

6. ENSAYOS QUÍMICO-MECÁNICOS

6.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es la validación de la extensión del BExM utilizando las variables de estado geoquímicas propuestas en el capítulo anterior, que originó el modelo constitutivo denominado BExCM. Para ello, se intentará reproducir cualitativamente algunos ensayos en celdas de compresión isótropa y edométricos (de hinchamiento y presión de hinchamiento) en suelos expansivos cuyo comportamiento mecánico se presenta marcadamente afectado por acciones químicas. La intención es captar los principales fenómenos relacionados con el comportamiento de estos suelos sometidos a la exposición a soluciones salinas de diferentes concentraciones y con diferentes tipos de sales disueltas.

Se implementó el BExCM en el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT. Por tanto, este modelo se encuentra disponible para la aplicación a problemas de contorno relacionados con el comportamiento termo-hidro-mecánico y geoquímico de suelos expansivos no saturados y químicamente activos. El BExCM establece un fuerte acoplamiento entre los problemas THM y de transporte reactivo: parámetros geoquímicos ahora influyen directamente en el comportamiento mecánico del suelo.

Aunque la actual implementación del modelo incluye el efecto de la succión matricial (suelo no saturado) y temperatura en el comportamiento mecánico del suelo expansivo (Sánchez, 2001; Sánchez *et al.*, 2001), en los ensayos presentados en este ejercicio de validación, el suelo siempre se encuentra saturado y en condiciones isotérmicas, lo que permite enfocar básicamente el comportamiento químico-mecánico del material sin la interferencia de fenómenos de origen capilar o térmico, ajenos al objetivo específico de este capítulo.

El capítulo empieza con una discusión sobre los mecanismos de cambios de volumen en materiales arcillosos expuestos a soluciones salinas concentradas. Barbour & Fredlund (1989) consideran dos mecanismos potenciales: *consolidación osmótica* y *consolidación osmóticamente inducida*. El primero está relacionado con las interacciones físico-químicas a nivel de partícula, donde un aumento de la concentración de los iones resulta en la retracción de la capa doble y la consecuente tendencia a la retracción del suelo. El segundo se debe al flujo de agua que sale de la muestra inducido por gradientes osmóticos, generando presiones de poros negativas y aumento de la tensión efectiva. El proceso acoplado de flujo osmótico no se considera en la presente formulación. Resultados experimentales (Barbour & Fredlund, 1989; Santamarina & Fam, 1995) demuestran que la consolidación osmótica es el mecanismo predominante de cambios de volumen de origen químico en arcillas y mezclas de arena y

arcilla. En arcillas altamente sobreconsolidadas y lutitas ("shales")¹, flujo osmótico (ósmosis-química) puede tener importancia (Mitchell, 1991). En la ingeniería de petróleo, estudios teóricos sobre los mecanismos de colapso de pozos que atraviesan lutitas (Frydman & Fontoura, 2001; Molenaar & Huyghe, 2001) consideran el flujo osmótico como un elemento que contribuye a la estabilización mecánica del pozo.

Debido a que un análisis cuantitativo del problema químico-mecánico necesita una detallada caracterización del material y teniendo en cuenta que no se dispone de toda la información necesaria para la completa modelación químico-mecánica de los ensayos encontrados en la literatura, se definió un suelo de referencia para la reproducción cualitativa de los ensayos. Este suelo de referencia representa una hipotética arcilla expansiva natural.

A continuación, se analizan una serie de ensayos edométricos de hinchamiento y presión de hinchamiento (Di Maio, 1996; Daupley, 1997) donde se somete el suelo de referencia a simultáneas acciones químicas y mecánicas. Por tratarse de un análisis cualitativo, la modelación de estos ensayos se hizo a nivel local (puntos de integración) utilizando solamente la parte volumétrica del BExCM presentada en el capítulo anterior.

Posteriormente, se presentan ensayos (Santamarina & Fam, 1995) que se resuelven como problemas de contorno (unidimensionales). A través de estos ensayos se verifica que el modelo es capaz de reproducir el mecanismo de consolidación osmótica: a medida en que la sal disuelta se difunde en el suelo saturado, debido a su baja permeabilidad se generan presiones de poros positivas (respuesta no drenada a la tendencia a la retracción) que se disipan a lo largo del tiempo.

