar el cambio de volumen durante el agrietamiento, la trayectoria VS podría representarse por la trayectoria BU, con lo cual la contracción tridimensional parte justamente de la condición e_{cr} .

En síntesis hasta el momento se tiene un modelo que con base en las trayectorias de tensiones, la resistencia a la tracción y los parámetros de compresibilidad y de permeabilidad tanto en consolidación como en contracción unidimensionales, permite predecir el índice de vacíos al cual se produciría el agrietamiento del suelo. Este índice de vacíos crítico está expresado en términos de la tensión vertical total.

Por otra parte en un proceso de desecación, el índice de vacíos va cambiando a medida que el suelo pierde agua. Los autores plantean el desarrollo de la ecuación que gobierna este proceso basados en la formulación de consolidación unidimensional de Gibson et al (1967), pero además involucran la componente de deformación volumétrica, una vez que se ha presentado el agrietamiento y se forman columnas independientes de suelo. Esta formulación tiene en cuenta grandes deformaciones del suelo y se desarrolla en términos de coordenadas lagrangianas, considerando la ecuación de equilibrio, la ecuación de flujo en términos de la velocidad relativa aparente entre el agua y las partículas sólidas, el principio de tensiones efectivas y la ecuación de continuidad. La expresión final es una ecuación diferencial parcial no lineal, cuya solución los autores la resuelven por medio de un programa de elementos finitos.

Los resultados que obtienen, son las curvas de asentamiento-tiempo, los perfiles de tensión efectiva, los índices de poros a diferentes profundidades, las presiones de poros y las áreas específicas de grietas (área de grietas por unidad de área). La profundidad hasta la cual se presenta agrietamiento por desecación se obtiene cuando $e = e_{cr}$ y el volumen específico de grietas, definido como el volumen de grietas por unidad de área, lo evalúan mediante integración numérica de la distribución del área específica de grietas a lo largo de la profundidad de agrietamiento.

Para la evaluación numérica de la teoría se supuso un depósito de arcilla blanda de China (arcilla a la cual le habían determinado en el laboratorio los parámetros necesarios para el modelo) de 6 m de espesor y se simuló el efecto de descenso del nivel freático y el de desecación superficial. En el primer caso encontraron que la resistencia a la tracción tenía poca influencia tanto en el progreso de los asentamientos como en la profundidad y volumen específico de grietas. En el segundo caso encontraron que se formaba una costra superficial que influía en la compresión general del depósito y cuyo espesor y resistencia dependían de la tasa de desecación: cuando la tasa de desecación era baja, la costra se desarrollaba de forma lenta, su espesor era grande y se producía una compresión importante del depósito, en cambio, cuando la tasa de desecación era alta, el espesor de la costra era bajo pero se desarrollaba de forma rápida, de tal manera que se impedía la evaporación del agua y la consolidación general del depósito disminuía. Esto indica que una tasa de desecación alta puede tener un efecto de retardo en el proceso general de consolidación y desecación.

3.3.3.1. Comentarios al modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995)

Conceptualmente, este modelo es bastante interesante ya que permite una visualización racional del fenómeno de desecación en sus diferentes etapas hasta el agrietamiento y se destaca el hecho de que sea formulado en términos de trayectorias de tensiones totales y efectivas. Hay algunos aspectos que merecen atención especial en el modelo y que se comentan enseguida:

El primero es relacionado con el criterio de inicio de grieta, pues los autores lo plantean fundamentalmente como un fenómeno que se da en término de tensiones totales (ecuación 3.3) al cual le corresponde un cierto valor en tensiones efectivas, sin embargo, siendo estrictos y sabiendo que el suelo está saturado, debería ser lo contrario, es decir, que la rotura esté gobernada por las tensiones efectivas exclusivamente y que a tal condición le corresponda un cierto valor en tensiones totales. Tal como está planteado el modelo no es posible definir el criterio de rotura directamente en tensiones efectivas.

El segundo aspecto está relacionado con la resistencia a la tracción, la cual se considera en el modelo como un parámetro fijo del suelo durante todo el proceso de desecación, cuando en realidad, es un parámetro variable que tiende a aumentar a medida que el suelo se va secando, es decir, a medida que aumenta la succión.

Finalmente otra limitación que se le ha planteado a este modelo es que no permite determinar la distancia entre grietas (Konrad y Ayad, 1997a). Para análisis de estabilidad, la distancia entre grietas puede ser de gran importancia, sin embargo, para problemas de flujo probablemente esta no es una gran limitante ya que el modelo sí permite evaluar el volumen general de grietas.

3.3.4 Modelo de Konrad y Ayad (1997a)

Este modelo busca determinar la profundidad máxima de agrietamiento y encontrar la distancia entre grietas adyacentes generadas por desecación de suelos. Se divide en tres etapas generales, tal como se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 3.5.

Inicialmente se evalúa la variación del perfil de succión en el tiempo, debida a la evaporación superficial. Para esto se emplea un modelo unidimensional de transferencia de masa dado por la siguiente ecuación diferencial que los autores resuelven por diferencias finitas:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] - \frac{\partial k}{\partial x} \quad (3.4)$$

Donde C es el coeficiente de almacenamiento específico, que se puede obtener de la pendiente de la curva de retención del suelo expresada en términos de la succión (ψ) y el contenido volumétrico de agua (θ) y k es la conductividad hidráulica del suelo.

