

CAPÍTULO 6

ESTUDIO MICROSCÓPICO DEL AGRIETAMIENTO DE LA ARCILLA

6.1 Introducción

En la literatura son relativamente abundantes los estudios microscópicos en suelos, principalmente enfocados al análisis de aspectos como composición, fábrica, estructura, porosidad o textura (Collins y McGown, 1974, Grabowska-Olszewska et al, 1984, Mitchell, 1993, Al-Rawas y McGown 1999, etc.). También hay algunos estudios relacionados con la presencia de microestructuras producidas por corte (Morgenstern y Tchalenko, 1967), sin embargo, la información sobre características y evolución de microagrietamientos de arcilla producidos por desecación es escasa, posiblemente debido a la dificultad de analizar el material sin alterar su estructura ni su humedad, pues en los microscopios electrónicos de barrido “Scanning Electron Microscope” (SEM) convencionales, que son los que más han sido utilizados para análisis microestructurales, las muestras deben secarse, recubrirse con un metal conductor para obtener una buena imagen y someterse a una condición de alto vacío. Con un microscopio electrónico *ambiental* de barrido “Environmental Scanning Electron Microscope” (ESEM), como el que se utilizó en este estudio, sí es posible observar la muestra sin alterar sus condiciones y esto permite obtener información importante sobre los mecanismos de inicio, evolución y morfología de las microgrietas.

En este capítulo se presentan los resultados de las observaciones al microscopio de muestras de arcilla, sometidas a procesos de desecación en condiciones de deformación restringida y de humedad controlada. La mayor parte del estudio se realizó con un ESEM, utilizando un detector de electrones gaseosos secundarios “Gaseous Secondary Electron” (GSE), aunque también se hicieron observaciones en modo de alto vacío (SEM), con detector de electrones retrodispersados “backscatter” (BSE) y observaciones con un microscopio óptico convencional, de tipo lupa binocular. En muchos casos se logra mejor resolución de la imagen en la condición de alto vacío que en la condición ambiental, pero como ya se indicó, por los efectos de recubrimiento y de presión sobre la muestra, sólo resulta útil para una situación estática del proceso, por ejemplo al final del mismo, cuando la arcilla ya está seca. El microscopio óptico es muy útil para analizar la etapa de agrietamiento rápido, porque se logra visualizar la trayectoria de avance en buena parte de la muestra.

Las muestras observadas se instalaron en un pequeño molde construido en material acrílico, cuya forma permite crear restricción unidireccional o bidireccional a la libre retracción del suelo a medida que pierde humedad y esto hace que se generen los agrietamientos. Se

hicieron pruebas con ambos tipos de restricción al desplazamiento y se analizó además el comportamiento de las grietas por efecto de agregarle agua al suelo.

Con el fin de evaluar la composición química de la arcilla y de su evolución durante el proceso de secado en la zona de agrietamiento, en uno de los ensayos se hicieron determinaciones semicuantitativas de los elementos presentes, utilizando para ello una microsonda analizadora de rayos X por energía dispersiva (EDAX).

De las diferentes observaciones realizadas tanto en el microscopio electrónico como en el óptico, se presentan las condiciones típicas de evolución del proceso de agrietamiento y se describen los rasgos morfológicos más significativos que se van presentando a medida que cambia la humedad y la correspondiente succión del suelo. Al final se plantea una interpretación conceptual sobre el posible mecanismo de avance de microgrietas a partir de las observaciones realizadas y de conceptos de mecánica de fractura discutidos anteriormente.

6.2 Equipos empleados y condiciones de ensayo

El molde empleado para colocar la muestra en el microscopio se fabricó en material acrílico, tiene forma similar al que se utilizó para realizar ensayos de tracción (ver Capítulo 4) y permite limitar las deformaciones longitudinales del suelo para así inducir agrietamientos durante el proceso de secado (Fig. 6.1). Cada una de las esquinas internas del molde se enumeró para identificar con mayor facilidad la orientación de los agrietamientos respecto a la posición del molde.

La observación de los microagrietamientos se hizo con un microscopio electrónico de barrido XL30 Philips (Fig. 6.2), el cual en modo ambiental (ESEM) permite el análisis de muestras sin necesidad de ningún tipo de recubrimiento puesto que la fase de vapor con carga (H_2O^+), que rodea la muestra, actúa como una película conductora con lo que se logra una adecuada visualización mediante el bombardeo de electrones sobre la superficie de la muestra (Romero, 1999), esto hace que puedan emplearse muestras húmedas y que sea posible observar la evolución del agrietamiento durante el secado. Para los análisis en modo ambiental se aplicó bajo vacío, reduciendo la presión de vapor dentro de la cámara donde se introduce la muestra a valores absolutos entre 0.9 y 1.1 Torr (0.12 - 1.46 kPa). Aunque este vacío puede tener algún efecto sobre la muestra, es mucho menos drástico que el requerido en la condición de electrones retrodispersados, donde las presiones absolutas de vapor deben reducirse hasta valores del orden de 2×10^{-4} Torr. (2.7×10^{-5} kPa) o incluso menores.

Las condiciones de presión de vapor y temperatura imponen una humedad relativa dentro de la cámara, cuya variación se presenta en la Tabla 6.1. Esta humedad relativa se conoce como humedad relativa aparente (h_{ra}) y se define como la relación entre la presión en la cámara (u_c) y la presión de vapor de saturación (u_{co}) a la misma temperatura (Romero, 1999). En este caso, con las presiones aplicadas y la temperatura ambiente (18 a 21 °C), se tenía una humedad relativa aparente del orden de 6% (Fig. 6.3), así se logró un proceso de secado de la muestra relativamente rápido y acorde con los tiempos de observación. Con frecuencia fue necesario variar ligeramente la presión en la cámara para lograr una mejor resolución de la imagen.

El equipo permite tomar medidas directamente sobre la pantalla y esto facilita por ejemplo la medición de tamaño de partículas, tamaño de poros o abertura de grietas, además es posible tomar fotografías digitales, útiles para análisis posteriores.

En el Capítulo 2 se presentaron los análisis de la microestructura de la arcilla donde se hicieron ampliaciones de la imagen hasta de 14000X con el detector GSE (modo ambiental). Para la observación de microagrietamientos la amplificación tan alta no resulta conveniente porque los poros interagregados se confunden con las aberturas causadas por las microgrietas, por esto se trabajó con ampliaciones que variaron entre 300X y 2300X. Con el aumento mayor se logró detectar grietas de aproximadamente 1 μm de abertura.

El microscopio está equipado con una microsonda analizadora de rayos X por energía dispersiva (EDAX) que se utiliza para determinar la composición química de la muestra en el sitio de observación, lo cual es útil para evaluar si se produce alguna alteración de elementos por efectos del secado.

De manera complementaria a las observaciones en modo ambiental se empleó el detector de electrones retrodispersados (BSE). En algunos casos la resolución de las imágenes es mejor con este detector, particularmente para las ampliaciones mayores, pero se debe aplicar alto vacío dentro de la cámara y recubrimiento previo de la muestra con una fina película de oro para lograr conductividad en su superficie (el equipo para metalizar la muestra se presenta en la Figura 6.4), por lo tanto no es viable para analizar evolución del proceso de agrietamiento sino para apreciar rasgos morfológicos en una condición fija, preferiblemente al final, cuando la muestra ya está seca y no sufre cambios morfológicos importantes.

Las observaciones con este tipo de detector se hicieron al final de los ensayos, cuando ya la muestra estaba seca. Con este procedimiento se detectaron algunos rasgos interesantes del agrietamiento a diferentes escalas de magnificación (100X a 2500X).

Además del microscopio electrónico se utilizó un microscopio óptico (tipo lupa binocular) para evaluar la evolución de las grietas de tamaño intermedio, con aumentos entre 6.4X y 48X. Las observaciones en este microscopio son particularmente útiles para ver aspectos morfológicos generales como por ejemplo el efecto de las condiciones de frontera en toda la muestra, la evolución rápida de la contracción en las primeras etapas del secado, la evolución e interconexión de diferentes grietas dentro de la muestra o el comportamiento del material durante el mojado, pues estos aspectos son difíciles de apreciar en escalas de tanto detalle como las del microscopio electrónico.

En este caso se tomaron microfotografías convencionales en diferentes etapas del proceso de retracción, empleando para ello una cámara que está directamente instalada sobre el microscopio (Fig. 6.5).

6.3 Procedimiento de ensayo

Con el fin de analizar las características intrínsecas del agrietamiento en condiciones similares a los ensayos previos de tracción y de mecánica de fractura, se trabajó con muestras de arcilla remoldeada, partiendo de humedades cercanas al 50%. Las muestras se instalaron en el

molde con una pequeña paleta y se trató de dejar la superficie y los bordes lo más uniforme posible.

Antes de llevar la muestra al microscopio electrónico se determinaba su humedad inicial, se hacía una descripción visual y se tomaba una fotografía, con lo cual se daba inicio al proceso de ensayo.

La primera observación en el ESEM consistía en hacer un barrido general a baja magnificación, por toda la superficie de la muestra, para conocer la morfología y detectar la presencia de microgrietas. Una vez detectadas las zonas de mayor interés, se hacía la evaluación más detallada, aumentando el factor de amplificación. En todo momento se controlaba el tiempo y se iban anotando las diferentes condiciones observadas, además, en algunos puntos de la muestra se hacían análisis químicos, empleando para ello la sonda de energía dispersiva de rayos X. El tiempo aproximado de observación de cada muestra fue de dos horas, pero a intervalos intermedios se extraía la muestra de la cámara, se pesaba nuevamente para determinar su humedad, se hacía una descripción visual (macroscópica) y se volvía a llevar a la cámara del microscopio manteniendo la misma orientación y la misma presión.

La segunda etapa de los análisis se hacía con el microscopio óptico y el propósito era observar la morfología del agrietamiento en una superficie mayor que la que se abarcaba con el microscopio electrónico, de esta manera se consiguió evaluar procesos de propagación e interconexión de grietas y en general se pudo tener una escala intermedia de observación. En este caso también se pesó la muestra en diferentes tiempos para conocer la variación de la humedad. Al final de algunas pruebas se le agregó agua a la muestra para observar el comportamiento de las grietas ante el aumento de humedad.

Después de la fase de secado, en una de las muestras se adelantó una tercera etapa de observación en el microscopio electrónico en condición de alto vacío y con el detector BSE. En estos casos la muestra se metalizaba, mediante el equipo mostrado en la Figura 6.3. Este proceso tenía una duración de aproximadamente tres minutos y luego se llevaba la muestra al microscopio. Debido a que el volumen de la muestra era relativamente grande y que su permeabilidad era muy baja, la aplicación del alto vacío fue demorada, pues tardaba entre 1 y 1.5 horas, cuando en muestras convencionales, de menor tamaño, el vacío se logra en 5 ó 10 minutos.

Como en cada una de las muestras analizadas hay ciertos detalles particulares de la morfología, resulta conveniente describir solamente los rasgos morfológicos más importantes y los detalles comunes que caracterizan el proceso general de microagrietamiento.

