

## **Capítulo 5: Marco conceptual y modelo constitutivo para materiales expansivos**

Los suelos tipificados como suelos expansivos se caracterizan por tener un conjunto de respuestas y comportamientos fenomenológicos comunes entre sí. Como características fundamentales del comportamiento nos encontramos con una gran capacidad de incorporar agua, el desarrollo de grandes deformaciones de expansión y retracción asociadas a procesos de humedecimiento y secado respectivamente, el desarrollo de grandes presiones de hinchamiento en procesos de humedecimiento en condiciones de confinamiento y la aparición de deformaciones no recuperables a lo largo de ciclos de humedecimiento y secado. La descripción de estos comportamientos requiere el uso de un marco conceptual capaz de incorporar tanto aspectos fenomenológicos como estructurales de la respuesta del material. Cambios en el contenido de agua y procesos de carga-descarga provocan cambios de volumen asociados a mecanismos internos de cambio volumétrico diferentes. En el caso particular de las mezclas de pellets de bentonita, se trata de un material artificial con una estructura que sufre importantes cambios a lo largo del proceso de hidratación. Partiendo de una estructura granular con grandes poros en su estado de fábrica y evolucionando a un material de estructura cerrada y homogénea por efecto del humedecimiento.

La descripción constitutiva del comportamiento de los suelos expansivos se enmarca dentro de la mecánica de suelos no saturados. Para describir el comportamiento de cambio volumétrico de los suelos en su estado no saturado, es necesario identificar primero cuales son las variables fundamentales que explican este comportamiento. Los primeros intentos realizados para describir este comportamiento, se orientaron hacia la búsqueda de una ley de tensiones efectivas equivalente a la propuesta por Terzaghi (1936) para el caso de los suelos en su estado saturado,  $\sigma' = (\sigma - u_w)$ . En este sentido, Bishop en 1959 y Aitchison & Bishop en 1960 sugirieron la existencia de una ley equivalente a la propuesta por Terzaghi para el caso de un suelo en su estado no saturado dada por la expresión: **Equation Chapter (Next) Section 5**

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (5.1)$$

donde  $(\sigma - u_a)$  es la tensión neta,  $(u_a - u_w)$  es la succión y  $\chi$  un parámetro que depende de las características de la estructura del suelo ( $\chi = 1$  en el caso saturado y  $\chi = 0$  para el suelo seco). El éxito obtenido en la reproducción del comportamiento de cambio volumétrico a partir de expresiones como la (5.1) fue muy limitado y poco generalizable. A partir de estas limitaciones, se comenzó a extender y a aceptar la idea de considerar más de una variable de tensiones para describir el comportamiento de los suelos no saturados. Coleman (1962) sugiere que los cambios de volumen y los cambios en el contenido de agua (en condiciones de carga isótropa) se pueden describir utilizando dos variables independientes  $(\sigma - u_a)$  y  $(u_a - u_w)$ . Posteriormente, Fredlund & Morgenstern (1977) proponen expresiones que vinculan el índice de vacíos de un suelo ( $e$ ) con estas dos variables de tensiones. Actualmente, es muy aceptada la necesidad de considerar al menos dos variables para describir el comportamiento de cambio volumétrico del suelo en su estado no saturado.

De forma general podemos decir que en un suelo en estado no saturado, es posible definir tres campos de tensiones: la tensión total  $\sigma_{ij}$ , la presión de aire  $u_a \delta_{ij}$  y la presión de agua  $u_w \delta_{ij}$ , donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker. La descripción del comportamiento de cambio volumétrico se puede realizar a partir de dos cualesquiera de las combinaciones posibles entre los campos anteriores:  $(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$ ,  $(u_a - u_w) \delta_{ij}$  y  $(\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij})$ . Siendo la combinación más aceptada, la tensión neta  $\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$  y la succión  $s = (u_a - u_w) \delta_{ij}$ . La tensión neta representa el exceso de tensión sobre la presión de aire y la succión, representa el exceso de presión de aire sobre la presión de agua. La elección de estas dos variables resulta de gran practicidad debido a su aplicación directa en técnicas experimentales como la translación de ejes.

Los primeros modelos constitutivos desarrollados para representar el comportamiento de cambio volumétrico de los suelos no saturados fueron modelos de tipo superficie de estado. En ellos se plantean expresiones semiempíricas que vinculan las variables de esfuerzo, tensión neta y succión, con el índice de vacíos de suelo, Figura 5.1 (Biot, 1941; Aitchison, 1967 y 1969; Matyas & Radhakrishna, 1968; Fredlund, 1977; Alonso & Lloret, 1985). Una extensa revisión sobre la posibilidad de describir el comportamiento de los suelos no saturados a partir de superficies de estado y su

deducción, fue presentada por Alonso & Lloret (1985). Si bien estos modelos representan un gran avance para entender y reproducir el comportamiento de cambio volumétrico, resultan insuficientes para explicar cierto tipo de fenómenos. Tal es el caso de la aparición de deformaciones no recuperables en procesos de humedecimiento y secado o la dependencia de las deformaciones con la trayectoria de tensiones.