En las simulaciones, cambios de concentraciones, porosidad y presiones de poros están totalmente acoplados. Por tanto, se resuelven los problemas hidro-mecánico y de transporte reactivo de manera simultánea a través del esquema de acoplamiento fuerte propuesto en la figura 3.2 (sección 3.6 del capítulo 3).

Finalmente, se discuten algunas limitaciones del modelo relacionadas con el comportamiento irreversible de la bentonita de Ponza (Di Maio, 1996; Di Maio, 1998) frente a la exposición cíclica a diferentes tipos de soluciones salinas.

¹ Roca sedimentaria originada de la compactación de lodos, posee estructura laminada paralela al plano de estratificación (Blyth & de Freitas, 1989). López Marinas (2000) considera dos subgrupos de lutitas: limolitas (limos compactados y cementados) y arcillitas (arcillas compactadas y cementadas).

6.2. MECANISMOS OSMÓTICOS DE CAMBIOS DE VOLUMEN

Cambios de volumen en suelos arcillosos saturados ocurren a largo plazo debido a su baja conductividad hidráulica. Los parámetros que controlan su comportamiento hidro-mecánico en el tiempo son la compresibilidad, que relaciona los cambios de volumen con los cambios de tensiones efectivas, y la permeabilidad, que es una medida de la aptitud del suelo para conducir fluidos en sus poros.

Debido a las interacciones físico-químicas entre las partículas de arcilla y el agua ionizada de los poros, la compresibilidad y permeabilidad de los suelos arcillosos también dependen de variables geoquímicas (o ambientales) tales como la succión osmótica y las concentraciones de los cationes intercambiables. Evidencias experimentales ampliamente difundidas en la literatura confirman esta afirmación y se ha utilizado frecuentemente la teoría de la capa doble para describir de manera cualitativa (y a veces cuantitativa) el comportamiento de estos materiales. Como se vio en el capítulo anterior, esta teoría ha sido de gran importancia para la comprensión del comportamiento de las arcillas a escala microscópica.

Sin embargo, las variables geoquímicas no sólo influyen en el comportamiento hidro-mecánico de las arcillas cambiando sus parámetros. Variaciones del estado geoquímico del suelo también son capaces de inducir deformaciones y flujos de origen osmótico, que en determinadas circunstancias no se pueden despreciar, como es el caso de algunas aplicaciones en medios porosos de baja permeabilidad relacionadas con la ingeniería geotécnica ambiental, la ingeniería de petróleo y también la hidrogeología (Barbour & Fredlund, 1989; Carrera, 1991; Civan, 2001; Frydman & Fontoura, 2001; Molenaar & Huyghe, 2001).

A continuación se describen los dos mecanismos potenciales de cambios de volumen originados de estas deformaciones y flujos osmóticamente inducidos, denominados *consolidación osmótica* y *consolidación osmóticamente inducida* (Barbour & Fredlund, 1989).

Cuando se expone una arcilla a una solución salina concentrada, la sal se transporta en sus poros por difusión molecular y altera las interacciones electrostáticas entre las partículas de arcilla, reduciendo el espesor de la capa doble y causando, como resultado final, la disminución del índice de vacíos del suelo (retracción), fenómeno ya discutido en el capítulo anterior.

Debido a su baja permeabilidad, esta tendencia a retracción de la arcilla tiene como respuesta no drenada la generación de presiones de poros positivas, disminuyendo las tensiones efectivas en el suelo y manteniendo, a corto plazo, su volumen constante. El exceso de presiones de poros se disipa lentamente a medida en que la muestra se deforma. Este mecanismo se denomina consolidación osmótica y está directamente relacionado con el

transporte de sales disueltas en el agua de los poros por difusión. Se estudiará detalladamente la consolidación osmótica en la sección 6.5 de este capítulo.