6.4. Evolución morfológica general de las microgrietas en la arcilla (observaciones con ESEM y microscopio óptico)

El agrietamiento por desecación se presenta como consecuencia de la imposibilidad de que el suelo reduzca su volumen libremente a medida que aumenta la succión, de tal forma que se generan tensiones que superan la resistencia a la tracción y el suelo se agrieta (Abu-Hejleh y Znidarčić, 1995, Konrad y Ayad, 1997a). En el caso de las muestras analizadas el aumento de la succión se produce por la baja humedad relativa impuesta en la cámara del microscopio y

esto hace que se presente un secado relativamente rápido a temperatura ambiente. La restricción a los desplazamientos horizontales durante el secado se debe a la forma del molde, cuyos extremos ejercen la función de anclaje sobre la parte central de la muestra. Towner (1987b) realizó ensayos para evaluar la humedad de agrietamiento y resistencia a la tracción de arcillas, usando moldes algo similares a los aquí empleados, los cuales también causaban restricción unidireccional a las deformaciones. Con este tipo de moldes, el agrietamiento final tiende a ser perpendicular a la dirección de la restricción principal.

El proceso de evolución de los microagrietamientos observados a medida que se reduce la humedad de la arcilla se puede caracterizar de manera más o menos general por cuatro etapas representativas, tal como se indica en la Figura 6.6 y describe a continuación:

Etapa 1: Muestra húmeda. Corresponde a la arcilla inmediatamente después de haberse colocado en el molde. A simple vista se observa una superficie uniforme, de textura lisa y color brillante por la presencia superficial de una película de agua. No se distingue ningún agrietamiento. La muestra observada al microscopio presenta rugosidad superficial debida a la presencia de algunos grumos y a las huellas dejadas por la espátula durante la instalación en el molde (Fig. 6.7). Se ve claramente el contraste entre la matriz, de material muy fino, y los grumos que conforman partículas de mayor tamaño. En algunos sitios aislados se presentan microgrietas superficiales, de muy poca extensión y abertura (menores de 20 μm de longitud y de 5 μm de abertura), especialmente en los bordes de la muestra, donde hace contacto con el molde. La humedad de esta etapa varió aproximadamente entre 50% y 40%, que de acuerdo con la curva de retención, corresponde a succiones entre 90 y 200 kPa respectivamente.

Etapa 2: Inicio de desecación. Corresponde a humedades entre 40% y 35% (succiones entre 200 y 500 kPa respectivamente). La muestra ha perdido parte de su humedad, se ve menos brillante y menos lisa que en la etapa anterior, además se alcanza a detectar una ligera contracción longitudinal. Microscópicamente se observa que los grumos y las partículas de mayor tamaño resaltan respecto a la matriz, aumentando así la rugosidad superficial. Se amplían las microgrietas próximas a las esquinas del molde y aparecen otras nuevas en distintas orientaciones, con la tendencia de bordear siempre a las partículas mayores (Figura 6.8). En esta etapa la longitud de microgrietas varía entre aproximadamente 20 y 100 μm y su abertura entre 5 y 20 μm . En algunos casos se notan depresiones superficiales en forma de medialuna, orientadas predominantemente en la misma dirección de las tensiones de tracción.

En estudios sobre muestras de mortero Bisschop y Van Mier (1999) también reportan morfologías de microagrietamientos similares a los aquí observados, ellos denominan grietas de interfase o “bond cracks” a las que se presentan entre las partículas mayores y la pasta o matriz y grietas de pasta o “paste cracks” a las que se presentan dentro de la matriz pero interconectan partículas mayores.

Etapa 3. Propagación estable de grietas. A simple vista es claro que la muestra ha sufrido contracción volumétrica aunque parcialmente restringida por las paredes del molde, pues se nota reducción de su longitud, separación de la muestra respecto al borde en algunos puntos y reducción de la sección central tanto horizontal como verticalmente. El color se hace más opaco y no es igual en toda la superficie, lo que indica que a pesar del pequeño tamaño de la muestra, la desecación no es totalmente uniforme debido a las condiciones de frontera.

Al microscopio se observa ampliación y coalescencia de microgrietas en las esquinas internas de la muestra (Figura 6.9) y aparición de microgrietas secundarias; simultáneamente, otras tienden a reducirse de tamaño e incluso desaparecen. El avance de microgrietas se produce por tramos cortos que se entrelazan con los grumos o partículas mayores, terminando con un cambio de dirección en la punta (Fig. 6.10), por esta razón, las microgrietas no son rectilíneas ni uniformes en sus bordes, sino que presentan irregularidades asociadas tanto con las condiciones de tensión como con la presencia de partículas o grumos de diferentes tamaños.

En este caso la longitud de las microgrietas es del orden de 300 a 500 μm y su abertura entre 20 y 30 μm aproximadamente. Por la velocidad de avance que presenta la punta de las grietas en superficie, se podría considerar que están sufriendo un proceso de propagación lento o estable. El intervalo de humedad al cual ocurre este comportamiento no es muy amplio y en las muestras analizadas varió entre 35 y 30% (succiones entre 500 y 1100 kPa respectivamente). En algunos casos se observó que entre las paredes de las grietas quedaban pequeños filamentos de suelo que no habían alcanzado a separarse (Fig. 6.10).

Los agrietamientos en el hormigón muestran trayectorias similares a las que se observaron en la arcilla, pues tienen forma de meandros que se desplazan con respecto al eje de agrietamiento una distancia aproximadamente igual al máximo tamaño de los agregados y esta es una de las razones que plantean Bazant y Planas (1998) para justificar el modelo de banda de agrietamiento en la que la trayectoria de una grieta no se representa por una línea sino por una banda de cierto ancho dentro de la cual ocurre el agrietamiento.

Etapa 4. Propagación inestable de grietas. La contracción volumétrica que se aprecia a simple vista no difiere mucho respecto a la etapa anterior debido a que el molde ejerce fuerte restricción, sin embargo, los microagrietamientos alcanzan un tamaño macroscópico y puede observarse su prolongación inestable.

El inicio del agrietamiento generalmente aparece en alguna de las esquinas del molde o simultáneamente en una esquina y en un punto intermedio, luego la grieta se propaga muy rápidamente en sentido transversal. El avance se produce por tramos de pocos milímetros que en algunos casos son continuos de extremo a extremo y en otros discontinuos hasta que se presenta coalescencia de ellos. El avance de cada tramo es prácticamente instantáneo y la coalescencia de tramos de grieta o el avance continuo de toda la grieta tarda entre 10 y 20 segundos. Algunas microgrietas próximas tienden a cerrarse lo que indica una localización de las deformaciones hacia la grieta principal. La humedad para la cual se presentó el agrietamiento inestable varió para las diferentes muestras entre 31% y 27% (succiones entre 1100 y 2000 kPa respectivamente).

El avance del agrietamiento inestable en el microscopio electrónico resulta difícil de apreciar porque además de la gran rapidez con la que se presenta el proceso, las aberturas de grieta y la longitud de las mismas tienen dimensiones macroscópicas y por lo tanto no es posible ubicar los frentes de avance. En este caso resultó de mayor utilidad el empleo del microscopio óptico, con aumentos entre 6.4X y 24X. El avance ocurre de manera similar al descrito en la etapa 3, es decir por coalescencia de tramos de grieta, sólo que en esta etapa el avance es mucho más rápido y las aberturas son mayores.

Después de que se ha producido el agrietamiento total, la retracción continúa, lo cual se refleja en un aumento importante de la abertura de la grieta principal (Figura 6.11) y en algunos casos por la aparición de grietas secundarias paralelas a la grieta principal. Este proceso se estabiliza cuando el suelo ya ha perdido gran parte de la humedad.

6.5 Análisis morfológico de una zona microagrietada a diferentes escalas de magnificación (observaciones con SEM y detector BSE)

En la Figura 6.12 se presenta la secuencia de imágenes a diferentes niveles de amplificación (100X hasta 2500X) correspondientes a una zona microagrietada que se generó al final del proceso de desecación en una de las muestras analizadas previamente. Las observaciones fueron realizadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM) con el detector BSE, en condición de alto vacío (2.7×10^{-4} Torr) y con la muestra recubierta con una fina película de oro, por lo tanto se trata de una secuencia que representa una condición estática del proceso y no su evolución.

A continuación se describen los principales rasgos morfológicos observados en estas imágenes:

- Existe una grieta principal de gran abertura y de trayectoria irregular. En el extremo de la misma se presentan ramificaciones de menor abertura y mucho más cortas pero también de trayectoria irregular, con bordes constituidos por pequeños y sucesivos tramos de arco (Fig. 6.12 a,b).
- Al final de las ramificaciones se aprecia una punta de grieta aparentemente bien definida, sin embargo en las imágenes de mayor detalle se nota que la grieta continúa con menor abertura e incluso presenta nuevas ramificaciones con morfología similar a la grieta principal. La trayectoria seguida por las microgrietas tiende a circundar los grumos o partículas de suelo de mayor tamaño (Fig. 6.12 c,d).
- La concentración de los microagrietamientos alrededor de las partículas de mayor tamaño es clara en imágenes más amplificadas (Fig. 6.12 e,f). Aquí también se nota la presencia ocasional de filamentos de suelo entre las caras opuestas de las grietas, similares a los observados en la Figura. 6.10, la prolongación de la zona agrietada en un área alrededor de la punta visible de la grieta y la forma predominantemente redondeada de la misma punta (Fig. 6.12 e, f).

Dentro de los anteriores rasgos, se quiere destacar la presencia de los filamentos de suelo entre las paredes de las grietas y la forma redondeada de la punta de las grietas, ya que como se discute en el apartado 6.9, estos dos aspectos pueden dar pistas sobre el proceso de propagación de las grietas y permiten plantear una hipótesis sobre el avance del frente de agrietamiento, con base en algunos criterios de mecánica de fractura.

6.6 Efecto de la geometría de la muestra en las condiciones de agrietamiento

En los casos descritos hasta ahora las muestras presentaban restricción a la contracción uniaxial, donde el agrietamiento principal tiende a ocurrir en sentido perpendicular al eje de

tracción (Fig. 6.13a). Con el propósito de analizar cuál era el efecto de imponer una restricción biaxial a la retracción, se colocó muestra en toda el área externa del molde, de tal manera que se limitaran los desplazamientos en dos direcciones perpendiculares.

Lo que se observó en este caso fue que la morfología superficial y los microagrietamientos iniciales, son similares a los de las etapas 1 y 2 de la condición de restricción unidireccional, es decir, textura superficial rugosa, presencia de grumos, aparición de pequeñas microgrietas especialmente en las esquinas del molde, etc., sin embargo, en las fases más avanzadas de la desecación (fases 3 y 4), tienden a generarse dos grietas principales, cada una perpendicular a la dirección de la tracción actuante (Fig. 6.13b).

Se hizo una prueba complementaria con restricción parcial en una dirección y restricción total en la otra, llenando el molde parcialmente en dos de sus extremos y totalmente en los otros dos (Fig. 6.13c). En este caso ocurrió agrietamiento múltiple, con una grieta bien definida en dirección perpendicular al eje de mayor restricción, dos grietas transversales y una pequeña grieta paralela al eje de la tracción principal.