En 1990 Alonso *et al.* presentaron un modelo constitutivo para suelos parcialmente saturados formulado en términos de elastoplasticidad y que utiliza como variables fundamentales la tensión neta y la succión de forma independiente. Este modelo, llamado Modelo Básico de Barcelona (Barcelona Basic Model, BBM), permite reproducir de manera unificada, múltiples aspectos del comportamiento observado en los suelos no saturados y que hasta ese momento se trataban en forma independiente. Una de las bases de esta formulación, es la consideración de los distintos mecanismos internos de cambio volumétrico que actúan en el suelo por efecto de las acciones externas. El modelo asume que los mecanismos de cambio volumétrico actuantes en el suelo por efecto de carga y/o mojado son similares y considera una misma superficie de fluencia para a ambos. Esta superficie se denomina superficie de carga y colapso (LC en la Figura 5.2), y representa el límite de comportamiento elástico frente a cambios en el nivel de carga y cambios en el contenido de agua del material. La posición y forma de dicha superficie está determinada por las características de la estructura interna del suelo y representa la variación de la carga de preconsolidación con la succión. Un suelo con una estructura abierta y poco rígida tendrá asociado un dominio elástico caracterizado por un valor de carga de preconsolidación bajo ( $LC_1$  en la Figura 5.3-a). Por otra parte, un suelo con una estructura cerrada y rígida, tendrá un dominio elástico con valores mayores ( $LC_2$  en la Figura 5.3-b). Las ideas planteadas en el modelo BBM representan un avance en la integración de aspectos fenomenológicos y estructurales del comportamiento de los suelos no saturados y constituyen un marco de referencia consistente para analizar la evidencia experimental existente.

En el caso de los suelos expansivos, la descripción del comportamiento requiere identificar y estudiar cuales son los mecanismos internos de cambio de volumen que actúan durante la expansión. Estos materiales se caracterizan por su gran contenido de minerales arcillosos, minerales con una gran superficie específica y que se agrupan formando paquetes de estructura laminar. La observación de la estructura interna de

estos materiales muestra que estos paquetes o conglomerados de partículas se pueden combinar dando lugar a diferentes arreglos estructurales (van Olphen 1977) (Figura 5.4). El fenómeno de expansión está asociado a la incorporación de moléculas de agua entre láminas de arcilla. Los factores que controlan este fenómeno fueron presentados por Ladd (1960) e interpretados a partir de la Teoría de la capa doble. Entre estos factores, la gran superficie específica de las partículas de arcilla aparece como un elemento fundamental en el fenómeno de expansión. En la literatura existen numerosas correlaciones entre las propiedades y características de los minerales arcillosos y su capacidad expansiva. Chen (1975), correlaciona el índice plástico con el potencial de expansión, mientras Seed *et al.* (1962) vinculan el porcentaje de minerales arcillosos y su actividad con el potencial de expansión (Figuras 5.5 y 5.6 respectivamente). Recientemente Mitchell (2003) analiza la vigencia del trabajo presentado por Ladd (1960).

Tomando en cuenta estos aspectos fenomenológicos y estructurales de estos materiales, Gens & Alonso (1992) plantean las bases para un modelo constitutivo orientado a materiales expansivos. En este trabajo se ponen en evidencia que los mecanismos de cambio volumétrico provocados por un humedecimiento o por un incremento en el nivel de carga, tienen asociados mecanismos internos diferentes. También se analizan aspectos del comportamiento de los suelos expansivos como la existencia de deformaciones no recuperables en ciclos de mojado y secado (Chu & Mou, 1973), la dependencia de la presión de expansión con la trayectoria de tensiones (Brackley, 1975) y se contrastan estos aspectos con las ideas propuestas en el modelo BBM. Las consideraciones necesarias para la descripción del comportamiento de materiales con características expansivas se pueden resumir en:

- Los suelos expansivos se caracterizan por la existencia de múltiples niveles estructurales.
- Se identifica un nivel microestructural formado por los conglomerados de partículas de arcilla y un nivel macroestructural, caracterizado por las acciones entre conglomerados de partículas de arcilla.
- El fenómeno de expansión tiene su origen a nivel microestructural

- El comportamiento a nivel macroestructural está controlado tanto por el efecto de la succión capilar y por el efecto de la carga.