Otro mecanismo, denominado consolidación osmóticamente inducida, ocurrirá como resultado del flujo acoplado de líquido en la arcilla debido a gradientes de potencial (o succión) osmótico. En este caso, cuando se expone una arcilla a una solución salina, se generará un flujo osmótico de líquido hacia el exterior de la muestra induciendo en esta presiones de poros negativas ($P_l < 0$). Esto resulta en un aumento de las tensiones efectivas ($\sigma_{ij} - \delta_{ij} P_l$) y consecuentemente retracción de la muestra. Este cambio de volumen está relacionado únicamente con cambios de tensiones efectivas. Al contrario de la consolidación osmótica, en este mecanismo la química del agua de los poros no afecta directamente el comportamiento mecánico del suelo. Lo hace indirectamente a través del problema hidráulico, donde el flujo total de líquido en este caso viene dado por:

$$\mathbf{q}_l = -\mathbf{K}(\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) + \sigma \mathbf{K} \nabla s_o \quad (6.1)$$

donde \mathbf{K} es la conductividad hidráulica saturada y s_o es la succión osmótica ($s_o = -\pi_o$, siendo π_o el potencial osmótico), dada anteriormente por la ecuación (5.2). σ es la eficiencia osmótica del material ($0 \leq \sigma \leq 1$). En la ecuación (6.1), se observa que el flujo osmóticamente inducido depende de la conductividad hidráulica del material, del gradiente de succión osmótica y de la eficiencia osmótica, cuyo significado físico se discute a continuación.

Cuando la eficiencia osmótica vale uno ($\sigma = 1$), el suelo se comporta como una membrana semipermeable perfecta, permitiendo que el agua (disolvente de la fase líquida) y las demás especies neutrales pasen e impidiendo el paso de las especies iónicas a través del suelo. Esto se demuestra matemáticamente considerando el flujo acoplado de solutos por gradiente de potencial hidráulico (Soler & Jakob, 1997; Soler, 1998), denominado ultrafiltración, que es el proceso acoplado recíproco al flujo de líquido por gradiente de potencial osmótico (ósmosis-química). Por tanto, la eficiencia osmótica es una medida del grado de comportamiento del suelo como una membrana semipermeable perfecta (Barbour & Fredlund, 1989).

La eficiencia osmótica presenta gran dependencia con la química del agua de los poros y también con la porosidad, conforme se ilustra en la figura 6.1. En realidad, se observan eficiencias osmóticas altas únicamente en materiales arcillosos de baja porosidad (alta densidad) y para concentraciones electrolíticas diluidas (Barbour & Fredlund, 1989; Mitchell, 1993). Esto es así porque la extensión de la capa doble es quien determina cuáles son los poros electrostáticamente libres. En rocas con los poros suficientemente pequeños, las capas dobles difusas de las partículas se superponen y la distribución de cargas eléctricas en la solución impide el paso de las especies iónicas a través de los poros (Appelo & Postma, 1993; Soler, 1998). Appelo & Postma (1993) llaman la atención sobre el hecho de que este proceso se auto-regula. A medida en que las concentraciones aumentan en el suelo causan una

retracción de la capa doble y permiten el paso de más y más iones solubles. Según estos autores, para concentraciones por encima de 1mol/l la capa doble se encuentra retraída y el comportamiento del suelo como membrana semipermeable se reduce (σ se hace pequeño).

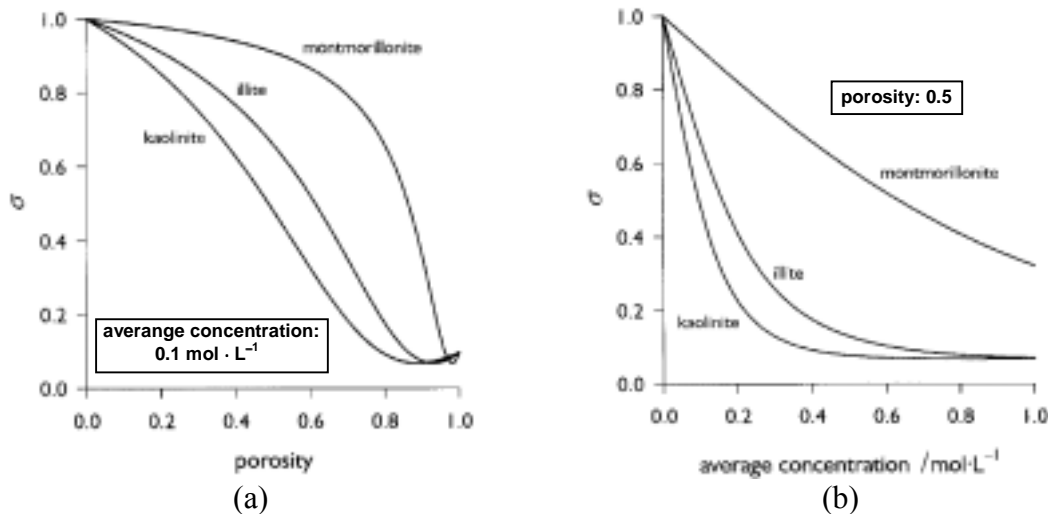


Figura 6.1. Eficiencia osmótica versus (a) porosidad y (b) concentración. Valores de σ calculados de acuerdo con el Modelo de Membrana de Fritz-Marine (Marine & Fritz, 1981; Fritz & Marine, 1983) utilizando valores de referencia para diferentes tipos de arcillas puras según Keijzer & Loch (2001).

