

## CAPÍTULO 7

### MORFOLOGÍA DEL AGRIETAMIENTO DE LA ARCILLA EN MUESTRAS DE TAMAÑO INTERMEDIO

#### 7.1 Introducción

La observación morfológica de los procesos de inicio y evolución de los agrietamientos puede hacerse a diferentes escalas, por ejemplo, en el capítulo 6 se hizo a escala microscópica, utilizando distintos equipos y varios niveles de magnificación de las imágenes. La unidad típica de medida de longitudes y aberturas de grietas en este tipo de evaluación es la micra. También puede hacerse a escala intermedia, para observar a simple vista los procesos de agrietamiento en muestras de laboratorio e identificar patrones geométricos de las grietas y rasgos típicos de comportamiento del suelo en procesos de desecación. A esta escala las medidas suelen representarse en mm ó cm., finalmente, las observaciones pueden realizarse a escala que podría denominarse macro, correspondiente a las grietas que se aprecian en el terreno natural o en campos de experimentación, en cuyo caso las longitudes son del orden de m o incluso Km. y las aberturas normalmente son de varios cm.

Las pruebas que aquí se describen se consideran dentro de una escala intermedia de observación y con ellas se complementan las evaluaciones morfológicas que se realizaron sobre la misma arcilla a escala microscópica.

En particular en este capítulo se analizan las características del inicio y la evolución de las grietas producidas por desecación en relación con las condiciones iniciales del ensayo (humedad, succión y grado de saturación), con la geometría de los moldes empleados y con la tasa de desecación. Estos resultados a su vez permiten plantear relaciones con las propiedades mecánicas que controlan el comportamiento de la arcilla, especialmente con la resistencia a la tracción. Además se hace énfasis especial en el análisis de las restricciones a la contracción impuestas por los distintos moldes de ensayo y se discute cómo tales condiciones de restricción influyen de manera muy importante en las características del agrietamiento.

Los ensayos consistieron en someter a desecación muestras reconstituidas de arcilla colocadas en tres tipos de moldes diferentes. Por las características de los moldes se generan agrietamientos en la muestra cuando se alcanzan determinados valores de humedad o de succión, estos agrietamientos van incrementándose a medida que avanza la desecación, hasta que finalmente llegan a una condición estable.

Se realizaron varias series de ensayos, con diferentes valores de humedad inicial. Periódicamente, se tomaban datos del tiempo transcurrido a partir del inicio de la desecación,

de la temperatura ambiente, de la humedad relativa del ambiente y del peso de la muestra, este último para determinar los cambios de humedad. También se hacía un esquema de la evolución de las muestras y se tomaban fotografías que posteriormente se digitalizaban y servían para realizar los análisis geométricos cuantitativos de la magnitud de los agrietamientos, considerando las áreas agrietadas y las no agrietadas. En algunas muestras se agregó agua después del secado inicial y se analizó su comportamiento.

Dentro de los trabajos sobre morfología de agrietamientos a escala intermedia se pueden mencionar los de Corte e Higashi (1960), Towner (1987b), Lloret et al (1998), Yesiller et al (2000) y Kodikara et al (2000), en la mayoría de ellos también se busca indagar sobre las variables que intervienen en el proceso de agrietamiento de las arcillas y sobre las condiciones de inicio y propagación de las grietas. En este trabajo se pretende entonces ampliar la información disponible sobre el tema, pero incorporando, como ya se indicó, un elemento adicional relacionado con la forma de los moldes y su efecto en las condiciones de restricción a la contracción y en el desarrollo de las tensiones de tracción que dan origen a las grietas.

## 7.2 Procedimiento y equipos

El suelo empleado fue la misma arcilla de Bogotá descrita en los otros capítulos, también en condición reconstituida. El procedimiento general consistió en agregar agua a las muestras hasta la humedad requerida para cada ensayo, luego, mediante una espátula, se mezclaba el suelo hasta conseguir una pasta uniforme. En estas condiciones se colocaba en los moldes de ensayo, se enrasaba y se limpiaban los residuos. Parte del material sobrante se utilizaba para determinar la humedad inicial, la cual servía para deducir, por pérdida de peso, la humedad en cualquier momento del ensayo, aunque al final de cada ensayo también se determinaba la humedad de la muestra y el dato servía de verificación de las humedades antes calculadas.

Los moldes empleados fueron de tres tipos: los más grandes que este caso llamaremos bandejas, consistieron en recipientes de forma cuadrada, con pequeñas ranuras o hendiduras en la base para proveer rugosidad y restringir la libre contracción del suelo. Una de las bandejas tenía 5 mm de altura (B-1) y otra 10 mm de altura (B-2). El segundo tipo de molde fue de tamaño pequeño y en forma de I, tratando de lograr restricción en el desplazamiento por contracción axial, de forma similar a lo que se realizó con las muestras llevadas al microscopio y con los ensayos de tracción. A estos moldes se les denominó moldes pequeños (MP) y el tercer tipo de molde tenía la misma forma del anterior pero aún de menor tamaño y se le denominó molde micro (MM).

En la Figura 7.1 se presentan las fotografías de los tres tipos de moldes y en la Figura 7.2 se muestra un montaje general de los ensayos en los moldes de bandejas, donde se pueden apreciar los equipos complementarios consistentes en una unidad de lectura electrónica de temperatura y humedad relativa ambientales, un cronómetro y una balanza con precisión de 0.1 gr. Esta balanza se empleó para pesar los moldes tipo B y MP mientras que para los moldes tipo MM se empleó una balanza de 0.0005 gr. de precisión. En la Figura 7.3 se muestran los esquemas de los moldes con sus dimensiones.

De los moldes tipo MP y MM se disponía de grupos de tres iguales, de forma tal que se podían hacer series de ensayos de manera simultánea, lo cual es útil para mejorar la estadística de los datos. Una vez determinada la humedad inicial se pesaba el conjunto de molde más muestra, se hacían las lecturas de temperatura y humedad relativa, se dibujaba un

esquema de las condiciones y detalles de la muestra y se tomaban fotografías. La muestra se dejaba secar al aire durante cierto tiempo, al cabo del cual se repetía el procedimiento de toma de datos, con el fin de tener un registro de la evolución de la muestra a medida que perdía humedad. En el esquema se indicaban los rasgos morfológicos como contracción lateral, abultamiento, cambio de color, etc. y en particular se trataba de identificar el momento de inicio de los agrietamientos.

Cuando se estimaba que estaba próxima la humedad de agrietamiento, se recubrían las muestras con un plástico durante las horas de la noche, con lo cual se reducía la pérdida de humedad a valores próximos a cero y se evitaba así que la muestra se agrietara en momentos en los cuales no se estaba haciendo observación periódica. Se tuvo especial cuidado en el manejo de las muestras al momento de pesarlas, para no inducir movimientos bruscos ni causar pérdidas o acumulaciones de material que alteraran los datos de humedad.

### 7.3 Curvas de desecación y humedad de agrietamiento

En cada uno de los ensayos se midió la temperatura, la humedad relativa ambiental y la humedad de la muestra función del tiempo. Los períodos de observación variaron entre 1 y 10 días, dependiendo del tipo de molde y de la evolución del agrietamiento. En la gran mayoría de las pruebas la temperatura presentó poca variabilidad, oscilando entre 18° y 20° C, sólo en algunas oportunidades se registraron temperaturas hasta de 22° C. Sin embargo no se contó con registros nocturnos, donde probablemente la temperatura descendió considerablemente a valores del orden de 8 a 12° C, pero como ya se indicó en estos períodos las muestras permanecían recubiertas para reducir su pérdida de humedad.

La humedad relativa del ambiente del laboratorio presentó valores máximos de 73% y mínimos de 46 % y valores medios del orden de 60%. En las Figuras 7.4 y 7.5 se presentan las curvas de variación de humedad, humedad relativa y temperatura en función del tiempo de desecación para las los ensayos de bandejas (series B1 y B2). En tales curvas se hizo la corrección para descontar el tiempo que las bandejas permanecían recubiertas, es decir corresponde a los tiempos netos de desecación, donde se asume que la redistribución de la humedad causada por el recubrimiento temporal de las muestras no afecta de manera significativa el proceso de desecación debido al poco espesor de las mismas. En las Figuras 7.6 y 7.7 se presentan las curvas de variación de humedad de la muestra en función del tiempo para los ensayos en moldes pequeños y en moldes micro, respectivamente. Para mayor claridad, en tales figuras se omiten las curvas de humedad relativa y temperatura.

Kodikara et al (2000) presentan tres curvas de desecación que se ajustan a ecuaciones de tipo exponencial, de la forma:

$$w = w_0 \exp(-kt) \quad (7.1)$$

Donde  $w_0$  es la humedad inicial del ensayo,  $k$  es descrita como tasa de desecación y  $t$  es el tiempo.

Al tratar de ajustar los resultados de los presentes ensayos con la ecuación anterior, no se obtuvieron buenos coeficientes de correlación en todos los casos, ya que en general las curvas de desecación no mostraron una curvatura continua sino tres tramos característicos: un tramo inicial, de tipo lineal, que es el de mayor pendiente o de mayor tasa de pérdida de humedad, un tramo intermedio o de transición, que es no lineal y de corta duración y un tramo final,

que es lineal y tiene pendiente muy baja. El tramo inicial, en el cual ocurre la mayor parte de la retracción y el inicio del agrietamiento, se puede representar simplemente con la recta:

$$w = w_o - \lambda_o t \quad (7.2)$$

Donde  $w_o$  es la humedad inicial y  $\lambda_o$  la pendiente inicial o la tasa de pérdida de humedad. Si se quiere definir toda la curva es necesario determinar además la ecuación del tramo recto final, cuya pendiente es  $\lambda_f$  y el tiempo correspondiente al punto de inflexión ( $t_i$ ), determinado por la intersección de las dos rectas (Figura 7.8a). Estas curvas son similares a las de un ensayo de contracción libre, en el cual se representa el índice de poros en función de la humedad (Figura 7.8 b), pues en ese caso también se tiene un tramo lineal inicial que corresponde a la condición de suelo saturado, un tramo intermedio que representa la zona de inicio de la desaturación y un tramo final correspondiente al suelo no saturado.

En los ensayos realizados, la tasa de desecación inicial aumenta proporcionalmente con la humedad inicial mientras que tiende a disminuir con el tamaño de las muestras (Fig. 7.9). Aunque sería muy útil poder saber si el suelo está saturado o no a partir de la curva de desecación, es necesario tener precaución ya que la correspondencia entre las dos curvas de la Figura 7.8 no se da en todos los casos, debido a que la contracción no es totalmente uniforme sino parcialmente restringida y aún en muestras que se dejen en retracción libre puede ocurrir desacople entre los cambios de volumen y la tasa de desecación, de todas maneras si el agrietamiento se presenta en el tramo inicial, es muy probable que el suelo esté saturado.

Con las fotografías tomadas en diferentes momentos se puede determinar el cambio de área superficial de la muestra a medida que se va secando, pero la medición del cambio de altura y de succión se consideró que no era conveniente realizarlas porque los instrumentos podrían alterar el fenómeno de agrietamiento que se quería evaluar, tal como se reporta en algunos ensayos revisados por Kodikara et al (2000), por lo tanto, con los parámetros medidos, no se puede conocer el índice de poros en todo momento ni se puede obtener directamente el grado de saturación del suelo al inicio de las grietas, por esta razón es necesario basarse en la curva de retención del material para estimar indirectamente el grado de saturación y la succión media en el momento del agrietamiento.

Aunque la información obtenida de esta manera es de gran utilidad, es probable que no corresponda exactamente con la succión que efectivamente se presenta en las zonas de agrietamiento, ya que la curva de retención fue realizada con material que podía contraerse libremente mientras que en este caso, como ya se indicó, la contracción es restringida y por lo tanto pueden presentarse incrementos locales de succión, como los medidos en los ensayos de tracción (ver Capítulo 4), en los que se empleó el tensiómetro del Imperial College (Ridley y Burland, 1993).

En cuanto a la influencia de la tasa de desecación en el inicio del agrietamiento (Fig. 7.10), la tendencia observada fue que a mayor tasa de desecación inicial es menor la humedad de agrietamiento normalizada ( $w_{crN}$ ), donde esta última se define como la humedad de agrietamiento sobre la humedad inicial ( $w_{crN} = w_{cr} / w_o$ ). Esto implica que si se partiera de humedades iguales debería esperarse menor humedad de agrietamiento mientras mayor sea la tasa de desecación. Los resultados aquí obtenidos presentan tendencias similares a los reportados por Lloret et al (1998) y por Kodikara et al (2000).

En la Tabla 7.1 se resumen los datos generales de cada uno de los ensayos realizados y se indica allí el espesor de las muestras, la humedad inicial, la humedad de agrietamiento, la humedad de agrietamiento normalizada, el tiempo neto transcurrido hasta el inicio del agrietamiento, la tasa de desecación en el tramo inicial de la curva, la succión media deducida de la curva de retención y el grado de saturación al inicio de las grietas.

Otra manera de presentar las curvas de desecación es en términos de pérdida específica de humedad (pérdida de masa de agua por unidad de área superficial) en el tiempo, tal como lo reporta Dineen (1997) para ensayos de desecación libre. Esta representación tiene la ventaja de que permite la comparación directa de las curvas ya que las hace independientes de la humedad inicial y de las áreas de los moldes, por lo tanto, todas parten del mismo punto.

En la Figura 7.11 se representan de esta forma las curvas de desecación de las bandejas B1 y B2, donde se puede ver que para cada tipo de molde las pendientes son muy similares entre sí en el tramo inicial, luego comienzan a separarse las curvas y cada una llega a un valor diferente, el cual depende de la humedad inicial, es decir, las muestras más húmedas están en capacidad de perder mayor cantidad de agua y por eso las curvas de desecación bajan más que las correspondientes a las muestras de menor humedad. La pendiente media de los ensayos B2 es un poco menor que la de los ensayos B1, así mismo, las curvas de los ensayos B2 se prolongan más que las de B1 debido a que el volumen del molde es mayor y por lo tanto tienen mayor capacidad de perder agua durante el secado.

En las Figuras 7.12 y 7.13 se muestran las curvas de desecación de los ensayos MP serie A y MM serie A respectivamente. En ambos casos el comportamiento es similar al de las muestras de bandejas, caracterizado por una pendiente inicial muy uniforme y un valor final que es función de la humedad inicial. Un aspecto que se notó en todos los casos es que el inicio del agrietamiento, representado en las figuras por una flecha vertical, ocurre en el tramo recto inicial y aparentemente no tiene mucha influencia en la variación de la tasa de desecación, puesto que las curvas en general no mostraron cambios importantes de pendiente después del inicio de las grietas. Esto probablemente se deba a que el aumento de la superficie de evaporación generado por la apertura de las grietas no es muy significativo respecto al área total de la muestra y también a que tales superficies de fractura generan caras laterales que son menos efectivas para permitir la evaporación del agua que las caras superficiales.

La comparación de los diferentes ensayos se puede apreciar mejor en la Figura 7.14, donde resulta claro que los ensayos en moldes micro presentan la mayor pendiente inicial y los menores valores finales de pérdida específica de agua, los de moldes pequeños tienen pendiente intermedia y pérdida intermedia de agua y las bandejas presentan la menor pendiente y la mayor pérdida específica de agua. Estos resultados muestran que las condiciones de desecación están relacionadas con la masa total de suelo que se está desecando y como se mostrará posteriormente, con las formas de los moldes.

Un aspecto que merece especial atención es el inicio del agrietamiento, puesto que en realidad es una condición que depende mucho de la escala de observación y de los efectos que se quieran evaluar, por lo tanto se debe definir convenientemente, bien sea por longitud, por profundidad, o por apertura. En el caso de las bandejas, se consideró que las grietas se iniciaban cuando su longitud era igual o superior a 10mm, pero para el caso de los moldes pequeños se adoptó como inicio de grieta una longitud de 3mm y para los moldes micro de 1mm. Estos criterios adoptados guardan relación con la dimensión máxima del molde y con

las dimensiones que en la práctica indicaban que en realidad se trataba del inicio de una grieta y no de discontinuidades causadas por rugosidad superficial o formación de grumos. Las longitudes adoptadas de inicio de grieta respecto a las longitudes máximas de cada tipo molde variaron entre 3.75% y 5%. En la literatura revisada no se especifica el criterio de condición de inicio de grieta.

Al revisar las observaciones hechas en el microscopio, se nota que una grieta se puede definir de manera relativamente clara cuando su longitud es aproximadamente el 4% del ancho de la imagen o de su campo visual. Esta proporción se ajusta razonablemente a la que se tiene en el caso de los moldes. En síntesis se puede considerar que para escalas de observación micro e intermedia un valor de 4% de la longitud máxima de observación es razonable como criterio de longitud inicial de grieta.

En la Figura 7.15, se presenta la humedad de inicio de grietas en función de la humedad inicial del ensayo para cada tipo de molde. Con base en esta figura se puede ver que para unas condiciones similares de humedad relativa y temperatura, la humedad de agrietamiento tiende a aumentar linealmente con la humedad inicial. Esta tendencia, aunque presenta importante dispersión en los datos, particularmente en los moldes micro, se observó en todas las series de ensayos. Las ecuaciones de las rectas de interpolación y los coeficientes de correlación se presentan en cada una de las curvas. Estas curvas también se pueden presentar en términos de la humedad de agrietamiento normalizada, tal como se muestra en la Figura 7.16.