Posteriormente, Alonso *et al.* (1994) tomando estas ideas, formulan un modelo adecuado para reproducir los aspectos fundamentales del comportamiento de los suelos expansivos, Modelo Expansivo de Barcelona (BExM, Barcelona Expansive Model). En él se integran aspectos fenomenológicos y estructurales del comportamiento de los suelos expansivos en una misma formulación constitutiva.

A continuación se describen de forma general las ideas propuestas por Gens & Alonso (1992), Alonso (1998), Alonso *et al.* (1999) y la formulación propuesta por Sanchez *et al.* (2001) para la modelación de materiales expansivos. Estos trabajos representan la base utilizada en el planteo de un modelo constitutivo adecuado para mezclas de pellets de bentonita. Se indican los distintos aspectos estructurales y fenomenológicos del comportamiento y se plantea su formulación constitutiva.

## **5.1 Modelo constitutivo para suelos expansivos estructurados**

Los pellets de bentonita son granulados de alta densidad que se obtienen a partir polvo de bentonita precalentado y compactado mediante una prensa de rodillos (apartado 1.2.1). De acuerdo con lo observado, las mezclas de pellets de bentonita presentan dos niveles o escalas estructurales claramente diferenciadas: una escala microestructural formada por los pellets de bentonita y una escala macroestructural, caracterizada por las interacciones entre pellets. En la Figura 5.7-a se muestra el aspecto de una muestra de pellets y sus distintos niveles estructurales. En la Figura 5.7-b, se presentan las distribuciones de tamaño de poros obtenidas en ensayos de intrusión de mercurio, para el caso de un pellet ( $\rho_d=1.95 \text{ Mg/m}^3$ ) y una mezcla de pellets ( $\rho_d=1.15 \text{ Mg/m}^3$ ).

La existencia de dos niveles o escalas estructurales con características muy diferenciadas tiene sus consecuencias a nivel fenomenológico. A continuación se presentan las bases utilizadas para el planteo de un modelo constitutivo adecuado para materiales expansivos estructurados. Se describen y formulan los distintos elementos del modelo para el caso de carga isótropa y se plantea su extensión al caso de carga triaxial.

## **5.2 Bases del modelo**

Para el planteo del modelo, se consideraron las características estructurales del material, se identificaron los distintos mecanismos internos de cambio de volumen y se planteó una formulación matemática adecuada.

De acuerdo con las observaciones realizadas, las mezclas de pellets de bentonita presentan dos niveles estructurales con características bien diferenciadas. Por un lado, un nivel microestructural caracterizado por la estructura de los pellets (unidades expansivas) y por otro un nivel macroestructural caracterizado por la estructura granular que conforman los pellets. Ambos niveles están vinculados de forma tal que condicionan el proceso de hidratación. Durante la inyección de agua en el material, el agua entra en el material a través de la red de macroporos y posteriormente se produce la hidratación y expansión de los pellets por intercambio de agua con la macroporosidad. Durante la primera etapa mientras las unidades granulares no sufren mayor cambio (la succión permanece casi constante), Figuras 5.8 y 5.9-a. Sin embargo, en la etapa posterior (Figura 5.9-b), los pellets se expanden invadiendo la macroporosidad provocando grandes cambios en las propiedades hidráulicas y mecánicas del material.

Existen distintos mecanismos internos de cambio de volumen que actúan por efecto de un cambio en el nivel de carga o por un humedecimiento. Los mecanismos de cambio volumétrico asociados a un proceso de carga a succión constante, se pueden observar comparando los resultados obtenidos en ensayos de intrusión de mercurio realizados muestras preparadas a diferentes valores de densidad seca. El proceso de compactación se puede asimilar a un proceso de carga a succión constante, Figura 5.10-a. Durante este proceso se observa una compresión asociada a una reducción del volumen de vacíos entre pellets. Por otra parte, como resultado de una trayectoria de humedecimiento a carga constante se produce un aumento de volumen. Este aumento está asociado a la aparición de un nuevo conjunto de poros de tamaño intermedio (Figura 5.10-b). Finalmente, en procesos de humedecimiento a volumen constante, se observa como de una estructura con una distribución de poros bi-modal en su estado de fábrica se pasa a una estructura con una distribución de poros tri-modal (Figura 5.10-c). Estas

observaciones nos muestran que los mecanismos de cambio volumétrico que aparecen por efecto de un humedecimiento o por la aplicación de carga son muy diferentes.