Estas observaciones de la respuesta del agrietamiento a variaciones geométricas muestran que a pesar de que en las primeras etapas del proceso de desecación, la aparición de microgrietas está muy asociada a la distribución de granos dentro de la muestra, los agrietamientos finales dependen fundamentalmente de las condiciones de restricción a los desplazamientos. En condiciones de restricción unidireccional o bidireccional, el agrietamiento tiende a manifestar una respuesta controlada y relativamente simple de predecir, sin embargo, a medida que se aumentan los grados de restricción o que difieren las restricciones en diferentes orientaciones, aumenta la complejidad del patrón de agrietamientos.

6.7 Comportamiento del suelo agrietado ante la incorporación de agua

Este comportamiento se evaluó en una de las muestras después de la etapa de agrietamiento total (final de etapa 4). La incorporación de agua sobre la superficie de la muestra se hizo con un cuentagotas y las observaciones se realizaron con un microscopio óptico. Lo que se apreció fue que a los pocos segundos (entre 15 y 30 s), unas grietas se extendieron rápidamente y se generaron nuevas grietas, algunas de ellas paralelas y otras perpendiculares a las existentes (Figura 6.14), sin embargo después de aproximadamente 5 minutos, todas las grietas se cerraron y se tuvo una muestra relativamente uniforme.

El mecanismo que probablemente ocurre puede explicarse con el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas, discutido en el capítulo 4: cuando la muestra sufre el agrietamiento inicial por desecación, se libera la mayor parte de las tensiones de tracción pero debido a las restricciones de la base y de los bordes del molde, que impiden la libre contracción del suelo, persisten algunas tensiones en diferentes sitios de la muestra que no son suficientes para producir nuevos agrietamientos porque su magnitud es inferior a la resistencia a la tracción que tiene el suelo en ese momento, sin embargo, al incorporarse agua, se produce una reducción rápida de la succión que a su vez causa una reducción en la resistencia a la tracción y el suelo se agrieta.

Esto se puede visualizar mejor en un diagrama de tensiones de Lambe, donde la trayectoria de tensiones en un punto P de la muestra (parte izquierda de la Figura 6.14) se puede representar

de acuerdo con el diagrama de la Figura 6.15: antes de agregarse el agua, el material se encuentra en el punto A puesto que ha seguido una trayectoria de tensiones efectivas O-A desde el momento que se inició la desecación. Como se puede ver, el punto A se encuentra por debajo de la envolvente de resistencia en tracción y por eso no se produce la grieta. La succión en ese instante es S_A pero al agregársele agua, la succión se reduce rápidamente a un valor S_B y la trayectoria de tensiones efectivas pasa del punto A al punto B, toca la envolvente de resistencia y en ese instante ocurre el agrietamiento. Esta hipótesis implica que al mojar el suelo no se devuelve por la misma trayectoria de secado y por lo tanto debe existir una importante histéresis en el comportamiento, como efectivamente se observó en las curvas de retención del capítulo 2.

La condición de agrietamiento en tensiones efectivas se puede ver reflejada en tensiones totales de la siguiente manera: para que se presente la grieta por desecación, es necesario que la trayectoria de tensiones totales llegue hasta el punto F', donde a la resistencia a la tracción es $\sigma_{t(F)}$, que es superior a la tensión de tracción en el punto A', sin embargo, al agregarse agua, la trayectoria se devuelve hasta el punto B' y su resistencia a la tracción es $(\sigma_{t(B)})$, es decir que el valor de la resistencia a la tracción en la trayectoria de secado ($\sigma_{t(F)}$) es muy superior al que se presenta en la trayectoria de mojado ($\sigma_{t(B)}$). El cierre final de las grietas después de algunos minutos de haberse hidratado está relacionado con expansiones que sufre el suelo ante la reducción generalizada de la succión.

El efecto de generación de nuevas grietas por la incorporación de agua tiene importantes implicaciones de tipo práctico, pues por ejemplo en el caso común de una vía que está cimentada sobre un suelo que se ha agrietado a causa de una prolongada sequía puede presentarse falla de la cimentación o deformaciones superficiales muy fuertes. Adicionalmente si ingresa agua al suelo de manera relativamente rápida a través de las grietas, pueden generarse efectos secundarios como expansiones o colapsos en el material, dependiendo de la magnitud de la presión de confinamiento (Alonso et al, 1990, Gens y Alonso, 1992). Este comportamiento se manifiesta usualmente en Bogotá, tanto en vías como en cimentaciones de viviendas, al inició las temporadas lluviosas, después de prolongados períodos de sequía.

6.8 Composición química en la zona de agrietamiento

El estudio de los cambios químicos que ocurren en un suelo por efecto de las variaciones hidromecánicas y de temperatura es un aspecto que recientemente ha despertado mucho interés, particularmente para el diseño de barreras en arcilla destinadas a la contención de residuos radiactivos, (Guimarães, 2001, Guimarães et al, 2002). Los problemas de agrietamiento de tales barreras pueden ser críticos, puesto que aumentan la permeabilidad y reducen así su vida útil (Horseman et al, 1999, Graham et al, 2002).

En el caso de agrietamiento de arcillas por desecación a temperatura ambiente las condiciones son mucho menos severas que aquellas a las que están expuestas las barreras de residuos radiactivos, sin embargo puede resultar útil conocer su comportamiento, particularmente para tener una primera aproximación de carácter semicuantitativo, sobre los posibles cambios en composición química de la arcilla durante el proceso de secado y de agrietamiento. Para esto se hicieron algunas determinaciones directamente sobre las caras de ciertas microgrietas,

utilizando la microsonda EDAX. Este tipo de análisis es común para la identificación de minerales en estudios petrográficos (ej. Welton, 1984) pero ha sido menos utilizado en análisis geotécnicos.

En las mediciones realizadas no se detectó ningún cambio de composición química durante el proceso de desecación y microagrietamiento, esto aunque era de esperarse debido al corto período de observación de la muestra y a las temperaturas moderadas (entre 18° y 21°C), permite ver que los agrietamientos no tienden a concentrarse en zonas de un determinado elemento y que por desecación a temperatura ambiente son poco significativos los cambios químicos que se presentan.

En la Figura 6.16 se muestra el espectro de energía dispersiva de rayos X, el cual está compuesto por fondo o “background continuum” y por picos característicos que muestran los elementos presentes en la muestra. Debido a las características del detector, sólo se pueden identificar los elementos entre el Boro, de número atómico 5 y el Uranio de número atómico 92.

La proporción de elementos en un punto de análisis dentro de la muestra se cuantifica por medio de un software de conteo, que está incorporado a la misma sonda, el cual cuantifica el valor de los picos por encima del fondo, los compara con patrones de composición conocida y realiza una corrección del llamado “efecto matriz”, conocida como “corrección ZAF” (Duque, 1993). En la Figura 6.17 se presentan los resultados de uno de los conteos realizados en un mismo punto, próximo a una microgrieta, a diferentes tiempos de observación, es decir, correspondientes a diferentes humedades.

En cuanto a composición química se aprecia que la mayor proporción de material corresponde a oxígeno, seguido de sílice, aluminio y hierro, con muy bajas proporciones de magnesio, potasio, carbonato y titanio. Aunque esta composición es útil para caracterizar al suelo, lo que más importa en este caso es evaluar si la arcilla manifiesta alguna modificación durante el secado y efectivamente se observa que existe muy poca variación en la composición del material a las 2 horas de observación, con respecto a la observación a las 3 horas, cuando han aumentado los tamaños de las microgrietas, esto al parecer indica que existe poco efecto químico en el proceso de agrietamiento, como por ejemplo agrupación de elementos a uno y otro lado de la grieta o concentración de ciertos elementos en algunos sectores de mayor o menor humedad, sin embargo aunque la evaluación se hizo para varios puntos dentro de la muestra y en todos ellos se observó la misma tendencia, se requiere aún mayor investigación al respecto.

El efecto del secado al horno (105°C, 24h) del material sí manifiesta cambios importantes en la proporción de elementos dentro de la muestra, pero éstos no son debidos al agrietamiento sino a la pérdida general del agua en la arcilla, pues por ejemplo el cambio más significativo corresponde al de oxígeno que se redujo de 48.8% a 42%, hubo una pequeña reducción del sílice y aumentos en el hierro y el aluminio. Esta composición química de la muestra seca corresponde a la del esqueleto mineral del suelo analizado.

6.9 Interpretación del posible mecanismo de avance de microgrietas en la arcilla

Como se vio en el capítulo 5, Irwin (1957) planteó que a pesar de que las deformaciones generales de un material que sufre agrietamiento sean predominantemente elásticas y que se pueda abordar el problema con LEFM, en la punta de la grieta existe una pequeña zona en la cual las deformaciones son plásticas, denominada *zona plástica*, cuyo tamaño y forma dependen del factor de intensidad de tensiones (K), de la resistencia a la tracción del material (σ_t ó σ_{ys}), y de la longitud de la grieta en el instante considerado. En un diagrama de distribución de tensiones en la punta de una grieta, la zona plástica se representa de manera simplificada por un círculo (Fig 6.17a), sin embargo, su forma es más compleja, por ejemplo si se adopta el criterio de fluencia de Von Mises, la forma de la zona plástica es como se indica en la Figura 6.18b (Broek, 1986). Se puede ver en esta figura que para el caso de deformación plana la zona plástica se extiende en dirección perpendicular al eje de la grieta.

En las muestras que aquí se analizan, predomina una condición de deformación plana, cuyo proceso de rotura podría interpretarse de la siguiente manera, a partir de las observaciones microscópicas y de los conceptos de distribución de tensiones en la punta de la grieta:

Dentro de los rasgos morfológicos importantes del proceso de extensión de grietas, se pudo apreciar que la punta de las mismas no es muy aguda sino que presenta cierta redondez, que existen filamentos de suelo, los cuales en algunos casos unen las dos caras de una grieta en tramos intermedios y que los bordes que conforman las caras de las grietas no son uniformes sino que presentan numerosos tramos cortos de forma semicircular. Estas características, junto con las condiciones de tensión, indican que al parecer el proceso de avance de las microgrietas no es continuo sino que ocurre a través de pequeños tramos de suelo relativamente independientes, cada uno de los cuales va entrando en rotura a medida que se desplaza la zona de concentración de tensiones.

En la Figura 6.19 se presenta de manera esquemática el proceso y allí puede verse que la trayectoria posible de grieta se representa por elementos (microfibras cilíndricas) de suelo de dimensiones similares. El elemento más próximo a la punta de la grieta, donde se presenta la zona plástica, es el que está sometido a la mayor tensión de tracción y por lo tanto, tiende a estirarse y a su vez a reducirse en su sección transversal, en un proceso parecido al que en mecánica de fractura se denomina fractura dúctil y que puede presentarse en metales muy puros, en los cuales las deformaciones plásticas de cortante puro ocurren en planos conjugados de desplazamiento hasta que el material pierde el 100% de su área transversal, formando una garganta, como se presenta en la Figura 6.20 (Broek, 1986). Cuando el elemento entra en rotura, pasa a formar parte de las caras de la grieta, conformando uno de los tramos semicirculares antes descritos y la grieta avanza hasta llegar al siguiente elemento al que le ocurre un proceso similar.