La condición de inicio de grieta es la misma que se considera en el modelo anterior, es decir, que el suelo se agrieta cuando la tensión principal menor en la superficie del terreno es igual a la resistencia a la tracción (ecuación 3.3). La succión que se presenta al inicio del agrietamiento la denominan succión crítica (ψ_{cr}) y la obtienen con base en el modelo de trayectorias totales y efectivas de Abu-Helejh y Znidarčić (1995). Si se asume que el suelo está normalmente consolidado, el valor de K_0 se puede aproximar a $(1 - \text{sen } \phi')$ y en tal caso la succión crítica se puede calcular como:

$$\psi_{cr} = \frac{\sigma_t}{\text{sen } \phi'} \quad (3.5)$$

Cuando se llega a la condición de inicio de grieta, se puede determinar un perfil crítico de tensión horizontal que depende del estado inicial de tensiones, de la resistencia a la tracción del suelo y del perfil de succión calculado.

La segunda etapa del modelo se basa en criterios de LEFM para determinar profundidad máxima de agrietamiento bajo el perfil de tensión lateral calculado en la etapa anterior. En este caso es necesario evaluar el factor de intensidad de tensiones K_I que está dado por:

$$K_I = \alpha \sigma (a)^{0.5} \quad (3.6)$$

Donde σ es el máximo valor de tensión de tracción, a es la profundidad de la grieta y α es un coeficiente que depende de la distribución de tensiones y de la relación b/a . En este caso b representa la profundidad hasta la cual se aplican las tensiones de tracción. Lachenbruch (1961) presenta soluciones de α para distribuciones de tensión triangular creciente y diferentes relaciones de b/a y para distribución rectangular o uniforme, con relación $b/a = 1$, como se presenta en la Figura 3.6. Ninguna de las dos distribuciones indicadas en la figura corresponde con la que se presenta por efecto de la succión, es decir, decreciente en profundidad, como se muestra en la Figura 3.7a, por tal razón, Konrad y Ayad proponen que la distribución de tensión lateral se aproxime a una forma trapezoidal, como la indicada en la Figura 3.7b, con lo cual el factor de intensidad de tensiones se puede calcular de manera aproximada, restando el evaluado con la distribución triangular del evaluado con la distribución rectangular:

$$K_{I,trap} = K_{I,rect} - K_{I,tria} \quad (3.7)$$

La profundidad máxima de grieta se presenta cuando el factor de intensidad de tensiones actuante es igual al crítico (K_{IC}) y de acuerdo con las ecuaciones (3.6) y (3.7) sería:

$$\alpha_1 \left(\frac{b}{a} \right) \sigma_t (a)^{0.5} - \alpha_2 \left(\frac{b}{a} \right) [\sigma_t - \sigma_3(b)] (a)^{0.5} = K_{IC} \quad (3.8)$$

Donde α_1 y α_2 son coeficientes indicados en la Figura 3.6, para cada tipo de distribución.

La tercera y última etapa consiste en el cálculo de la distancia (D) entre grietas. Aquí se considera, de manera análoga a lo planteado por Lachenbruch (1961), que cuando se forma una grieta, la tensión horizontal en las caras de la misma pasa de tener el valor de la resistencia a la tracción σ_t a un valor cero, mientras que los sitios alejados de la grieta tienden a mantener el valor de σ_t , lo cual genera una redistribución de tensiones en el medio.

Para determinar tal distribución de tensiones se emplea un modelo elástico que se resuelve por elementos finitos, donde se considera que en una de las caras de la grieta actúa un perfil de tensión ficticia equivalente al que se presentaba justo antes de iniciarse la grieta y en el otro extremo, muy alejado, la tensión es σ_t . Se adopta entonces como criterio de separación entre una grieta existente y otra adyacente, la distancia a la cual la tensión horizontal se incrementa hasta llegar al 95% de la resistencia a la tracción (Figura 3.8).

3.3.4.1 Comentarios al modelo de Konrad y Ayad (1997a)

El modelo, como se describe en la Figura 3.5, muestra una aproximación relativamente completa del problema de agrietamientos en arcilla. Respecto al criterio de inicio de grietas, como se mencionó, se fundamenta en el valor de la resistencia a la tracción y en la trayectoria de tensiones seguida durante la desecación, por lo tanto los comentarios que se le pueden formular son los mismos que los planteados para el modelo anterior. En relación con el criterio de propagación de grietas se destaca el hecho de que involucran la LEFM en la formulación y plantean una forma de evaluar el factor de intensidad de tensiones para una distribución creciente de succión en profundidad como es la impuesta por la succión durante un proceso de desecación ya que las soluciones anteriores (Lachenbruch, 1961) sólo contemplaban distribuciones de tensiones constantes o crecientes en profundidad.

El método para determinar distancia entre grietas, a pesar de que plantea como un problema de distribución de tensiones, no deja de ser arbitrario en cuanto a la definición de un cierto valor de tensión (95% de la resistencia a la tracción) al cual debe generarse la grieta adyacente. Los mismos autores en unas pruebas de campo donde aplicaron su modelo (Ayad, Konrad y Soulié, 1997) encontraron que la separación entre grietas se presentaba cuando la tensión horizontal alcanzaba valores entre 80 y 88 % de la resistencia a la tracción, es decir que se trata de una estimación empírica que puede tener amplia variabilidad.