El marco conceptual planteado en el modelo BExM (Gens & Alonso, 1992) considera la existencia de dos niveles estructurales. Por un lado, un nivel macroestructural que describe la interacción entre conglomerados de partículas de arcilla y partículas de mayor tamaño (granos de arena y limo). Por otra parte, un nivel microestructural que describe el comportamiento de los conglomerados de partículas de arcilla causantes del fenómeno de expansión. Para describir el comportamiento del nivel macroestructural se utiliza un modelo elastoplástico de tipo BBM (Alonso *et al.* 1990). Mientras que para describir el comportamiento del nivel microestructural se plantea un modelo elástico. Para considerar las deformaciones no recuperables de expansión, se plantea la existencia de una interacción y acoplamiento constitutivo entre ambos niveles estructurales a partir de funciones de interacción. Este acoplamiento está definido a partir de dos superficies de fluencia SD y SI asociadas a trayectorias de mojado y secado de la microestructura.

En el trabajo presentado a continuación, se describe un modelo constitutivo para materiales expansivos estructurados basado en los trabajos de Gens & Alonso (1992), Alonso *et al.* (1995), (1999) y Sanchez *et al.* (2001). El modelo se presenta aplicado al caso particular de mezclas granulares de pellets de bentonita. Se realizan consideraciones sobre la irreversibilidad del proceso de hidratación de los pellets, la influencia del tamaño de los pellets en el comportamiento observado, el efecto del tipo de transferencia de agua utilizada en el proceso de hidratación del material y la influencia de la velocidad de aplicación de las condiciones de contorno durante el mojado. Para ganar claridad conceptual en el planteo del modelo, se desarrolla primero en condiciones de carga isótropa y posteriormente se extiende al caso de carga triaxial.

### **5.3 Modelo en condiciones de carga isótropa**

Se considera la existencia de dos niveles estructurales: un nivel macroestructural que describe el comportamiento y las interacciones entre pellets de bentonita y un nivel microestructural que describe el comportamiento de los pellets o unidades expansivas. Cada uno de los niveles estructurales se describe en forma independiente y

considerando las correspondientes variables de tensiones en cada caso (tensión media  $p$  y succión micro y macro:  $s_m$  y  $s_M$ ).

### 5.3.1 Nivel microestructural

El nivel microestructural está asociado al comportamiento hidromecánico de las unidades granulares expansivas (pellets). Se considera un modelo de tipo elastoplástico con dos superficies de fluencia SD y SI. Estas superficies definen los límites del comportamiento elástico y están asociadas al decremento e incremento de la succión respectivamente. Mediante la posición de estas superficies es posible considerar la evolución del contenido de agua del material (máximos y mínimos) a lo largo de su historia. Estas superficies indican la aparición de deformaciones no recuperables en procesos de humedecimiento y secado respectivamente. Ambas superficies se activan de forma independiente y no se considera la existencia de acoplamiento entre ambas. En la Figura 5.11 se representan el dominio elástico y las superficies de fluencia en el plano  $(p, s_m)$ .

El comportamiento de cambio volumétrico de la microestructura se considera determinado por una única variable. La tensión media neta a nivel microestructural, definida como:

$$\hat{p}_m = (p' + \chi s_m) \quad (5.2)$$

donde  $p' = (p - u_a)$  es la tensión media neta,  $s_m$  la succión micro y  $\chi$  un parámetro del modelo. Esto determina que a succiones altas, la acción de un incremento en la tensión media neta es casi imperceptible en el cambio volumétrico de la microestructura. Por el contrario, para valores de succión baja, un cambio en la tensión media tiene un mayor efecto en el cambio volumétrico.

#### 5.3.1.1 Régimen elástico

Las deformaciones elásticas a nivel microestructural se computan mediante una ley incremental de tipo logarítmico:

$$d\varepsilon_m^{el} = \frac{d\hat{p}_m}{K_m} \quad (5.3)$$

El coeficiente  $K_m$  representa la rigidez de la microestructura frente a los cambios de  $\hat{p}_m$ , para el que se considera una expresión de tipo:

$$K_m = \frac{(1 + e_m)}{\kappa_m} \hat{p}_m \quad (5.4)$$

Siendo  $\kappa_m$  un parámetro constante del modelo.

### 5.3.1.2 Superficie de fluencia

Las superficies de fluencia  $F_{SD}$  y  $F_{SI}$  representan los límites en el comportamiento elástico a lo largo de trayectorias de humedecimiento y secado respectivamente (Figura 5.11). Se consideran expresiones de tipo:

$$F_{SD} = (SD_0 - \hat{p}_m) = 0 \quad (5.5)$$

$$F_{SI} = (\hat{p}_m - SI_0) = 0 \quad (5.6)$$

$SD_0$  y  $SI_0$  representan los valores límites del comportamiento elástico para procesos de humedecimiento y secado respectivamente.