Con el fin de comparar los diferentes ensayos, en la Figura 7.17 se muestran en una sola gráfica todos los resultados en términos de la humedad inicial y la humedad de agrietamiento, donde se aprecia que los datos de las bandejas y de los moldes pequeños se pueden agrupar razonablemente en una sola línea de interpolación, mientras que los de los moldes micro presentan humedades de agrietamiento muy inferiores a las anteriores. En esta misma figura se indican, en líneas a trazos, los valores medios de los límites líquido y plástico de la arcilla ensayada. Aquí se puede ver que en los ensayos en bandejas y moldes pequeños, la humedad de agrietamiento ocurre en general entre estos dos límites, aún en las muestras que parten con humedades muy altas, es decir, en este intervalo es donde se generan las tensiones necesarias para que el material entre en rotura por tracción. En el caso de los moldes micro, el agrietamiento ocurrió para humedades próximas o inferiores al límite plástico e incluso en un caso la muestra no se agrietó.

Haciendo uso de la curva de retención de la arcilla, las condiciones de inicio de grieta también pueden representarse en términos de la humedad inicial y la succión de agrietamiento, como se indica en la Figura 7.18. En esta figura, a pesar de la dispersión de los datos, se puede ver que la succión de agrietamiento tiende a ser menor a medida que se incrementa la humedad inicial, esto implica que si la humedad inicial es alta, la succión es baja y así mismo es baja la resistencia a la tracción, por lo tanto el suelo entra en rotura fácilmente, mientras que si la humedad inicial es baja, la succión es alta y la resistencia a la tracción del suelo se incrementa, de tal manera que se requieren altas succiones impuestas por el secado para hacer entrar el suelo en rotura.

Todos los agrietamientos en bandejas y moldes pequeños iniciaron en condición de suelo saturado. Este es un aspecto importante en el comportamiento, que bajo ciertas condiciones, brinda la posibilidad de estudiar el problema en términos de tensiones efectivas, como se planteó en el capítulo 6. En los moldes micro, varias muestras se agrietaron en condiciones parcialmente saturadas, con grados de saturación que variaron entre 85% y 100%. El

comportamiento aparentemente anómalo de las muestras micro, relacionado con la baja humedad de agrietamiento, la alta succión y la no saturación al inicio de las grietas, parece estar asociado a diferencias en las características de restricción al desplazamiento en los distintos moldes, como se discute enseguida.

#### **7.4 Mecanismos y morfología de agrietamiento de muestras en moldes pequeños (MP) y micro (MM)**

Cuando un suelo se somete a succión, las partículas tienden a acercarse unas a otras y por tal razón el material se contrae. Si por ejemplo se tiene una muestra cilíndrica que se deja secar, las partículas de dicha muestra tienden a contraerse hacia el centro de gravedad y se produce reducción de volumen (Figura 7.19). Si entre la muestra y la base donde ésta se apoya la fricción es muy baja, no se presenta restricción a la contracción y por lo tanto, no deben aparecer grietas en la muestra al ocurrir cambio uniforme de volumen.

En los moldes pequeños y micro que tienen forma de I, la geometría impone restricciones a la contracción, entonces se generan tensiones de tracción que pueden causar el agrietamiento del suelo. Estos moldes geoméricamente presentan tres zonas (Figura 7.20a): una zona central (zona 2) hacia donde se produce la contracción principal y dos zonas extremas (zonas 1 y 3) que funcionan a manera de anclaje. En la zona 2 se presentan fuerzas que se podrían denominar de acción y en las zonas 1 y 3 fuerzas de reacción. De acuerdo con lo observado en los distintos ensayos, el agrietamiento inicial o primario ocurre precisamente en la interfase entre la zona central y los extremos (tramos a-f ó l-g).

Al observar la geometría de los moldes se puede notar que las paredes a-b, f-e, l-k y g-h son las que más impiden la contracción de la muestra y por lo tanto se podrían denominar paredes de reacción. En este caso la base del molde y las demás paredes también ejercen cierta restricción a la contracción, principalmente cuando las muestras están muy húmedas ya que presentan alta adhesión, sin embargo se puede considerar que esta restricción es inferior a la primera. En la misma Figura 7.20a se presenta un esquema de lo que puede ser la distribución de fuerzas (o de tensiones) en el interior de la muestra antes de producirse el agrietamiento.

Si se quisieran comparar las características de restricción impuestas por dos tipos de moldes se podría por ejemplo establecer de manera preliminar, la proporción entre las áreas de reacción ( $A_r$ ) y de acción ( $A_a$ ), lo que podría denominarse relación de reacción ( $RR = A_r/A_a$ ). En los esquemas de la Figura 7.3 aparecen las dimensiones de los moldes, de las cuales se pueden obtener los valores de RR. Para los moldes pequeños el valor de RR es 3.5 ( $RR = 14\text{cm}^2/4\text{cm}^2$ ) y para los moldes micro  $RR = 3$  ( $RR = 1.2\text{cm}^2/0.4\text{cm}^2$ ).

De acuerdo con este criterio, los moldes pequeños ejercen mayor restricción a la contracción que los moldes micro y por tal razón, en condiciones similares de ensayo, el agrietamiento inicial en el molde pequeño debe ocurrir a mayor humedad que en el molde micro ya que la muestra tiene gran dificultad para contraerse y por lo tanto, con poca pérdida de agua se produce el agrietamiento, mientras que en el molde micro es necesario que se presenten mayores pérdidas de humedad para que la reacción sea más efectiva y se supere la resistencia a la tracción del suelo. Esto explicaría porqué en los moldes micro la humedad de agrietamiento tiende a ser inferior que en los moldes pequeños, tal como se mostró en la Figura 7.17

Cuando ya ha ocurrido el agrietamiento primario, las tres zonas de la muestra tienden a continuar su retracción individual y en este caso son la base y las paredes del molde las que

impiden la libre retracción y dan origen a un agrietamiento secundario que se presenta en la parte media de cada sector. Este fenómeno puede repetirse y la muestra se subdivide en tramos geoméricamente similares, sin embargo, en cierto momento las subdivisiones dejan de presentarse porque las fuerzas de reacción son muy bajas y el material puede contraerse de manera relativamente libre. En los ensayos realizados en moldes se presentó agrietamiento primario, secundario y en algunos casos terciario. En la Figura 7.20b se presenta un esquema de la evolución típica de los agrietamientos y en las Figuras 7.21, 7.22 y 7.23, se presentan registros fotográficos de algunos ensayos, en los que se muestran diferentes etapas en el proceso de desecación.

En términos de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM), sobre la evolución de los agrietamientos observados en los moldes se pueden hacer las siguientes observaciones: una vez que se inicia la grieta transcurre un cierto tiempo durante el cual ésta se prolonga muy poco, luego la grieta sufre una prolongación súbita en pocos segundos y avanza hasta el extremo opuesto, es decir que el comportamiento se ajusta al modelo de avance de grietas planteado por la LEFM en el cual se presenta inicialmente una extensión estable de grieta y si aumenta la tensión, como en efecto ocurre por el aumento de la succión en la muestra, se presenta una extensión inestable o muy rápida. Este es un comportamiento que también se observó en las evaluaciones microscópicas descritas en el capítulo anterior.

Otra característica que se puede notar es la localización o concentración de las deformaciones hacia la grieta y no hacia otros sectores de la muestra, como plantean Hillerborg et al (1976) en su modelo de grieta ficticia aplicada al análisis de inicio y propagación de grietas mediante mecánica de fractura. Finalmente el comportamiento bastante homogéneo del agrietamiento de muestras como las que se aprecian en la secuencia de la Figura 7.21 se puede explicar en términos del factor de intensidad de tensiones, el cual indica que si las condiciones de tensión expresadas por este parámetro son similares, los agrietamientos también deben serlo.

### 7.5 Estimación de las tensiones impuestas por los moldes MP y MM

Con el propósito de estimar la resistencia a la contracción impuesta por los moldes al suelo, se prepararon muestras de tipo MP y MM a diferentes humedades, que luego se extrajeron de los moldes y se dejaron secar al aire sobre una superficie de vidrio. A medida que las muestras se iban secando, se medía su longitud y su peso, de tal forma que al final se podía obtener una relación entre la humedad de la muestra y su contracción. Por otra parte, a partir de los ensayos de tracción a deformación controlada, sobre muestras remoldeadas del mismo suelo (ver Capítulo 4), se determinaron los módulos de elasticidad iniciales en tracción ( $E_T$ ) en función de la humedad. Con el módulo de elasticidad y la deformación medida ( $\delta$ ), se puede entonces estimar la tensión de tracción ( $\sigma_t$ ) que sería necesaria para impedir la contracción de la muestra, puesto que para una condición elástica:

$$\sigma_t = E_T \delta \quad (7.3)$$

En la Figura 7.24 se presentan las curvas de variación de la humedad y la contracción axial de cuatro ensayos MP. En este caso se incluye la letra L para indicar que la contracción es libre (aunque en realidad no es totalmente libre porque existe cierta adhesión en la base). Los ensayos MPL1 y MPL2 que se iniciaron a humedades de 38% y 38.6% respectivamente, presentaron contracción total cercana al 9%, sin sufrir agrietamiento, pero las muestras MPL3 y MPL4 iniciadas a humedades de 50.6% y 51%, sí sufrieron agrietamiento e incluso



expansión inmediatamente después de haberse generado la grieta, por lo cual, la contracción total en estos ensayos fue baja, con valores alrededor del 2%.

El agrietamiento de las muestras MPL3 y MPL4, que partieron con alta humedad, se puede explicar en términos de la resistencia a la tracción en tensiones efectivas como se indica en la Figura 7.25: debido a la alta humedad, la succión es muy baja y por eso las trayectorias parten de un punto muy cercano al origen y también muy próximo a la envolvente de resistencia en tracción, de tal manera que una restricción a la contracción, así sea leve, como la causada por la adhesión entre la base y la muestra, rápidamente lleva a la trayectoria a tocar la envolvente y se produce el agrietamiento. Las muestras MPL1 y MPL2 por el contrario parten de un punto más alejado de la envolvente y como la contracción es relativamente libre la trayectoria es bastante tendida y no se alcanza a llegar a la rotura en tracción.

En las muestras MML1 y MML2, iniciadas a humedades de 37.8% y 44.8% respectivamente la contracción total, fue similar a la ocurrida en las muestras MPL1 y MPL2 y tampoco sufrieron agrietamiento (Fig. 7.26).

A partir de las mediciones de contracción se puede estimar la tensión impuesta por los moldes al inicio del agrietamiento, de la siguiente manera:

Conociendo la humedad inicial del ensayo de contracción libre ( $w_o$ ), se determina cuál sería la humedad de agrietamiento ( $w_{cr}$ ) si el suelo tuviera la restricción del molde. Esta humedad se puede obtener mediante las correlaciones de la Figura 7.16, así:

$$\text{Para moldes MP: } \frac{w_{cr}}{w_o} = -0.0054w_o + 1.0711 \quad (7.4)$$

$$\text{Para moldes MM: } \frac{w_{cr}}{w_o} = -0.0029w_o + 0.6208 \quad (7.5)$$

Para la humedad de agrietamiento se determina cuál es la contracción de la muestra medida en cada ensayo ( $\delta_{cr}$ ) y se calcula el módulo de elasticidad en tracción para esta misma humedad, el cual se puede obtener de los ensayos de tracción a deformación controlada, de acuerdo con la siguiente correlación (Fig. 4.21):

$$E_T = 30355 e^{-0.0713w} \quad (7.6)$$

Mediante la ecuación (7.3) se evalúa la tensión que sería necesaria para impedir la contracción que se midió y estos valores serían las tensiones ejercidas por las paredes del molde. Si la contracción sufrida por la muestra entre el inicio del ensayo y la humedad de agrietamiento es muy significativa, es conveniente calcular la tensión de agrietamiento como la sumatoria de las tensiones en diferentes etapas de la contracción, esto para tener en cuenta la gran variación que tiene el módulo de elasticidad con la humedad.

Finalmente se pueden comparar las tensiones calculadas con la resistencia a la tracción del suelo a la correspondiente humedad de agrietamiento. Para esto es posible emplear la siguiente correlación que se obtuvo en el Capítulo 4 (Fig. 4.23a):

$$\sigma_t = 499.94e^{-0.0617w} \quad (7.7)$$

La ecuación (7.7) se obtuvo para humedades entre 35% y 65%, sin embargo, de manera preliminar se puede asumir que la tendencia es válida para humedades hasta del orden del 15%.

En la Tabla 7.2 se presenta el resumen de los datos y cálculos de los ensayos de retracción sin moldes. Para las muestras MPL1 y MPL2 que sufrieron poca contracción hasta la humedad de agrietamiento, la tensión de tracción se calcula en una sola etapa (correspondiente a la contracción media en el intervalo de humedad), pero para los moldes MML1 y MML2 se hace en varias etapas. En la tabla también se presentan los valores de tensión calculados con (7.3), que son deducidos de la contracción y los calculados con (7.7) estimados de los ensayos de tracción.

La comparación entre las tensiones calculadas de las dos formas y la resistencia a la tracción del suelo se muestra en la Figura 7.27. En esta gráfica se puede ver que en los ensayos MPL la tensión calculada es inferior a la resistencia a la tracción de la arcilla, probablemente porque la contracción no fue totalmente libre debido a la adhesión entre la muestra y la base, esto es un indicativo de que los moldes MP son efectivos para evitar la contracción del suelo. En las muestras micro (MML) la tensión calculada resultó superior a la resistencia a la tracción del suelo debido a la importante contracción medida. Esto indica que la geometría de tales moldes es poco efectiva para evitar la contracción del material.

## 7.6 Agrietamiento de muestras en bandejas

En las muestras de las bandejas no se cuenta con paredes de reacción y por lo tanto, la restricción al desplazamiento es ejercida fundamentalmente por la fricción entre el suelo y la base del molde, que como ya se indicó, tiene pequeñas hendiduras en forma reticular, esto da como resultado una compleja distribución de tensiones donde la relación de reacción no se puede determinar fácilmente. En los ensayos de la bandeja B1 (de 5mm de profundidad) las grietas primarias presentaron cierta uniformidad y tendencia a ocurrir en sentido diagonal, perpendicular a las zonas de mayor tracción, de lo que se infieren dos direcciones preferenciales de tensión (Figura 7.28a), mientras que en las de la bandeja B2 (de 10mm de profundidad) mostraron menos uniformidad y se pueden inferir 3 a 4 direcciones preferenciales de tensión (Figura 7.28b).

Una característica del secado en las muestras de bandeja es que tiende a ocurrir desde la parte externa hacia la parte interna, esto se evidencia por el contraste de tonalidad del material y se debe a que en la parte central la evaporación sólo puede presentarse a través de la cara superior de la muestra mientras que en los extremos, se puede presentar por la cara superior y por las caras laterales. Este comportamiento hace que se genere un gradiente adicional de tensiones dentro de la muestra que al parecer tiene alta incidencia en el agrietamiento secundario y en el patrón final de agrietamiento.

Otro aspecto que se observó y que tiene relación con la desecación no uniforme de las muestras es el alabeo o curvatura hacia arriba que normalmente se presenta en las esquinas cuando se ha perdido bastante humedad, esto da origen a torsiones que en ocasiones inducen nuevos agrietamientos o amplían las grietas existentes. En un terreno natural esta desecación no uniforme de la parte superior, asociada con las condiciones de borde o con la presencia de amplias grietas verticales, origina deformaciones horizontales no uniformes que pueden a su vez causar agrietamientos horizontales (Chertkov y Ravina, 1999, Konrad y Ayad, 1997b).

En la Figura 7.29 se presenta la secuencia de agrietamiento de una de las muestras de bandeja donde se aprecia la contracción lateral y el levantamiento en las esquinas.

Varias muestras presentaron patrones de agrietamiento mucho más severos que los de la Figura 7.29 y no se obtiene repetibilidad sistemática en los resultados entre diferentes ensayos como sí ocurría con las muestras de los moldes, pues en las bandejas el agrietamiento es fundamentalmente bidimensional mientras que en los moldes es unidimensional.