Barbour & Fredlund (1989), además de describir teóricamente estos dos mecanismos potenciales de cambio de volumen osmótico, utilizan simulaciones numéricas para ilustrar el comportamiento característico de suelos arcillosos expuestos a soluciones concentradas de NaCl. En un programa experimental con ensayos edométricos adaptados para medidas de presión de poros y flujos que entran y salen de la muestra (por la cara superior y/o inferior), exponen dos suelos arcillosos a soluciones concentradas de NaCl. Los suelos estudiados (con índices de vacíos entre 0,5 y 2) corresponden a una arcilla natural ("Regina Clay" - predominantemente una montmorillonita cálcica) y a un suelo artificial, mezcla de 20% de montmorillonita sódica y 80% de arena ("Ottawa Sand"). Se verificó que, para estos suelos, el mecanismo predominante de cambios de volumen en las muestras era la consolidación osmótica. Aunque se observó flujo osmótico, se demostró que el mecanismo de consolidación osmóticamente inducida tenía poca importancia y no explicaba los cambios de volumen observados en las muestras.

Mitchell (1991) considera que los flujos osmóticamente inducidos pueden ser comparables a los flujos por gradientes hidráulicos en arcillas extremadamente sobreconsolidadas y lutitas, donde la porosidad y conductividad hidráulica son bajas. Se considera que estos flujos pueden tener importancia en procesos geológicos (Mitchell, 1991). Pero otro punto a discutir con respecto al comportamiento hidro-mecánico de estos materiales es si las presiones de poros

osmóticamente inducidas son suficientemente grandes para causar cambios significativos en el estado de tensiones efectivas y consecuentemente deformar el suelo. Fritz & Marine (1983) consideran que la máxima presión hidráulica osmóticamente inducida se alcanza en membranas de arcillas de baja porosidad, alta capacidad de intercambio de cationes (CIC) y separando soluciones diluidas.

En el campo de la ingeniería de petróleo, en algunas aplicaciones relacionadas con la perforación de pozos en lutitas se tiene en cuenta el flujo osmótico de líquido como elemento que influye en la estabilidad mecánica del pozo recién perforado. Frydman & Fontoura (2001) demuestran numéricamente como el flujo osmótico originado de la diferencia de concentraciones salinas entre el agua utilizada en la perforación y el agua de los poros de la roca contribuye para acelerar la disipación de presión de poros generada inicialmente en el proceso de perforación. Este mecanismo adicional de disipación de presión de poros contribuirá a la estabilización mecánica del pozo (Frydman & Fontoura, 2001; Molenaar & Huyghe, 2001). También en este campo de la ingeniería de petróleo, se estudia el comportamiento mecánico de lutitas expuestas a soluciones salinas (Civan, 2001; Santos & Perez, 2001). Proceso gobernado por la difusión molecular de las sales en el medio poroso y directamente relacionado con la consolidación osmótica.

Con respecto a las arcillas densamente compactadas, como las utilizadas en barreras de contención de residuos altamente radiactivos, Mitchell (1991) considera que estos materiales pueden presentar propiedades de membrana cuando las concentraciones dentro y fuera de la barrera son diferentes. Pero en realidad, poco se sabe sobre el comportamiento hidromecánico de las arcillas altamente compactadas sometidas a acciones químicas.

En uno de los pocos programas experimentales para verificar la influencia de la química en el comportamiento mecánico de suelos compactados expansivos, Karnland (1997) realizó una serie de ensayos de presión de hinchamiento en la bentonita sódica MX-80, material utilizado en el concepto de referencia sueco de almacenamiento de residuos radiactivos profundo. En uno de los ensayos realizados por Karnland (1997) (figura 6.2), se puede apreciar como la presión de hinchamiento, que constituye una variable clave en estos tipos de sistemas de almacenamiento, se reduce a menos de la mitad cuando se expone la muestra de bentonita (inicialmente hidratada con agua pura) a una solución saturada de NaCl. Esto indica que también estos materiales pueden ser altamente afectados por acciones químicas.