Posiblemente algunos elementos presentan condiciones de resistencia a la tracción superior al resto del material y por tal razón, no alcanzan a llegar a la rotura, en estos casos puede presentarse una detención del avance de la grieta o puede ocurrir que el incremento de la magnitud del campo de tensiones ocasione la rotura del elemento subsiguiente, en este caso se formarían los filamentos de suelo que eventualmente quedan entre las dos caras de la grieta, tal como morfológicamente se aprecia en las microfotografías.

Este modelo conceptual aunque es muy simplificado permite tener una idea del fenómeno físico de avance del frente de agrietamiento y puede ser compatible con los criterios energético y de tensiones empleados en mecánica de fractura, puesto que en cada uno de los elementos se verificaría internamente la condición de estabilidad que define si la grieta continúa extendiéndose o si se estabiliza. Adicionalmente, en la Figura 6.20 se puede ver que las probetas sometidas a tracción pura y que en este caso representan las fibras del suelo, en realidad rompen por corte, de manera semejante a lo que ocurrió en varios de los ensayos de extensión en el equipo triaxial (capítulo 2) que presentaban reducción de sección y bien definido el ángulo de rozamiento (ϕ). Esto apoya la hipótesis indicada en el capítulo 4 respecto a los mecanismos similares que presentan la rotura por tracción y la rotura por corte.

Planas et al (1995) indican que una grieta cohesiva puede tener diferentes orígenes físicos, como se muestra en la Figura 6.21. El mecanismo de microagrietamiento de la arcilla que se describió, presenta cierta similitud con el caso de rotura fibras de enlace (Fig. 6.21d) y cuando las grietas adquieren un tamaño mayor su morfología se asemeja a la dejada por separación de agregados entabados por fricción (Fig. 6.21e), con frecuentes superposiciones o traslajos (Fig. 6.21f). Aquí se ve una vez más la relación que existe entre la rotura por tracción y la rotura por corte.

6.10 Conclusiones

- El estudio de microagrietamientos permite visualizar aspectos morfológicos de inicio y avance de grietas en una arcilla. El microscopio electrónico ambiental resulta de especial interés en este tipo de evaluaciones puesto que con él se logra observar la evolución del fenómeno sin alterar las condiciones de la muestra. El microscopio electrónico en condición de alto vacío y con detector de electrones retrodispersados, es útil para las etapas finales o para detallar un punto fijo de alguna de las etapas intermedias del agrietamiento ya que en muchos casos se logran imágenes de mayor nitidez y de mayor amplificación que en el modo ambiental y el microscopio óptico convencional es de utilidad para observar las etapas de propagación rápida de grietas y los procesos de mojado de la muestra, puesto que se tiene mayor campo de observación y facilidades para desplazar y rotar la muestra.
- A partir de las pruebas realizadas sobre arcilla remoldeada, se definieron cuatro etapas del proceso de agrietamiento por desecación: muestra húmeda, inicio de desecación, propagación estable de grietas y propagación inestable de grietas. En cada una de tales etapas se describen los aspectos morfológicos típicos. En la primera etapa se aprecian algunas microgrietas muy pequeñas y superficiales que generalmente no son las causantes del agrietamiento final, puesto que éste se relaciona fundamentalmente con las condiciones de restricción al desplazamiento impuestas por la geometría de la muestra.
- El avance de las microgrietas no es continuo sino que sucede por tramos cortos, generalmente interconectados mediante partículas de mayor tamaño o grumos de suelo. A medida que aumenta la desecación, la grieta se prolonga y se presenta coalescencia de los diferentes tramos por lo tanto no sigue una trayectoria rectilínea sino con curvaturas y ramificaciones. Las morfologías de agrietamiento observadas en la arcilla presentan bastante similitud con las que ocurren en mortero y en hormigón,

donde la presencia de los granos de mayor tamaño influye en la orientación y forma de las grietas.

- La hidratación de un suelo que está en proceso de agrietamiento por desecación causa un avance muy rápido de las grietas existentes y aparición de nuevas grietas, este fenómeno se puede explicar mediante el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas descrito en el capítulo 4, como una reducción rápida de la succión que lleva la trayectoria de tensiones efectivas hasta tocar la envolvente de resistencia en tracción. Después de unos minutos las grietas tienden nuevamente a cerrarse porque se producen expansiones en el suelo.
- Los análisis de composición química con microsonda no mostraron correlación entre la composición de la arcilla y la ocurrencia de las microgrietas, sólo se observaron algunos cambios de composición después de un secado de la muestra en el horno.
- A partir de los rasgos morfológicos del suelo agrietado y de las observaciones sobre el avance de las grietas, se hace una interpretación cualitativa del proceso de prolongación de una microgrieta, considerando elementos o fibras independientes de suelo que sufren rotura por tracción. Este esquema simplificado guarda relación con los modelos de agrietamiento cohesivo planteados en mecánica de fractura y permiten encontrar similitudes importantes entre los mecanismos de rotura por tracción y por corte, como se había planteado en el capítulo 4.

ESEM Relative Humidity Isobar Chart
Temperature (°C) vs. Vapor Pressure (Torr)

°C	% RELATIVE HUMIDITY																										
	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	27.5	25	22.5	20	17.5	15	12.5	10	7.5	5	2.5	0
0	4.6	4.3	4.1	3.9	3.6	3.4	3.2	3.0	2.7	2.5	2.3	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
1	4.9	4.7	4.4	4.2	3.9	3.7	3.4	3.2	2.9	2.7	2.4	2.2	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.0
2	5.3	5.0	4.7	4.5	4.2	4.0	3.7	3.4	3.2	2.9	2.6	2.4	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.1	0.0
3	5.7	5.4	5.1	4.8	4.5	4.2	4.0	3.7	3.4	3.1	2.8	2.5	2.3	2.0	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.1	0.0
4	6.1	5.8	5.5	5.2	4.9	4.6	4.3	3.9	3.6	3.3	3.0	2.7	2.4	2.1	1.8	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	0.9	0.8	0.6	0.5	0.3	0.2	0.0
5	6.5	6.2	5.9	5.5	5.2	4.9	4.6	4.2	3.9	3.6	3.3	2.9	2.6	2.3	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3	1.1	1.0	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.0
6	7.0	6.6	6.3	5.9	5.6	5.2	4.9	4.5	4.2	3.8	3.5	3.1	2.8	2.4	2.1	1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.0
7	7.5	7.1	6.7	6.4	6.0	5.6	5.2	4.9	4.5	4.1	3.7	3.4	3.0	2.6	2.2	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.0
8	8.0	7.6	7.2	6.8	6.4	6.0	5.6	5.2	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.8	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
9	8.6	8.2	7.7	7.3	6.9	6.4	6.0	5.6	5.2	4.7	4.3	3.9	3.4	3.0	2.6	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.6	0.4	0.2	0.0
10	9.2	8.7	8.3	7.8	7.3	6.9	6.4	6.0	5.5	5.1	4.6	4.1	3.7	3.2	2.8	2.5	2.3	2.1	1.8	1.6	1.4	1.1	0.9	0.7	0.5	0.2	0.0
11	9.8	9.3	8.8	8.3	7.9	7.4	6.9	6.4	5.9	5.4	4.9	4.4	3.9	3.4	2.9	2.7	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.7	0.5	0.2	0.0	0.0
12	10.5	10.0	9.4	8.9	8.4	7.9	7.3	6.8	6.3	5.8	5.2	4.7	4.2	3.7	3.1	2.9	2.5	2.2	2.0	1.7	1.5	1.2	1.0	0.7	0.5	0.2	0.0
13	11.2	10.6	10.1	9.5	9.0	8.4	7.8	7.3	6.7	6.2	5.6	5.0	4.5	3.9	3.4	3.1	2.8	2.5	2.2	2.0	1.7	1.4	1.1	0.8	0.6	0.3	0.0
14	12.0	11.4	10.8	10.2	9.6	9.0	8.4	7.8	7.2	6.6	6.0	5.4	4.8	4.2	3.6	3.3	3.0	2.7	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9	0.6	0.3	0.0
15	12.8	12.1	11.5	10.8	10.2	9.6	8.9	8.3	7.7	7.0	6.4	5.7	5.1	4.5	3.8	3.5	3.2	2.9	2.6	2.2	1.9	1.6	1.3	1.0	0.6	0.3	0.0
16	13.6	12.9	12.2	11.6	10.9	10.2	9.5	8.8	8.2	7.5	6.8	6.1	5.4	4.8	4.1	3.7	3.4	3.1	2.7	2.4	2.0	1.7	1.4	1.0	0.7	0.3	0.0
17	14.5	13.8	13.1	12.3	11.6	10.9	10.2	9.4	8.7	8.0	7.3	6.5	5.8	5.1	4.4	4.0	3.6	3.3	2.9	2.5	2.2	1.8	1.5	1.1	0.7	0.4	0.0
18	15.4	14.7	13.9	13.1	12.4	11.6	10.8	10.0	9.3	8.5	7.7	6.8	5.9	5.2	4.4	4.0	3.6	3.3	2.9	2.5	2.1	1.6	1.2	0.8	0.4	0.0	0.0
19	16.4	15.6	14.8	14.0	13.2	12.3	11.5	10.7	9.9	9.0	8.2	7.4	6.6	5.8	4.9	4.5	4.1	3.7	3.3	2.9	2.5	2.1	1.5	1.2	0.8	0.4	0.0
20	17.5	16.6	15.8	14.9	14.0	13.1	12.3	11.4	10.5	9.6	8.8	7.9	7.0	6.1	5.3	4.8	4.4	3.9	3.5	3.1	2.6	2.2	1.8	1.3	0.9	0.4	0.0
21	18.6	17.7	16.8	15.8	14.9	14.0	13.0	12.1	11.2	10.2	9.3	8.4	7.4	6.5	5.6	5.1	4.7	4.2	3.7	3.3	2.8	2.3	1.9	1.4	0.9	0.5	0.0
22	19.8	18.8	17.8	16.8	15.8	14.8	13.9	12.9	11.9	10.9	9.9	8.9	7.9	6.9	5.9	5.4	4.9	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0
23	21.0	20.0	18.9	17.9	16.8	15.8	14.7	13.7	12.6	11.6	10.5	9.5	8.4	7.4	6.3	5.8	5.3	4.7	4.2	3.7	3.2	2.6	2.1	1.6	1.1	0.5	0.0
24	22.3	21.2	20.1	19.0	17.9	16.8	15.6	14.5	13.4	12.3	11.2	10.1	8.9	7.8	6.7	6.1	5.6	5.0	4.5	3.9	3.4	2.8	2.2	1.7	1.1	0.6	0.0
25	23.7	22.5	21.3	20.2	19.0	17.8	16.6	15.4	14.2	13.0	11.9	10.7	9.5	8.3	7.1	6.5	5.9	5.3	4.7	4.2	3.6	3.0	2.4	1.8	1.2	0.6	0.0
26	25.2	23.9	22.7	21.4	20.1	18.9	17.6	16.4	15.1	13.8	12.6	11.3	10.1	8.8	7.6	6.9	6.3	5.7	5.0	4.4	3.8	3.1	2.5	1.9	1.3	0.6	0.0
27	26.7	25.4	24.0	22.7	21.4	20.0	18.7	17.4	16.0	14.7	13.3	12.0	10.7	9.3	8.0	7.3	6.7	6.0	5.3	4.7	4.0	3.3	2.7	2.0	1.3	0.7	0.0
28	28.3	26.9	25.5	24.1	22.6	21.2	19.8	18.4	17.0	15.6	14.2	12.7	11.3	9.9	8.5	7.8	7.1	6.4	5.7	5.0	4.2	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7	0.0
29	30.0	28.5	27.0	25.5	24.0	22.5	21.0	19.5	18.0	16.5	15.0	13.5	12.0	10.5	9.0	8.2	7.5	6.7	6.0	5.2	4.5	3.7	3.0	2.2	1.5	0.7	0.0
30	31.8	30.2	28.6	27.0	25.4	23.8	22.2	20.7	19.1	17.5	15.9	14.3	12.7	11.1	9.5	8.7	7.9	7.2	6.4	5.6	4.8	4.0	3.2	2.4	1.6	0.8	0.0
31	33.7	32.0	30.3	28.6	26.9	25.2	23.6	21.9	20.2	18.5	16.8	15.1	13.5	11.8	10.1	9.3	8.4	7.6	6.7	5.9	5.0	4.2	3.4	2.5	1.7	0.8	0.0
32	35.6	33.8	32.1	30.3	28.5	26.7	24.9	23.2	21.4	19.6	17.8	16.0	14.2	12.5	10.7	9.8	8.9	8.0	7.1	6.2	5.3	4.2	3.2	2.1	1.1	0.0	0.0
33	37.7	35.8	33.9	32.0	30.2	28.3	26.4	24.5	22.6	20.7	18.8	17.0	15.1	13.2	11.3	10.4	9.4	8.5	7.5	6.6	5.7	4.7	3.8	2.8	1.9	0.9	0.0
34	39.9	37.9	35.9	33.9	31.9	29.9	27.9	25.9	23.9	21.9	19.9	17.9	15.9	14.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
35	42.1	40.0	37.9	35.8	33.7	31.6	29.5	27.4	25.3	23.2	21.1	19.0	16.9	14.7	12.6	11.6	10.5	9.5	8.4	7.4	6.3	5.3	4.2	3.2	2.1	1.1	0.0
36	44.5	42.3	40.1	37.9	35.6	33.4	31.2	28.9	26.7	24.5	22.3	20.0	17.8	15.6	13.4	12.2	11.1	10.0	8.9	7.8	6.7	5.6	4.5	3.3	2.2	1.1	0.0
37	47.0	44.7	42.3	40.0	37.6	35.3	32.9	30.6	28.2	25.9	23.5	21.2	18.8	16.5	14.1	12.9	11.8	10.6	9.4	8.2	7.1	5.9	4.7	3.5	2.4	1.2	0.0
38	49.7	47.2	44.7	42.2	39.7	37.3	34.8	32.3	29.8	27.3	24.8	22.4	19.9	17.4	14.9	13.7	12.4	11.2	9.9	8.7	7.5	6.2	5.0	3.7	2.5	1.2	0.0
39	52.4	49.8	47.2	44.6	42.0	39.3	36.7	34.1	31.5	28.8	26.2	23.6	21.0	18.4	15.7	14.4	13.1	11.8	10.5	9.2	7.9	6.6	5.2	3.9	2.6	1.3	0.0
40	55.3	52.6	49.8	47.0	44.3	41.5	38.7	36.0	33.2	30.4	27.7	24.9	22.1	19.4	16.6	15.2	13.8	12.5	11.1	9.7	8.3	6.9	5.5	4.2	2.8	1.4	0.0
41	58.4	55.5	52.5	49.5	46.7	43.8	40.9	37.9	35.0	32.1	29.2	26.3	23.4	20.4	17.5	16.1	14.6	13.1	11.6	10.2	8.8	7.3	5.8	4.4	2.9	1.5	0.0
42	61.6	58.5	55.4	52.3	49.3	46.2	43.1	40.0	36.9	33.9	30.8	27.7	24.6	21.5	18.5	16.9	15.4	13.9	12.3	10.8	9.2	7.7	6.2	4.6	3.1	1.5	0.0
43	64.9	61.7	58.4	55.2	51.9	48.7	45.4	42.2	38.9	35.7	32.4	29.2	26.0	22.7	19.5	17.8	16.2	14.6	13.0	11.4	9.7	8.1	6.5	4.9	3.2	1.6	0.0
44	68.4	65.0	61.5	58.1	54.7	51.3	47.9	44.5	41.0	37.6	34.2	30.8	27.4	23.9	20.5	18.8	17.1	15.4	13.7	12.0	10.3	8.5	6.8	5.1	3.4	1.7	0.0
45	72.0	68.4	64.8	61.2	57.5	54.0	50.4	46.8	43.2	39.6	36.0	32.4	28.8	25.2	21.6	19.8	18.0	16.2	14.4	12.6	10.8	9.0	7.2	5.4	3.6	1.8	0.0
46	75.9	72.1	68.3	64.5	60.7	56.9	53.1	49.3	45.5	41.7	37.9	34.1	30.3	26.6	22.8	20.9	19.0	17.1	15.2	13.3	11.4	9.5	7.6	5.7	3.8	1.9	0.0
47	79.9	75.9	71.9	67.9	63.9	59.9	55.9	51.9	47.9	43.9	39.9	35.9	31.9	27.9	24.0	22.0	20.0	18.0	16.0	14.0	12.0	10.0	8.0	6.0	4.0	2.0	0.0
48	84.0	79.8	75.5	71.4	67.2	63.0	58.8	54.6	50.4	46.2	42.0	37.8	33.5	29.4	25.2	23.1	21.0	18.9	16.8	14.7	12.6	10.5	8.4	6.3	4.2	2.1	0.0
49	88.4	84.0	79.6	75.1	70.7	66.3	61.9	57.5	53.0	48.6	44.2	39.8	35.4	30.9	26.5	24.3	22.1	19.9	17.7	15.5	13.3	11.1	8.8	6.6	4.4	2.2	0.0
50	93.0	88.3	83.7	79																							