### 7.7. Cuantificación de los agrietamientos en muestras de bandejas

Estos patrones tan irregulares de los agrietamientos en las bandejas, que guardan similitud con los que se presentan en un terreno natural, hacen necesario un análisis cuantitativo que permita comparar unos agrietamientos con otros. Yesiller et al (2000), presentan un recuento de algunos de los sistemas de cuantificación de agrietamientos, entre los cuales se destacan el de Kleppe y Olson (1985), denominado número de severidad de agrietamiento (crack severity number) que consiste en calificar el agrietamiento en escala de 0 a 4, donde el valor 0 indica ausencia de grietas mientras que el valor 4 indica grietas con aberturas superiores a 20mm y de gran profundidad. Otra posible cuantificación es mediante el índice de agrietamiento (cracking index), propuesto por Al Wahab y El-Kedrah (1995), que es la relación entre el área de grietas y el área superficial total. Finalmente, una tercera forma de cuantificación es la denominada factor de intensidad de agrietamiento (crack intensity factor, CIF), propuesto por Mi (1995, citado por Yesiller et al, 2000) y por Miller et al (1998), que fundamentalmente es igual al índice de agrietamiento, sólo que en este caso las medidas de las áreas, que son bastante irregulares, se hacen con un analizador de imágenes computarizado, con lo cual teóricamente se logra mayor precisión que en el caso anterior donde las medidas se hacían con regla. El CIF está definido como:

$$CIF(\%) = \frac{A_{grietas}}{A_{total}} \times 100 \quad (7.8)$$

La cuantificación que se hace en el presente estudio se enmarca dentro del concepto del CIF, ya que se hace medición digital de las áreas de agrietamiento, pero no con analizador de imágenes sino digitalizando manualmente cada una de las fotografías y evaluando la áreas y los perímetros mediante el programa Autocad®. Este programa mide en unidades de píxeles, pero se hace la conversión a unidades convencionales de área. En las Figuras 7.30 y 7.31 se presentan las imágenes digitalizadas en la condición final de cada ensayo y en la Tabla 7.3 se presenta el resumen de las variables geométricas medidas, junto con los cálculos de CIF y el porcentaje de contracción de la muestra. Una muestra como la del ensayo B2A (Fig. 7.31) que presenta agrietamiento severo y con amplia separación entre las caras de las grietas tiene un CIF igual a 11.2 mientras que si el agrietamiento es incipiente y principalmente de poca abertura, como en el caso del ensayo B2C (Fig. 7.31), el valor de CIF es 0.7.

Como se puede apreciar en la Figura 7.32, el CIF está relacionado linealmente con las condiciones de restricción al desplazamiento, pues a mayor porcentaje de contracción lateral es menor el CIF. Este comportamiento es similar al que se observó en las muestras de los moldes e indica que si la restricción a la contracción es efectiva, el agrietamiento debe ser mayor que si la restricción es poco efectiva.

En términos generales, el CIF es un factor que da una buena idea del grado de agrietamiento que presenta un suelo y principalmente reduce la subjetividad en la caracterización, además

con una adecuada calibración, sería una forma de involucrar cuantitativamente la variable agrietamiento en los modelos numéricos ya que está estrechamente relacionada con otras variables como la permeabilidad, la porosidad y la resistencia.

La forma que presentan los bloques de suelo agrietado es una característica morfológica complementaria para describir el patrón de agrietamiento de un material y es usualmente empleada en los estudios de agrietamiento de materiales como los reportados por Lachenbruch (1961), Morris et al (1992), Blight (1997), Konrad y Ayad (1997b), etc. De acuerdo con Bazant y Cedolin (1991) teóricamente se pueden presentar cuatro patrones de grietas originados por contracción uniforme en un medio ideal: grietas paralelas, triangulares, cuadradas y hexagonales. Kodikara et al (2000) indican que estas características geométricas se pueden relacionar mediante el área media de celdas ( $A_m$ ) y la longitud específica de grietas ( $L_s$ ), donde  $A_m$  corresponde al área total de celdas dividido por el número de celdas y  $L_s$  es la longitud total de grietas dividida por el área superficial total. Para las diferentes geometrías y considerando una sola celda, estas relaciones son:

$$A_m = \frac{5.19}{L_s^2} \text{ (triangular)} \quad (7.9)$$

$$A_m = \frac{4}{L_s^2} \text{ (cuadrangular)} \quad (7.10)$$

$$A_m = \frac{3.47}{L_s^2} \text{ (hexagonal)} \quad (7.11)$$

Kodikara et al (2000), comparan resultados de geometrías medidas en ensayos de agrietamiento con las geometrías teóricas (Fig. 7.33) y muestran que estas relaciones se mantienen independientemente del tamaño de las celdas. Además que todos los datos tienden a caer cerca de las líneas teóricas, especialmente cerca de la línea que representa formas cuadrilaterales de celdas y que ningún dato está por encima de la línea triangular de tal forma que se considera que esta línea constituye un límite superior en la relación entre  $A_m$  y  $L_s$ . En la misma Figura 7.33 se incluyen los datos de los ensayos de las bandejas que presentaron celdas definidas es decir se excluyen los ensayos B1C y B2C (ver Tabla 7.3) y como se puede observar todos los datos están dentro de la misma tendencia de los presentados por Kodikara et al (2000).

VARIABLES COMO EL CIF Y LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS CELDAS CONSTITUYEN EN SÍ UNA FORMA PRÁCTICA DE CARACTERIZAR UN MATERIAL AGRIETADO Y A PARTIR DE ALLÍ RELACIONARLO CON CIERTOS COMPORTAMIENTOS MECÁNICOS. Hay modelos matemáticos de tipo estocástico que pretenden simular la evolución bidimensional de un proceso de agrietamiento, tales como el propuesto por Horgan y Young (2000) que son interesantes porque buscan predecir la morfología superficial de un suelo que se va secando gradualmente, pero que deben contar con parámetros básicos como los aquí medidos y requieren además formas de comparación de los resultados con variables numéricas y en este caso el CIF y la geometría de las celdas pueden ser algunas de las formas de verificación.

### 7.8 Efecto de rehidratar las muestras agrietadas

Con el fin de tener una idea del comportamiento de la arcilla seca y agrietada ante el aumento de humedad, a tres de las muestras de bandejas se le agregó agua gradualmente utilizando un atomizador. En la Figura 7.34 se muestran las fotos de la condición seca y de la condición

hidratada de las muestras B1-C y B2-C. En esta figura se nota claramente que el agua induce nuevos agrietamientos en la mayor parte de la muestra pero también se reduce la abertura de las grietas existentes y se reduce la contracción de la muestra respecto a los bordes. En la muestra B1-C el CIF pasó de 1 antes de mojar a 4.1 después de mojar y en la muestra B2-C pasó de 0.7 antes de mojar a 4.2 después de mojar.

En la Figura 7.35 se presenta la secuencia de rehidratación de la muestra B2-B que presentaba agrietamiento severo antes de rehidratar ( $w = 4.7\%$ ,  $CIF = 9.4$ ). Inicialmente se le agregaron  $25 \text{ cm}^3$  de agua y la muestra no presentó agrietamientos adicionales sino sólo ligera expansión que causó leve reducción en la abertura de las grietas ( $w = 10.1\%$ ,  $CIF = 9.3$ ), luego se dejó secar nuevamente durante 5 días hasta que llegó a la humedad anterior ( $4.7\%$ ) y se le volvió a agregar un volumen mayor de agua ( $70 \text{ cm}^3$ ), con lo cual, después de 2 minutos ya se habían generado nuevas grietas pero se redujeron bastante las aberturas de las grietas existentes. Esta reducción de abertura de grietas bajó el factor de intensidad de agrietamiento ( $w = 20\%$ ,  $CIF = 8.6$ ).

Yesiller et al (2000) realizaron ciclos de humedecimiento y secado en muestras de material compactado, de baja plasticidad y encontraron que el agrietamiento, medido con CIF, era mayor después de haber humedecido y vuelto a secar que durante el secado inmediatamente después de la compactación inicial, es probable que tal comportamiento se deba a que el suelo por su baja plasticidad experimente mucha menor expansión que la arcilla empleada en el presente estudio y por tal razón, al cuantificar el CIF, prevalece la generación nuevos agrietamientos sobre la reducción de la apertura de las grietas existentes.

## 7.9 Conclusiones

- La pérdida de agua por desecación en un suelo hace que se presenten contracciones en el mismo, debido al aumento de la succión y si tales contracciones no se pueden desarrollar libremente, se generan tensiones de tracción que pueden dar origen a agrietamientos.
- La tasa de desecación de un material puede representarse en términos de la pendiente de la curva humedad-tiempo. Para la arcilla estudiada estas curvas presentan un tramo inicial recto, prolongado y de alta pendiente, un tramo intermedio curvo y corto y un tramo final recto de muy baja pendiente. La tasa de desecación en el tramo inicial normalmente es mayor mientras mayor sea la humedad al inicio de la desecación y también es mayor en la medida que sea menor el espesor de la muestra.
- Otra forma de representar la desecación es mediante la pérdida específica de humedad o pérdida de masa de agua por unidad de superficie en el tiempo. Este método tiene la ventaja de que todas las curvas parten del mismo punto y por lo tanto se facilita la comparación de resultados. Con esta representación se nota que las pendientes iniciales de las curvas son muy similares entre sí cuando los ensayos se hacen en un mismo tipo de molde, independientemente de la humedad inicial, pero difieren para los distintos moldes ya que para los MM la pendiente es mayor que para los MP y a su vez la de los MP es mayor que la de las bandejas. Este comportamiento probablemente indica que la desecación en las bandejas es fundamentalmente superficial, mientras que en los moldes MP y MM influye la desecación lateral.

- El inicio del agrietamiento en un suelo no es una condición absoluta sino relativa que se debe definir con base en la escala de observación y en el tamaño de la muestra, pues hay microagrietamientos que no se pueden apreciar a simple vista o hay discontinuidades muy pequeñas que no son significativas en muestras de gran tamaño. En este estudio se definió para cada tipo de molde una longitud mínima de discontinuidad, como condición de inicio de grieta.
- Para condiciones similares de humedad relativa y temperatura, la humedad de agrietamiento tiende a aumentar linealmente con la humedad inicial y a disminuir con la tasa de desecación.
- Todos los agrietamientos en bandejas y en moldes MP ocurrieron en condición de suelo saturado y humedades comprendidas entre los límites líquido y plástico mientras que en los moldes MM ocurrieron con grados de saturación entre 85% y 100% y en varios casos a humedades inferiores al límite plástico.
- Otra variable que se notó de gran influencia en la humedad de agrietamiento fue la restricción a la contracción impuesta por cada tipo de molde. Si la restricción es grande, el suelo se agrieta fácilmente al perder poca humedad y por lo tanto la humedad de agrietamiento tiende a ser alta y si la restricción es pequeña ocurre lo contrario.
- La comparación entre las tensiones medidas y las calculadas a la humedad de agrietamiento para los moldes MP y MM indica que la restricción a la contracción en los moldes MP es efectiva mientras que en los moldes MM es poco efectiva.
- Los agrietamientos en las bandejas son de tipo bidimensional y por tal razón son mucho más complejos y de menor repetibilidad que los que se presentan en los moldes MP y MM. Para cuantificar la magnitud de los agrietamientos se emplea el denominado factor de intensidad de agrietamiento (CIF) que es el área de grietas dividida por el área total en un instante dado. Los valores de CIF variaron entre 0.4 para una muestra poco agrietada y 11.2 para una muestra muy agrietada y con amplia abertura entre grietas.
- Al agregársele agua a las muestras que presentaban baja intensidad de agrietamiento, se generaron nuevos agrietamientos muy severos. Cuando la muestra partía de un agrietamiento inicial alto el efecto de agregar agua se veía compensado con la reducción en la abertura de las grietas existentes.

ensayo	espesor (mm)	humedad inicial ( $\omega_0$ ) (%)	humedad de agriet. Inicial ( $\omega_{cr_0}$ ) (%)	humedad de agriet. normalizada ( $\omega_{cr_0}/\omega_0$ )	tiempo inicio grieta ( $t_{cr}$ ) (min)	tasa de desecación ( $\lambda_0$ ) (% $\omega$ /min)	Succión al agrietar (kPa)	Grado de saturación al agrietar (%)
B1A	5	155,5	60,00	0,39	2984	0,032	28,0	100
B1B	5	84,0	50,00	0,60	2000	0,017	80,0	100
B1C	5	122,3	56,00	0,46	2286	0,029	40,0	100
B2A	10	95,3	55,00	0,58	4237	0,0095	43,0	100
B2B	10	50,3	45,00	0,89	1064	0,005	120,0	100
B2C	10	103,0	47,00	0,46	6588	0,0085	100,0	100
MP1A	5	56,0	40,00	0,71	500	0,032	190,0	100
MP2A	5	68,3	50,00	0,73	631	0,029	80,0	100
MP3A	5	89,5	56,70	0,63	1093	0,03	39,0	100
MP1B	5	46,8	41,80	0,89	208	0,024	150,0	100
MP2B	5	46,8	41,20	0,88	243	0,023	153,0	100
MP3B	5	46,8	42,70	0,91	178	0,023	140,0	100
MP1C	5	62,6	42,30	0,68	423	0,048	140,0	100
MP2C	5	63,2	40,10	0,63	462	0,05	190,0	100
MP3C	5	63,6	44,05	0,69	399	0,049	115,0	100
MP1D	5	83,8	41,70	0,50	1079	0,039	150,0	100
MP2D	5	83,8	46,80	0,56	925	0,04	100,0	100
MP1E	5	114,2	54,20	0,47	1364	0,044	50,0	100
MP2E	5	114,2	59,00	0,52	952	0,058	35,0	100
MP1F	5	97,8	49,90	0,51	1261	0,038	80,0	100
MP2F	5	98,1	61,80	0,63	807	0,045	20,0	100
MM1A	3	38,6	20,00	0,52	169	0,11	9000	90
MM2A	3	38,6	20,00	0,52	177	0,105	9000	90
MM3A	3	38,6	21,00	0,54	168	0,105	7000	92
MM4A	3	115,7	No agrietó					
MM1B	3	46,7	18,00	0,39	237	0,121	10000	85
MM2B	3	46,7	20,00	0,43	221	0,121	10000	90
MM3B	3	46,7	20,00	0,43	217	0,123	10000	90
MM4B	3	121,4	27,70	0,23	426	0,22	2500	95
MM1C	3	64,0	33,00	0,52	78	0,4	600	100
MM2C	3	64,1	30,80	0,48	133	0,25	1000	100
MM3C	3	63,7	32,50	0,51	78	0,4	800	100

Tabla 7.1 Datos generales de los ensayos de retracción y agrietamiento en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.

Ensayo	$w_o$ (%)	$w_{cr} = f(w_o)$ (%)	$\delta_{cr}$ ( $\Delta L/L_{ocr}$ ) (%)	Deform Parcial $\delta$	$w_{media}$	$E_{Tcr}$ (kPa)	$E_u \cdot \delta$ (kPa)	(1) $\sigma_t = \sum E_u \cdot \delta$ (kPa)	(2) $\sigma_t = f(w_{cr})$ (kPa)	OBSERVACIONES
MPL1	38	32,9	1,80	1,80	34,50	2594	46,7	46,7	65,7	No agrietó
MPL2	38,6	33,3	2,10	2,10	35,00	2503	52,6	52,6	64,1	No agrietó
MPL3	50,6	40,4	1,80							agrietó (sin molde $w = 36,4\%$ )
MPL4	51	40,6	0,70							agrietó (sin molde $w = 38,1\%$ )
MML1	37,8	19,3	4,20	2,00	30,00	3575	71,5	212,8	151,8	No agrietó
				2,40	23,00	5889	141,3			
MML2	44,8	22,0	7,80	2,00	40,50	1691	33,8	276,0	128,7	No agrietó
				2,00	34,00	2688	53,8			
				2,00	28,00	4123	82,5			
				1,80	23,00	5889	106,0			

- (1) Tensión de tracción estimada a partir de las contracciones sufridas por la muestra
- (2) Resistencia a la tracción estimada en función de la humedad de agrietamiento

Tabla 7.2 Datos para estimar las tensiones de tracción ejercidas por los moldes a la humedad de agrietamiento y comparación con la resistencia a la tracción a esa misma humedad.