En las próximas secciones, se van a reproducir ensayos de laboratorio de arcillas donde se supone que el proceso predominante de cambios de volumen de origen químico es la consolidación osmótica. La mayoría de los ensayos encontrados en la literatura son para arcillas con altos índices de poros y expuestas a soluciones saturadas de distintas sales (ejemplos: Santamarina & Fam, 1995; Di Maio, 1996), casos donde los flujos osmóticamente inducidos son despreciables y la difusión molecular gana importancia (Di Maio, 1996). En la sección 6.5 se comprobará la veracidad de esta hipótesis reproduciéndose los ensayos

edométricos y de consolidación isótropa de Santamarina & Fam (1995) como problemas de contorno químico-mecánicos.

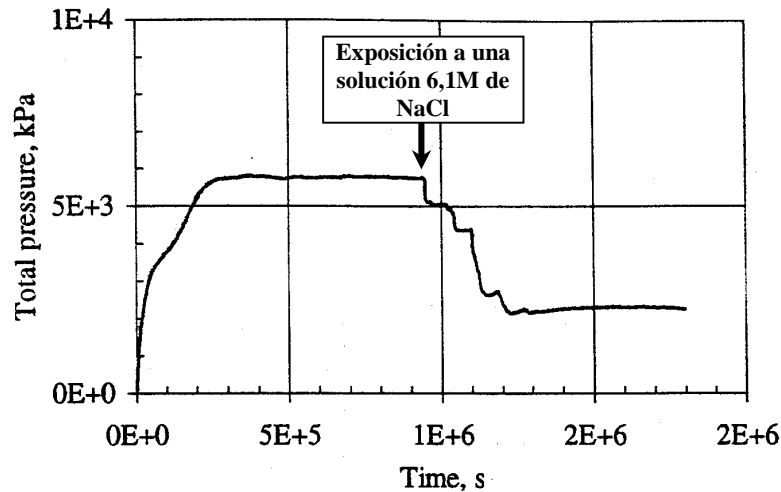


Figura 6.2. Ensayo de presión de hinchamiento (Karnland, 1997) en la arcilla MX-80 saturada con agua pura y posteriormente expuesta a una solución saturada de NaCl. Después de la saturación con agua pura, se obtuvo una densidad saturada de 2000 kg/m^3 para la muestra.

También se reproducen ensayos de presión de hinchamiento en rocas argiláceas (Daupley, 1997), donde a principio la consolidación osmóticamente inducida puede tener lugar, pero en este caso se demostrará que la única manera de explicar el comportamiento químico-mecánico de este material es a través de la consolidación osmótica como resultado del intercambio de cationes.

6.3. EL SUELO DE REFERENCIA

Un análisis cuantitativo del problema químico-mecánico necesita una detallada caracterización geoquímica de la arcilla expansiva en cuestión. Los coeficientes de selectividad de las reacciones de intercambio de cationes para una determinada arcilla son de gran importancia, ya que es a partir de estas constantes que se determina la proporción en que los cationes intercambiables ocupan los sitios en el complejo de cambio de la arcilla. La presencia de minerales accesorios como calcita, dolomita, yeso o anhidrita tienen gran influencia en la química del agua de los poros de una arcilla natural. Estos minerales son responsables por el tamponamiento del sistema frente a cambios de variables geoquímicas como el pH, restringiendo también las concentraciones de especies acuosas en equilibrio con ellos.

Teniendo en cuenta que no se dispone de toda la información necesaria para la completa modelación químico-mecánica de los ensayos encontrados en la literatura para las arcillas expansivas naturales (generalmente heteroionizadas), se utilizó un suelo de referencia cuyos parámetros mecánicos para la parte volumétrica del BExCM se encuentran en la tabla I.

En la tabla I, conforme se comentó en el apartado 3.2, se verifica que los valores de los β_m^i están cualitativamente de acuerdo con la teoría de la capa doble difusa, ya que $\beta_m^{Na} > \beta_m^K$, $\beta_m^{Mg} > \beta_m^{Ca}$ y en general $\beta_m^{monovalente} > \beta_m^{bivalente}$.