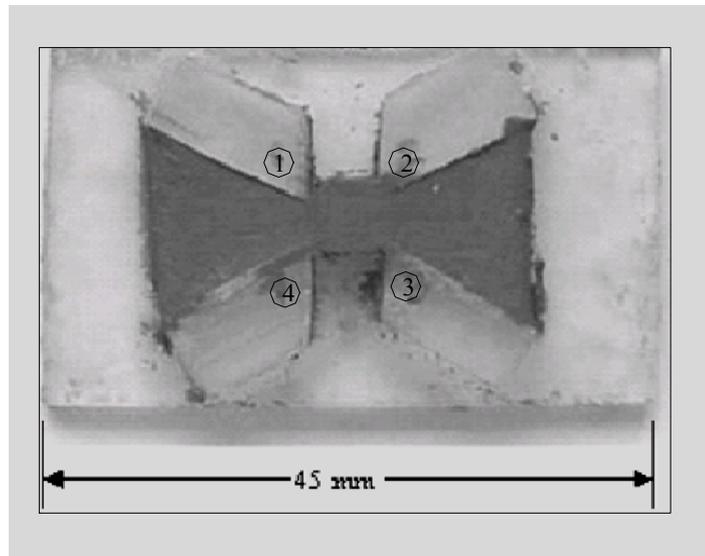


Figura 6.1 Molde para montar la muestra en el microscopio.

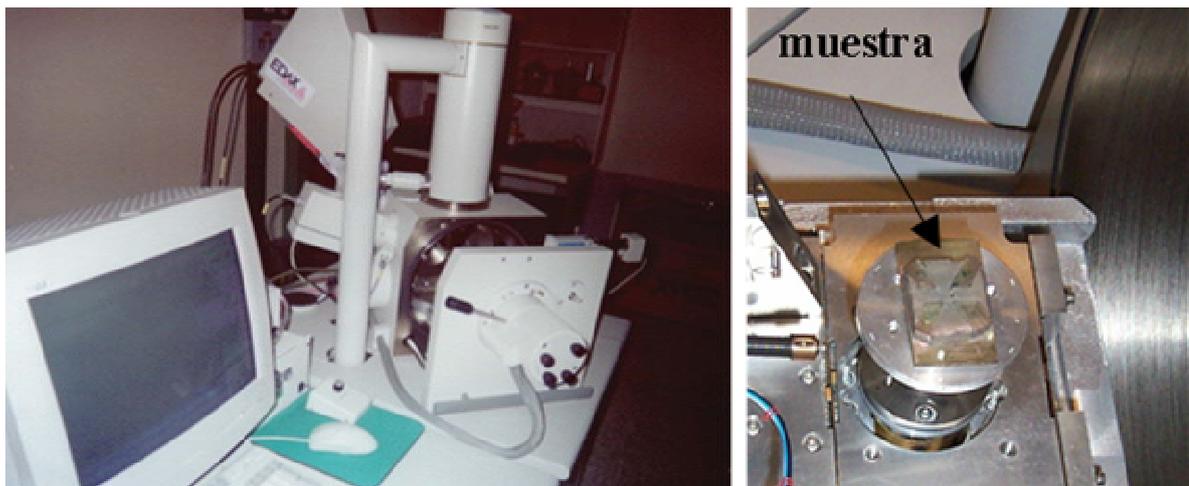


Figura 6.2 Microscopio electrónico. Izquierda: cámara, microsonda de energía dispersiva de rayos X (EDX) y monitor. Derecha: detalle de la muestra dentro de la cámara del microscopio electrónico.

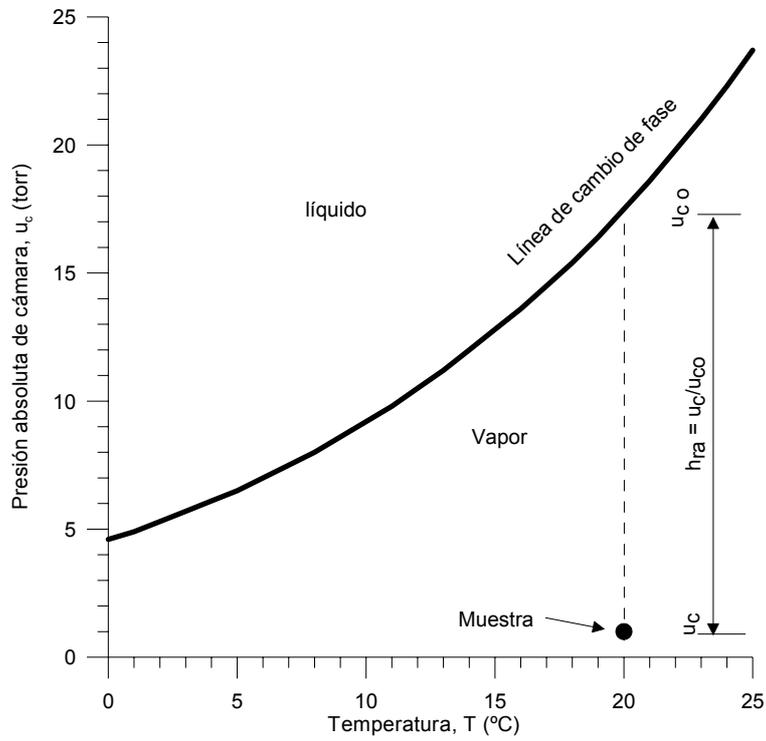


Figura 6.3 Humedad relativa aparente (h_{ra}) definida por la presión en la cámara y la temperatura en el ESEM.