ENSAYO	A inicial $cm^2$	A final $cm^2$	A grietas $cm^2$	Perim griet cm	L griet cm	A celdas $cm^2$	Am celda $cm^2$	L específica $cm^{-1}$	CIF (%)	Contracción (%)
B1A	400	370,13	26,76	311,3	155,7	343	28,6	0,421	7,2	7,5
B1B	400	350,27	19,60	163,6	81,8	331	82,7	0,234	5,6	12,4
B1C	400	352,37	3,47	69,5	34,7	0	0,0	0,099	1,0	11,9
B2A	400	389,37	43,52	438,4	219,2	346	13,3	0,563	11,2	2,7
B2B	400	371,18	34,75	155,1	77,6	336	56,1	0,209	9,4	7,2
B2C	400	337,61	2,39	52,8	26,4	0	0,0	0,078	0,7	15,6

Tabla 7.3 Datos geométricos de la condición final de agrietamiento en ensayos de desecación en bandejas



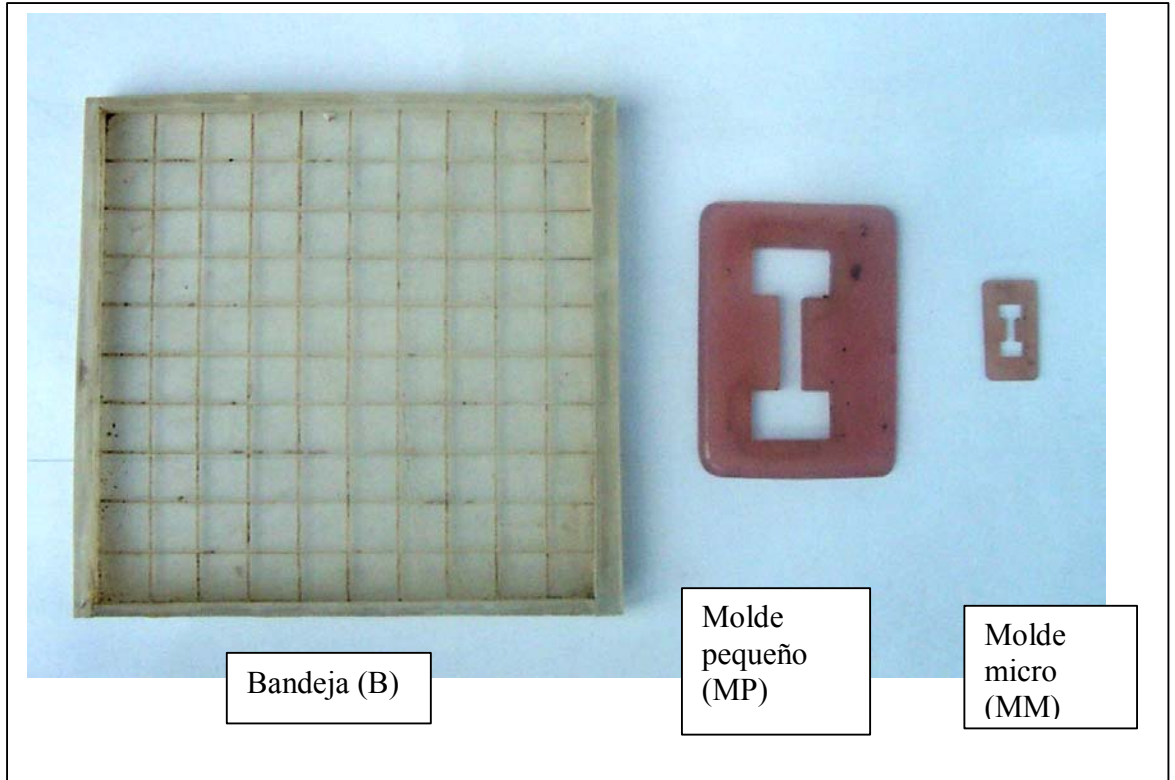
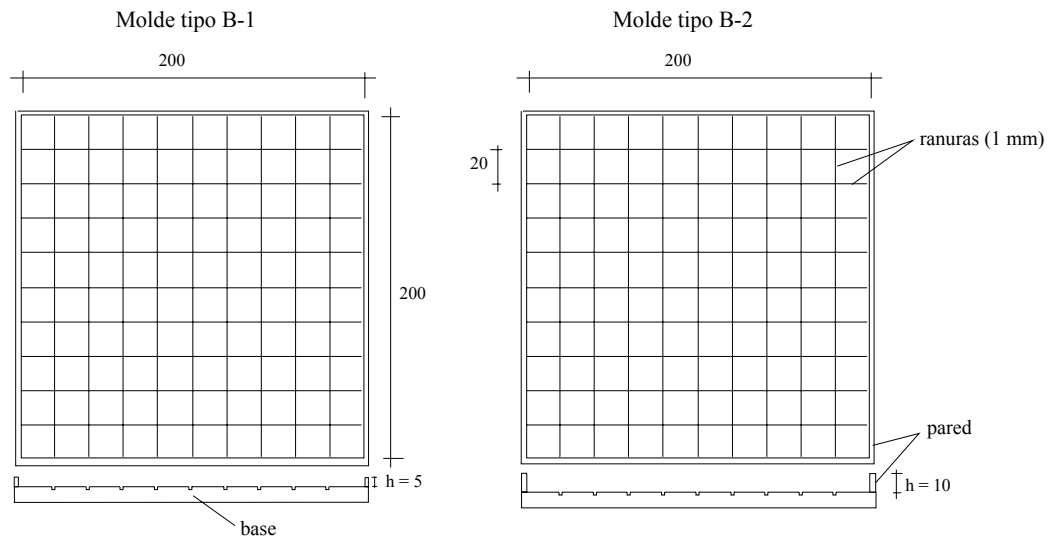


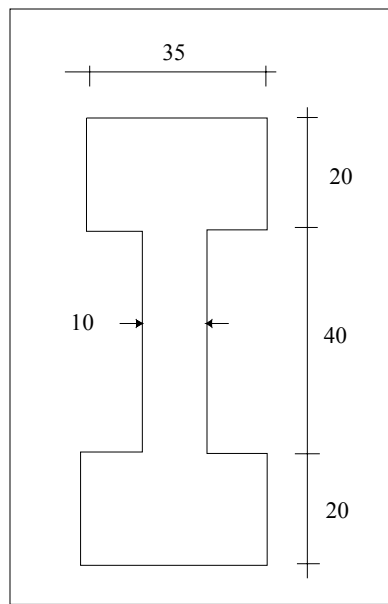
Figura 7.1 Moldes usados para ensayos de retracción y agrietamiento.



Figura 7.2 Montaje general de los ensayos de retracción y agrietamiento a escala intermedia.

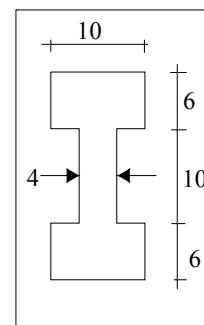


Molde Pequeño (MP)



h = 5

Molde Micro (MM)



h = 2

(medidas en mm)

Figura 7.3 Dimensiones de los moldes de ensayos de retracción y agrietamiento.

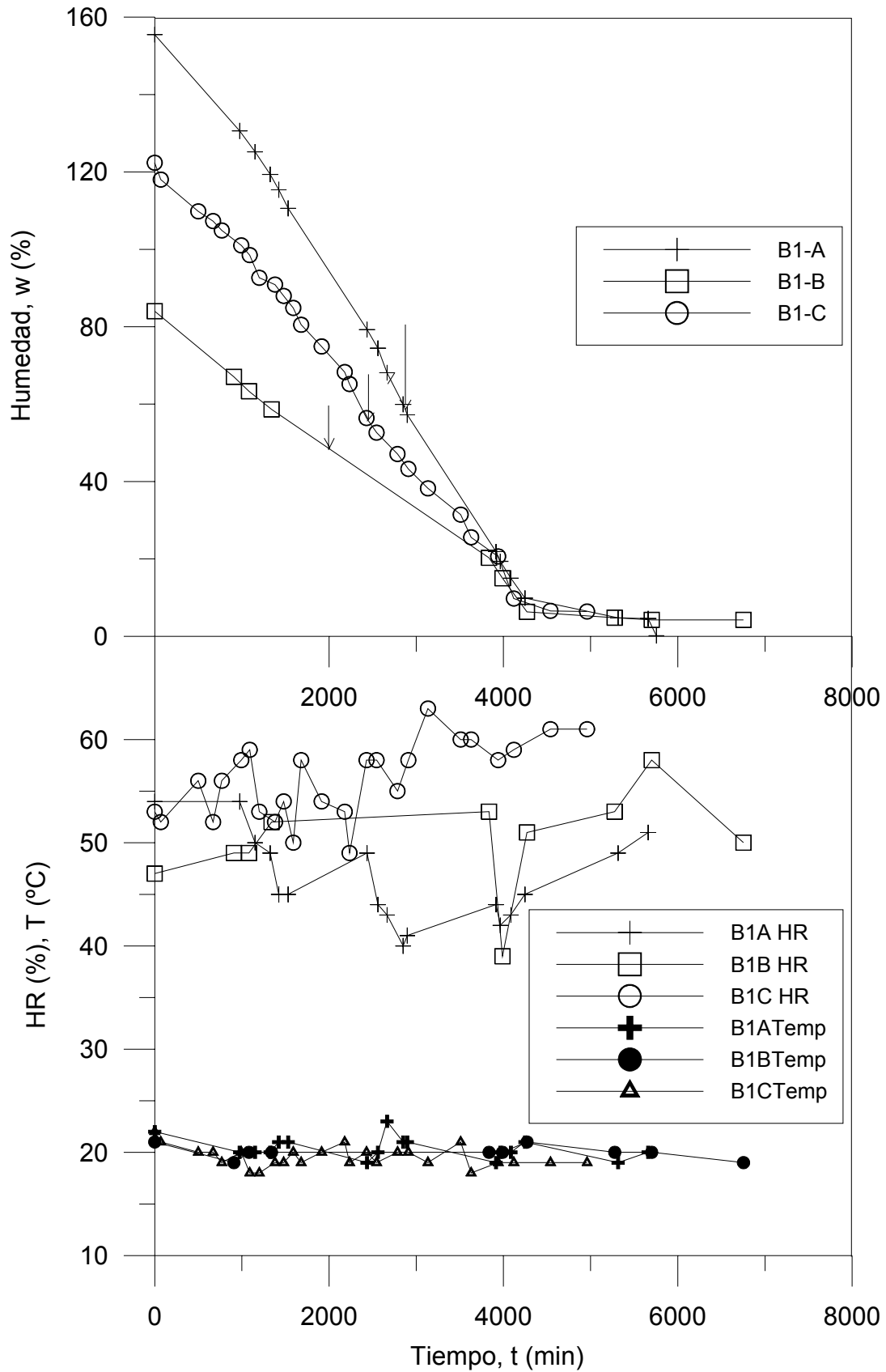


Figura 7.4 Variación de la humedad (w), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (↓) en ensayos de retracción en bandejas (Serie B1).

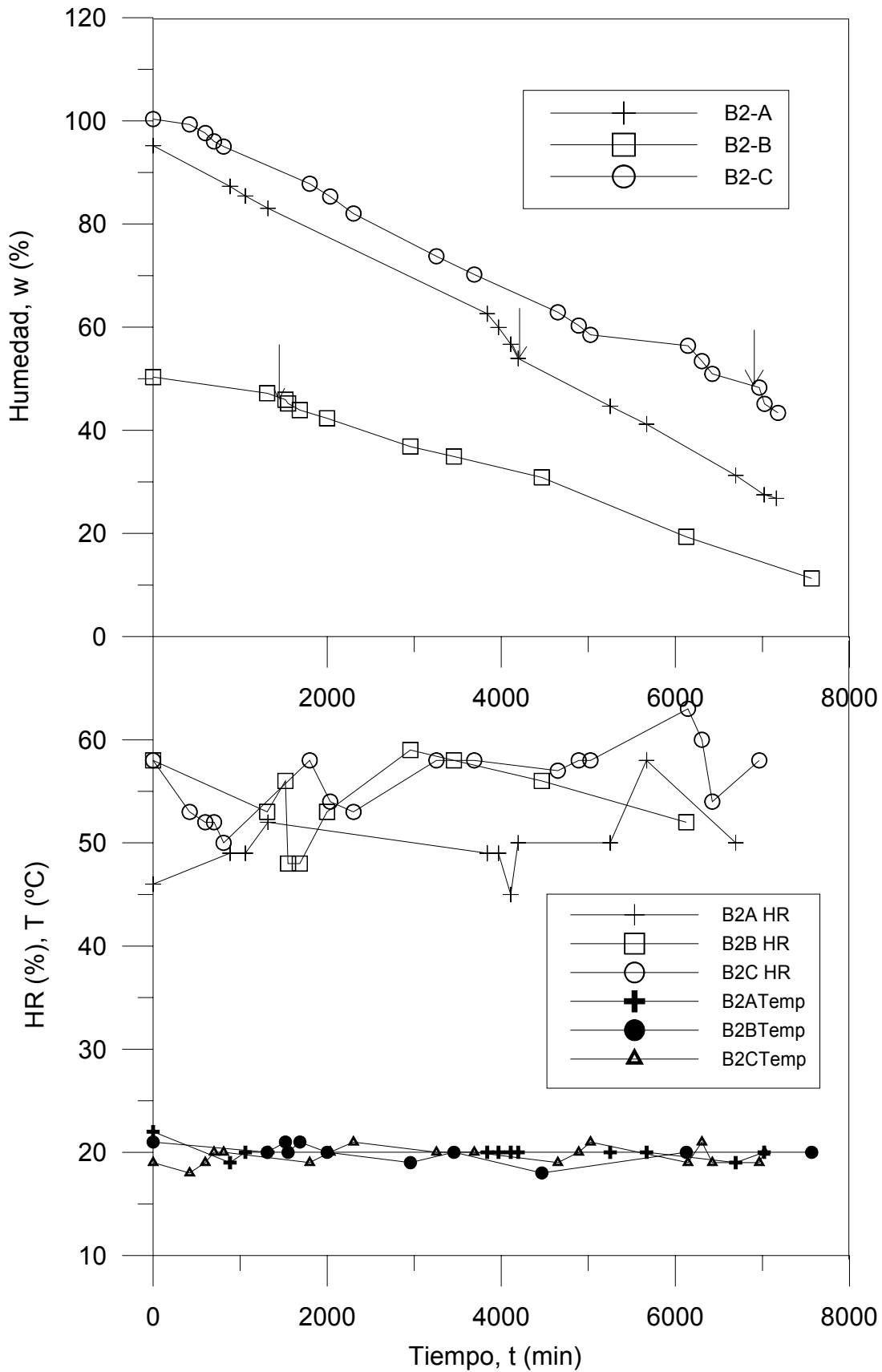


Figura 7.5 Variación de la humedad (w), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (↓) en ensayos de retracción en bandejas (Serie B2).

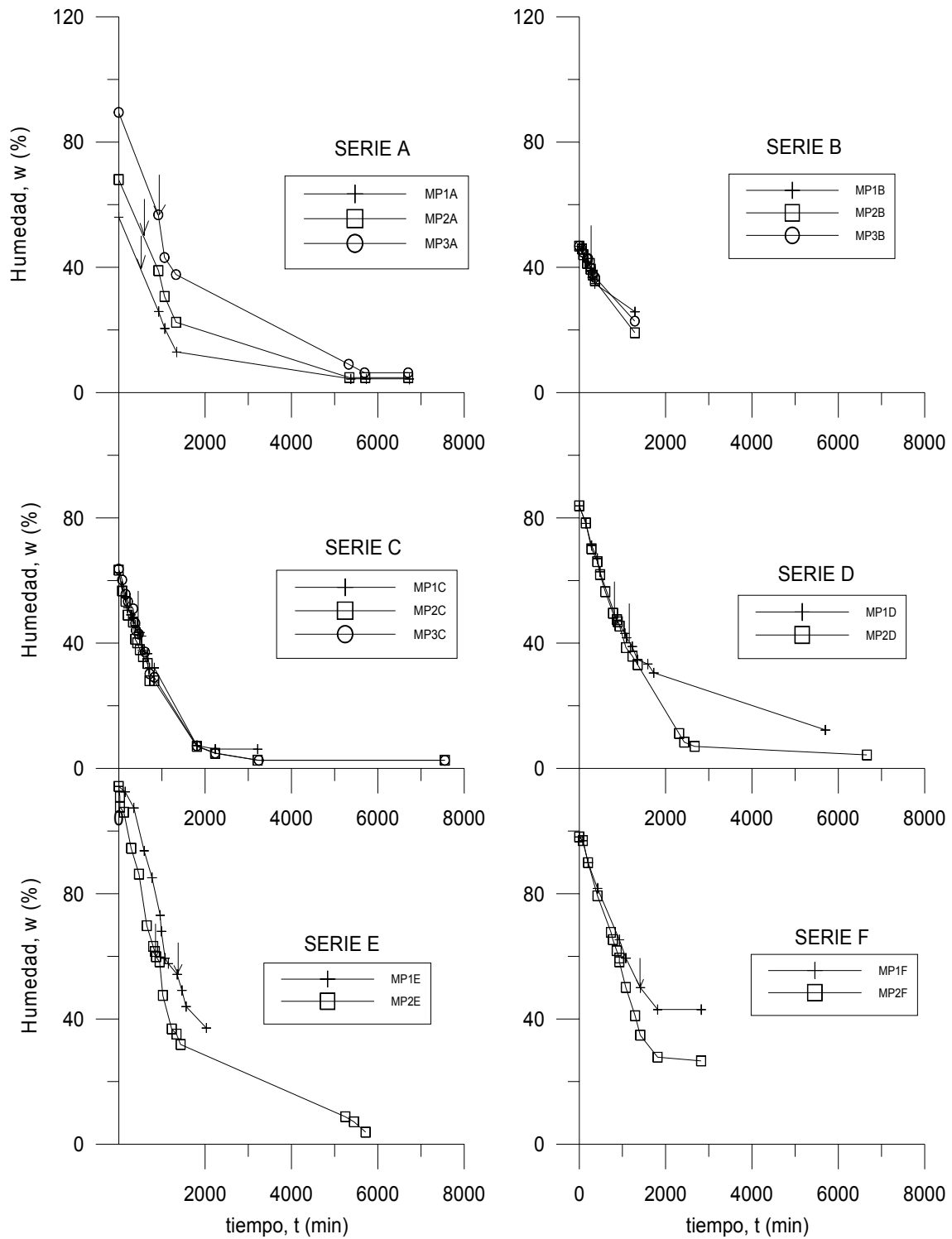


Figura 7.6 Variación de la humedad (w) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (↓) en ensayos de retracción en moldes pequeños (MP).