3.3.5 Modelo de Bronswijk (1988)

Se trata de una formulación para modelar el balance de agua, agrietamiento y subsidencia de suelos arcillosos. Con este modelo se pretende mejorar los programas de simulación de flujo a

través de medios porosos, incorporando los efectos del agrietamiento y los cambios volumétricos, ya que como lo señala el autor, los cálculos de transporte de agua en un suelo arcilloso no se pueden hacer solamente con base en la conductividad hidráulica y la curva de retención sino que se necesita de una tercera relación: las características de contracción, dadas por la relación entre el volumen del suelo y su humedad.

Se considera en el modelo que los cambios de volumen observados en el campo obedecen a agrietamiento del terreno y a subsidencia. Para tener en cuenta la proporción de cada uno de ellos, se introduce un factor adimensional rs . Para el caso de contracción tridimensional o isotrópica $rs = 3$ y para contracción unidimensional $rs = 1$.

En la Figura 3.9 se presenta un esquema del modelo propuesto, donde se indican los cambios respecto a un modelo inicial de balance de agua aplicado a un suelo sin grietas. Para analizar la infiltración se evalúa un área de matriz y un área de grietas y en función de la intensidad de la lluvia y de las tasas máximas de infiltración a través de cada una de ellas se pueden calcular los volúmenes de agua que se infiltran y los que fluyen como escorrentía. La proporción entre la infiltración a través de las grietas y de la matriz varía continuamente, debido a que el suelo se contrae o se expande con los cambios de humedad. En el modelo no se tiene en cuenta el flujo horizontal a través de las grietas pero se señala que debe ser muy pequeño, sin embargo sí se considera el efecto de las grietas horizontales en el flujo vertical de forma indirecta.

El modelo fue validado en un campo experimental en Holanda, sobre un terreno arcilloso al cual se le determinó su composición granulométrica, su curva de retención, su conductividad hidráulica en función de la presión de agua y sus características de contracción. En el sitio se hizo un registro continuo de lluvia durante 8 meses y durante mismo período se midieron semanalmente los niveles de agua subterránea, la humedad del suelo, los cambios de nivel de la superficie del terreno y la contracción o expansión relativa del suelo a diferentes profundidades. Las variaciones superficiales se midieron con un nivel telescópico en relación a un punto fijo. La contracción y expansión relativa del suelo se midió usando un sistema de discos instalados en una perforación a diferentes profundidades (entre 0.3 y 6.6 m) a los cuales se les determinaba su variación de nivel. Estas variaciones permitían determinar indirectamente la apertura de las grietas puesto que se asumió contracción tridimensional ($rs = 3$), con lo cual, la magnitud de los desplazamientos horizontales (correspondientes en el modelo a la apertura de las grietas) coincide con la magnitud de los desplazamientos verticales medidos.

El autor muestra muy buena correlación entre los datos experimentales de posición de la superficie del terreno, volumen de grietas y niveles de agua subterránea y los valores calculados mediante un programa de flujo adaptado para este efecto. Los datos de variación de humedad mostraron menor correlación, lo cual se lo atribuye a la dificultad de determinar la humedad en un suelo estructurado como el del sitio de experimentación y a que el programa de cálculo original no tiene en cuenta la posible evaporación adicional causada por la presencia de raíces en los niveles inferiores.

Como datos interesantes de los resultados se muestra la rápida respuesta del suelo agrietado a la lluvia, reflejada en los incrementos casi inmediatos en la posición del nivel freático y en la expansión del suelo, adicionalmente se destaca la gran magnitud del volumen calculado de grietas que fue de aproximadamente de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, hecho que tiene alta implicación en el transporte de agua y de solutos a través del suelo.

3.3.5.1 Cometarios al modelo de Bronswijk (1988)

Desde un punto de vista práctico, este modelo representa una herramienta útil para el cálculo de flujo y de subsidencia, especialmente si se consideran los buenos resultados obtenidos respecto a las mediciones de campo realizadas por el autor, además es relativamente sencillo de implementar y de adaptar a los modelos numéricos de flujo existentes.

En cuanto al inicio, propagación y distribución espacial de las grietas, el modelo no los tiene en cuenta de forma explícita, pues simplemente involucra su efecto general en los cambios de volumen y presupone que al contraerse verticalmente se produce subsidencia y al contraerse horizontalmente se produce agrietamiento. Esta hipótesis implica que el suelo debe partir de una condición agrietada puesto que no habría resistencia a la tracción en sentido horizontal, como no la hay en sentido vertical, puesto que la contracción es libre, adicionalmente, se debe saber de antemano cuál es la profundidad hasta la cual llegan las grietas, porque hasta ese nivel se cuantifican los cambios horizontales de volumen.

