

Capítulo 7: Deducción de parámetros y comportamiento previsto por el modelo

Si bien la utilización del modelo constitutivo planteado requiere la determinación de numerosos parámetros, la gran mayoría de ellos tiene un significado físico claro. Para determinar cada uno de estos valores resulta conveniente adoptar una sistemática de análisis lo más sencilla posible y que permita optimizar los ensayos realizados y la información que de ellos se obtiene. A continuación se plantean distintos ensayos de laboratorio y se indica el tipo y la calidad de la información que se deduce de cada uno de ellos. Finalmente, se simula el comportamiento de mezclas de pellets con diferentes valores de densidad seca a lo largo de distintas trayectorias de tensiones para explorar las capacidades del modelo. Ensayos con trayectorias de humedecimiento a carga constante y ensayos con trayectorias de humedecimiento a volumen constante. Los valores adoptados para los parámetros del modelo en estos ejemplos son valores de referencia obtenidos a partir de los resultados experimentales (Capítulo 4).

7.1 Deducción de los parámetros del modelo

Teniendo en cuenta que los ensayos de laboratorio se realizaron utilizando edómetros sin control de la tensión lateral, el modelo se define en función de la tensión vertical neta σ_v' en sustitución de la tensión media neta p .

7.1.1 Parámetros de la microestructura

El nivel microestructural está caracterizado por las unidades expansivas altamente compactadas. El comportamiento de deformación volumétrica de dichas unidades se describe de acuerdo con el modelo elastoplástico descrito en el apartado 5.3.1. El conjunto de los parámetros, su descripción, el tipo de ensayos utilizado en su deducción y la calidad de la información obtenida en cada uno de estos se resumen en la Tabla 7.1.

7.1.1.1 Dominio elástico

El comportamiento a nivel microestructural se describe en función de el esfuerzo efectivo vertical micro generalizado ($\hat{\sigma}_m$). Este valor se define a partir de la expresión

$\hat{\sigma}_m = (\sigma' + \chi s_m)$, siendo χ un parámetro experimental. La deformación volumétrica elástica se expresa en función del cambio en el esfuerzo vertical efectivo micro ($\hat{\sigma}_m$) como:

$$d\varepsilon_{vmic}^{el} = \frac{\kappa_m}{(1+e_m)} \frac{d\hat{\sigma}_m}{\hat{\sigma}_m} \quad (7.1)$$

Para definir este comportamiento es necesario determinar el valor de la rigidez κ_m , para el que en este caso se adoptó un valor constante e independiente del nivel de carga y succión actuantes en la microestructura.

7.1.1.2 Superficie de fluencia y parámetros de comportamiento plástico

Para definir el dominio elástico es necesario determinar la posición de las superficies de fluencia F_{SD} y F_{SI} de acuerdo con $F_{SD} = (SD_0 - \hat{\sigma}_m) = 0$ y $F_{SI} = (\hat{\sigma}_m - SI_0) = 0$. Estas superficies se expresan en función de los parámetros SD_0 y SI_0 . Una vez activada la superficie de fluencia, se producen deformaciones no recuperables a nivel microestructural que se computan a partir de la expresión:

$$d\varepsilon_{vmic}^{pl} = \frac{(\lambda_{m\beta} - \kappa_m)}{(1+e_m)} \frac{d\hat{\sigma}_m}{\hat{\sigma}_m} \quad \beta=I,D \quad (7.2)$$

7.1.1.3 Deducción de parámetros

De acuerdo con lo anterior, para describir el comportamiento de la microestructura es necesario definir cinco parámetros, κ_m , λ_{mD} , λ_{mI} , SD_0 y SI_0 . Adicionalmente, se deben determinar las restantes leyes constitutivas del material. La ley de Darcy, la ley de permeabilidad relativa y la curva de retención.