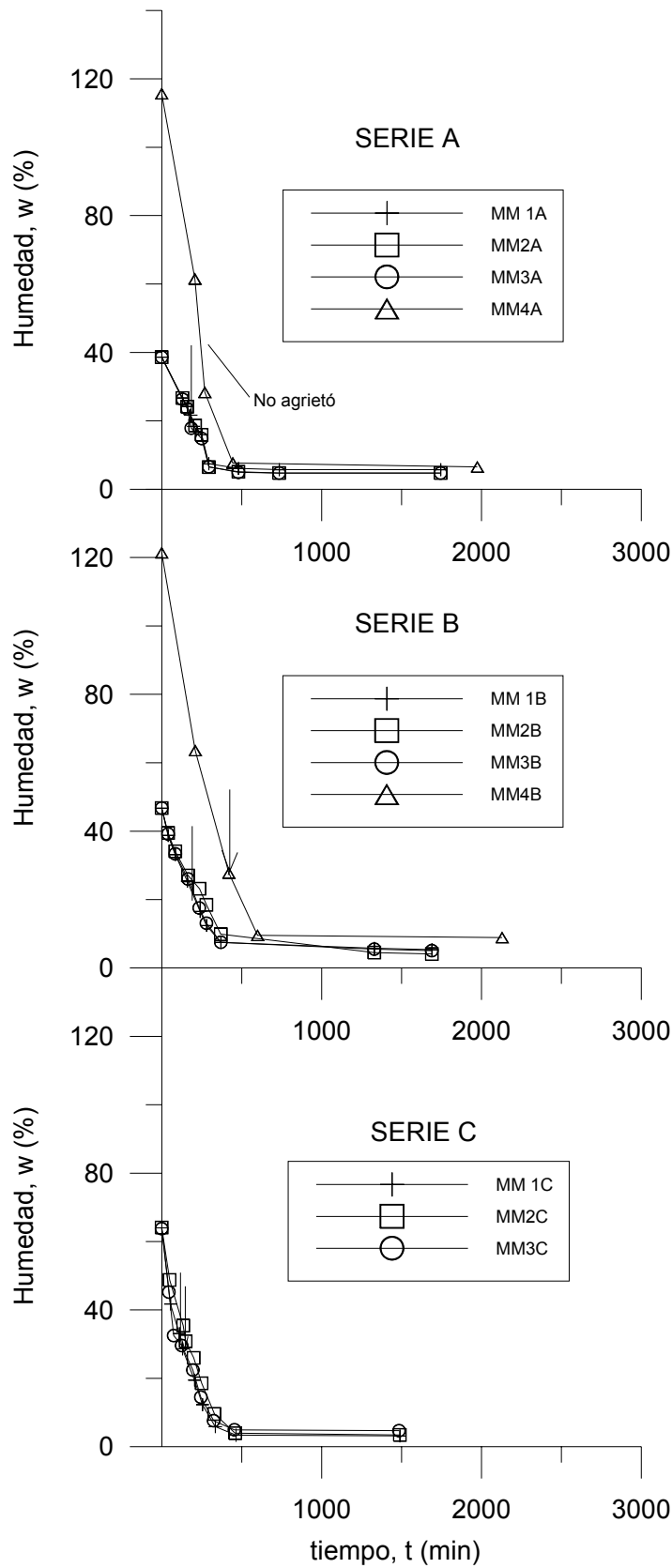


Figura 7.7 Variación de la humedad (w) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (↓) en ensayos de retracción en moldes micro (MM).

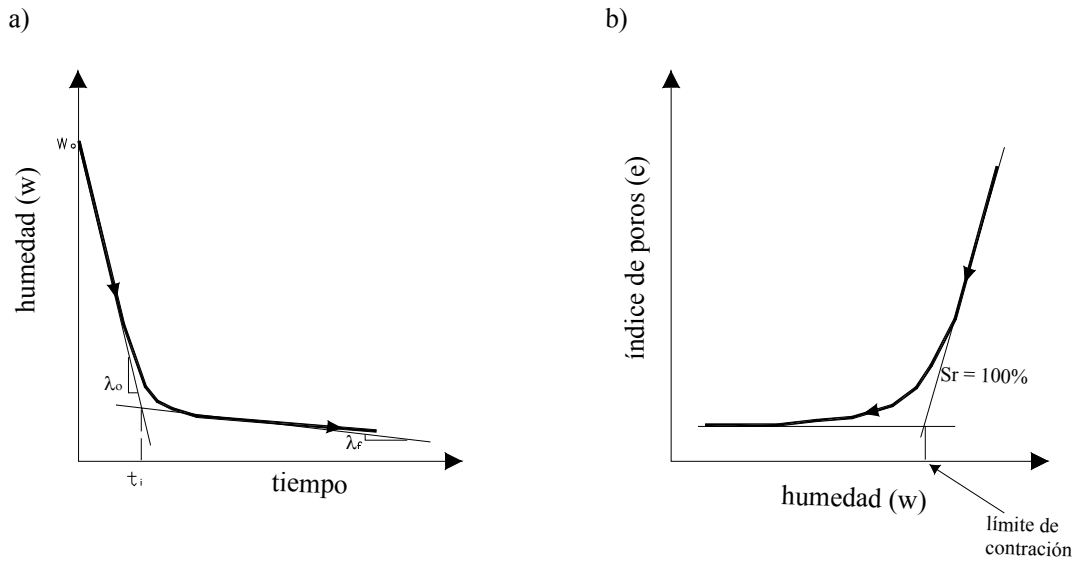


Figura 7.8 Esquema donde se compara una curva típica de desecación (a) con una curva de retracción (b).

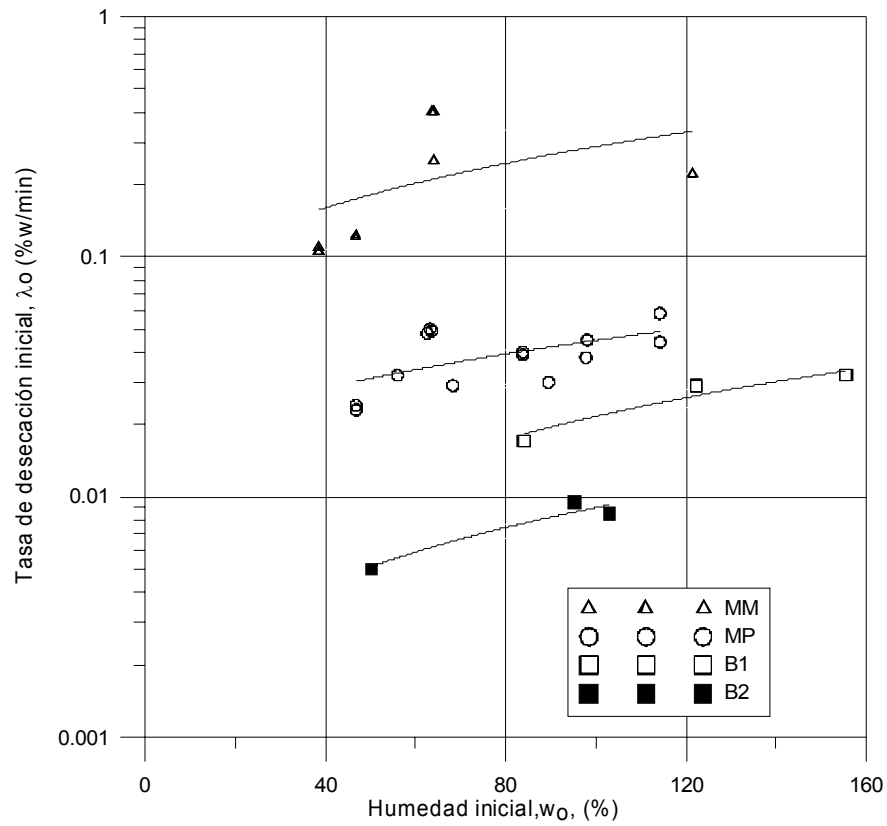


Figura 7.9 Relaciones entre la humedad inicial, la tasa de desecación inicial y el tipo de molde.

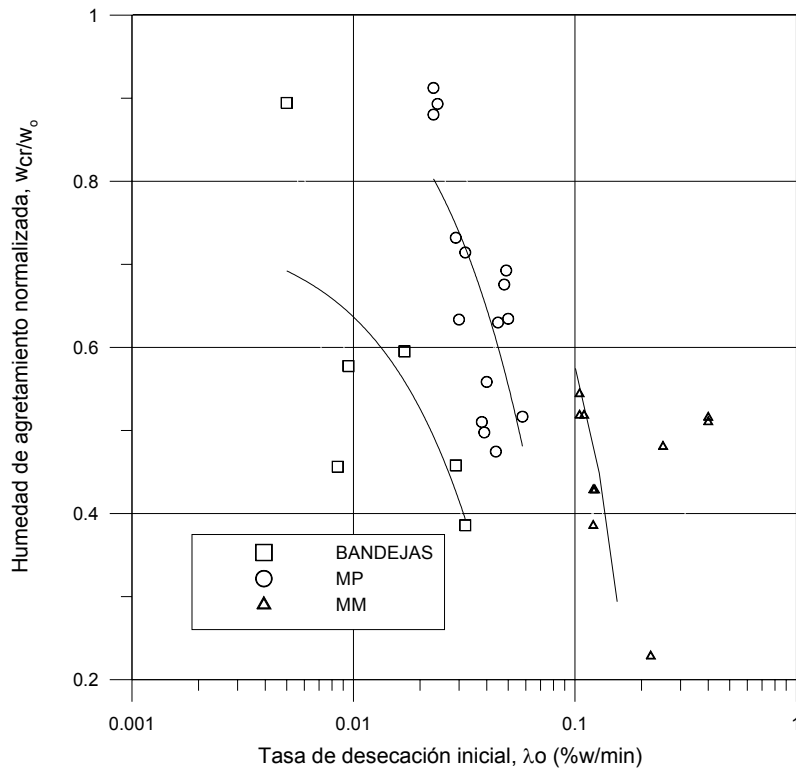


Figura 7.10 Humedad de agrietamiento normalizada en función de la tasa de desecación inicial para los diferentes tipos de moldes.

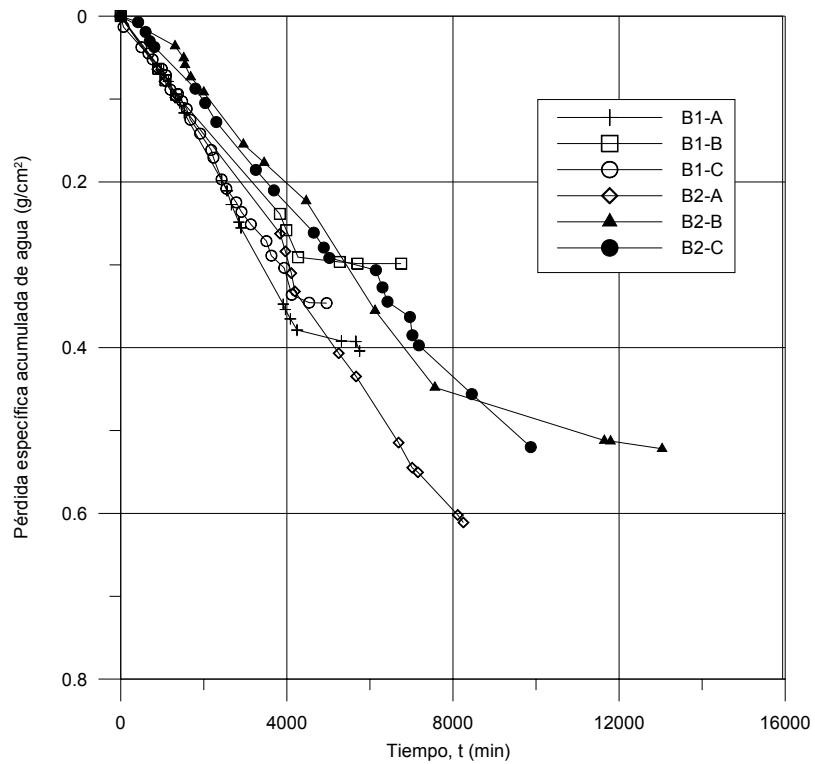


Figura 7.11 Pérdida específica de agua en función del tiempo, para muestras de bandejas.



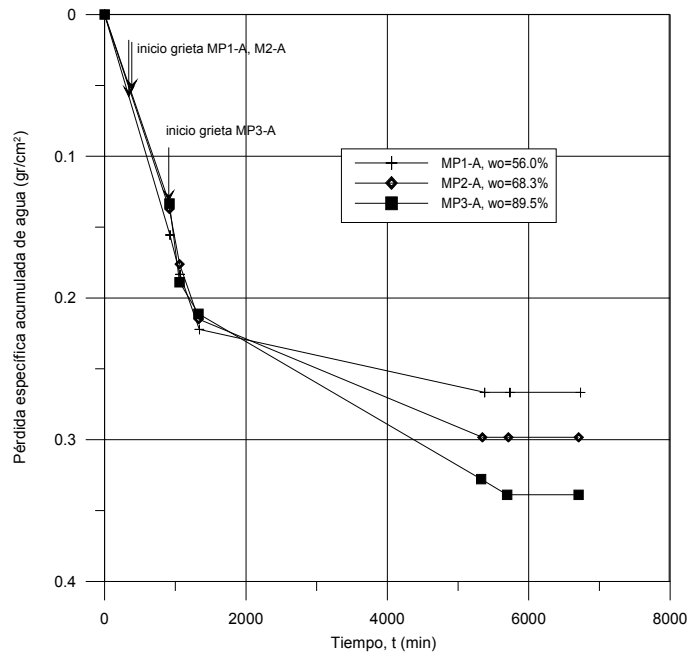


Figura 7.12 Pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo de desecación para ensayos MP, serie A.

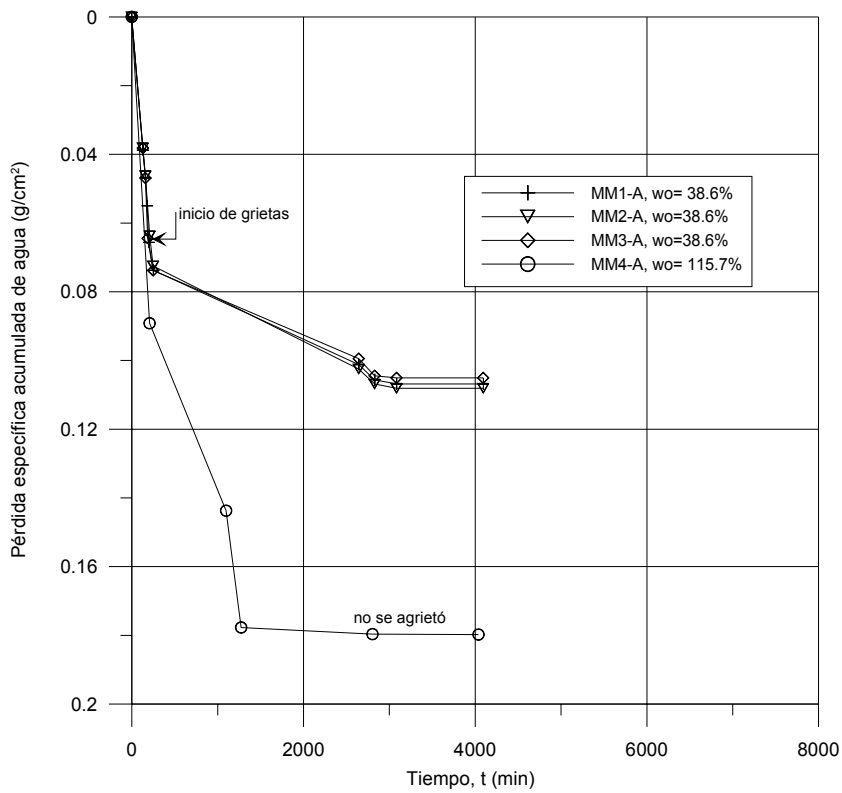


Figura 7.13 Pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo, para ensayos MM de la serie A.

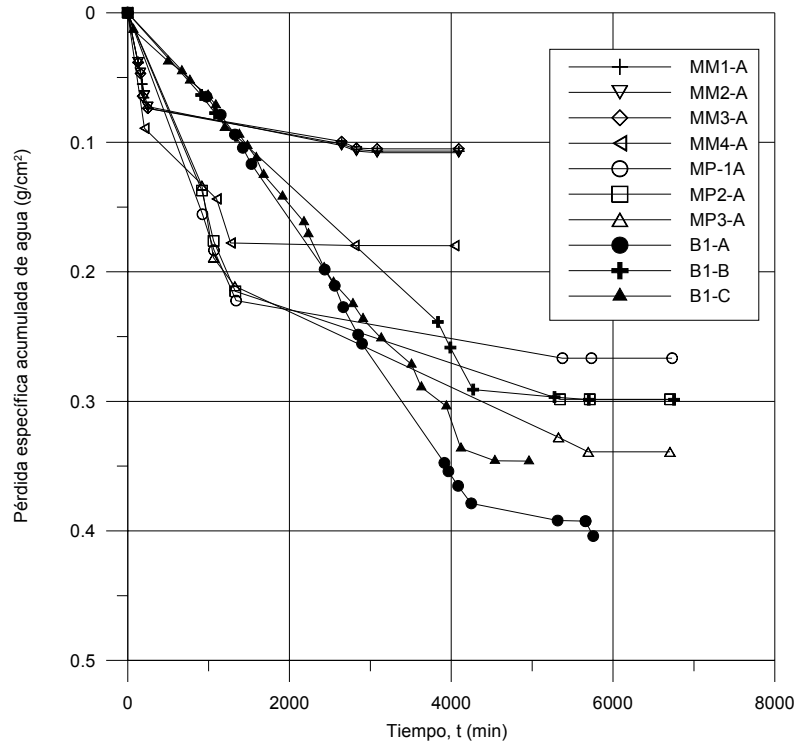


Figura 7.14 Curvas conjuntas de pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo, para ensayos de bandejas, MP y MM.