3.4 Conclusiones

- Los estudios de agrietamiento de suelos se pueden clasificar de manera general en cinco categorías: 1) estudios de morfología y evolución de grietas, 2) estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos, 3) estudio individual de variables que intervienen en la formación de grietas, 4) modelos de inicio y propagación de grietas y 5) estudios del comportamiento de suelos agrietados.
- Dentro de los estudios de morfología y evolución de grietas las evaluaciones macroscópicas corresponden a fenómenos de carácter regional (grietas de varios kilómetros de longitud) o de carácter local (grietas de metros o decenas de metros de longitud). Los estudios a escala intermedia son aquellos realizados en campos de prueba o en lisímetros y en ellos normalmente se hace una completa instrumentación para medir deformaciones, succiones, cambios de humedad, etc. Estudios de agrietamiento de suelos por desecación a escala microscópica no se encontraron en la literatura revisada aunque son numerosos para otro tipo de materiales y resultan de especial interés para comprender los mecanismos de inicio y propagación de grietas.
- En los estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos, las grietas se consideran como un efecto secundario debido a fenómenos como la subsidencia del terreno, los eventos sísmicos o volcánicos o la desecación producida por la presencia de árboles.
- El estudio de las variables que individualmente intervienen en el agrietamiento comprende muchos frentes de la mecánica de suelos no saturados que ya han sido bastante investigados pues aquí se estudian propiedades hidráulicas y mecánicas y su relación con los cambios de succión. Los estudios de resistencia a la tracción y de mecánica de fractura aplicados al agrietamiento del suelo no son muchos y en los últimos años se ha visto la necesidad de profundizar en ellos.

- Los modelos de agrietamiento de suelos que buscan predecir las condiciones de inicio de las grietas y las características de su propagación se pueden agrupar en tres categorías: modelos físicos unidimensionales, modelos físicos de distribución espacial de grietas y modelos probabilísticos de distribución espacial de grietas. El modelo de Konrad y Ayad (1997a) parece hoy día el más completo y se basa en la mecánica de suelos clásica para determinar el inicio de la grieta y en la LEFM para estudiar su propagación.

Enfoque General (Descripción)	Tipos de Estudio	Aplicaciones	Estado del Conocimiento	Se trata en esta tesis
Estudios de Morfología y evolución de grietas (Se describen características geométricas tales como longitud, profundidad, inclinación, abertura, patrón de agrietamiento, etc. También se indican cambios morfológicos en el tiempo).	Identificación de grietas in-situ.	Permiten identificar características y magnitud de un problema regional o local y plantear hipótesis sobre sus posibles causas y evolución.	La orientación superficial del agrietamiento es fácil de determinar pero la abertura y orientación en profundidad son difíciles de determinar in-situ.	
	Campos de prueba instrumentados.	Permiten conocer con buena precisión la evolución morfológica de las grietas y relacionarla con variables medidas	En los pocos estudios existentes se ha logrado identificar las condiciones particulares de inicio y evolución de las grietas y esta información se ha usado para calibrar modelos.	
	Estudios en muestras de laboratorio y en lisímetros.	Se puede analizar de manera sistemática el efecto de distintas variables que intervienen como humedad, densidad, geometría, humedad relativa, temperatura, etc.	Existen algunos estudios de caracterización con muestras que se someten a desecación y se controlan las variables. Ensayos similares se han hecho en lisímetros, especialmente para evaluar efectos de las grietas en el flujo.	X
	Estudios de microagrietamiento.	Ayuda a identificar mecanismos de inicio y propagación de grietas y su relación con la microestructura.	Hay estudios de microagrietamientos por corte pero no por tracción. Existen varios estudios sobre otros materiales como hormigón y acero.	X
Estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos (Las grietas se estudian como un efecto secundario, asociado a ciertos fenómenos locales).	Agrietamientos por subsidencia.	Su estudio se relaciona con las grandes deformaciones por consolidación del terreno y en general se asocian a extracción de agua subterránea y a condiciones geológicas locales	Son estudios de carácter regional que se concentran especialmente en aspectos morfológicos de las grietas y en su relación con condiciones geológicas e hidrogeológicas locales.	
	Agrietamientos por presencia de árboles.	Se aplican mucho para identificar causas de deterioro en obras civiles y para diseñar medidas correctivas.	Existe buena información sobre estudios de caso pero falta profundizar sobre mecanismos de transmisión de la succión y su relación con las condiciones de evolución de los agrietamientos.	
	Agrietamientos por eventos sísmicos o volcánicos	El estudio de las grietas post- evento es importante para conocer las características y magnitud del mismo.	Los agrietamientos en estos casos se asocian más a mecanismos de corte que de tracción. Es campo de estudio de la ingeniería sísmológica.	
Estudio de variables individuales que intervienen en el agrietamiento de suelos. (Son estudios muy específicos fundamentalmente de carácter investigativo sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas que intervienen en el agrietamiento de suelos).	Características de retracción y expansión.	Estas son propiedades que deben conocerse puesto que intervienen de manera directa en los mecanismos que gobiernan el fenómeno del agrietamiento de los suelos.	Actualmente hay buenos conocimientos y técnicas experimentales y numéricas para evaluar propiedades de deformación en suelo, donde se incluye la succión como variable importante. Se necesita mayor estudio respecto a las restricciones al desplazamiento durante la contracción.	X
	Resistencia a la tracción.	Son importantes para conocer las condiciones de inicio de las grietas.	Los estudios de resistencia a la tracción son escasos y no hay información sobre relaciones tensión-deformación-succión. Se requiere de estudios sistemáticos.	X
	Mecánica de fractura (MF).	En suelos su aplicación es relativamente reciente y escasa, pero es de utilidad para estudiar mecanismos de propagación de grietas.	Hay pocos estudios donde se aplique la MF en suelos y se requiere de mayor investigación sistemática. Escasas investigaciones sobre el efecto de tamaño de MF.	X
Modelos de inicio, propagación y distribución espacial de grietas (Son modelos que buscan representar los mecanismos y procesos de agrietamiento a partir de la interrelación de las variables que intervienen. Con estos modelos se intenta predecir comportamientos bajo ciertas condiciones conocidas).	Modelos físicos unidimensionales de inicio y propagación de grietas.	Buscan identificar las condiciones particulares de inicio de una grieta y hasta qué profundidad se prolongará a partir de variables físicas conocidas.	Los modelos de inicio de grietas se basan en resistencia a la tracción y trayectorias de tensiones. Los de extensión de grietas en condiciones de tensión, en índice de poros crítico o en MF.	X
	Modelos físicos de distribución espacial de grietas.	Los modelos básicos buscan estimar la distancia entre grietas y los más avanzados la orientación y distribución espacial de múltiples grietas	En los modelos básicos la estimación de distancia entre grietas es semiempírica. Los modelos netamente físicos que permitan predecir orientación y distribución de grietas no se han desarrollado aún.	X
	Modelos probabilísticos de distribución espacial de grietas.	A partir de ciertas reglas basadas en propiedades generales observadas en procesos de agrietamiento se hacen simulaciones que teóricamente permiten aproximarse a la condición de agrietamiento real, que es tridimensional.	Dada la complejidad de simular con modelos físicos todo el proceso de agrietamiento multidimensional, ésta podría ser una aproximación. El problema es que no tiene en cuenta de forma explícita, variables importantes que intervienen, como la resistencia a la tracción, la MF o las características de retracción.	
Estudio del comportamiento de suelos agrietados Se estudian los efectos de las grietas sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, sin que el interés principal sea explorar sobre la causa de tales agrietamientos.	Estudios experimentales y numéricos sobre resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad de suelos.	Muy útiles para determinar comportamiento de obras civiles, para prever el efecto del agrietamiento en el comportamiento del suelo y para la adopción de medidas correctivas en sitios con problemas.	Hay estudios sobre cierto tipo de arcillas, donde se muestra que la influencia de las grietas en la resistencia y la deformabilidad es poca si la abertura es pequeña, pero aumenta con la apertura. El flujo en los suelos agrietados es muy superior a través de las grietas, incluso si éstas están aparentemente cerradas.	
	Modelos de flujo que tienen en cuenta el efecto del agrietamiento en los suelos.	De gran utilidad en problemas hidrogeológicos, agrológicos y ambientales, también se pueden aplicar a evaluación en obras civiles como presas o taludes.	Existen algunos modelos que involucran el efecto de las grietas y su evolución en las condiciones de flujo pero no están muy ligados con los mecanismos físicos de inicio y propagación de grietas.	