### 5.3.1.3 Régimen elastoplástico

Cuando se activa alguna de las superficies de fluencia,  $F_{SD}$  o  $F_{SI}$ , el material desarrolla deformaciones no recuperables. Los incrementos de deformación total micro  $d\varepsilon_{vm}^T$  a lo largo en régimen elastoplástico se computan a partir de la siguiente expresión:

$$d\varepsilon_{vm}^T = \frac{\lambda_{m\beta}}{(1 + e_m)} \cdot \frac{d\hat{p}_m}{\hat{p}_m} \quad (5.7)$$

$\beta = I, D$  corresponden a los coeficientes en trayectorias de secado y humedecimiento respectivamente.

### 5.3.1.4 Endurecimiento

Como parámetros de endurecimiento de cada una de las superficies de fluencia se toman  $SD_0$  y  $SI_0$ . La ley de endurecimiento (cambio en la posición de las superficies) se considera dependiente del incremento de deformación plástica de la microestructura  $d\varepsilon_{vm}^{pl}$  de acuerdo con la expresión:

$$\frac{dS\beta_0}{S\beta_0} = \frac{(1 + e_m)}{(\lambda_{m\beta} - \kappa_m)} d\varepsilon_{vm}^{pl} \quad (5.8)$$

$\beta = D, I$  indican la superficie activada, humedecimiento y secado respectivamente.

### 5.3.1.5 Síntesis del comportamiento del modelo microestructural

A los efectos de investigar el comportamiento previsto por el modelo para la microestructura, se presenta la respuesta del modelo a lo largo de trayectorias de humedecimiento a volumen constante y humedecimiento a carga constante. La evolución de la presión de hinchamiento a lo largo de una trayectoria de humedecimiento a volumen constante a nivel de la microestructura se representa en forma simplificada en la Figura 5.12. Al inicio del ensayo, la trayectoria de tensiones se desarrolla a lo largo del dominio elástico y la presión de hinchamiento crece en función del parámetro elástico  $\kappa_m$  (tramo 1-2 en la Figura 5.12). Al continuar decreciendo la succión, se activa la superficie  $F_{SD}$  y se produce un cambio en la pendiente de la curva de presión de hinchamiento (tramo 2-3 en la Figura 5.12). A lo largo de esta segunda etapa, la superficie  $F_{SD}$  es arrastrada hacia su nueva posición que se computa a partir de la evolución del parámetro  $SD_0$  según la ley de endurecimiento, expresión (5.7).

Para el caso de una trayectoria de humedecimiento a carga constante (Figura 5.13), la evolución de la deformación volumétrica muestra una primera etapa elástica (tramo 1-2 en la Figura 5.13). En esta etapa, se registran deformaciones de expansión en la microestructura de acuerdo con la expresión (5.3). En una segunda etapa, se activa la superficie de fluencia  $F_{SD}$  y se computan deformaciones de expansión no recuperables. A lo largo de esta segunda etapa, las deformaciones siguen la expresión incremental

$$d\varepsilon_{vm}^T = \frac{\lambda_{mD}}{(1+e_m)} \cdot \frac{d\hat{p}_m}{\hat{p}_m} \text{ y se desplaza la superficie de fluencia hacia una nueva posición}$$

determinada por el valor de  $SD_0$ .

La caracterización de la microestructura en el laboratorio se realizó a partir de ensayos de humedecimiento a volumen constante y humedecimiento a carga constante. Ensayos realizados sobre muestras de bentonita preparadas a un valor de densidad seca igual a la de los propios pellets (unidades microestructurales:  $\rho_d = 1.90 \text{ Mg/m}^3$ ). Los parámetros  $\kappa_m$  y  $\lambda_{m\beta}$  así como la posición de superficies  $F_{SD}$  y  $F_{SI}$  dependen de las características de los pellets (minerales arcillosos activos, densidad seca, humedad inicial) y el proceso de fabricación.

### 5.3.2 Nivel macroestructural

El nivel macroestructural describe la interacción del conjunto de pellets entre si. Para ello se adoptó el modelo elastoplástico BBM propuesto por Alonso *et al.* (1990). Este modelo resulta especialmente adecuado para representar el comportamiento de materiales susceptibles de colapso y con una moderada o baja capacidad expansiva. En él se considera que los mecanismos internos de cambio de volumen que actúan en el suelo debido a un aumento en el nivel de carga o por efecto del humedecimiento, están asociados al reacomodo de granos de arena o conglomerados de partículas de arcilla. Se considera una zona de comportamiento elástico limitada por dos superficies de fluencia (Figura 5.14). Una superficie asociada a trayectorias de carga y colapso (superficie LC) y una segunda superficie que toma en cuenta el incremento de la cohesión aparente  $p_s$  con la succión, superficie  $F_S$ .