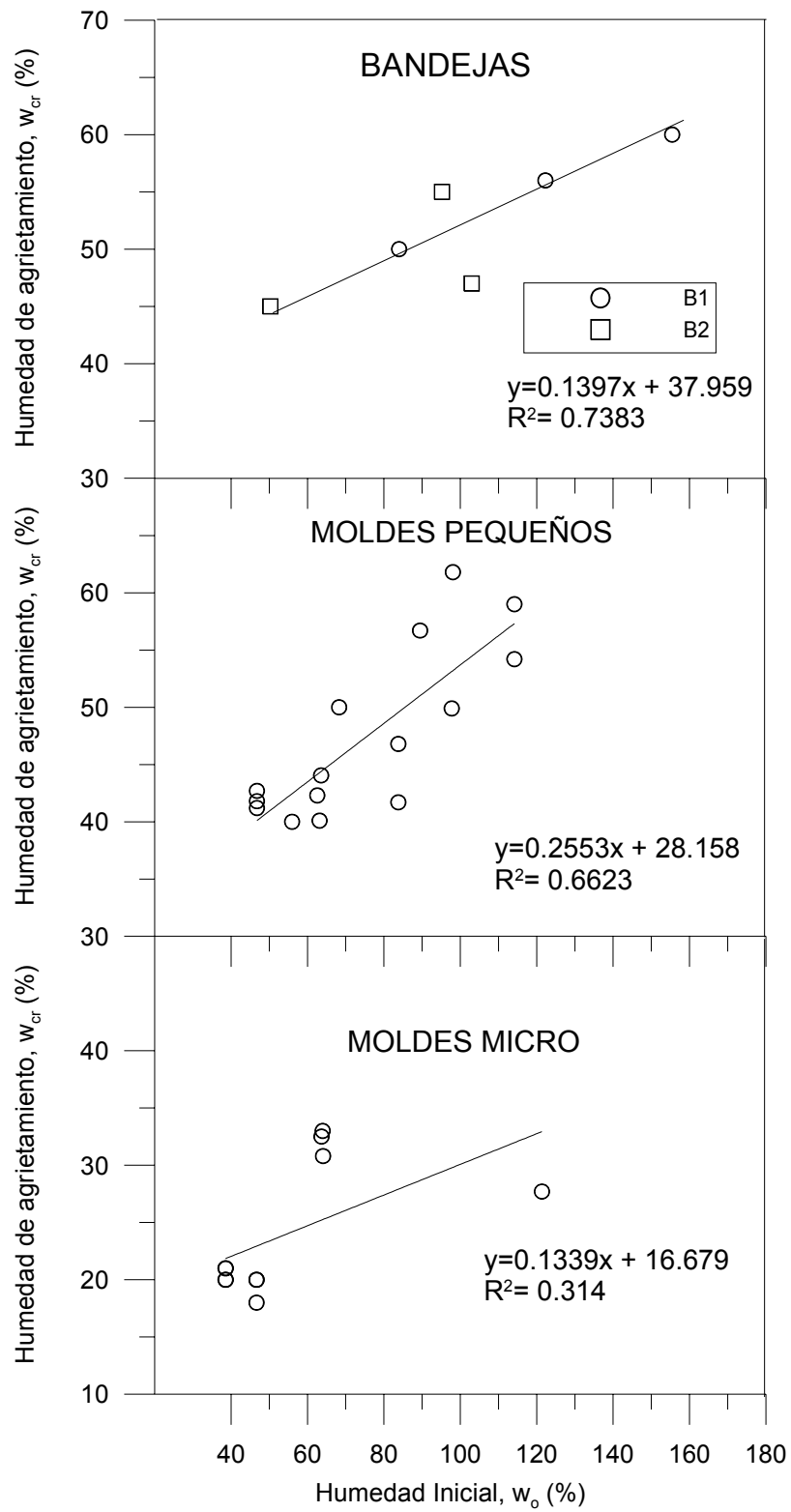


Figura 7.15 Relación entre la humedad de agrietamiento y la humedad inicial en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.

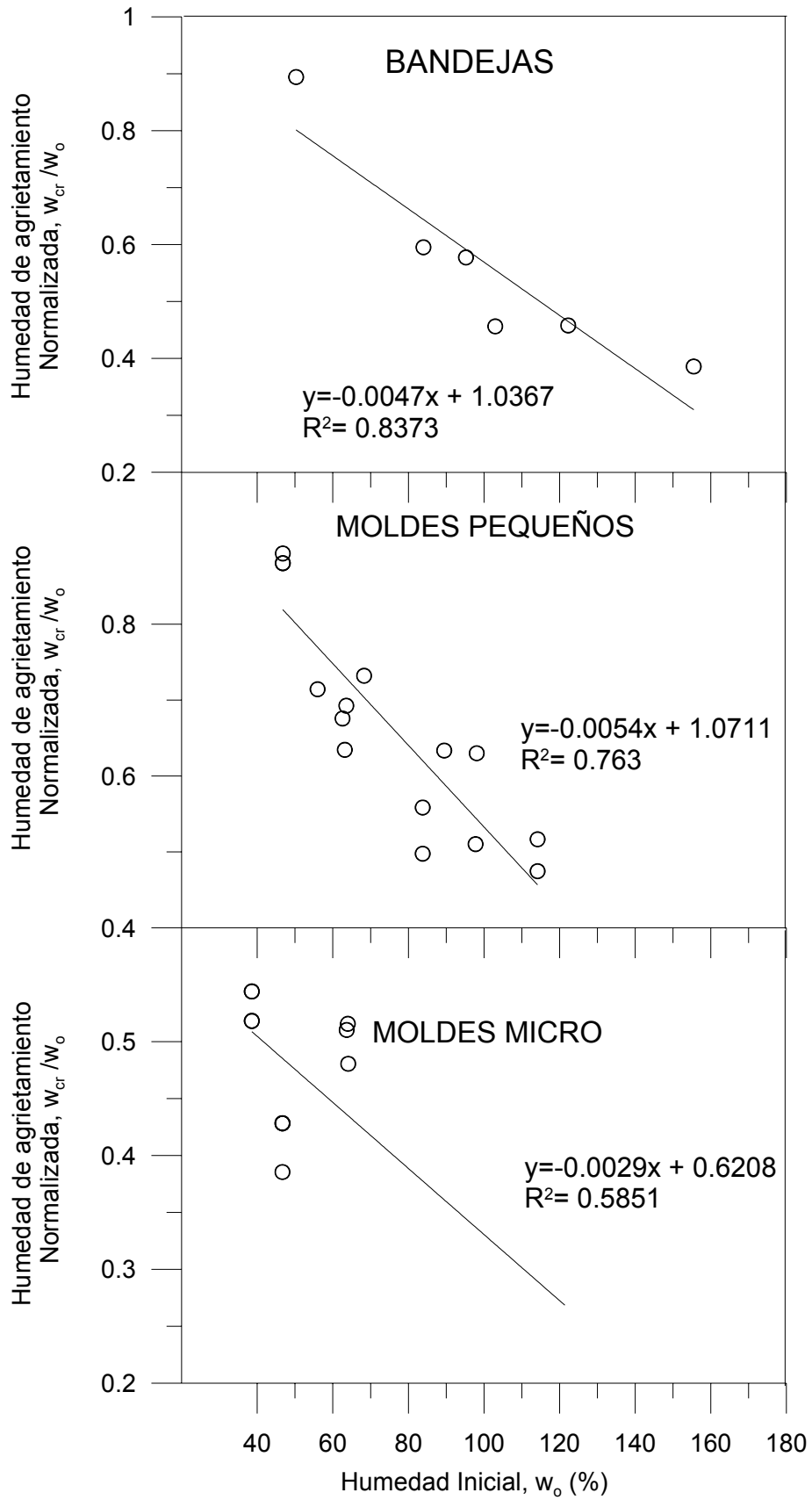


Figura 7.16 Relación entre la humedad de agrietamiento normalizada y la humedad inicial en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.

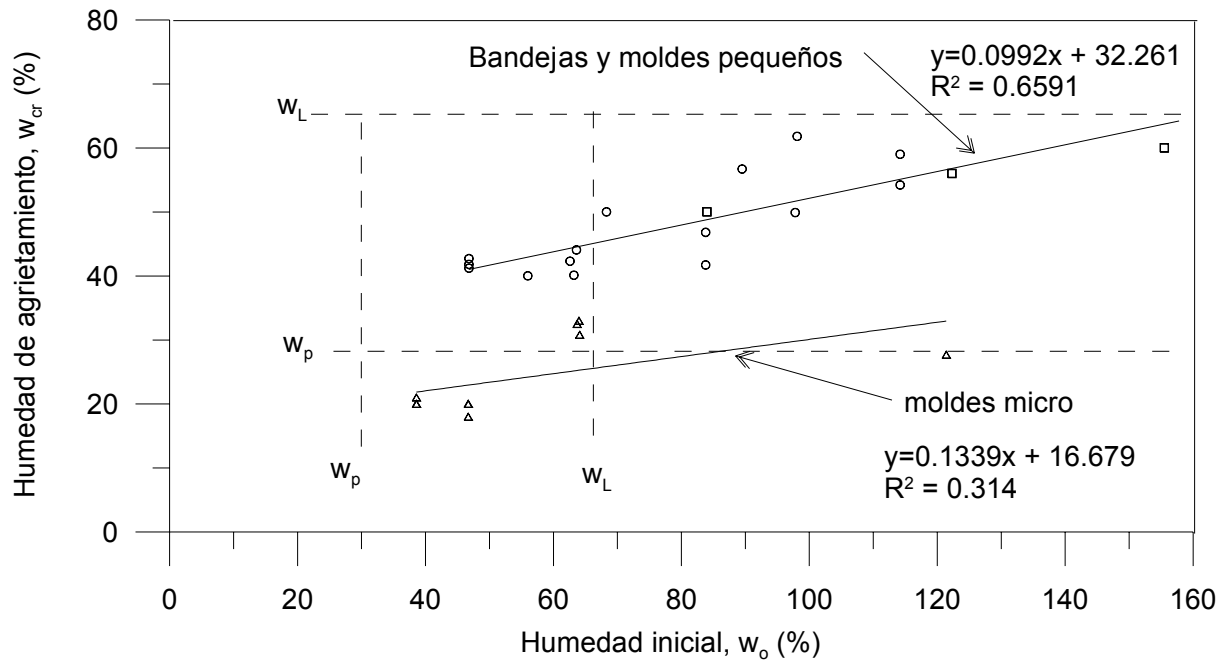


Figura 7.17 Datos conjuntos de humedad de agrietamiento en función de la humedad inicial.

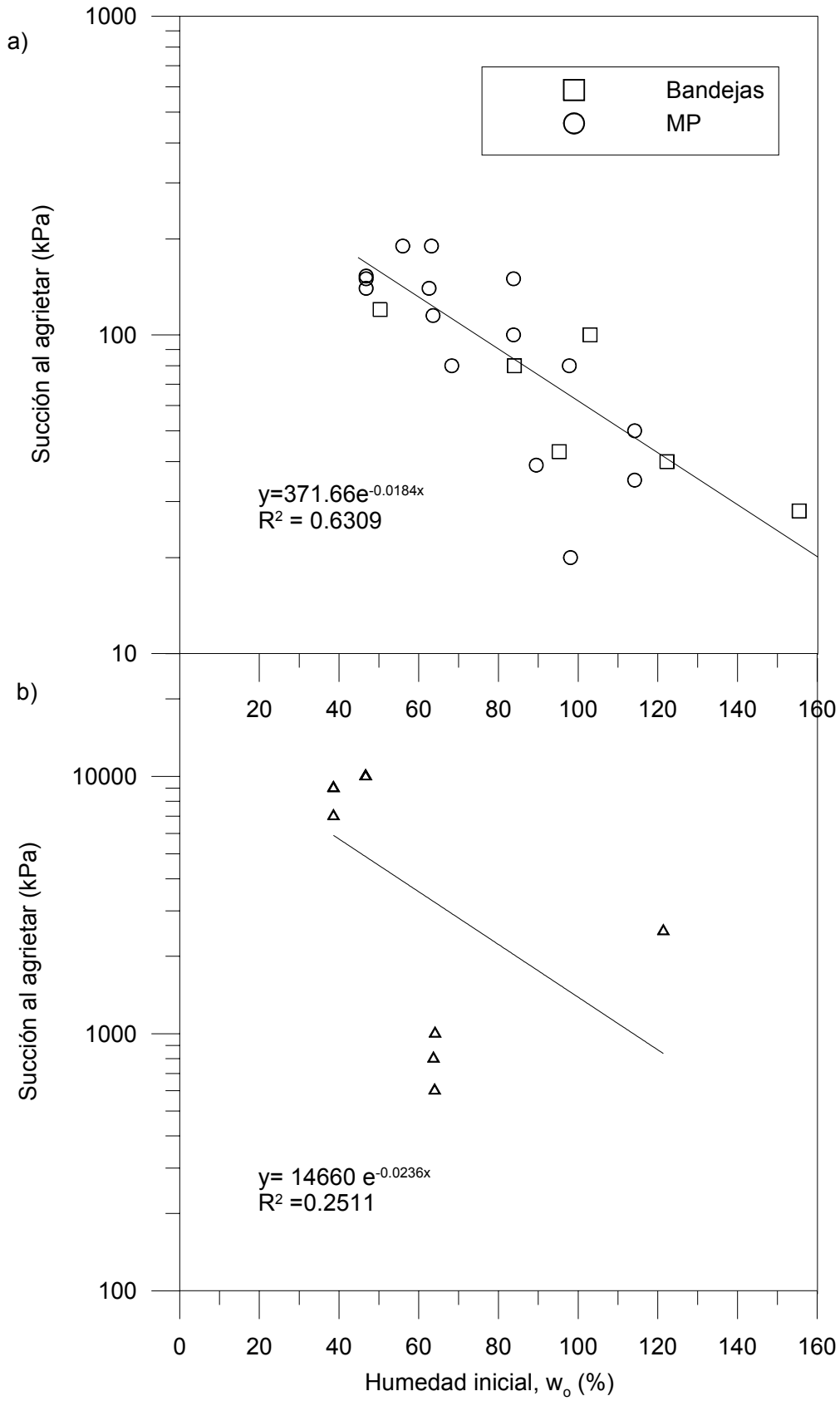


Figura 7.18 Relación entre la succión al inicio del agrietamiento y la humedad inicial: a) bandejas y moldes pequeños, b) moldes micro.

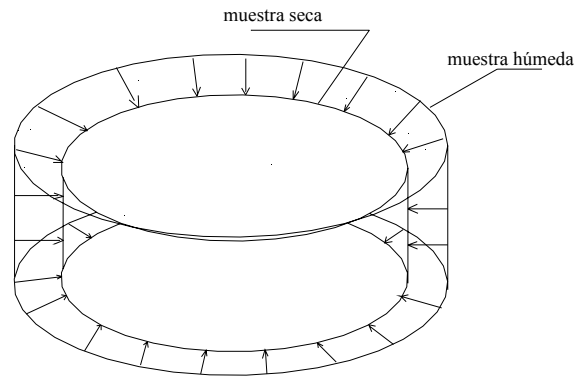


Figura 7.19 Esquema de la contracción libre de una muestra cilíndrica de arcilla.

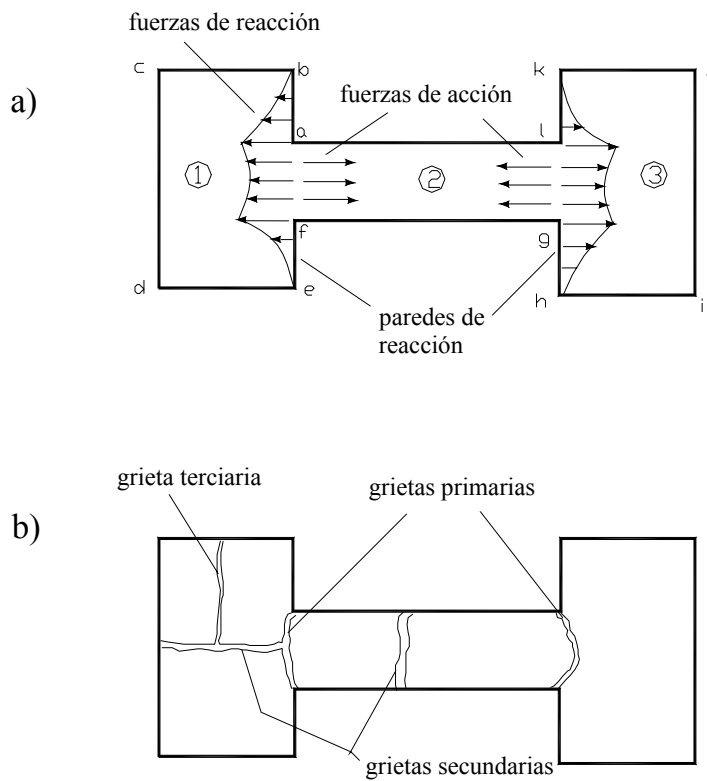


Figura 7.20 a) Esquema de la posible distribución de fuerzas en los moldes MP y MM , b) evolución típica de los agrietamientos a medida que aumenta la desecación.