Tabla 3.1 Panorama general sobre estudios de agrietamiento de suelos y temas tratados en la presente investigación.

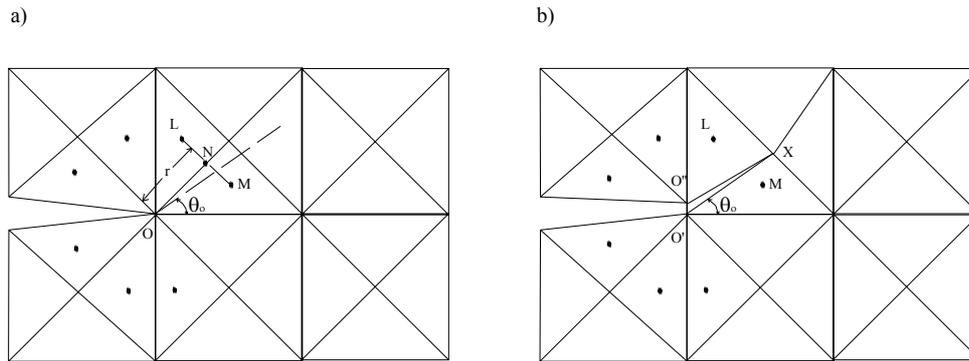


Figura 3.1 Mecanismo de propagación de grieta propuesto en el modelo de Lee et al (1988). a) antes de la propagación de la grieta, b) después de la propagación de la grieta.

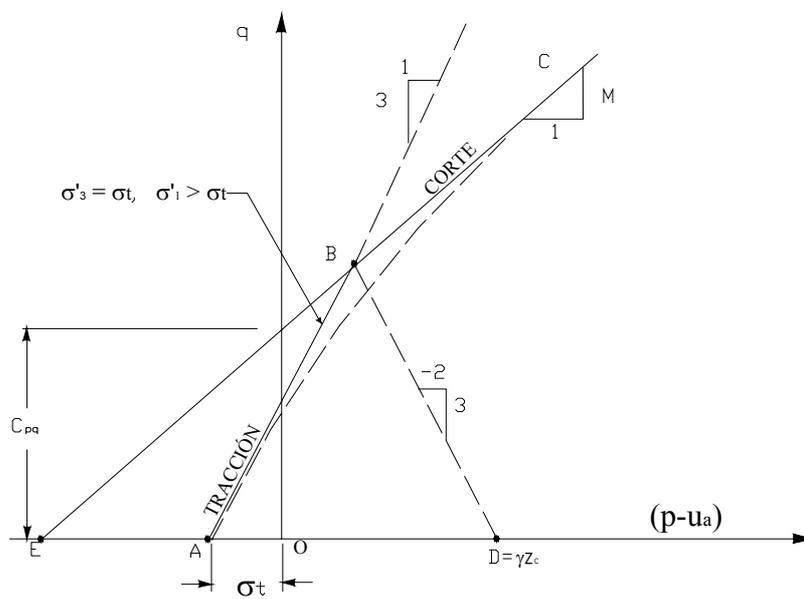


Figura 3.2 Representación esquemática de las envolventes de rotura en tracción y en corte y su relación con la succión en el modelo de Morris et al (1992).

