

Capítulo 8: Comparación entre el comportamiento real y el previsto por el modelo.

En la utilización de las mezclas de pellets de bentonita como material aislante en la construcción de almacenamientos subterráneos para residuos radioactivos de larga duración, el material se instala con un muy bajo contenido de agua (3-6%). Una vez instalado comienza la etapa de hidratación hasta que se completa la saturación (estado de servicio). Uno de los aspectos determinantes en el diseño de este tipo construcciones es el tiempo necesario para que el material alcance la saturación. De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos anteriormente, la hidratación de la barrera está influenciada por las condiciones de contorno (condiciones naturales de hidratación y características del sistema hidratación artificial).

En los capítulos anteriores se planteó un modelo constitutivo para materiales expansivos estructurados utilizando las ideas planteadas por Alonso *et al.* (1999) en el modelo BExM. El modelo propuesto se implementó en un código numérico utilizando la técnica de las diferencias finitas y se propuso una metodología para la deducción de los parámetros del modelo. Para validar la formulación propuesta resulta útil comparar los comportamientos reales y los previstos por el modelo para los distintos ensayos. A continuación se presenta una comparación entre los resultados experimentales y las predicciones del modelo para distintos ensayos. Se consideraron ensayos de humedecimiento a carga constante y ensayos de humedecimiento a volumen constante. En el primer caso se simuló los ensayos realizados utilizando dos tipos de transferencia de agua diferentes, transferencia en forma de vapor y líquido (apartado 4.3.1). En el caso de los ensayos de humedecimientos a volumen constante se exploraron las capacidades del modelo para reproducir el efecto de un incremento en la densidad seca del material (ensayos presentados en el apartado 4.2.7) y la influencia de la presión de inyección (ensayos presentados en el apartado 4.3.3).

8.1 Ensayos de humedecimiento a carga constante. Transferencia líquida y transferencia de vapor.

8.1.1 Descripción de los ensayos y comportamiento experimental observado

A lo largo del programa experimental se realizaron ensayos de humedecimiento a carga constante utilizando dos tipos de transferencia de agua (en forma líquida y en forma de vapor). En el ensayo de humedecimiento por transferencia líquida se saturó la muestra por inundación y se midió la evolución del contenido de agua. La succión se dedujo a partir de la curva de retención del material. Por otra parte, en el ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor se controló la humedad relativa del aire en los vacíos de la muestra utilizando soluciones salinas. En este caso se realizó un humedecimiento por etapas desde 250 MPa A efectos de comparar los resultados experimentales con las capacidades del modelo se estudiaron los ensayos realizados sobre muestras con un valor de densidad seca de 1.3 Mg/m^3 y con una carga vertical de 300 kPa. Las trayectorias de tensiones y características del ensayo se muestran en la Figura 4.46.

De acuerdo con lo descrito en el apartado 4.3.1, ambos ensayos presentaron comportamientos y respuestas constitutivas diferentes (Hoffmann *et al.* 2003). En el ensayo de transferencia líquida (mojado por inundación) se observa un comportamiento inicial de colapso seguido de deformaciones de expansión y finalmente, muy próximo a la saturación, un colapso adicional (Figuras 4.46-a y 4.47-a). En el ensayo realizado utilizando transferencia de vapor, se observan deformaciones de expansión desde un comienzo del humedecimiento hasta que se alcanza el valor límite correspondiente a una succión de 3 MPa (CuSO_4). A partir de este punto y debido a la inundación con agua, se observan deformaciones de colapso seguidas de deformaciones de expansión (tramo B-C en Figuras 4.46-b y 4.47-b).

La interpretación de estos ensayos requiere considerar la existencia de dos potenciales de agua diferentes que coexisten en el suelo. Un potencial asociado al almacenamiento de agua en los vacíos entre pellets (succión macroestructural) y un potencial asociado al almacenamiento de agua en los vacíos interiores al pellet (succión microestructural). Durante el ensayo de saturación por inundación, el agua entra en la muestra llenando la

macroporosidad y reduciendo la succión correspondiente a dicho nivel estructural. Las fuerzas intergranulares se debilitan y se produce el colapso de la estructura granular. Un instante posterior los pellets de bentonita comienzan a hidratarse intercambiando agua con los macroporos y se observa un comportamiento global de expansión. A partir de este momento, los pellets continúan hidratándose intercambiando agua con los macroporos hasta alcanzar el equilibrio (se igualan los potenciales micro y macro). Por otra parte en el ensayo de humedecimiento realizado utilizando transferencia de vapor, la velocidad de humedecimiento está limitada por la capacidad de transportar e intercambiar agua del aire circulante a través de los poros de la muestra. La transferencia de agua se produce en forma lenta y permite que ambos potenciales evolucionen sustancialmente en equilibrio, ($s_M \approx s_m$). En este caso las fuerzas intergranulares se debilitan muy lentamente, mientras los pellets de bentonita se hidratan experimentando deformaciones de expansión, invadiendo la macroporosidad y aumentando los contactos intergranulares. Como resultado se observan deformaciones netas de expansión desde un comienzo del ensayo.