Figura 6.4 Equipo de metalización de muestras para su observación en el microscopio electrónico con alto vacío y detector de electrones retrodispersados.



Figura 6.5 Microscopio óptico binocular, dotado de cámara fotográfica en la parte superior. Aumentos entre 6.4X y 48X.

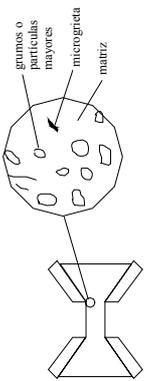
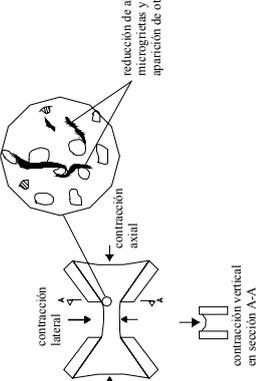
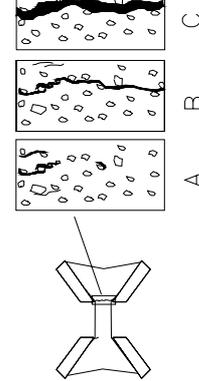
Etapa	Intervalo de Humedad (%)	Intervalo de Succión (kPa)	Esquema	Descripción Macroscópica	Descripción Microscópica
① Muestra húmeda	50 40	90 200		Muestra húmeda, recién instalada en el molde. No se observan grietas, material uniforme, textura lisa y color brillante	Rugosidad superficial por presencia de algunos grumos y por moldeado de la muestra. Microgrietas ocasionales muy superficiales y pequeñas, de 1 a 5 micras de abertura y de 10 a 20 micras de longitud.
② Inicio desecación	40 35	200 500		La arcilla pierde brillo superficial y la textura se aprecia menos uniforme. Ligera contracción longitudinal de la muestra	Se notan más resaltados los granos mayores respecto a la matriz (mayor rugosidad). Aparecen nuevas microgrietas con diferentes orientaciones bordeando a las partículas mayores. Las microgrietas predominantes son de 5 a 20 micras de abertura y de 20 a 100 micras de longitud. Se notan depresiones superficiales en la dirección de la tracción.
③ Propagación estable	35 30	500 1100		El color se hace opaco, la textura es similar a la etapa anterior, evidente contracción volumétrica aunque restringida por el molde y separación en algunos sitios de la muestra respecto a las paredes del molde.	Microgrietas en las esquinas internas de la muestra, incremento de tamaño y coalescencia de algunas de ellas y reducción de otras. Clara separación entre la muestra y el molde en algunos tramos. Abertura de microgrietas entre 20 y 30 micras y longitud entre 300 y 500 micras.
④ Propagación inestable	30 27	1100 2000		Propagación rápida del agrietamiento en sentido transversal de la muestra. en general sólo se presenta una grieta principal. La muestra se nota relativamente seca.	Se distinguen tres etapas: A. Se inicia prolongación y coalescencia de microgrietas. B. La grieta principal se prolonga totalmente en sentido transversal en un tiempo muy corto (10 a 20 segundos). Las grietas adyacentes tienden a cerrarse. C. Aumenta la apertura de grieta, después de unos minutos aparecen grietas secundarias y luego se estabiliza el proceso.

Figura 6.6 Evolución típica de microagrietamientos por desecación de la arcilla.

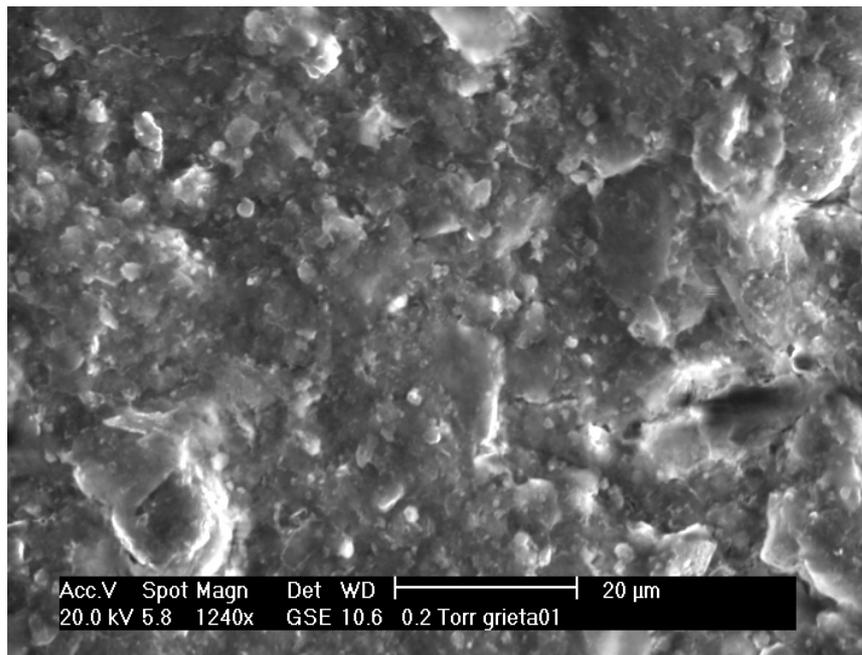


Figura 6.7 Rugosidad superficial al inicio del ensayo debida a la formación de pequeños grumos.

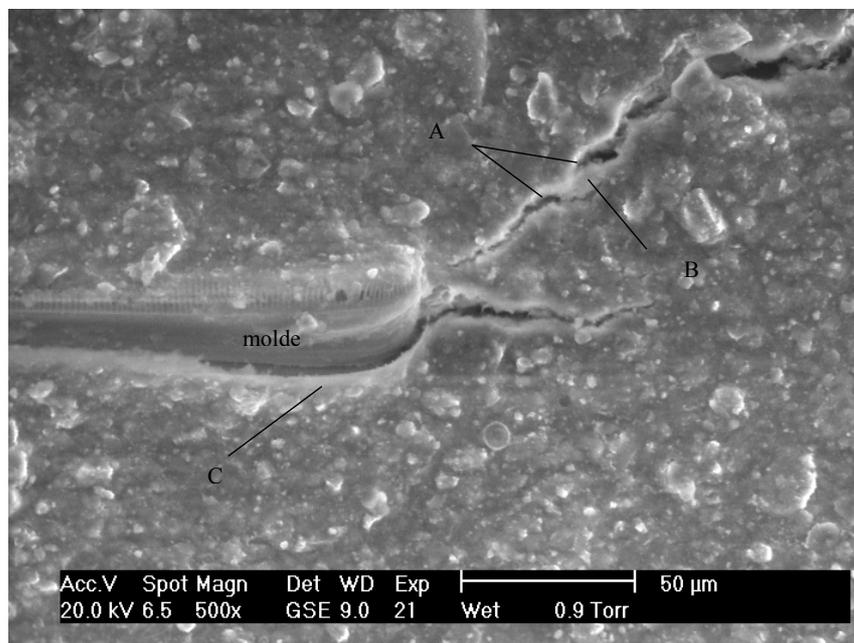


Figura 6.8 Microgrietas discontinuas observadas al inicio de la desecación. (A) Punta de dos microgrietas que se traslapan, (B) partícula bordeada por puntas de microgrietas y (C) separación entre la muestra y una pared del molde.

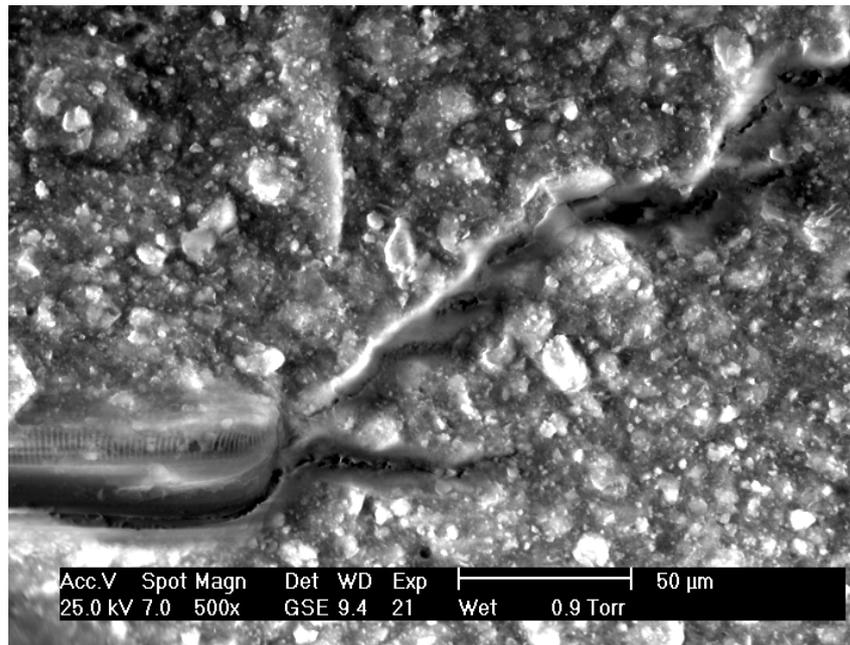


Figura 6.9 Coalescencia de tramos de microgrieta para formar una microgrieta continua (compárese con la Fig.6.8).

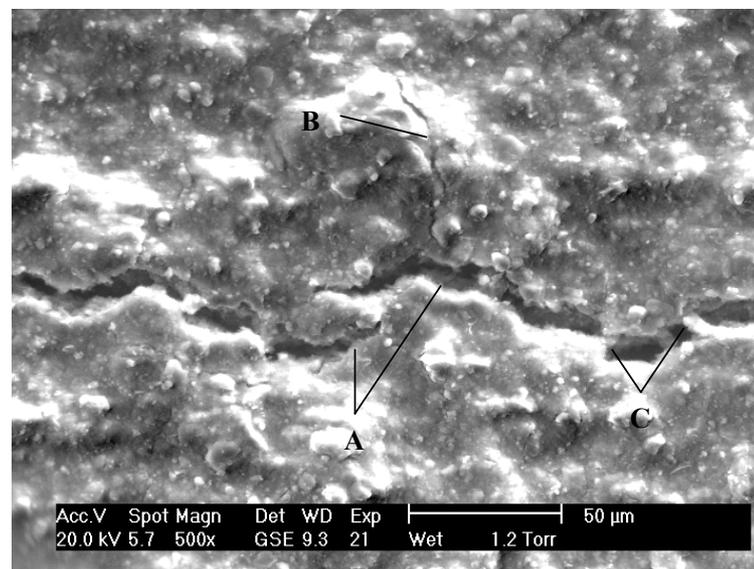


Figura 6.10 Avance estable de microgrietas y aparición de microgrietas secundarias. (A) Avance de microgrieta principal, (B) aparición de microgrieta secundaria y (C) filamentos de suelo que quedan entre las caras de las microgrietas.