#### 5.3.2.1 Régimen elástico

A nivel macroestructural se consideran en forma independiente los cambios volumétricos provocados por un cambio de tensión media neta ( $p'$ ) y cambios de succión ( $s_M$ ). Las deformaciones volumétricas elásticas se computan a partir de:

$$d\varepsilon_{vM}^{el} = \frac{dp'}{K_{pM}} + \frac{ds_M}{K_{sM}} \tag{5.9}$$

donde

$$K_{pM} = \frac{(1+e)p'}{\kappa_i} \quad (5.10)$$

representa el coeficiente de compresibilidad frente a cambios en el valor de la tensión media neta  $p'$  y

$$K_{sM} = \frac{(1+e)(s_M + p_{atm})}{\kappa_s} \quad (5.11)$$

es el coeficiente de compresibilidad frente al cambio de succión.

### 5.3.2.2 Superficie de fluencia

Las superficies de fluencia de la macroestructura, superficie de carga y colapso (LC) y superficie  $F_s$ , determinan los límites del comportamiento elástico frente a trayectorias de carga y humedecimiento. La forma y la posición de la superficie LC está determinada por el cambio en el valor de la presión de preconsolidación con la succión ( $p_0(s_M)$ ). Un material con una macroestructura abierta, con un valor de densidad seca bajo y con una baja sobreconsolidación, tiene asociada una superficie de fluencia de carga y colapso (LC) con valores de preconsolidación  $p_0$  bajos. Por el contrario, en el caso de estructuras granulares más densas y cerradas, con un fuerte grado de sobreconsolidación, la posición de la superficie de fluencia se desplaza a valores de  $p_0$  más altos. En la Figura 5.15 se muestra la posición de la superficie LC para dos materiales con diferentes niveles de empaquetamiento. En el caso de las mezclas de pellets de bentonita, la posición inicial de la superficie LC queda determinada por el grado de empaquetamiento de los pellets alcanzado durante el proceso de compactación. La variación de  $p_0$  con la succión (superficie LC) está dada por la expresión:

$$p_0(s_M, p_0^*) = p^c \left( \frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{(\lambda(0) - \kappa_{s0})}{(\lambda(s_M) - \kappa_s(s_M))}} \quad (5.12)$$

donde  $p_0^*$  es el valor de la presión de preconsolidación para el suelo en condiciones saturadas y  $p^c$  es un valor de carga de referencia.  $\lambda(s_M)$  es el coeficiente de compresibilidad elastoplástica para una succión  $s_M$ . Alonso *et al.* (1990) proponen:

$$\lambda(s_M) = \lambda(0) \cdot [r + (1-r)e^{-\beta s_M}] \quad (5.13)$$

Donde  $\lambda(0)$  es el valor de dicho coeficiente en condiciones saturadas,  $r$  y  $\beta$  parámetros que definen la forma de dicha superficie.

Por su parte, la superficie  $F_s$ , considera el aumento de la cohesión aparente con la succión  $p_s$ . Se propone un aumento lineal con la succión de acuerdo con la expresión:

$$p_s = -ks_M \quad (5.14)$$

### 5.3.2.3 Régimen elastoplástico

Cuando la trayectoria de tensiones activa la superficie de fluencia LC, se producen deformaciones no recuperables. En régimen elastoplástico, los incrementos de las deformaciones plásticas se computan a partir de la expresión:

$$d\varepsilon_{vM}^{pl} = \frac{(\lambda(0) - \kappa_{i0})}{(1+e)} \frac{dp_0(s_M)}{p_0(s_M)} \quad (5.15)$$

### 5.3.2.4 Endurecimiento

La activación y desplazamiento de la superficie de fluencia LC se computa a partir del parámetro de endurecimiento  $p_0^*$  y depende del incremento de deformaciones plásticas  $d\varepsilon_{vM}^{pl}$ . La ley incremental se escribe como:

$$d\varepsilon_{vM}^{pl} = \frac{(\lambda(0) - \kappa_{p0})}{(1+e)} \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (5.16)$$

### 5.3.2.5 Síntesis del comportamiento del modelo macroestructural

A los efectos de identificar y caracterizar los patrones del comportamiento previstos en el modelo a nivel macroestructural, se estudió la respuesta prevista por el modelo macro a lo largo de trayectorias de humedecimiento a carga y a volumen constante.