8.1.2 Interpretación y modelación constitutiva

Para poder reproducir el comportamiento observado es necesario conocer la evolución de la succión en ambos niveles estructurales s_M y s_m y resolver un sistema de ecuaciones acoplado. Sin embargo como primera aproximación, es posible determinar la evolución de la succión en ambos niveles estructurales para ciertas etapas de cada ensayo sin introducir grandes errores y realizar una modelación de tipo constitutiva. Esta modelación se obtiene aplicando las ecuaciones constitutivas del modelo mecánico de forma directa sobre cada una de las etapas del ensayo. En el caso del ensayo utilizando agua líquida se asume que la macroestructura se satura de formas casi instantánea debido a su mayor permeabilidad respecto de la microestructura. Posteriormente la succión microestructural evoluciona en búsqueda del equilibrio de forma más lenta y retrasada respecto de la primera. En el ensayo realizado por transferencia de vapor, se asume que ambas succiones evolucionan esencialmente en equilibrio debido a las características de la transferencia de agua asociada a la técnica de transferencia de vapor.

8.1.2.1 Ensayo de humedecimiento por inundación con agua líquida

En el ensayo de saturación por inyección de agua, la macroestructura se satura de forma casi instantánea provocando una reducción drástica de la succión en este nivel. En esta primera etapa la succión a nivel macroestructural se hace cero ($s_M \approx 0$) mientras que la succión a nivel microestructural permanece constante ($s_m \approx s_{m0}$ Figuras 8.1-a y 8.1-b). Las fuerzas entre pellets disminuyen por efecto del humedecimiento favoreciendo la ocurrencia del colapso de la macroestructura que resulta dependiente del nivel de carga y que está controlado por la posición de la superficie de fluencia LC_1 en la Figura 8.1-a. En este período, la trayectoria de tensiones activa la superficie LC_1 y la arrastra hacia una nueva posición LC_2 computándose deformaciones de colapso. Luego de esta primera etapa los pellets comienzan a hidratarse intercambiando agua con los poros de la macroestructura, la succión micro decrece y la microestructura expande (Figuras 8.1-c y 8.1-d). Al principio de este proceso, los pellets desarrollan deformaciones de expansión elásticas (Figuras 8.1.d). Posteriormente la succión microestructural continúa decreciendo, se “activa” la superficie de fluencia SD_1 y aparecen deformaciones no recuperables de expansión (Figuras 8.1-e y 8.1-f).

8.1.2.2 Ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor

En el caso del ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor, la velocidad de hidratación es mucho más lenta ya que depende de la disponibilidad de agua existente en el flujo de aire circulante por la muestra. La menor velocidad de humedecimiento permite que ambos niveles estructurales evolucionen manteniendo el equilibrio ($s_M \approx s_m$). Asumiendo este equilibrio podemos representar las trayectorias de tensiones correspondientes a ambos niveles estructurales donde se pueden identificar dos etapas diferentes. Una etapa inicial donde ambas succiones (macro y micro) decrecen, se debilitan los contactos intergranulares al tiempo que en la microestructura se desarrollan deformaciones de expansión elásticas (Figuras 8.2-a y 8.2-b). Posteriormente continúa decreciendo la succión, se activan las superficies de fluencia y se producen deformaciones no recuperables (Figuras 8.2-c y 8.2-d). El resultado observado a lo largo de este ensayo depende de la intensidad e interacción de ambos mecanismos. En este caso, la primera parte del ensayo está dominada por las deformaciones de expansión mientras que durante la parte final del ensayo es el colapso quien controla el comportamiento del material.

8.1.3 Modelación hidromecánica acoplada

Para poder reproducir el comportamiento observado considerando su evolución en el tiempo es necesario resolver el problema hidromecánico de forma acoplada. Se deben tener en cuenta las leyes constitutivas del modelo mecánico e hidráulico (leyes de flujo, parámetros hidráulicos y la curva de retención). A partir de los resultados experimentales reportados en el Capítulo 4 se ajustaron los valores de los parámetros de las distintas leyes constitutivas del material y se planteó el modelo de forma acoplada. A continuación se presenta una comparación entre los resultados experimentales y la respuesta prevista por el modelo considerando una modelación de tipo acoplada. Se consideró el mismo conjunto de parámetros para ambos ensayos y únicamente se varían las condiciones de contorno. Los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 8.1.

8.1.3.1 Ensayos de humedecimiento a carga constante por inundación

En la Figura 8.3 se presenta la evolución temporal de la deformación vertical relativa ($\Delta H/H_0$) obtenida en el ensayo real y la evolución prevista por el modelo. Se observa una buena correspondencia entre ambas curvas a lo largo de casi todo el ensayo. Al final del ensayo se observa cierta discrepancia entre los resultados experimentales y el modelo. El fenómeno de colapso final, evidencia la existencia de un acoplamiento de tipo constitutivo entre los mecanismos de deformación ocurrentes en cada uno de los niveles estructurales. Fenómenos de acoplamiento similares se han observado en ensayos de carga a succión constante y en ensayos de presión de hinchamiento (apartado 4.2.3).