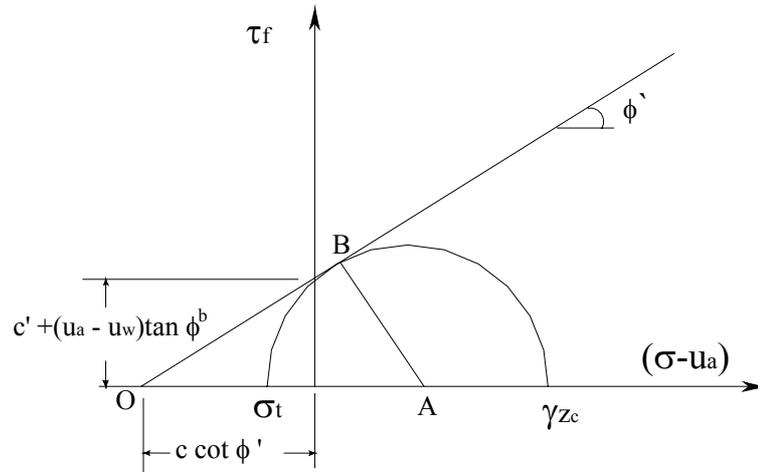


Figura 3.3 Esquema de la condición de rotura por agrietamiento basado en la solución de Rankine (Morris et al, 1992).

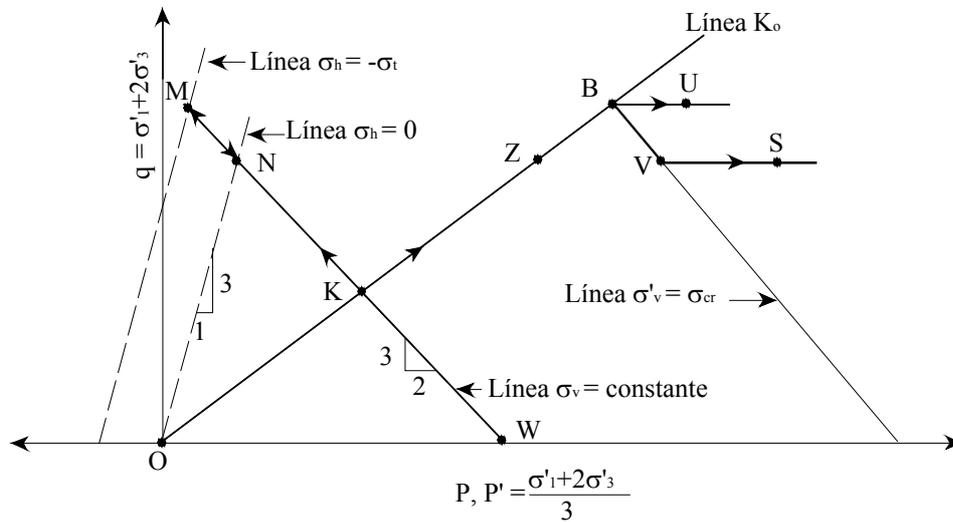


Figura 3.4 Trayectorias de tensiones totales y efectivas durante el proceso general de consolidación y desecación (Abu-Hejleh y Znidarčić, 1995).