Para determinar el valor de parámetros de la microestructura, se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre muestras fabricadas con un valor de densidad seca igual a la de los pellets (1.90 Mg/m^3). Ensayos de humedecimiento hinchamiento a carga constante, ensayos de humedecimiento a volumen constante y curvas de retención a volumen constante. Los ensayos de humedecimiento a carga constante permiten determinar los valores de los parámetros de rigidez del dominio

elástico y plástico (κ_m y λ_{mD}) y definir la posición de la superficie de fluencia de mojado F_{SD} (dependiente de SD_0 , Figura 7.1-a). La posición de esta superficie se puede obtener a partir de la intersección de las interpolaciones lineales de las deformaciones volumétricas elásticas y plásticas (Figura 7.1-b). En el caso de realizar un ensayo con control del contenido de agua, la succión se puede deducir a partir de la curva de retención del material. De forma alternativa, se puede realizar una estimación del valor de SD_0 considerando la historia del material y su proceso de fábrica. En este caso se adoptó un valor de $SD_0 \approx 70$ a 100 MPa en correspondencia con un valor de succión inicial definido de acuerdo con un contenido de agua higroscópico (14 %).

Si bien la posición de la superficie F_{SD} resulta determinante en el comportamiento de la microestructura así como en la cuantificación de las deformaciones no recuperables, la adopción de un valor arbitrario no condiciona la validez general del análisis realizado. En la Tabla 7.2 se presentan valores indicativos utilizados para describir el comportamiento de la microestructura de las mezclas de pellets de bentonita. Se omiten los valores correspondientes a λ_{mI} y F_{SI} ya que no intervienen en procesos de humedecimiento.

Tabla 7.1. Parámetros del modelo, descripción y deducción para la microestructura.

PARÁMETROS PARA LA MICROESTRUCTURA			
Parámetro	Descripción	Tipo de ensayo	Información
κ_m	Coeficiente de compresibilidad elástico.	Trayectorias de mojado a carga constante (inundación)	Buena
		Trayectorias de mojado con control de succión	Muy Buena
		Trayectoria de carga y descarga a succión constante	Buena
		Ciclos de mojado y secado a carga constante	Muy buena
λ_{mD} y λ_{mI}	Coeficientes de compresibilidad virgen para trayectorias de mojado y secado respectivamente.	Ciclos de mojado y secado a carga constante	Muy buena
SD_0 y SI_0	Límites de comportamiento elástico en trayectorias de mojado y secado respectivamente	Ciclos de mojado y secado a carga constante	Muy buena
		Mojado a carga constante con control de succión.	Buena

Tabla 7.2. Parámetros para el modelo de la microestructura.

Parámetro	Descripción	Valor
κ_m	Coeficiente de compresibilidad elástico	0.015-0.025
λ_{mD}	Coeficiente de compresibilidad virgen	0.045-0.065
χ	Parámetro experimental de $\hat{\sigma}_m = (\sigma' + \chi s_m)$	0.9
SD_0	Parámetro de endurecimiento de la superficie F_{SD}	80-110 MPa
k_o	Permeabilidad saturada [m/s]	10^{-14} - 10^{-15}
λ	Parámetro que define del permeabilidad relativa $k_{rI} = (S_r^m)^\lambda$	1.1-1.5

7.1.2 Parámetros de la macroestructura

Para describir la respuesta de los contactos intergranulares (macroestructura), se adoptó el modelo propuesto por Alonso *et al.* (1990), modelo BBM (apartado 5.3.2). En la Tabla 7.3 se resumen los parámetros del modelo, su significado y el tipo de ensayo utilizado para su deducción. A continuación se revisan las características y parámetros del modelo y se presentan algunos valores indicativos (Tablas 7.4 y 7.5).

7.1.2.1 Dominio elástico

El comportamiento de cambio volumétrico de la macroestructura en el rango elástico se define a partir de la expresión incremental:

$$d\varepsilon_{vM}^{el} = \frac{d\sigma_v}{K_{pM}} + \frac{ds_M}{K_{sM}} \quad (7.3)$$

Siendo K_{pM} y K_{sM} los coeficientes de compresibilidad elástica frente a cambios en la tensión media neta y en la succión respectivamente. Estos coeficientes se pueden expresar a partir de $K_{pM} = \frac{(1+e)\sigma_v}{\kappa_i}$ y $K_{sM} = \frac{(1+e)(s_M + p_{atm})}{\kappa_s}$. El coeficiente κ_i se supone dependiente de la succión de acuerdo con:

$$\kappa_i = \kappa_{i0} (1 - \alpha_i s_M) \quad (7.4)$$

siendo κ_{i0} el coeficiente de compresibilidad frente a incrementos de carga en condiciones saturadas y α_i un parámetro experimental que tiene en cuenta al aumento en la rigidez del material con el incremento de succión. Para κ_s se considera una expresión dependiente del nivel de carga y de la succión de acuerdo con:

$$\kappa_s(\sigma_v, s_M) = \kappa_{s0} \left(1 - \alpha_{sp} \ln \left(\frac{\sigma_v}{p_{ref}} \right) \right) * e^{-\alpha_{ss} s_M} \quad (7.5)$$

donde κ_{s_0} representa el valor de dicho coeficiente en condiciones saturadas y los parámetros α_{sp} y α_{ss} tienen en cuenta la influencia de la carga y la succión en el desarrollo de deformaciones de hinchamiento.