Las funciones de interacción f_I y f_D se encuentran representadas en la figura 6.3. Se utilizó funciones del tipo tangente hiperbólico comprendidas entre 0 y 1. En los ejemplos se consideró que las superficies SI, SD y el plano neutro (NP) se encuentran colapsados en un único plano en el espacio $p-s_m-\psi_c$, de manera que deformaciones elásticas de la microestructura siempre causarían deformaciones plásticas macroestructurales.

Tabla I. Parámetros volumétricos del BExCM para un suelo saturado químicamente activo (suelo de referencia).

Parámetros de la macroestructura (BBM)	pendiente de la curva de consolidación virgen saturada: $\lambda(0) = 0,05$ pendiente de la curva de carga-descarga saturada: $k_{io} = 0,005$		
Parámetros de la microestructura (BExCM)	$\chi = 1,0$ $\alpha_m = 0,04$	$\beta_m^{Na} = 0,002$ $\beta_m^K = 0,001$	$\beta_m^{Mg} = 0,0005$ $\beta_m^{Ca} = 0,0004$

En la modelación geoquímica de este material se consideró un modelo geoquímico simplificado para la arcilla, resumido en la tabla II. En esta tabla, las especies NaX, KX, CaX₂ y MgX₂ son respectivamente los cationes intercambiables sodio, potasio, calcio y magnesio, presentes en el complejo de cambio de la arcilla. X⁻ representa el mineral de la arcilla de superficie negativamente cargada.

Las reacciones de intercambio de cationes tal como están escritas en la tabla II siguen la convención de Gaines-Thomas (Appelo & Postma, 1993). La necesidad de adoptar una convención para este tipo de reacción se origina de la falta de consenso sobre el cálculo de las actividades químicas de los cationes adsorbidos en la arcilla. Se utiliza una formulación termodinámica aproximada en la cual las actividades de los cationes intercambiables son sus fracciones equivalentes. Las constantes de equilibrio de estas reacciones, denominadas coeficientes de selectividad, no son realmente constantes termodinámicas pues su determinación depende de las condiciones experimentales y cambian según el tipo de suelo.

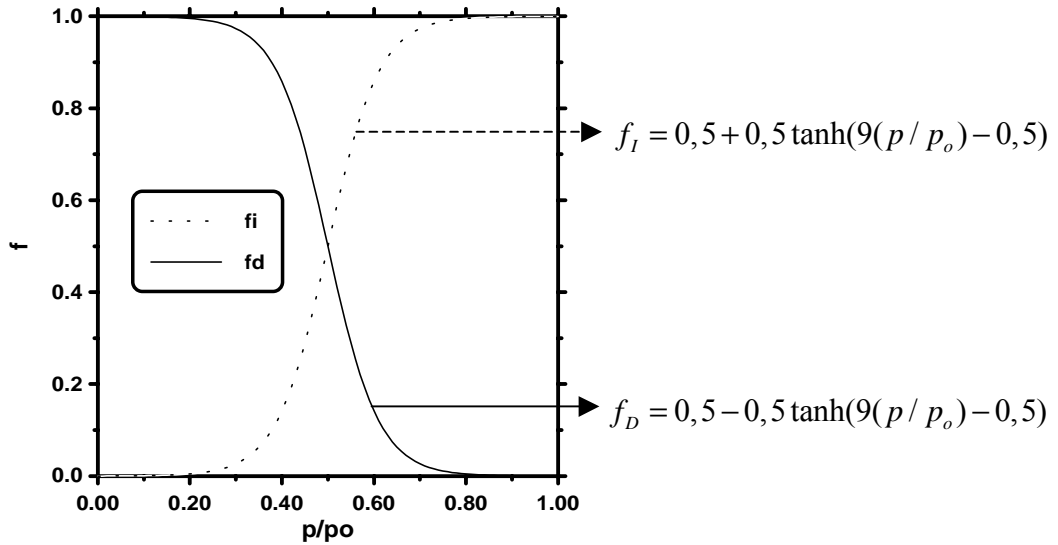


Figura 6.3. Funciones de interacción adoptadas en la modelación numérica.

Tabla II. Especies presentes en el sistema y reacciones químicas consideradas.