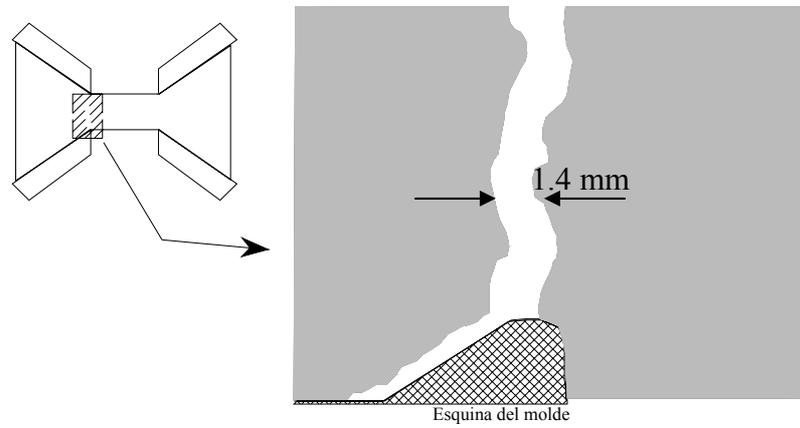


Figura 6.11 Abertura de grieta principal en zona de mayor tracción al final de proceso de desecación (imagen digitalizada).

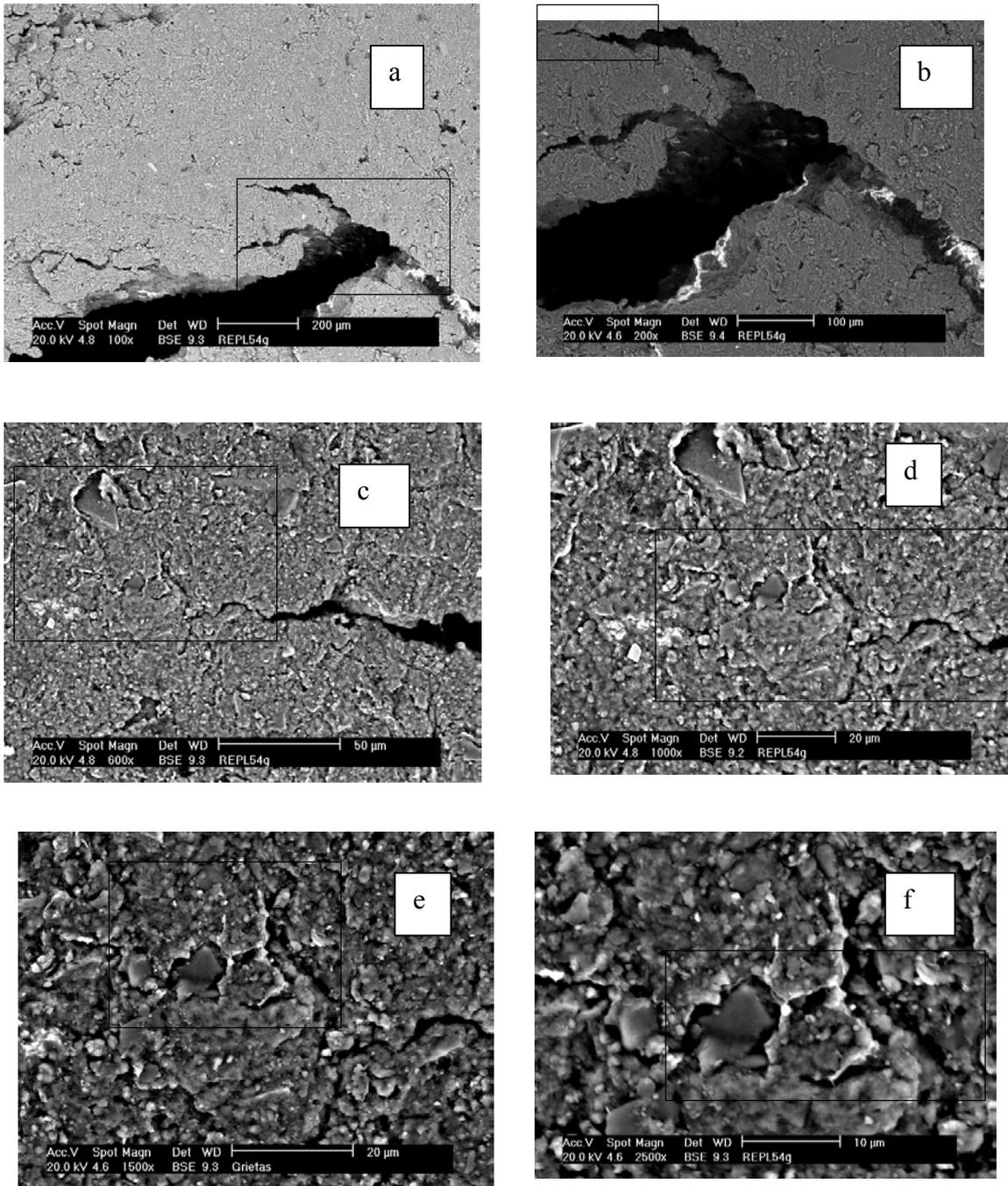


Figura 6.12 Detalle de una grieta a diferentes niveles de amplificación. Imágenes tomadas con SEM, detector BSE y alto vacío.

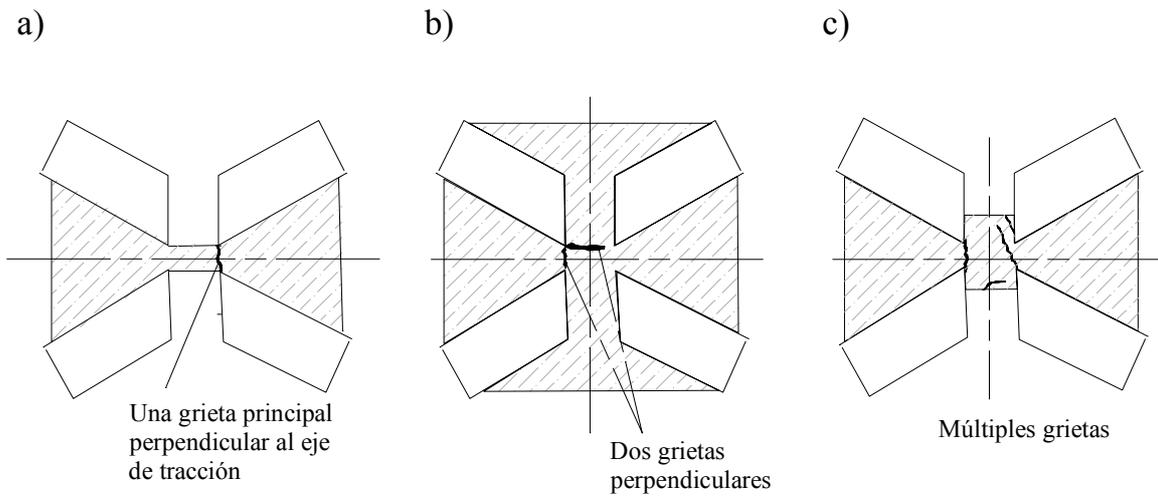


Figura 6.13 Agrietamientos finales para diferentes condiciones de restricción a la contracción: a) restricción uniaxial, b) restricción biaxial, c) restricción total en una dirección y parcial en la otra.

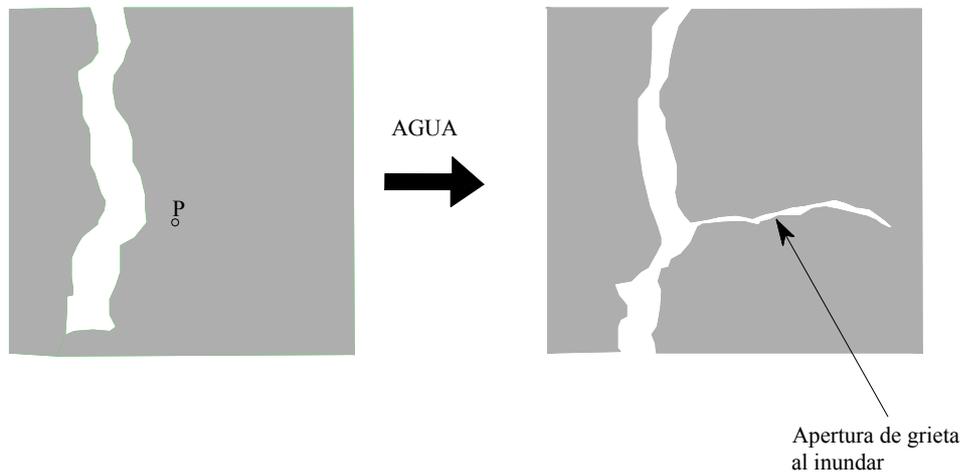


Figura 6.14 Agrietamiento muy rápido por efecto de agregar agua a la muestra. (Imagen digitalizada, observada en el microscopio óptico).

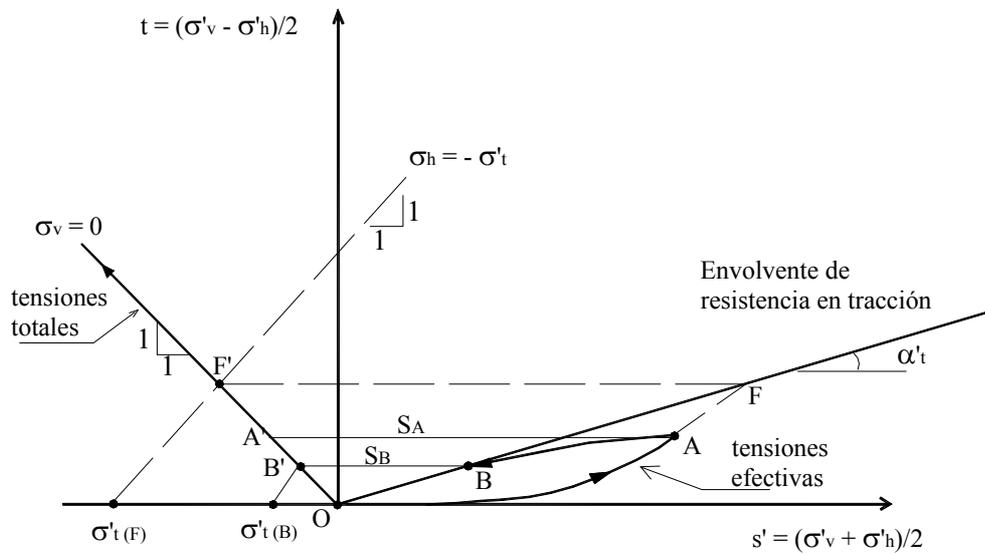


Figura 6.15 Trayectoria de tensiones ante el ingreso de agua en un punto P de la figura anterior.