La evolución en el tiempo de la succión macro y la succión micro correspondientes al modelo se presentan en la Figura 8.4. A lo largo del ensayo se distinguen tres etapas con comportamientos bien diferenciados. Una primera etapa caracterizada por la diferencia en la conductividad hidráulica de ambos medios y donde la succión macro disminuye mientras la succión micro permanece casi constante. Se observa que al cabo de $T_I=40$ segundos, la macroestructura se encuentra completamente saturada ($s_m = 0.01$ MPa), mientras que la succión micro permanece en un valor cercano al inicial ($s_m = 287$ MPa). En una segunda etapa, el valor de la succión en ambos niveles estructurales permanece casi constante y no se observan cambios en la deformación volumétrica de la muestra. Finalmente, la microestructura comienza a hidratarse y se registra un aumento de la

deformación vertical. La evolución de las trayectorias de tensiones a lo largo de cada una de las etapas expresadas en términos de succión y tensión vertical neta se indican en la Figura 8.5 para ambos niveles estructurales.

8.1.3.2 Ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando transferencia de vapor

El ensayo de humedecimiento utilizando transferencia de vapor se simuló considerando un humedecimiento por etapas. En la Figura 8.6 se presentan de forma comparada la evolución temporal de la deformación vertical relativa ($\Delta H/H_0$) obtenida durante el ensayo real y el comportamiento previsto por el modelo. Se observa que el modelo es capaz de reproducir de muy buena forma el comportamiento real observado. En la Figura 8.7 se presenta la evolución de la succión macro y micro obtenidas en el modelo. La utilización de un humedecimiento por transferencia de vapor permite que la succión en ambos niveles estructurales evolucione esencialmente en equilibrio a lo largo de las diferentes etapas. Durante las etapas de humedecimiento por vapor se producen deformaciones de expansión asociadas a la hidratación de la micro y macroestructura. Al llegar a la última etapa de humedecimiento se satura la muestra en una única etapa de inundación. En esta etapa se producen deformaciones de colapso seguidas de deformaciones de expansión. El modelo es capaz de reproducir este comportamiento de forma muy satisfactoria. La evolución de las trayectorias de tensiones a lo largo de cada una de las etapas (expresadas en términos de succión y tensión vertical neta) se indican en la Figura 8.8.

8.2 Ensayos de presión de hinchamiento

8.2.1 Descripción del ensayo. Resultados e interpretación del comportamiento observado

De acuerdo con lo descrito en el apartado 4.2.2, se realizaron ensayos de humedecimiento a volumen constante sobre muestras con distintos valores de densidad seca. Las muestras se saturaron por inundación con agua líquida y se midió la presión de hinchamiento vertical y la variación del contenido de agua en la muestra. La succión en la muestra se dedujo a partir del contenido de agua y la curva de retención. En la Figura 8.9 se presenta la evolución de la presión vertical de hinchamiento obtenida en ensayos realizados sobre muestras con una densidad seca de 1.5 Mg/m^3 (ensayos VC15-1 y VC15-2). Los resultados experimentales muestran que la evolución de la presión de hinchamiento presenta dos ramas o etapas de crecimiento que evolucionan a diferente velocidad. Al comienzo del ensayo se observa una primera etapa en la que se incrementa la presión de hinchamiento. Luego de esta primera etapa, el incremento de la presión vertical se detiene y se mantiene casi constante mientras la muestra continúa hidratándose. Finalmente, luego de esta etapa intermedia, se observa una nueva rama de crecimiento en la presión de hinchamiento hasta completar la saturación.

El comportamiento observado se puede interpretar considerando las características estructurales del material de la siguiente manera. Al comienzo del ensayo el agua entra a través de la macroestructura (más permeable) y la succión en este nivel estructural disminuye. A lo largo de esta etapa, la presión de hinchamiento crece fundamentalmente debido a las características de la macroestructura. Posteriormente, la microestructura comienza a hidratarse intercambiando agua con el nivel macro y se observa una etapa de transición. El hinchamiento de la microestructura es compensado por el colapso de la macroestructura. Finalmente y con la macro ya saturada, la presión de hinchamiento continúa creciendo hasta que la microestructura alcanza la saturación.