7.1.2.2 Superficie de fluencia y parámetros de comportamiento plástico

Los límites del dominio elástico se definen a partir de dos superficies de fluencia: la superficie de carga y colapso (LC) y una superficie que considera el aumento de la cohesión aparente con el aumento de la succión ($F_{SM} = -k \cdot s_M$, Figura 7.3). Teniendo en cuenta que los ensayos de laboratorio se realizaron utilizando edómetros sin control de la tensión lateral, se definió la superficie LC a partir de la tensión vertical neta σ'_v de acuerdo con:

$$\sigma_{V0}(s_M, \sigma_0^*) = \sigma^c \left(\frac{\sigma_0^*}{\sigma^c} \right)^{\frac{(\lambda(0) - \kappa_{i0})}{(\lambda(s_M) - \kappa_i(s_M))}} \quad (7.6)$$

En esta expresión, κ_{i0} y $\lambda(0)$ representan los coeficientes de rigidez elástica y elastoplástica en condiciones saturadas. $\kappa_{i0}(s_M)$ y $\lambda(s_M)$ representan los coeficientes evaluados en un valor de succión s_M . $\kappa_{i0}(s_M)$ está definido por la expresión (7.4) y $\lambda(s_M)$ por:

$$\lambda(s_M) = \lambda(0) \cdot [r + (1-r)e^{-\beta s_M}] \quad (7.7)$$

El valor σ_0^* corresponde al valor de la presión de preconsolidación en condiciones saturadas y representa el parámetro de endurecimiento de la superficie. σ^c es un valor de tensión de referencia.

7.1.2.3 Determinación de parámetros macro

La deducción de los valores de los parámetros correspondientes al dominio elástico del modelo se realizó a partir distintos ensayos. Ensayos con trayectorias de humedecimiento a carga constante ($dp' = 0$ Figura 7.2) y ensayos con trayectorias de carga a succión constante ($ds_M = 0$ Figura 7.3). Considerando ensayos con trayectorias de humedecimiento a carga constante ($dp' = 0$) a distintos niveles de carga dentro del

rango elástico, se obtiene información sobre $\kappa_s(\sigma_v, s_M)$ y se deducen los valores de los parámetros κ_{s0} , α_{sp} , α_{ss} y p_{ref} de las expresiones (7.4) y (7.5). Para una mejor estimación de estos valores es recomendable realizar ensayos con control de la succión. En la Figura 7.2 se indica la trayectoria de tensiones representada en el plano (tensión vertical neta: σ_v y succión macro: s_M) y la evolución de las deformación volumétrica desarrollada a lo largo de este tipo de trayectoria.

A partir de ensayos con trayectorias de carga-descarga a succión constante ($ds_M = 0$), se obtiene información sobre los parámetros de compresibilidad elástica κ_i , compresibilidad elastoplástica $\lambda(s_M)$, la carga de preconsolidación y su variación con la succión $\sigma_{v0}(s_M)$ (dadas por las expresiones (7.4), (7.7) y (7.6) respectivamente). Considerando la rama de recarga y descarga se obtuvieron los valores de $\kappa_i(s_M)$ para distintos valores de succión y se ajustaron los valores de κ_{i0} y α_i . Los valores de $\lambda(s_M)$ se calcularon a partir de la pendiente de la curva de compresibilidad en la rama de carga. La determinación del valor de la carga de preconsolidación $\sigma_{v0}(s_M)$ se realizó a partir de distintos métodos gráficos (ver apartado 4.2.3.2). La variación de $\lambda(s_M)$ se ajustó de forma conjunta con la de $\sigma_{v0}(s_M, \sigma_0^*)$. Primero se ajustaron los valores de los coeficientes en condiciones saturadas $\lambda(0)$ y σ_0^* . Posteriormente se estimaron los valores de los parámetros r , β y σ^c utilizando un ajuste por mínimos cuadrados. Los valores adoptados para los parámetros que definen el comportamiento elástico y el comportamiento elastoplástico y la superficie LC se presentan en la Tablas 7.4 y 7.5 respectivamente.