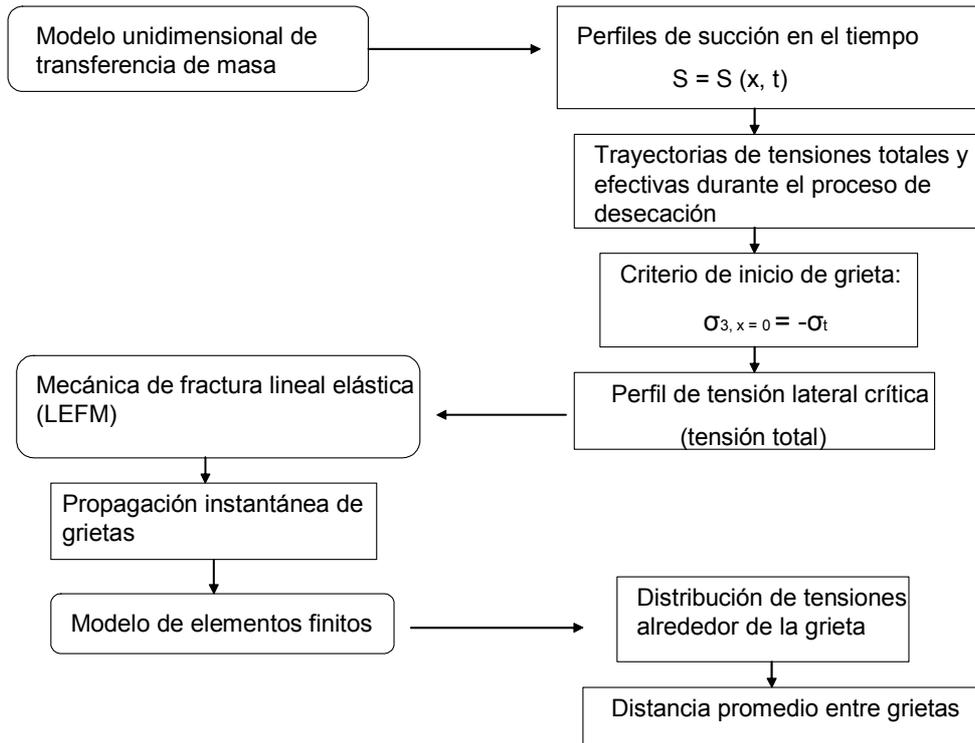


Figura 3.5 Diagrama de flujo del modelo propuesto por Konrad y Ayad (1997a).

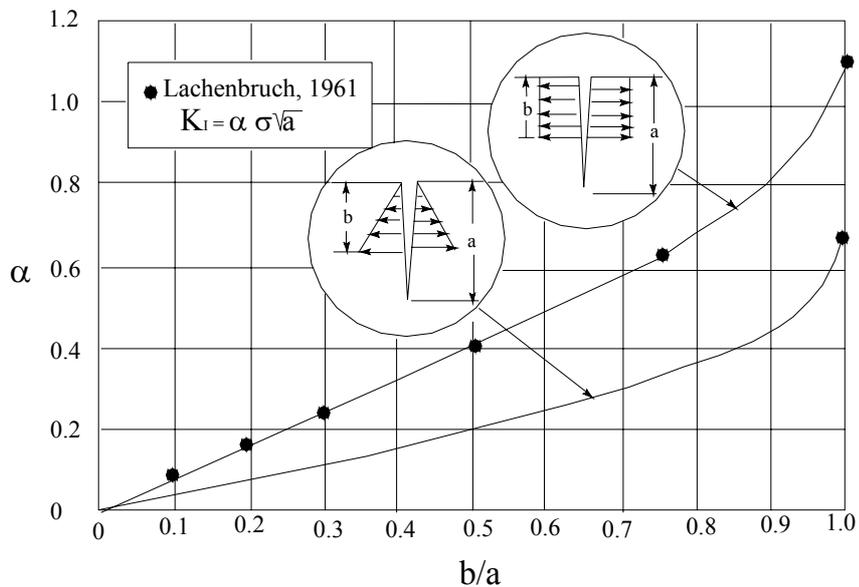


Figura 3.6 Factores de intensidad de tensiones para distribuciones de tensión uniforme y de aumento lineal (tomado de Konrad y Ayad, 1997a).

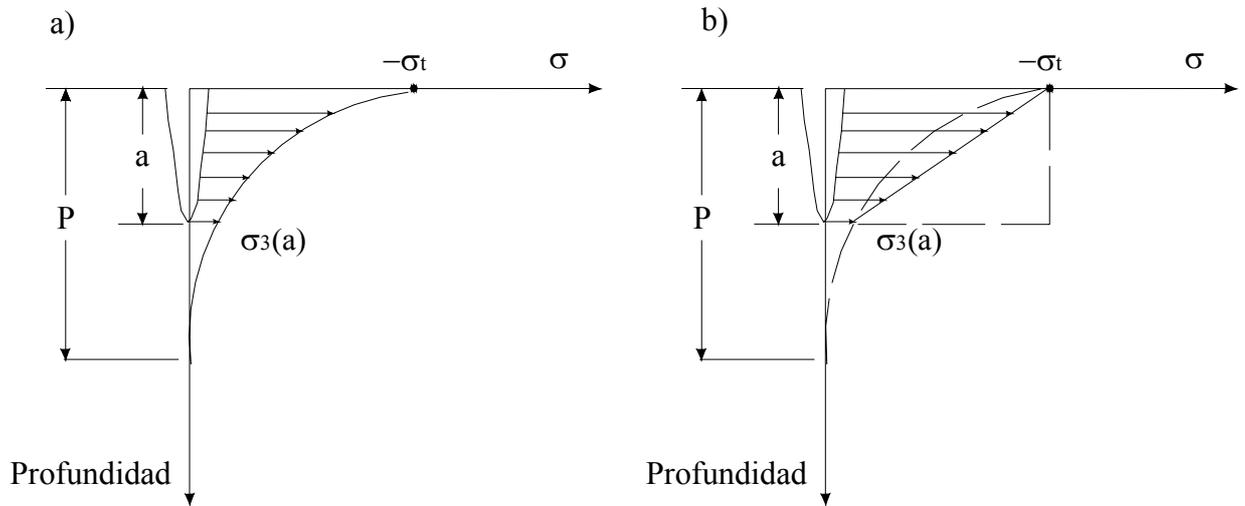


Figura 3.7 a) distribución de tensiones al inicio del agrietamiento, b) distribución trapezoidal de tensiones propuesta en el modelo de Konrad y Ayad (1997a).