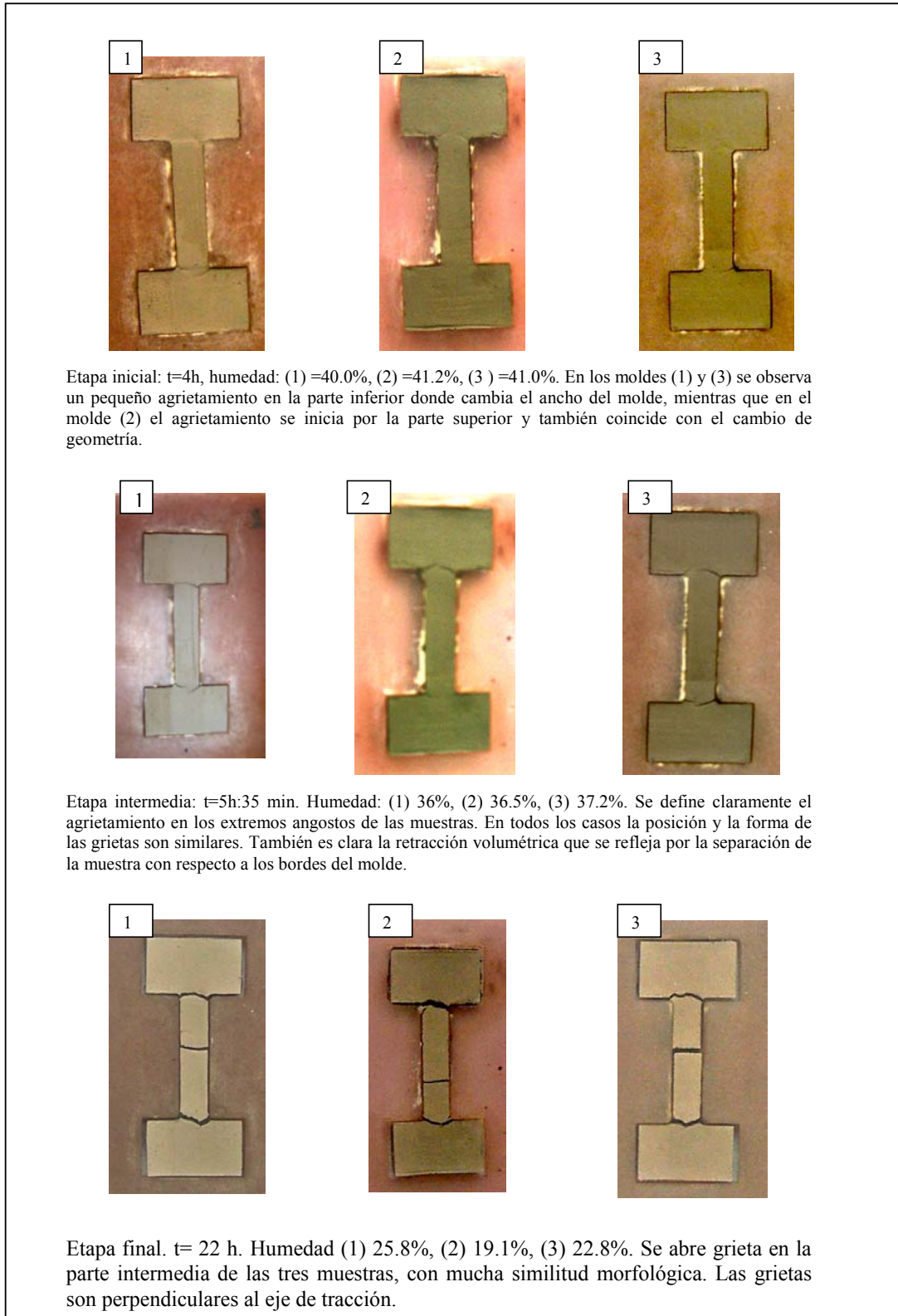


Figura 7.21 Fotografías de una secuencia típica de agrietamiento en moldes pequeños (serie B).



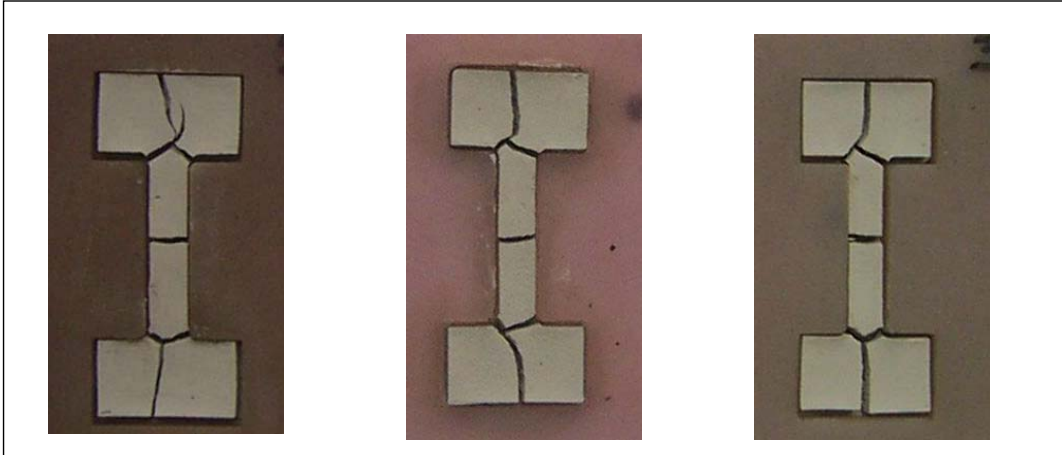


Figura 7.22 Fotografías del agrietamiento final en moldes pequeños, donde se presentan grietas primarias y secundarias (Serie C).

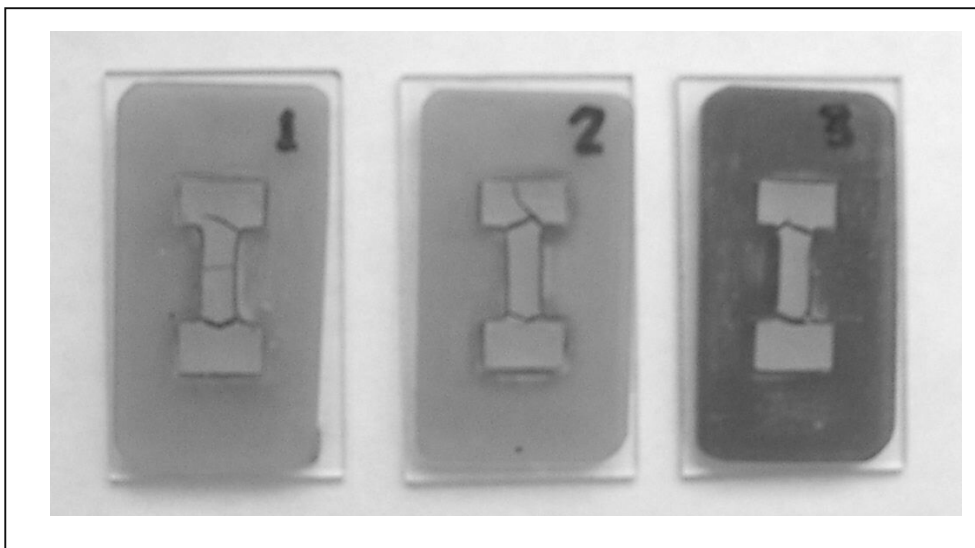


Figura 7.23 Fotografía del agrietamiento final en moldes micro (Serie C).

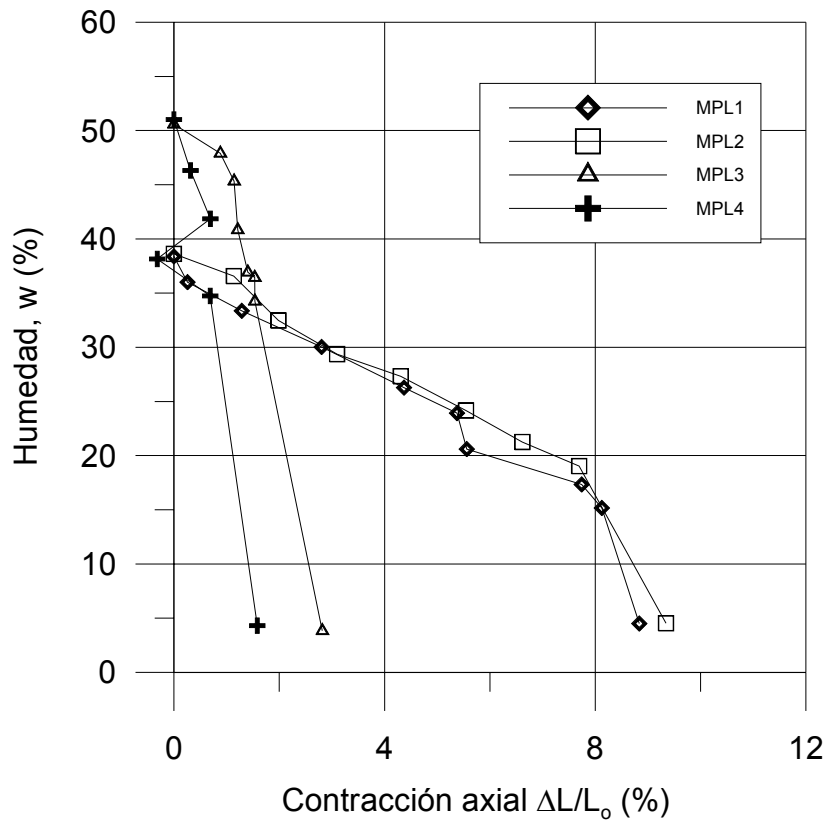


Figura 7.24 Curvas de contracción axial-humedad en ensayos MPL (las muestras MPL3 y MPL4 se agrietaron).

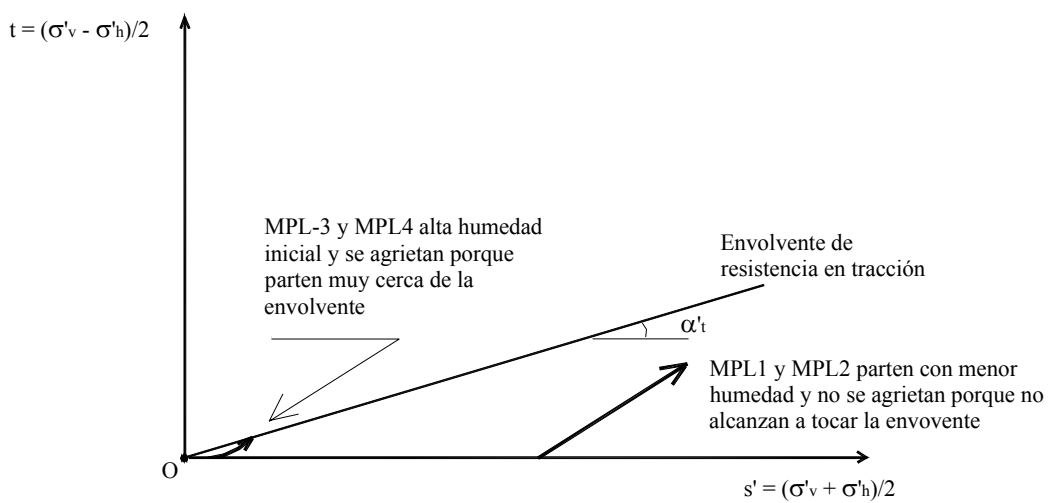


Figura 7.25 Esquema de trayectorias de tensiones efectivas en ensayos de retracción sin moldes (MPL1 a MPL4).

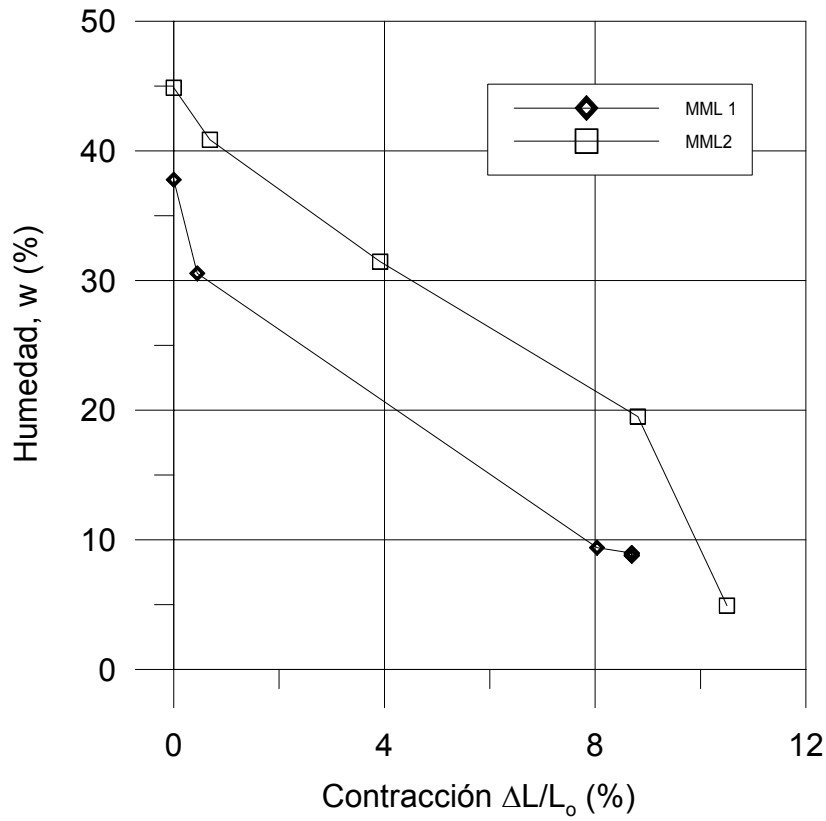


Figura 7.26 Curvas de contracción axial-humedad en ensayos MML.

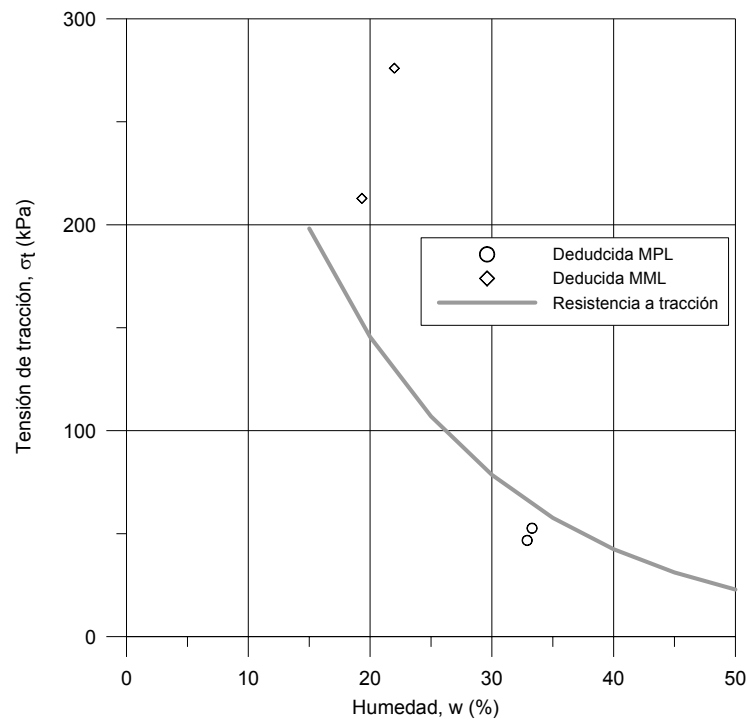


Figura 7.27 Comparación entre tensión de tracción estimada y resistencia a la tracción, en ensayos MPL y MML.