Tabla 7.3. Parámetros del modelo, descripción y deducción para la macroestructura.

PARÁMETROS PARA LA MACROESTRUCTURA			
Parámetro	Descripción	Tipo de ensayo	Información
κ_{i0} y $\lambda(0)$	Coefficientes de compresibilidad elástico y virgen para el caso del material en estado saturado	Edómetros con trayectorias de carga y descarga en condiciones saturadas	Muy Buena
$\kappa_i(s)$ y $\lambda(s)$	Coefficientes de compresibilidad elástico y virgen para una succión s .	Edómetros con trayectorias de carga y descarga a succión constante $s_M=s$.	Muy buena
$\kappa_s(p, s_M)$	Coeficiente de cambio volumétrico (compresibilidad) por cambios de succión en dominio elástico	Edómetros de humedecimiento a carga constante	Buena
		Ensayos de humedecimiento a carga constante con control de succión	Muy buena
κ_s / κ_p	Relación entre los coeficientes de compresibilidad	Ensayos de presión de hinchamiento	Buena
		Humedecimiento a volumen constante con control de succión	Muy buena
r, β	Parámetros de forma de la superficie de fluencia LC	Edómetros con trayectorias de carga y descarga a succión constante	Buena
		Ensayos de humedecimiento a carga constante con control de la succión.	Muy buena

Tabla 7.4. Valor y significado de los parámetros elásticos del modelo de la macroestructura.

Parámetros elásticos	Descripción	Valor 1.3 Mg/m ³	Valor 1.5 Mg/m ³
κ_{i0}	Valor en condiciones saturadas de la pendiente para el cambio volumétrico por carga	0.08-0.09	0.05-0.06
α_i	Coefficiente que toma en cuenta el cambio con la succión	0.002	0.002
κ_{s0}	Valor en condiciones saturadas de la pendiente del cambio volumétrico por succión	0.001-0.005	0.010-0.020
α_{sp}	Coefficiente que considera la influencia de la carga en el cambio volumétrico por succión	0.185	0.120
α_{ss}	Coefficiente que considera la influencia de la succión en el cambio volumétrico por succión	0.010	0.003
p_{ref}	Valor de referencia	0.009 MPa	0.007 MPa

Tabla 7.5. Parámetros que definen la superficie de fluencia LC de acuerdo con (7.6).

Parámetros LC	Descripción	Valores 1.3 Mg/m ³	Valores 1.5 Mg/m ³
$\sigma_{v_0}(0)$	Límite elástico en condiciones saturadas	0.28-0.45 MPa	1.1-1.2 MPa
σ^c	Carga de referencia	90 kPa	70 kPa
$\lambda(0)$	Coefficiente de compresibilidad virgen en condiciones saturadas	0.18-0.19	0.16-0.17
κ_{s0}	Coefficiente de compresibilidad elástico saturada (carga- descarga)	0.070-0.080	0.05-0.06
β	Parámetro que determina la curvatura de la superficie de fluencia LC	0.007-0.015 MPa ⁻¹	0.004 MPa ⁻¹
r	Parámetro que define el límite del coeficiente de compresibilidad $\lambda(s)$ para succiones altas	0.40-0.45	0.35-0.45

7.2 Comportamiento previsto por el modelo

A los efectos de estudiar las capacidades y el comportamiento previsto por el modelo se analizaron dos tipos de trayectorias diferentes. Trayectorias de humedecimiento a carga constante y trayectorias de humedecimiento a volumen constante (presión de hinchamiento).

7.2.1 Trayectorias de humedecimiento a carga constante. Influencia de la velocidad de humedecimiento.

La trayectoria de tensiones seguida durante los ensayos de humedecimiento a carga constante se puede describir en dos etapas. Una primera etapa en la que se incrementa la carga vertical en condiciones de fábrica (1-2 en la Figura 7.4) y seguidamente, una etapa en la que se satura la muestra inyectando agua desde su parte inferior (2-3 en la Figura 7.4). Se consideró una muestra con un valor de densidad seca de 1.3 Mg/m³ y un valor de carga vertical de 300 kPa. Para estudiar la influencia de la velocidad de inyección de agua en la respuesta del material se simularon dos ensayos en los que se aplicaron diferentes presiones de inyección de agua. En un primer ensayo se adoptó una presión

de inyección de agua correspondiente a una carga hidráulica de $h_{\text{inyección}}=30$ m y en el segundo caso se consideró una presión de inyección correspondiente a una carga hidráulica de $h_{\text{inyección}}=3$ cm.