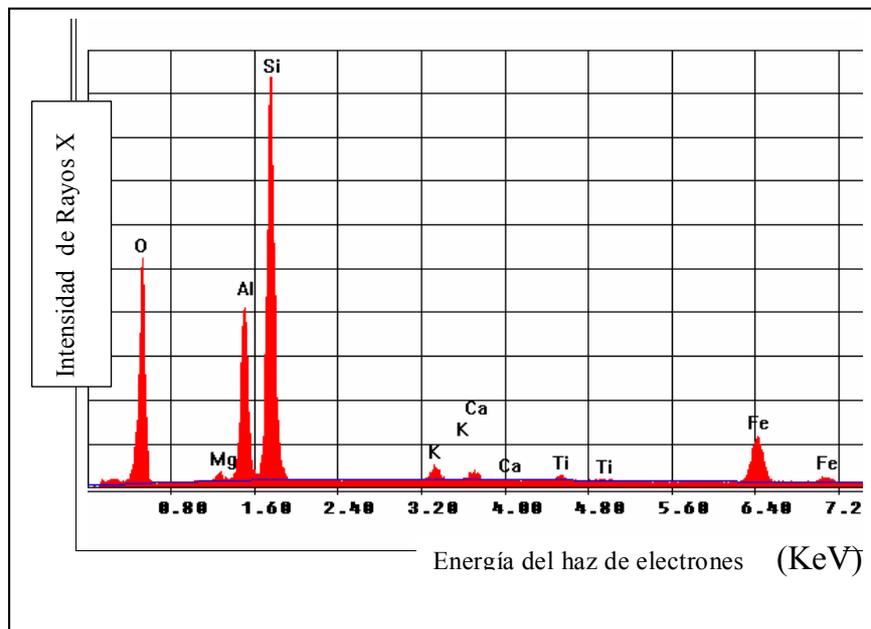


Figura 6.16 Espectro de energía dispersiva de Rayos- X y microanálisis químico.

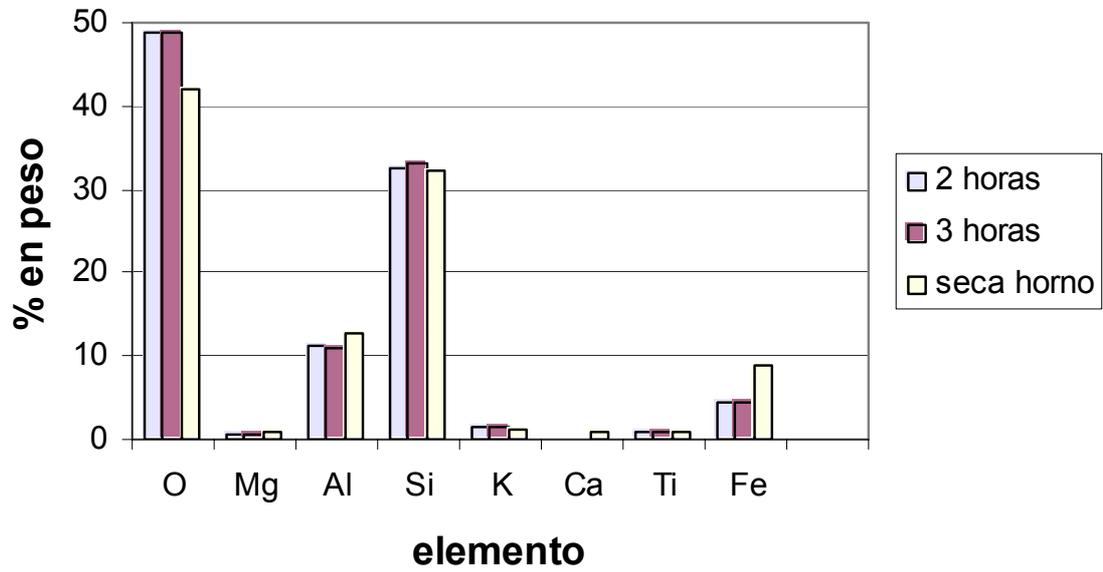


Figura 6.17 Proporción de la Composición química de la arcilla a diferentes humedades.

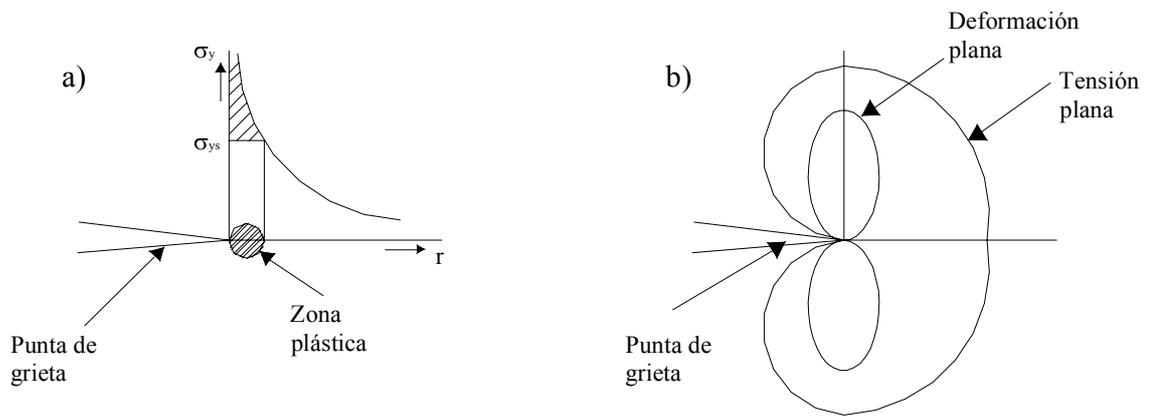


Figura 6.18 a) Distribución de tensiones en la punta de una grieta, b) Forma de la zona plástica. (Adaptado de Broek, 1986).

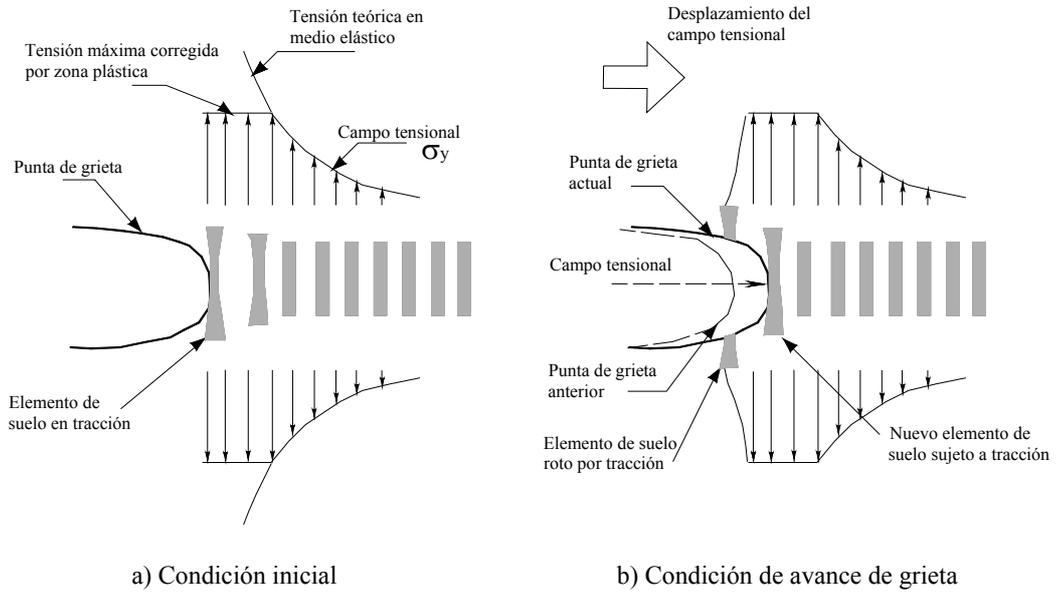


Figura 6.19 Representación esquemática del posible mecanismo de avance de microgrietas en la arcilla bajo una condición de deformación plana.

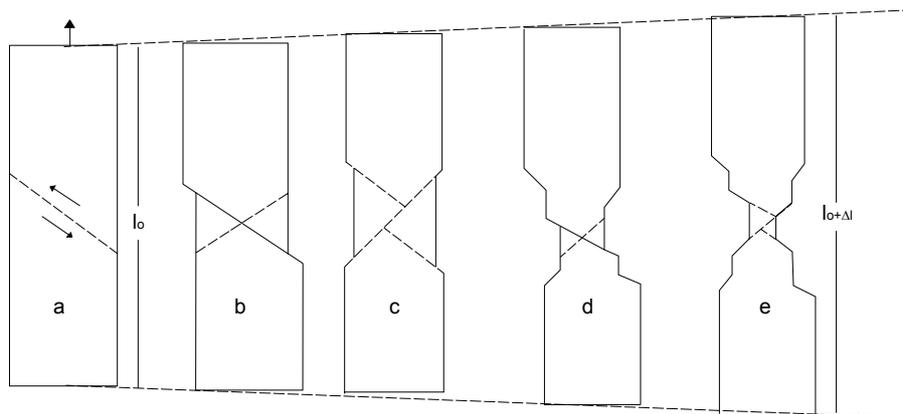


Figura 6.20 Mecanismo de rotura por deformación en metales puros (Tomado de Broek, 1986).

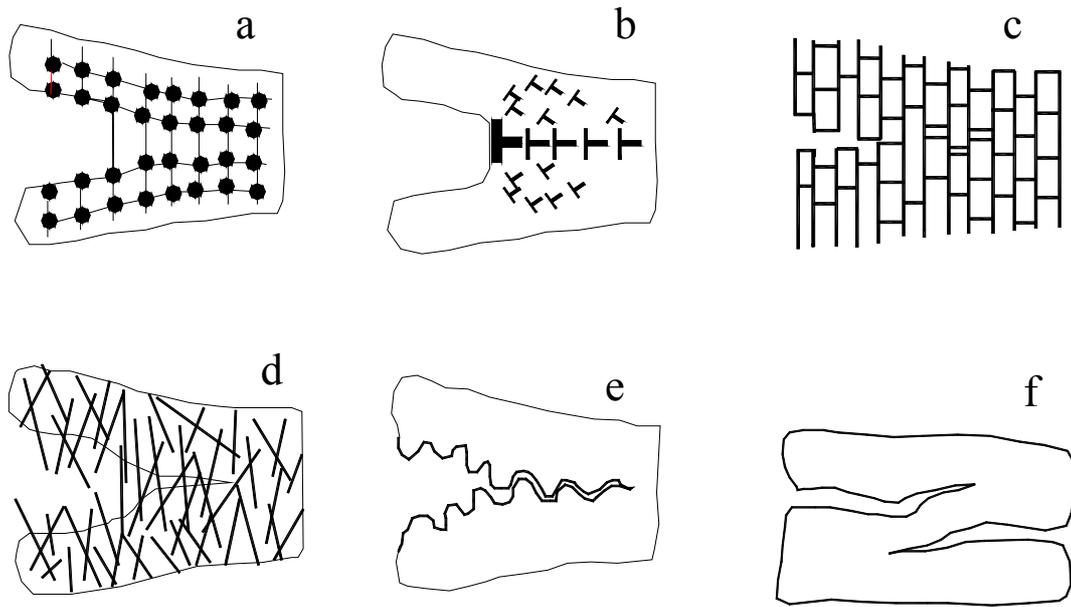


Figura 6.21 Posibles fuentes físicas de los agrietamientos cohesivos: a) enlaces atómicos, b) franja de dislocación, c) enlace de granos, d) enlace de fibras, e) agregados entrelazados por fricción y f) traslape de grietas (Planas et al, 1995).