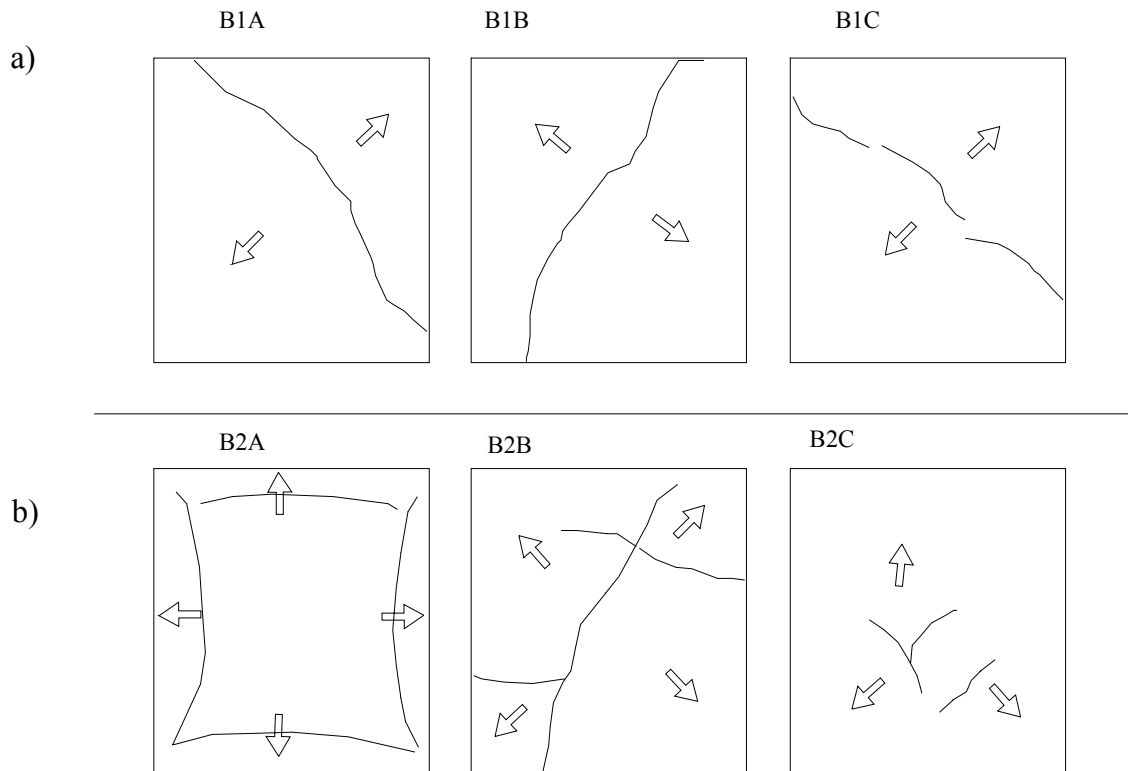


Figura 7.28 Agrietamiento primario típico y dirección inferida de las tensiones preferenciales a) muestras de la bandeja B1, b) muestras de la bandeja B2.



Figura 7.29 Fotografías de la secuencia de agrietamiento en el ensayo B1C.

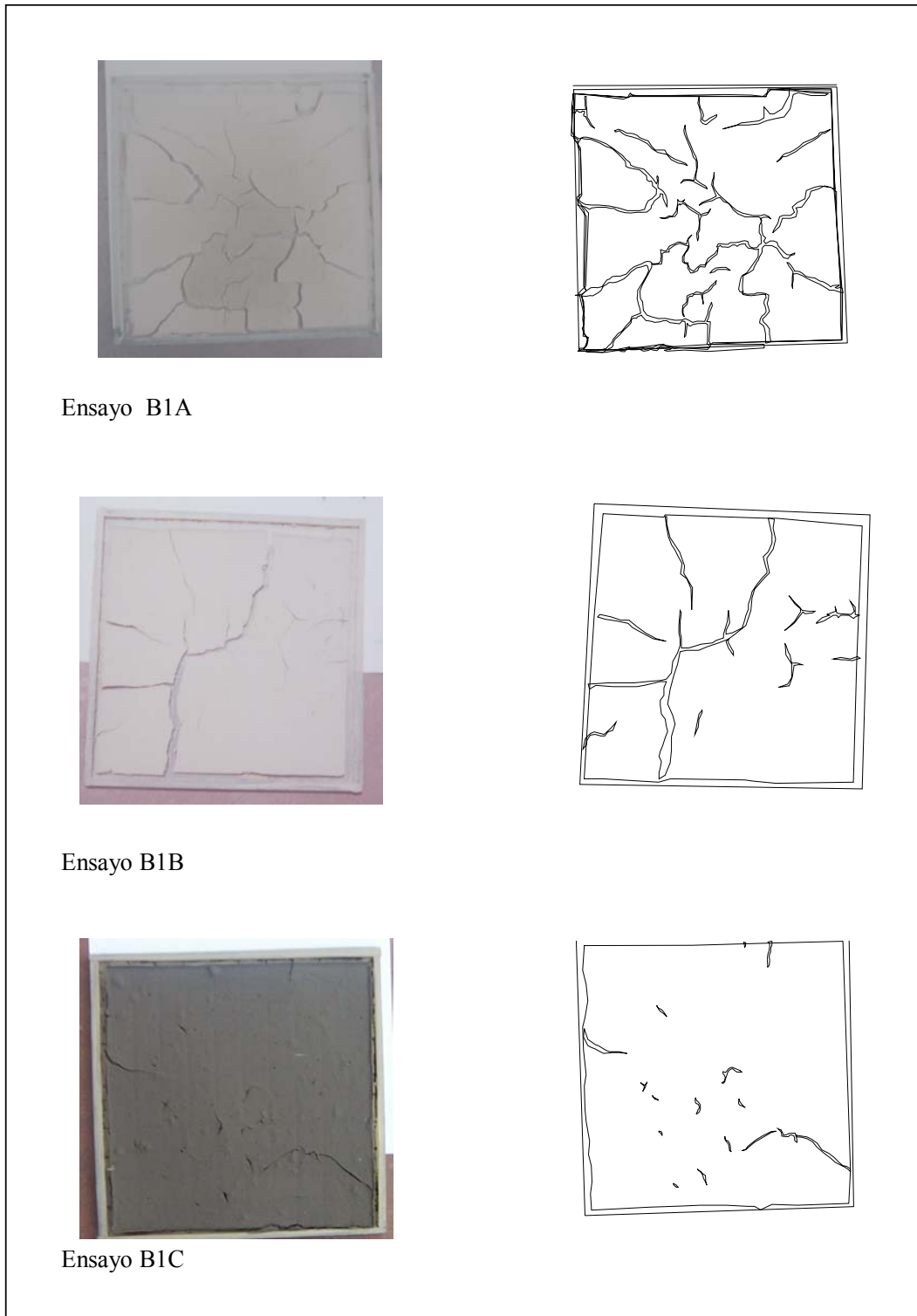


Figura 7.30 Fotografías e imágenes digitalizadas de la condición final en ensayos de la serie B1.



Figura 7.31 Fotografías e imágenes digitalizadas de la condición final en ensayos de la serie B2.

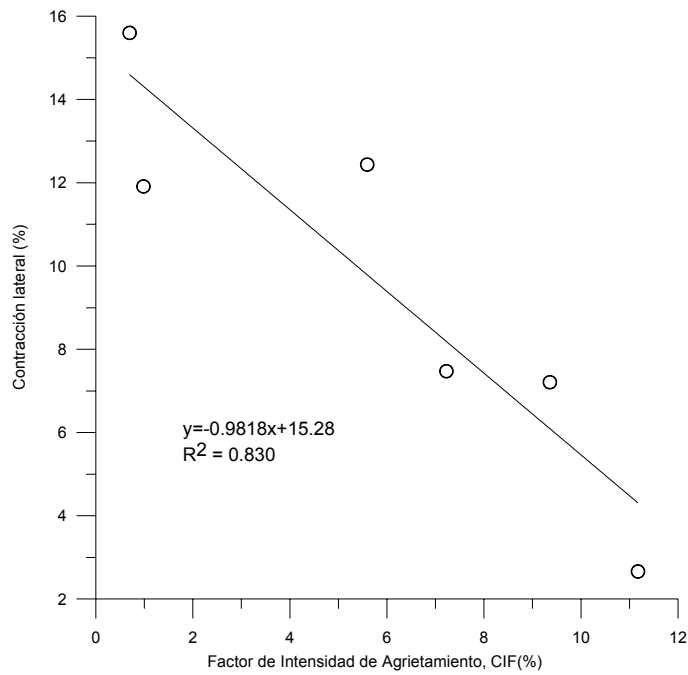


Figura 7.32 Relación entre el CIF y el porcentaje de contracción lateral en muestras de bandejas.

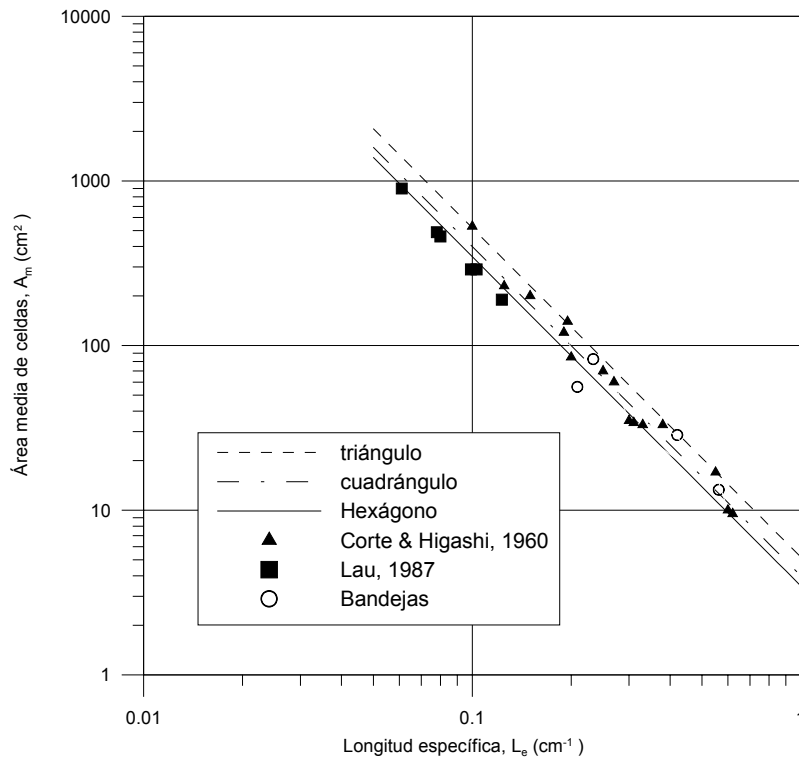


Figura 7.33 Relación entre área media de celdas y longitud específica de grietas (Adaptado de Kodikara et al. (2000)).



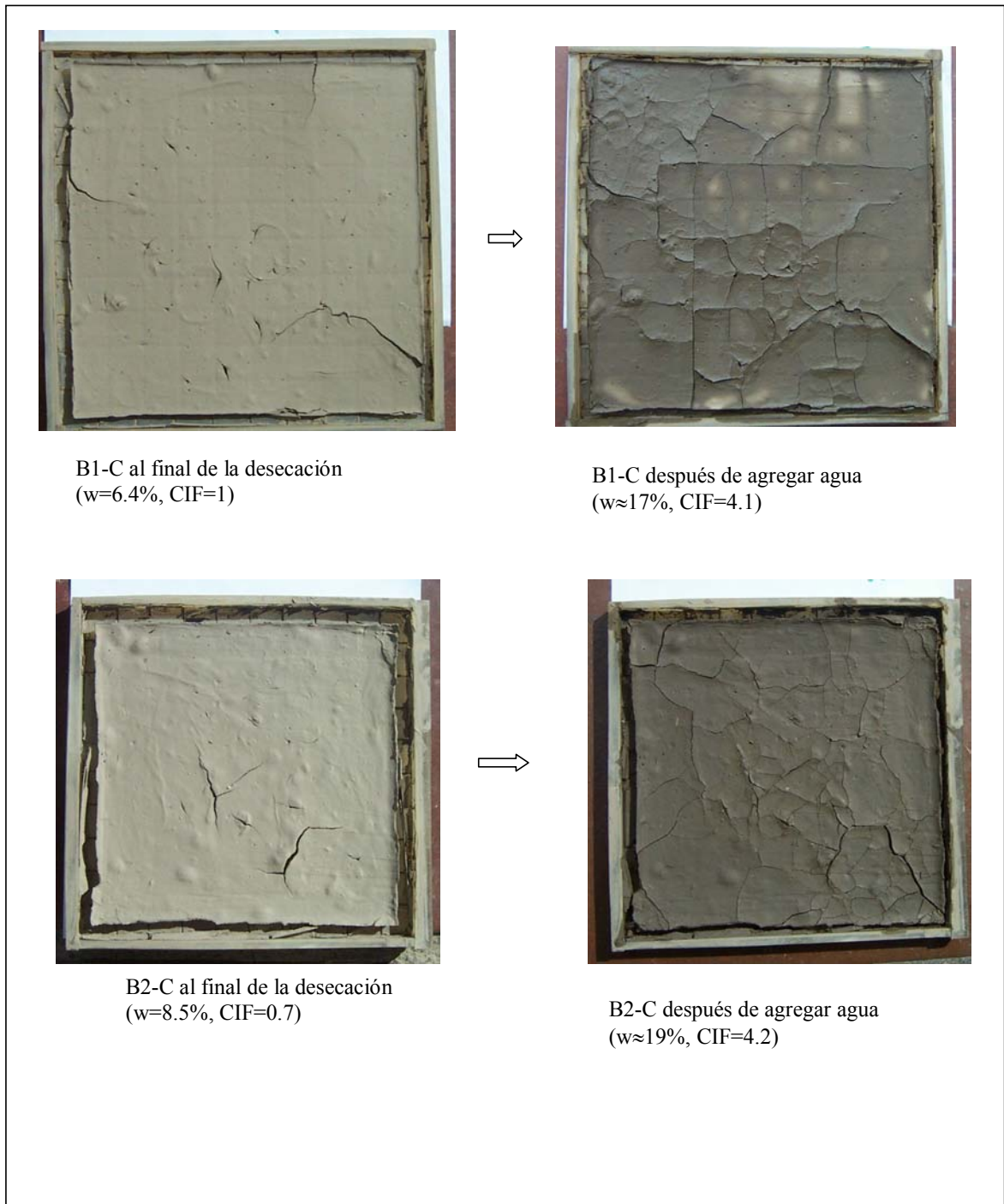


Figura 7.34 Agrietamientos inducidos por rehidratación de muestras previamente agrietadas y secas (ensayos B1-C y B2-C).

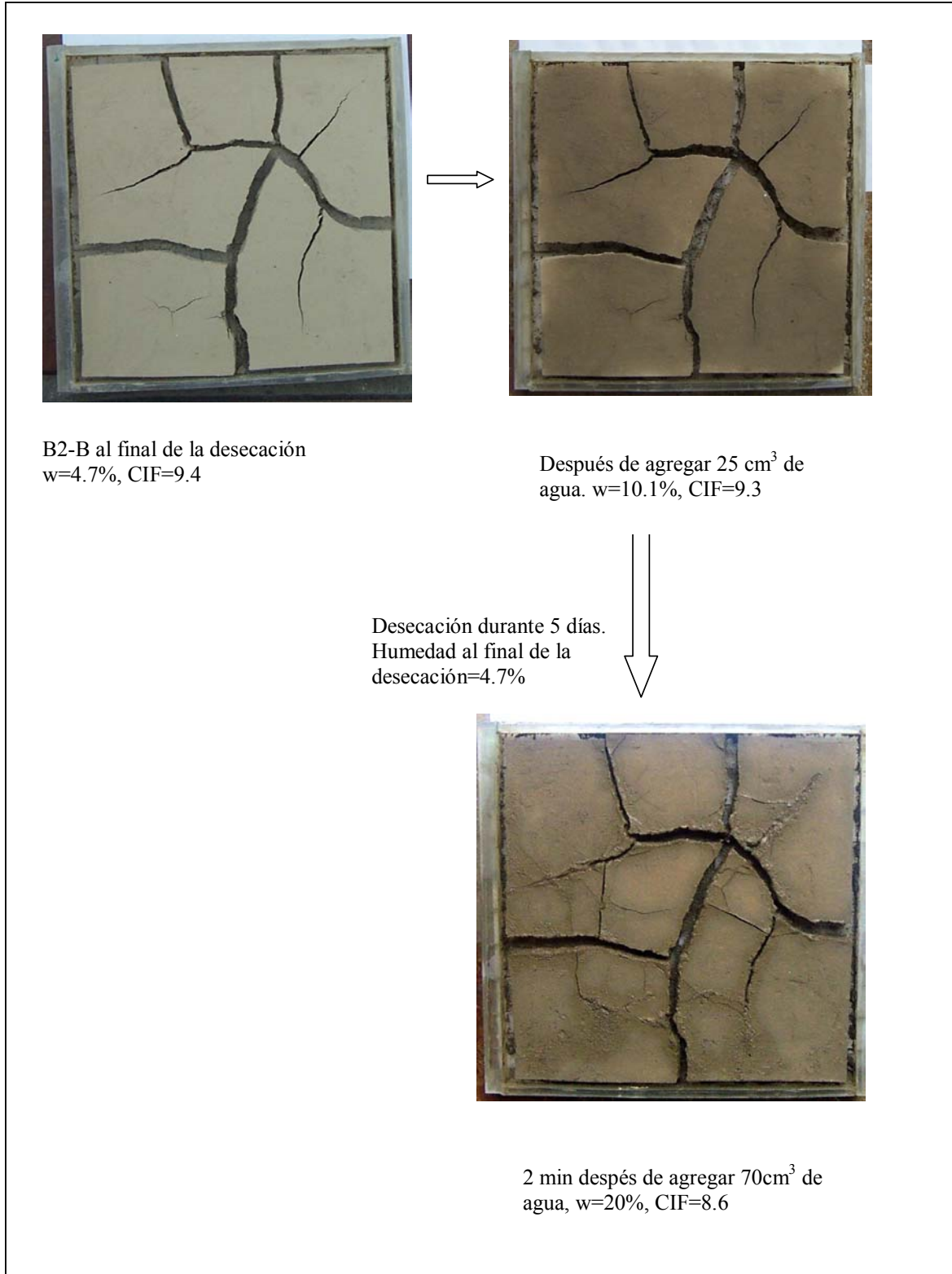


Figura 7.35 Agrietamientos producidos por rehidratación de la muestra B2-C en dos etapas.