8.2.2 Modelación acoplada Vs resultados experimentales

A los efectos de comparar los resultados experimentales con las capacidades del modelo se modelaron los resultados obtenidos en el ensayo VC15-1. Los parámetros utilizados

se ajustaron a partir de los valores de referencia presentados en el Capítulo 7 y se resumen en la Tabla 8.2. La comparación entre el comportamiento real y el previsto por el modelo se muestra en la Figura 8.10 y las trayectorias de tensiones seguidas a lo largo del ensayo para cada uno de los niveles estructurales se presentan en la Figura 8.12. Se observa que el modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento observado. Analizando los resultados obtenidos, las trayectorias de tensiones correspondientes a cada nivel estructural, se pueden distinguir varias etapas. Una primera etapa en la que la entrada de agua está dominada por la conductividad hidráulica de la macroestructura y la succión macro disminuye mientras que la succión micro permanece casi constante (etapa I en las Figuras 8.11 y 8.12). Durante esta etapa, la evolución de la presión de hinchamiento está caracterizada por las características elásticas de la macroestructura dadas por la relación incremental:

$$d\sigma_v = -\frac{K_{pM}}{K_{sM}} ds_M \quad (8.1)$$

Luego de esta etapa inicial, se observa un fenómeno de redistribución interna de agua. La microestructura demanda agua de la macroestructura y se observa que la succión micro disminuye mientras que la macro aumenta (se produce un fenómeno de “secado” de la macroestructura). A lo largo de esta etapa, la velocidad del incremento de la carga vertical disminuye (etapa indicada como II en la Figura 8.11). Finalmente, luego de esta etapa intermedia, la succión en ambos niveles estructurales continúa decreciendo hasta alcanzar la saturación (etapa III en las Figuras 8.11 y 8.12).

8.3 Ensayos de humedecimiento a volumen constante. Influencia de la presión de inyección de agua

En los ensayos realizados durante el programa experimental, se estudió la influencia de la presión de inyección de agua en la respuesta de hinchamiento del material. Se realizaron ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando distintos valores de presión de inyección (ver apartado 4.3.3). Estos ensayos se realizaron sobre muestras con densidad seca de 1.3 Mg/m^3 . A continuación se presentan de forma comparada los resultados experimentales y los comportamientos previstos por el modelo para estos ensayos. Primero se describen los procedimientos utilizados y el comportamiento experimental observado y posteriormente se presenta la comparación entre los

resultados experimentales y las predicciones del modelo. Para la selección de los valores de los parámetros del modelo se tomaron como valores de partida los reportados en los Capítulos 4 y 7.

8.3.1 Descripción de los ensayos y comportamiento experimental observado

De acuerdo con lo descrito en el apartado 3.3.2 y para estudiar el efecto de la velocidad de inyección de agua en el desarrollo de la presión de hinchamiento, se realizaron dos ensayos de humedecimiento a volumen constante sobre muestras con una densidad seca de 1.3 Mg/m^3 aplicando diferentes presiones de inyección de agua. En un primer caso se aplicó una presión de inyección correspondiente a una carga hidráulica de 2 m (20 kPa) y en el segundo caso, una presión de inyección de 200 kPa (ensayos VC13-W-2 y VC13-W-20 respectivamente). En cada uno de los ensayos se controló la variación del contenido de agua en la muestra y la presión de hinchamiento vertical. La evolución de la succión para cada uno de los ensayos se dedujo a partir del contenido de agua y de la curva de retención correspondiente. En la Figura 8.13 se muestra la evolución de la presión de hinchamiento y el grado de saturación para ambos ensayos. Para poder comparar la respuesta constitutiva del material en ambos ensayos, se consideró la evolución de la presión de hinchamiento vertical en función del grado de saturación de la muestra (Figura 8.14). De acuerdo con los resultados reportados en el apartado 4.3.3 se identifican respuestas constitutivas diferentes. En el ensayo realizado utilizando una presión de inyección correspondiente a 20 kPa, la presión de hinchamiento aumenta en correspondencia con el aumento del grado de saturación desde el comienzo del ensayo. Se observa un aumento de la presión de hinchamiento hasta alcanzar un máximo de 0.69 MPa en correspondencia con un grado de saturación de 0.57. Posteriormente decrece y vuelve a crecer llegando a un valor final de 0.62 MPa (Figura 8.14). Por el contrario, en el caso del ensayo realizado utilizando una presión de inyección correspondiente a 200 kPa, se produce una gran entrada de agua durante el primer minuto de inyección. En esta primera etapa del ensayo el grado de saturación en la muestra pasa de 0.2 hasta 0.9 y no se observa un incremento significativo en la presión de hinchamiento. Posteriormente la presión de hinchamiento comienza a crecer en correspondencia con el aumento en el grado de saturación hasta alcanzar un valor máximo de 0.72 MPa al final del ensayo (Figura 8.14).

La diferencia en la presión de inyección de agua utilizada en ambos ensayos provoca distintas respuestas constitutivas. De forma general podemos decir que el proceso de hidratación de las mezclas de pellets se caracteriza por la existencia de dos etapas. Una primera etapa dominada por la gran conectividad de la macroestructura y una segunda etapa donde los pellets se hidratan y expanden invadiendo la macroporosidad bloqueando el acceso de agua en el material. En el caso del ensayo realizado con una presión de inyección de 20 kPa, el gradiente utilizado no es suficiente para saturar por completo la macroestructura durante la primera etapa. El grado de saturación pasa de 0.1 a 0.3 durante el primer minuto de ensayo. Por el contrario, el mayor gradiente utilizado en el ensayo realizado con una presión de inyección de 200 kPa, determina un aumento en el grado de saturación de 0.2 a 0.9 en el mismo período. A lo largo de esta primera etapa, la mayor parte del agua se incorpora en la macroestructura y no provoca un aumento de la presión de hinchamiento. Posteriormente la permeabilidad se bloquea y en ambos ensayos se observa un incremento de la presión de hinchamiento debido a la expansión de los pellets.