En la Figuras 7.5 y 7.6 se muestran los resultados obtenidos en el caso del ensayo con una carga hidráulica de 30 m (inyección rápida). En la Figura 7.5 se muestra la evolución de la succión macro y micro (s_M, s_m) y la evolución de la deformación volumétrica (ε_v) en el tiempo. En la Figura 7.6 se representa la evolución de la trayectoria de tensiones en cada nivel estructural (macro y micro) en términos de la tensión vertical neta y la succión ((σ'_v, s_M) y (σ'_v, s_m)), respectivamente). En las Figuras 7.7 y 7.8 se muestran los resultados correspondientes al ensayo con carga hidráulica de 3 cm (inyección lenta).

Si bien en ambos ensayos aplica la misma trayectoria de tensiones, el modelo predice respuestas diferentes en cada caso. En el caso de la simulación realizada considerando $h_{\text{inyección}}=30$ m (ensayo de inyección rápida), el modelo predice deformaciones volumétricas de compresión (colapso) durante la primera parte del ensayo. Posteriormente se observan deformaciones de expansión (Figura 7.5-b). En el segundo caso, ensayo realizado considerando una inyección más lenta ($h_{\text{inyección}}=3$ cm), la evolución de la deformación volumétrica muestra deformaciones netas de expansión a lo largo de todo el ensayo (Figura 7.7-b).

7.2.1.1 Ensayo de inyección considerando $h=30$ m

En el caso de la simulación realizada considerando una carga hidráulica de inyección $h=30$ m (inyección rápida, Figuras 7.5 y 7.6), se pueden identificar tres etapas a lo largo del ensayo:

- ETAPA I: el agua entra en la muestra saturando la macroestructura y reduciendo drásticamente la succión en este nivel ($s_M \approx 0.03$ MPa, ETAPA I en Figura 7.6). Durante este tiempo no se producen mayores modificaciones a nivel microestructural. En esta primera etapa el modelo predice deformaciones netas de compresión asociadas al colapso de la macroestructura Figura 7.5-b.
- ETAPA II: ambos niveles estructurales comienzan a intercambiar agua. La succión micro decrece y se producen deformaciones de expansión mientras la

macroestructura continúa colapsando. A lo largo de esta etapa, la deformación volumétrica neta continúa siendo de compresión pero se computan incrementos de deformación volumétrica de expansión.

- ETAPA III: ambos niveles continúan intercambiando agua, la macroestructura permanece saturada y la microestructura desarrolla grandes deformaciones de expansión (arrastra la superficie de fluencia SD_0).

7.2.1.2 Ensayo de inyección considerando $h=3$ cm

En el caso del ensayo realizado considerando una inyección lenta, ($h=3$ cm, Figuras 7.7 y 7.8), el agua entra en la muestra con una velocidad menor que en el caso anterior. Ambos niveles estructurales evolucionan intercambiando agua desde un comienzo del ensayo. La deformación volumétrica computada a lo largo de este ensayo se puede explicar de la siguiente manera:

- ETAPA I: la succión decrece en ambos niveles estructurales y las trayectorias de tensiones se mantienen en el dominio elástico. Se desarrollan deformaciones de expansión (Figura 7.7).
- ETAPA II: a nivel macroestructural se activa la superficie de fluencia (LC) y se desarrollan deformaciones volumétricas de compresión (colapso). Al mismo tiempo se desarrollan deformaciones de expansión en la microestructura. Al inicio esta etapa las deformaciones de colapso superan a las de expansión provocando incrementos de deformación volumétrica neta de compresión. Posteriormente las deformaciones de expansión superan a las de colapso determinando incrementos de deformación volumétrica neta de expansión.

7.2.2 Trayectorias de humedecimiento a volumen constante. Ensayos de presión de hinchamiento considerando muestras con diferente densidad seca.