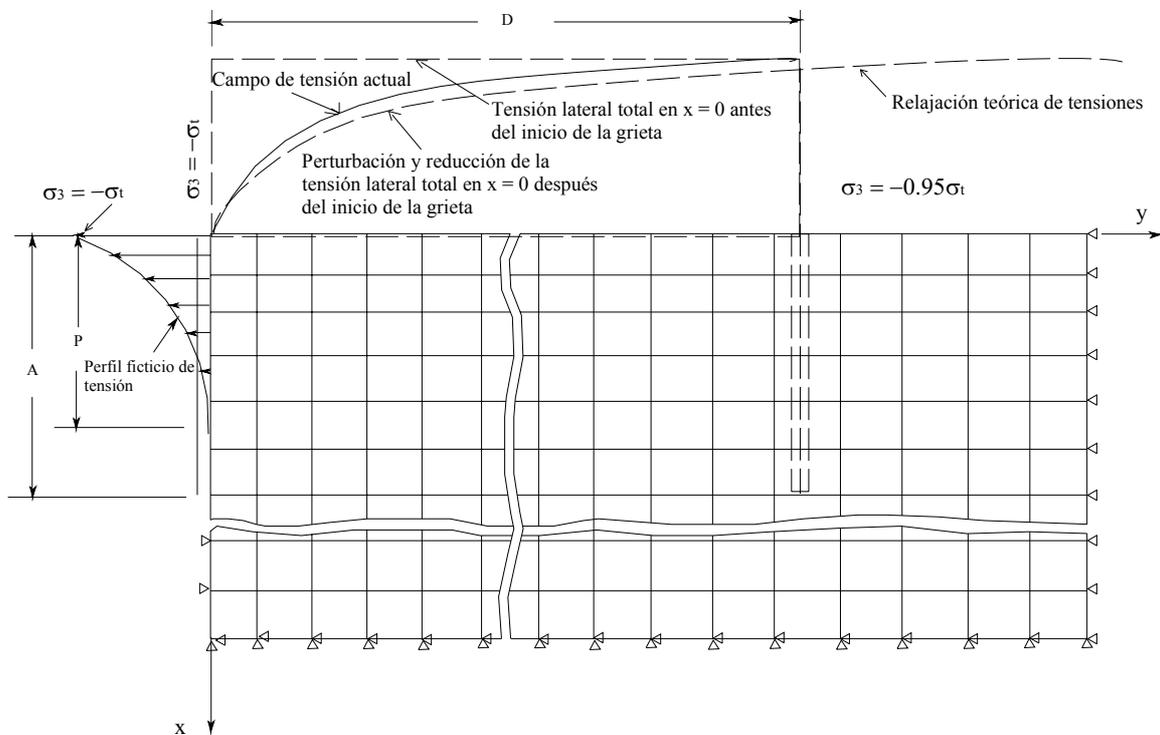
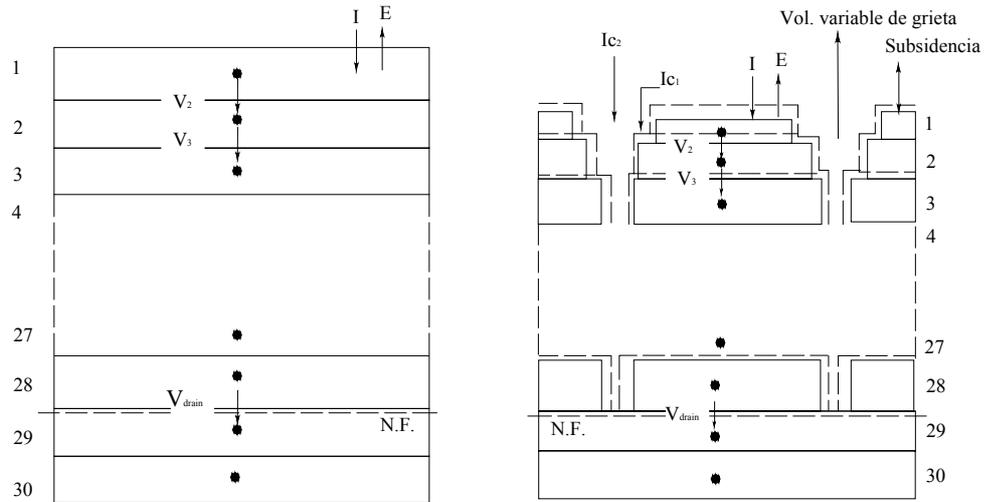


Figura 3.8 Modelo de Konrad y Ayad (1997a) para determinar la distancia promedio (D) entre grietas.



I : Tasa de infiltración en la matriz del suelo

I_{c1}: Parte de la infiltración total causada por la intensidad de la lluvia que excede la máxima tasa de infiltración de la matriz del suelo

I_{c2} : Parte de la infiltración total a través de las grietas, causada por la lluvia que cae directamente en las grietas

E : Evapotranspiración actual

V: Flujo de Darcy entre dos puntos nodales

V_{drain} : Drenaje de descarga

El sistema matriz-grieta en un tiempo T se indica con línea continua y en un tiempo T+ΔT con línea a trazos.

Figura 3.9 Esquema del modelo de flujo propuesto por Bronswijk (1988). Parte izquierda modelo original para cálculo de balance de agua y parte derecha modelo modificado para incluir efecto de las grietas y subsidencia.