8.3.2 Modelación acoplada Vs. resultados experimentales

Se realizó la modelación hidromecánica acoplada de ambos ensayos utilizando un único conjunto de parámetros. Los valores de los distintos parámetros utilizados se presentan en la Tabla 8.3.

8.3.2.1 Ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando un gradiente de inyección de 2 m

En la Figura 8.15 se muestra la evolución de la presión de hinchamiento obtenida durante el ensayo y la evolución prevista por el modelo. Se observa que el modelo es capaz de reproducir de forma aceptable el comportamiento observado. Se ajustan en buena forma tanto el tiempo total de ensayo como el valor final de la presión de hinchamiento. Sin embargo existen algunas discrepancias respecto del comportamiento de colapso que se observa sobre el final del ensayo. Estos fenómenos de colapso al final del proceso de saturación se puede explicar por un efecto de reacomodo interno y por invasión de los poros macro debido a la expansión de la microestructura. En este caso, el modelo implementado no es capaz de reproducir estos mecanismos internos de cambio de volumen macro-micro ya que no se ha considerado la posibilidad de un acoplamiento constitutivo entre niveles estructurales.

La evolución en el tiempo de la succión macro y micro se representa en la Figura 8.16. En la Figura 8.17 se presentan las trayectorias de tensiones para ambos niveles estructurales expresadas en términos de succión y tensión vertical neta. El resultado observado se puede interpretar considerando tres etapas. Una primera etapa caracterizada por la saturación de la macroestructura y el comienzo de la hidratación de la microestructura, donde se observa un aumento de la presión de hinchamiento en correspondencia con la hidratación de la microestructura (etapa indicada como I en las Figuras 8.16 y 8.17). Seguidamente se observa un aumento de la presión de hinchamiento provocado por la expansión de la microestructura, mientras la macroestructura permanece en régimen elástico (etapa indicada como II en las Figuras 8.16 y 8.17). Finalmente, el aumento de la presión de hinchamiento provoca la activación de la superficie de fluencia macro (superficie LC) y se compensa la capacidad expansiva de la microestructura (etapa indicada como III en las Figuras 8.16 y 8.17).

8.3.2.2 Ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando un gradiente de inyección de 20 m

En la Figura 8.18, se muestra la evolución de la presión de hinchamiento obtenida durante el ensayo y la evolución prevista por el modelo para el caso del ensayo realizado con una presión de inyección de agua de 200 kPa. Durante la fase inicial del ensayo se observan discrepancias entre las predicciones y el comportamiento real observado. Sin embargo, durante la parte final del ensayo, el modelo reproduce de forma satisfactoria los aspectos fundamentales del comportamiento del material.

Con el objetivo de comparar la duración de las distintas etapas del ensayo respecto del tiempo total de ensayo (tiempo necesario para completar la saturación), se representaron las evoluciones de las diferentes variables considerando un tiempo adimensional τ . Dicho tiempo se calcula dividiendo el tiempo real del ensayo entre el tiempo total de ensayo $\tau = t/T_{\text{total}}$. Considerando este tiempo adimensional se compararon los resultados experimentales y los previstos por el modelo. En la Figura 8.19 se presenta la evolución del grado de saturación, la presión de hinchamiento, el índice de vacíos de cada nivel estructural y la permeabilidad. Se observa que el modelo reproduce de manera cualitativa la mayoría de los aspectos del comportamiento del material. Se observa un aumento inicial del grado de saturación, un aumento del índice de vacíos micro en correspondencia con una disminución del índice de vacíos macro y una disminución de

la permeabilidad durante el ensayo. De igual forma, el modelo de hidratación adoptado permite reproducir los aspectos principales de la evolución de la permeabilidad con el grado de saturación (Figura 8.20).

Si bien sería posible mejorar la calidad del ajuste presentado en ambos ensayos, los valores de los parámetros adoptados representan el conjunto de valores que mejor ajusta en ambos ensayos.

8.4 Interacción entre niveles estructurales micro-macro. Funciones de interacción (Gens & Alonso, 1992).

En el modelo planteado se considera que la interacción entre ambos niveles estructurales está dada por la compatibilidad de desplazamientos y balance de masa a través de la superficie del pellet. Es decir que no existe un acoplamiento constitutivo entre ambos niveles estructurales.