En los ensayos de humedecimiento a volumen constante (ensayos de presión de hinchamiento), se consideraron muestras con densidades secas de 1.3 y 1.5 Mg/m^3 respectivamente. La muestra con una densidad seca de 1.3 Mg/m^3 se corresponde con un material de estructura granular abierta, menos rígida y más propensa al colapso

macroestructural. Por el contrario, la muestra con densidad seca de 1.5 Mg/m^3 , representa una estructura con un arreglo intergranular más cerrado, más rígida y menos susceptible de colapsar durante un proceso de carga y humedecimiento. En ambos casos se utilizó la misma presión de inyección de agua correspondiente a una carga hidráulica de 3 m. La trayectoria de tensiones seguida a lo largo de estos ensayos se representa esquemáticamente en la Figura 7.9 para cada uno de los niveles estructurales.

En la Figuras 7.10 y 7.11 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo correspondiente a una muestra con un valor de densidad seca de 1.3 Mg/m^3 . En la Figura 7.10 se muestra la evolución de las succión macro y micro (s_M , s_m) y la evolución de la presión de hinchamiento durante el ensayo. Mientras que en la Figura 7.11 se representa la evolución de las trayectorias de tensiones macro y micro, expresadas en función de la tensión vertical neta y la succión, (σ'_v, s_M) y (σ'_v, s_m) respectivamente. En las Figuras 7.13 y 7.14 se muestran los resultados correspondientes a la muestra con un valor de densidad seca de 1.5 Mg/m^3 .

7.2.2.1 Ensayo sobre muestra con densidad seca inicial de 1.3 Mg/m^3

En el caso del ensayo simulado considerando una muestra de densidad seca 1.3 Mg/m^3 (Figuras 7.10, 7.11 y 7.12), se pueden identificar tres etapas:

- ETAPA I: el agua entra en la muestra inundando la macroestructura y provocando un rápido descenso en la succión macro ($s_M \approx 0.01 \text{ MPa}$). Al mismo tiempo la succión en la microestructura permanece casi sin cambio ($s_m \approx 250 \text{ MPa}$). A lo largo de esta etapa el crecimiento de la presión de hinchamiento está determinado por las características de la macroestructura.
- ETAPA II: la microestructura comienza a hidratarse a partir del intercambio de agua con la macroestructura. La succión micro decrece y se registra un incremento en la presión de hinchamiento.
- ETAPA III: debido al gran potencial expansivo de la microestructura, la presión de hinchamiento continúa creciendo y se alcanza el límite elástico de la macroestructura (endurecimiento de la superficie LC en la Figura 7.11). Se computan deformaciones no recuperables a nivel macroestructural que compensan la expansión micro limitando el crecimiento de la presión de

hinchamiento. El hinchamiento de la microestructura produce la “invasión” de la macroestructura. En la Figura 7.12 se presenta la evolución del índice de vacíos a lo largo del ensayo para cada uno de los niveles estructurales. Se observa una reducción de la macroporsidad en favor de un aumento en la porosidad micro.

Las predicciones del modelo están de acuerdo con las observaciones experimentales realizadas a partir de porosimetrías de mercurio, ver el apartado 5.2.

7.2.2.2 Ensayo sobre muestra con densidad seca inicial de 1.5 Mg/m³

En el caso del ensayo simulado considerando una muestra de densidad seca 1.5 Mg/m³, Figuras 7.13 y 7.14, se pueden identificar tres etapas:

- ETAPA I: La succión macroestructural decrece, mientras que la succión de la microestructura permanece en valores cercanos al inicial. En esta etapa la evolución de la presión de hinchamiento está caracterizada por las propiedades de la macroestructura. La presión de hinchamiento aumenta hasta alcanzar la superficie de fluencia LC (Figuras 7.13 y 7.14).
- ETAPA II: Mientras la succión de la macroestructura continúa decreciendo y se producen deformaciones de colapso, la succión micro disminuye provocando deformaciones de expansión desde la microestructura. Ambos fenómenos se compensan mutuamente y como resultado se observa que la presión de hinchamiento no sufre mayores cambios. Esta etapa resulta en una zona de transición.
- ETAPA III: con la macroestructura ya casi saturada, la succión de la microestructura continúa decreciendo. Se alcanza la superficie de fluencia SD₀ y se desarrolla una gran expansión. Se produce el endurecimiento de la LC, se compensa el colapso macro y se observa un nuevo aumento de la presión de hinchamiento.