Para el caso trayectorias de humedecimiento a carga constante, se analizó la respuesta del modelo considerando dos mezclas de pellets con diferente densidad seca y siguiendo la misma trayectoria de tensiones. Los distintos niveles de empaquetamiento o densidad seca se toman en cuenta a partir de dos condiciones. Por un lado, la elección de los parámetros de rigidez elástica ( $\kappa_i$ ) y elastoplástica ( $\lambda(s_M)$ ) y la posición de la superficie de fluencia LC ( $p_0^*$  y  $p^c$ ). Se considera una mezcla con un valor de densidad seca bajo (estructura “abierta”) y una mezcla con un valor de densidad seca más alto (estructura “cerrada”), indicadas en la Figura 5.15.

En el caso de mezclas granulares abiertas y poco densas, la trayectoria de tensiones se desarrolla inicialmente a lo largo del dominio elástico (tramo 1-2 en la Figura 5.16). En esta etapa el modelo predice deformaciones moderadas de expansión. En este caso y dado que se trata de una estructura abierta los valores asumidos para los parámetros de rigidez elástica de la macroestructura predicen una muy baja expansión. En una segunda etapa, la trayectoria de tensiones activa la superficie de fluencia LC y se observan deformaciones de colapso (tramo 2-3 en la Figura 5.16). En esta segunda etapa se produce el colapso de la estructura granular por efecto de la caída de la resistencia de los contactos entre gránulos y se reducen los vacíos asociados a los espacios entre pellets ( $e_M$ ). Como resultado de este proceso de colapso, se obtiene una estructura granular más densa y con un valor de carga de preconsolidación  $p_0^*$  mayor al inicial ( $p_{00}^* \leq p_{01}^*$ ).

En el caso de una mezcla más densa y con una estructura granular más cerrada, la posición inicial de la superficie LC se encuentra desplazada a valores de  $p_0$  más altos (Figura 5.17). En el tramo elástico (tramo 1-2 en Figura 5.17) la trayectoria de humedecimiento provoca la relajación de los esfuerzos intergranulares y se computan deformaciones de expansión. La magnitud de estas deformaciones resulta mayor a las del caso anterior debido a las características más rígidas del material. En una segunda etapa y dependiendo de la posición de la superficie de fluencia LC y del nivel de carga aplicado, se registran deformaciones de colapso (tramo 2-3 en la Figura 5.17). Por efecto del colapso, se produce el endurecimiento de la curva LC que se desplaza hacia valores de  $p_0^*$  mayores.

En el caso de una trayectoria de humedecimiento a volumen constante, la trayectoria de tensiones se desarrolla de acuerdo a la Figura 5.18. En una primera parte la trayectoria se desarrolla a lo largo del dominio elástico (tramo 1-2 en la Figura 5.18) y se observa un incremento de la presión de hinchamiento de acuerdo con la expresión incremental

$$\frac{dp'}{K_{pM}} = -\frac{ds_M}{K_{sM}}.$$

Cuando la trayectoria de tensiones alcanza a la superficie de fluencia, aparecen deformaciones no recuperables asociadas a fenómenos de colapso y endurecimiento de la superficie LC. La presión de hinchamiento disminuye para poder compensar estas deformaciones de compresión (tramo 2-3 en la Figura 5.18).

En los modelos elastoplásticos descritos anteriormente, se consideró una plasticidad asociada (el potencial plástico y la superficie de fluencia coinciden). La consideración de una plasticidad no asociada, se puede tratar en forma análoga sin introducir mayores modificaciones en la formulación.

## 5.4 Modelo en condiciones de carga triaxial

### 5.4.1 Nivel microestructural

La extensión al estado de carga triaxial (p,q,s) del modelo para el caso de la microestructura se plantea considerando que el comportamiento de la microestructura es puramente volumétrico. Esto determina que las superficies de fluencia, son independientes del esfuerzo desviador Figura 5.19-a. Las expresiones de las superficies de fluencia para el decremento e incremento de succión son:

$$F_{SD} = (SD_0 - \hat{p}_m) = 0 \quad (5.17)$$

$$F_{SI} = (\hat{p}_m - SI_0) = 0 \quad (5.18)$$

La convención de signos se tomó de forma de mantener la condición de  $F < 0$  en el dominio elástico.