El planteo realizado se ha mostrado adecuado para reproducir la mayoría de los aspectos del comportamiento hidromecánico del material. Sin embargo, en ciertos casos el modelo ha resultado insatisfactorio e incapaz de reproducir algunos aspectos del comportamiento. La ocurrencia de un endurecimiento de la superficie de fluencia (LC) en trayectorias de humedecimiento y de descarga, así como la disminución de la porosidad macro por un efecto de “invasión” durante la expansión de la microestructura son algunos de estos aspectos. A continuación se revisan los aspectos estructurales y fenomenológicos del acoplamiento constitutivo entre niveles estructurales y se plantea su consideración a partir las funciones de interacción (Gens & Alonso, 1992).

8.4.1 Aspectos estructurales y fenomenológicos del acoplamiento entre niveles estructurales

A lo largo del proceso de hidratación se desarrollan en el material distintos mecanismos de deformación volumétrica. Por un lado, los pellets incorporan agua y desarrollan deformaciones de expansión y por otro, la incorporación de agua en los vacíos entre pellets provocan una reducción de las fuerzas intergranulares que mantienen la estructura granular estable. De acuerdo con las observaciones realizadas, es posible identificar dos situaciones distintas. Una primera situación en la que partiendo de una estructura granular y por efecto del mojado, se produce la expansión “isótropa” de las unidades microestructurales y se obtiene una estructura nueva donde tanto la micro como la macroestructura aumentan su volumen (Figura 8.21-a). Esta situación se puede asimilar a una expansión isótropa del material donde se induce la “expansión” de la macroestructura desde la microestructura debido. Existe una segunda situación en la cual se produce la expansión de la microestructura que invade y llena los vacíos entre pellets resultando en una expansión “amorfa” de la microestructura. En este caso se obtiene una estructura caracterizada por una disminución de los vacíos entre pellets (Figura 8.21-b). La ocurrencia de de una u otra situación, está en estrecha dependencia con las características estructurales del material así como con el nivel de carga actuante en la muestra. El primero de los casos descritos (expansión micro y expansión macro), está asociado a procesos humedecimiento a niveles de carga bajo. Procesos en los que durante la expansión de la microestructura, los contactos entre pellets se mantiene estable y no se produce la invasión de la macroporosidad. El segundo caso (expansión micro e invasión de la macro), está asociado a procesos de humedecimiento a un nivel de carga mayor. En este caso, durante el humedecimiento y expansión de la microestructura, los contactos entre pellets se debilitan y se produce el colapso por invasión de la estructura granular. Los contactos entre gránulos se modifican de forma que la nueva estructura resulta estable frente al nivel de carga aplicado.

La existencia de estos mecanismos internos de cambio de volumen se manifiesta al estudiar ciertos aspectos fenomenológicos de la respuesta del material. Tal es el caso de la acumulación de deformaciones no recuperables a lo largo de ciclos de humedecimiento-secado y su dependencia con el nivel de carga. El cambio en la posición de la superficie de fluencia a lo largo de trayectorias de humedecimiento y en

trayectorias de de descarga (ver apartado 4.2). Algunos de estos fenómenos ya fueron reportados en trabajos anteriores como los presentados por Alonso *et al.* (2001), Escudero (2000) y Romero *et al.* (2004).

8.4.2 Planteo del acoplamiento constitutivo entre los distintos niveles estructurales utilizando funciones de interacción

El acoplamiento propuesto en el modelo constitutivo implementado en los capítulos anteriores resulta incapaz de reproducir ciertos aspectos del comportamiento del material. Para poder considerarlos es necesario tomar en cuenta la existencia de un acoplamiento adicional de tipo constitutivo entre ambos niveles estructurales. En este caso se siguen las ideas propuestas por Gens & Alonso (1992) en el planteo del acoplamiento constitutivo entre niveles estructurales existentes en materiales expansivos y que tiene su base en la observación de fenómenos como los descritos anteriormente.

Considerando los aspectos estructurales y fenomenológicos revisados anteriormente, se plantea un acoplamiento constitutivo que depende de diversos factores. Por un lado se considera que es un acoplamiento de tipo inyectivo. Está originado en la microestructura (expansión del pellet) y se produce a nivel de la macroestructura. Adicionalmente se asume que el tipo de deformación que se produce (expansión o compresión) y su magnitud dependen tanto del nivel de carga como de las características estructurales de la muestra.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, Alonso *et al.* (1994) plantean un acoplamiento del tipo:

$$d\varepsilon_{vM-m}^{pl} = f(d\varepsilon_{vmm}, p, p_0) \quad (8.2)$$

Esta expresión asume que el acoplamiento constitutivo está controlado desde la microestructura ($d\varepsilon_{vmm}$) y que actúa induciendo deformaciones plásticas en la macroestructura $d\varepsilon_{vM-m}^{pl}$. La magnitud de las deformaciones dependen tanto del nivel de carga actuante en la muestra p como de la posición de la superficie de fluencia p_0 . Aceptando que las deformaciones inducidas en la macro $d\varepsilon_{vM-m}^{pl}$ son proporcionales a

las deformaciones a nivel micro $d\varepsilon_{vmm}$ y considerando el nivel de sobreconsolidación

$\left(\frac{p}{p_0}\right)$, se obtiene una expresión general de la ecuación (8.2) como:

$$\dot{\varepsilon}_{VM}^{pl} = \dot{\varepsilon}_{vmm} f_{\beta} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (8.3)$$

$\beta = D$ o I en trayectorias de humedecimiento y secado respectivamente.

La ecuación (8.3) determina el acoplamiento constitutivo entre ambos niveles estructurales y depende de $f\left(\frac{p}{p_0}\right)$. Esta función se denomina función de interacción y define cuál es el mecanismo de acoplamiento actuante en la macroestructura (expansión o compresión). Valores de $f_d > 0$ indican que una expansión de la microestructura induce deformaciones plásticas de expansión a nivel macro (Figura 8.21-a). Mientras que valores de $f_d < 0$, indican que una expansión a nivel micro induce deformaciones plásticas de compresión a nivel macro asociadas a un mecanismo de “invasión” de poros, (Figura 8.21-b). De acuerdo con lo visto anteriormente, valores de $f_d > 0$ están asociados a niveles de carga bajos ($\frac{p}{p_0}$ bajo), mientras que valores de $f_d < 0$ están asociados a niveles de carga más altos ($\frac{p}{p_0}$ cercanos a 1). A partir de estas consideraciones es posible dibujar de forma cualitativa la forma de la función de interacción asociada a un proceso de humedecimiento de la microestructura (Figura 8.22-a). Por otra parte, asumiendo mecanismos de acoplamiento similares durante trayectorias de secado se puede definir una función de interacción f_I , asociada a trayectorias de secado (Figura 8.22-b).

8.4.3 Formulación del acoplamiento constitutivo

Para considerar la existencia de un acoplamiento constitutivo entre ambos niveles estructurales se deben reformular algunas de las leyes constitutivas del modelo presentado hasta el momento. Para ello se tiene en cuenta que el acoplamiento se produce desde la microestructura en la macroestructura. No es necesario realizar modificaciones sobre el modelo microestructural y sí debemos de reformular el modelo constitutivo correspondiente a la macroestructura.

8.4.3.1 Reformulación del modelo macroestructural

Los incrementos de deformación volumétrica elástica de la macroestructura y la superficie de fluencia se computan como se han realizado hasta el momento de acuerdo a las expresiones definidas en el apartado 5.3.2:

$$d\varepsilon_{vM}^{el} = \frac{dp'}{K_{pM}} + \frac{ds_M}{K_{sM}} \quad (8.4)$$

y la superficie de fluencia

$$p_0(s_M, p_0^*) = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{(\lambda(0) - \kappa_{i0})}{(\lambda(s_M) - \kappa_i(s_M))}} \quad (8.5)$$

Para definir las deformaciones plásticas a nivel macroestructural se deben tener en cuenta en este caso los dos mecanismos actuantes. Por una lado las deformaciones asociadas a un mecanismo de carga y colapso de la propia macroestructura, y por otro las deformaciones inducidas desde la microestructura. Considerando que ambos fenómenos se producen a un mismo nivel estructural, podemos escribir las deformaciones plásticas totales a partir de la expresión:

$$d\varepsilon_{vM}^{pl} = d\varepsilon_{vM-LC}^{pl} + d\varepsilon_{vM-m}^{pl} \quad (8.6)$$

donde el incremento $d\varepsilon_{vM-LC}^{pl}$ corresponde a las deformaciones no recuperables propias de la macroestructura y $d\varepsilon_{vM-m}^{pl}$ corresponde a las deformaciones no recuperables inducidas desde la microestructura. Considerando el acoplamiento planteado en (8.3), podemos reescribir esta expresión como:

$$d\varepsilon_{vM}^{pl} = d\varepsilon_{vM-LC}^{pl} + d\varepsilon_{vmm} \cdot f_{I,D} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (8.7)$$

Asumiendo que el endurecimiento de la superficie de fluencia está gobernado por la ocurrencia de deformaciones plásticas de la macroestructura, debemos redefinir la ley de endurecimiento macroestructural como:

$$\frac{(1+e)}{(\lambda(0) - \kappa_{i0})} d\varepsilon_{vM}^{pl} = \frac{(1+e)}{(\lambda(0) - \kappa_{i0})} \cdot (d\varepsilon_{vM-LC}^{pl} + d\varepsilon_{vM-m}^{pl}) = \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (8.8)$$

A partir de las expresiones (8.7) y (8.8) se deben plantear las nuevas condiciones de consistencia para integrar el modelo constitutivo.

Existen numerosas expresiones matemáticas que se han propuesto para el planteo de las funciones de interacción. Un extenso análisis sobre distintas expresiones matemáticas utilizadas como funciones de interacción ha sido presentado por Garcia Escudero (2000). En estos trabajos se sugiere un procedimiento para la deducción y ajuste de las funciones de interacción a partir de ensayos con trayectorias de ciclos de humedecimiento y secado a carga constante.