#### 5.4.2 Nivel macroestructural

En el caso de la macroestructura, la extensión del modelo constitutivo al plano triaxial se realiza tomando un modelo de tipo Cam Clay. El modelo Cam Clay es adecuado para representar el comportamiento de materiales cohesivos en su estado saturado. Tomando la condición saturada como condición de contorno, se asume un comportamiento de tipo Cam Clay para valores de succión constante. La expresión de la superficie de fluencia en el espacio  $(p, q, s_M)$  es:

$$F_{Macro}(p, J, s, p_o^*) = \left[ \frac{J^2}{g^2(\theta)(p + p_s)^2} \right] - \left[ \frac{(p_o - p_s)}{(p + p_s)} \right] = 0 \quad (5.19)$$

donde  $p$  es la tensión media neta,  $J^2 = \frac{1}{2} \text{trace}(S^2)$  siendo  $S = \sigma^* - mp$  y  $m' = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$ .  $g(\theta)$  representa la variación de la superficie de fluencia en el plano

desviador y  $\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\det S}{J^3} \right)$ . Los valores de  $p_o$  y  $p_s$ , que representan la

presión de preconsolidación y la cohesión aparente se evalúan de acuerdo con las expresiones (5.12) y (5.14) respectivamente. La superficie de fluencia para el nivel macroestructural se presenta en la Figura 5.19-b.

#### 5.5 Interacción y acoplamiento entre niveles estructurales

Hasta el momento se han definido dos niveles estructurales: un nivel asociado a la interacción entre unidades granulares o macroestructura y un nivel asociado al comportamiento expansivo de las unidades granulares o microestructura. Para cada uno de ellos se ha formulado un modelo constitutivo independiente. Queda por definir en que forma se produce la interacción entre ambos niveles estructurales. Esto es, plantear la interacción física y acoplamiento constitutivo para integrar la respuesta de ambos niveles y obtener un comportamiento global. Para ello se sustituye el medio real por un medio equivalente formado por elementos idealizados. Se asume una dinámica de flujo, se aplican condiciones de compatibilidad entre desplazamientos y deformaciones en ambos niveles estructurales y se integran en un sistema de referencia único.

### 5.5.1 Idealización del medio y dinámica de flujo

Las mezclas de pellets son estructuras formadas por un conjunto de partículas granulares que presentan gran trabazón e imbricación entre sí (Figura 5.20-a). A los efectos de plantear el vínculo entre los distintos niveles estructurales, se sustituye el medio real por un medio equivalente. El medio equivalente está formado por un conjunto de elementos con idénticas propiedades (volumen representativo, Figura 5.20-b). La idealización propuesta considera que el medio equivalente está formado por partículas esféricas de igual tamaño ( $\phi = \phi_{\text{caract. Pellet}}$ ), y donde  $\phi_{\text{caract. Pellet}}$  representa el tamaño característico de los pellets deducido a partir de la curva granulométrica de la mezcla. En la Figura 5.21, se muestra un esquema de la idealización propuesta. Cada elemento del medio está formado por una parte microestructural, compuesta por un pellet esférico de tamaño  $\phi_{\text{caract. Pellet}}$  y una parte macro que depende de la densidad seca global de la mezcla. Ambos niveles estructurales están vinculados de forma jerárquica de tal manera que la microestructura recibe las acciones externas a partir de la macroestructura. Las unidades microestructurales no están conectadas entre sí. A partir de la idealización propuesta se establece una dinámica de flujo que se puede describir de la siguiente manera:

- El agua entra en el suelo a lo largo de la red de macroporos interconectados
- Posteriormente la microestructura se hidrata intercambiando agua con la macroestructura en forma local.
- Los pellets o unidades microestructurales de cada elemento no están conectados entre sí. No existe intercambio de agua entre ellos.
- La microestructura se considera como un término fuente o sumidero de la macroestructura en las ecuaciones de balance global del elemento correspondiente.

En la Figura 5.21 se presenta un esquema de la dinámica de flujo anteriormente descrita. La idealización propuesta tiene su base en las observaciones experimentales tanto fenomenológicas (ensayos de infiltración y permeabilidad) como estructurales (microscopía electrónica y porosimetrías de mercurio).

### 5.5.2 Acoplamiento y compatibilidad entre niveles estructurales

El medio equivalente o idealizado se puede considerar como la suma de dos medios distintos: un medio global, formado por elementos interconectados entre si y otro medio formado por elementos independientes entre si e interiores a cada uno de los elementos del medio global, Figura 5.22. En este caso se plantea la existencia de un acoplamiento definido por la compatibilidad de:

- El desplazamiento de la superficie del pellet o interfase micro-macro ( $\Delta u_{m,K}$ )
- El volumen de agua intercambiado entre ambos niveles estructurales ( $f_{M \rightarrow m}$ ).  
Término que aparece como fuente o sumidero de la macroestructura en las ecuaciones de balance de masa a nivel global.

Esto determina que los procesos de carga y humedecimiento actúan de forma independiente sobre cada uno de los niveles estructurales y el resultado del comportamiento global resultará de la composición de ambas respuestas. En la Figura 5.23 se representa el acoplamiento planteado para un elemento idealizado.