8.4.3.2 Comportamiento previsto considerando el acoplamiento constitutivo

A los efectos de estudiar las capacidades del modelo reformulado, se realizó una modelación constitutiva de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de humedecimiento a carga reportados en el apartado 4.3.1. La modelación constitutiva se realizó siguiendo las hipótesis planteadas en el apartado 8.1.2. En el ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor se asume que la succión de ambos niveles estructurales evolucionan en equilibrio ($s_M \approx s_m$). Mientras que en el ensayo realizado utilizando transferencia líquida, se consideran dos etapas de ensayo diferentes. Una primera etapa en la que la macroestructura se satura por completo ($s_M \approx 0$) mientras la succión micro no se modifica ($s_m \approx s_{m0}$) y una segunda etapa donde la succión micro decrece en busca del equilibrio con la succión macro hasta alcanzar la saturación. Los resultados obtenidos en esta modelación se presentan en las Figuras 8.23 y 8.24 para ambos ensayos en comparación con los resultados experimentales. Los valores de los parámetros utilizados en estos ensayos se resumen en la Tabla 8.4, en los que se consideró una microestructura completamente elástica ($\kappa_m = \lambda_m$). La superficie de

fluencia SD_0 indica únicamente la ocurrencia de deformaciones de acoplamiento micro-macro.

8.5 Resumen de Tablas

Tabla 8.1. Valores de los parámetros utilizados en la modelación correspondiente a los ensayos de humedecimiento a carga constante.

Parámetros micro	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros elásticos MACRO	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros LC	Valor (1.3 Mg/m ³)
κ_m	0.075	κ_{i0}	0.065	$\sigma_{v_0}(0)$	0.25 MPa
λ_{mD}	0.014	α_i	0.0027 MPa ⁻¹	σ^c	75 kPa
χ	0.9	κ_{s0}	0.003	$\lambda(0)$	0.195
SD_0	100-110 MPa	α_{sp}	0.20	κ_{s0}	0.075
k_o	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹⁵	α_{ss}	0.3 MPa ⁻¹	β	0.12 MPa ⁻¹
λ	1.1-1.2	p_{ref}	0.075 MPa	r	0.55

Tabla 8.2. Valores de los parámetros utilizados en la modelación correspondiente al ensayo de humedecimiento a volumen constante realizado sobre una muestra con densidad seca de 1.5 Mg/m³.

Parámetros micro	Valor (1.5 Mg/m ³)	Parámetros elásticos MACRO	Valor (1.5 Mg/m ³)	Parámetros LC	Valor (1.5 Mg/m ³)
κ_m	0.085	κ_{i0}	0.045	$\sigma_{v_0}(0)$	1.85 MPa
λ_{mD}	0.015	α_i	0.003 MPa ⁻¹	σ^c	75 kPa
χ	0.9	κ_{s0}	0.029	$\lambda(0)$	0.18
SD_0	100-110 MPa	α_{sp}	0.128	κ_{s0}	0.075
k_o [m/s]	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹⁵	α_{ss}	0.002 MPa ⁻¹	β	0.05 MPa ⁻¹
λ	1.1-1.2	p_{ref}	0.010 MPa	r	0.6

Tabla 8.3. Valores de los parámetros utilizados en la modelación correspondiente a los ensayos de humedecimiento a volumen constante realizados sobre muestras con densidad seca de 1.3 Mg/m³.

Parámetros micro	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros elásticos MACRO	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros LC	Valor (1.3 Mg/m ³)
κ_m	0.095	κ_{i0}	0.077	$\sigma_{v_0}(0)$	0.51 MPa
λ_{mD}	0.013	α_i	0.0027 MPa ⁻¹	σ^c	75 kPa
χ	0.9	κ_{s0}	0.038	$\lambda(0)$	0.200
SD_0	100-110 MPa	α_{sp}	0.215	κ_{s0}	0.075
k_o [m/s]	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹⁵	α_{ss}	0.3	β	0.01 MPa ⁻¹
λ	1.1-1.2	p_{ref}	0.010 MPa	r	0.65

Tabla 8.4. Valores de los parámetros utilizados en la modelación correspondiente a los ensayos de humedecimiento a carga constante realizados sobre muestras con densidad seca de 1.3 Mg/m³. Modelo BExM Considerando funciones de interacción.

Parámetros micro	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros elásticos MACRO	Valor (1.3 Mg/m ³)	Parámetros LC	Valor (1.3 Mg/m ³)
κ_m	0.075	κ_{i0}	0.077	$\sigma_{v_0}(0)$	0.23 MPa
λ_{mD}	0.075	α_i	0.0027 MPa ⁻¹	σ^c	75 kPa
χ	0.9	κ_{s0}	0	$\lambda(0)$	0.190
SD_0	24 MPa	α_{sp}	-	κ_{s0}	0.075
k_o [m/s]	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹⁵	α_{ss}	-	β	0.1 MPa ⁻¹
λ	1.1-1.2	p_{ref}	-	r	0.6

Función de interacción utilizada: $f_D = 1.577 * \frac{p}{p_o} - 2.04$