Especies en la fase líquida	$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Cl}^-$
Especies en la fase sólida	$\text{NaX}, \text{KX}, \text{MgX}_2, \text{CaX}_2$
Reacciones químicas (intercambio de cationes)	$\text{Na}^+ + \text{KX} \leftrightarrow \text{NaX} + \text{K}^+$ $\text{Na}^+ + \frac{1}{2} \text{MgX}_2 \leftrightarrow \text{NaX} + \frac{1}{2} \text{Mg}^{2+}$ $\text{Na}^+ + \frac{1}{2} \text{CaX}_2 \leftrightarrow \text{NaX} + \frac{1}{2} \text{Ca}^{2+}$

De acuerdo la convención de Gaines-Thomas, las leyes de acción de masas de las reacciones de intercambio en la tabla II se escriben como:

$$K_{\text{Na/K}} = \frac{x_{\text{Na}} a_{\text{K}^+}}{x_{\text{K}} a_{\text{Na}^+}} \quad (6.2)$$

$$K_{\text{Na/Mg}} = \frac{x_{\text{Na}} (a_{\text{Mg}^{2+}})^{0.5}}{(x_{\text{Mg}})^{0.5} a_{\text{Na}^+}} \quad (6.3)$$

$$K_{\text{Na/Ca}} = \frac{x_{\text{Na}} (a_{\text{Ca}^{2+}})^{0.5}}{(x_{\text{Ca}})^{0.5} a_{\text{Na}^+}} \quad (6.4)$$

donde x_{Na} , x_{K} , x_{Mg} y x_{Ca} son las respectivas fracciones equivalentes de los cationes intercambiables NaX, KX, MgX₂ y CaX₂ definidas anteriormente en la ecuación (5.6). a_{Na^+} , a_{K^+} , $a_{\text{Mg}^{2+}}$ y $a_{\text{Ca}^{2+}}$ son las actividades químicas de los cationes en solución. Para los coeficientes de selectividad de estas reacciones se adoptó los valores medios compilados por

Appelo & Postma (1993) para la convención de Gaines-Thomas teniendo como cation de referencia el Na^+ : $K_{\text{Na/K}} = 0,2$, $K_{\text{Na/Mg}} = 0,5$ y $K_{\text{Na/Ca}} = 0,4$.

Para el cálculo de las actividades químicas de las especies acuosas se utilizó el modelo de Harvie & Weare (1980) de la familia de los modelos de Pitzer para soluciones salinas muy concentradas (detalles de este modelo se encuentran en el apéndice C). Las soluciones utilizadas en los ensayos aquí reproducidos son soluciones saturadas de las sales NaCl , CaCl_2 y KCl . La succión osmótica y las fracciones equivalentes de los cationes intercambiables se calculan a partir de las actividades de las especies acuosas, justificando la utilización de un modelo adecuado para estas salmueras.

En el modelo geoquímico simplificado propuesto para este material, es posible obtener las fracciones equivalentes de los cationes intercambiables resolviendo las ecuaciones (5.7) y (6.2) a (6.4). En tal caso, se suponen conocidas las actividades de las especies en solución. Detalles de la implementación de las reacciones de intercambio de cationes en esta formulación se encuentran en el apéndice D.

Las condiciones iniciales geoquímicas para el suelo de referencia se encuentran en la tabla III. En esta tabla se verifica que las especies predominantes en el agua inicial son los iones sodio y cloruro y que la fase sólida del suelo es mayormente sódica.

Tabla III. Condiciones iniciales geoquímicas para el suelo utilizado en la modelación numérica (suelo de referencia).

Especies Acuosas (molalidad)	Na^+	0,31 M
	K^+	0,01 M
	Mg^{2+}	0,01 M
	Ca^{2+}	0,01 M
	Cl^-	0,36 M
Succión Osmótica	(ecuación 5.2)	1,6MPa
Cationes Intercambiables (fracciones equivalentes)	NaX	0,65
	KX	0,10
	MgX_2	0,10
	CaX_2	0,15

6.4. ENSAYOS EDMÉTRICOS: ANÁLISIS A NIVEL DE PUNTOS DE INTEGRACIÓN

En esta sección se analiza una serie de ensayos edométricos de hinchamiento (Di Maio, 1996) y presión de hinchamiento (Daupley, 1997) donde se somete el suelo de referencia a sucesivas acciones químicas y mecánicas. En este análisis cualitativo, la modelación de los ensayos se

hizo a nivel local (puntos de integración) utilizando solamente la parte volumétrica del BExCM presentada en el capítulo anterior.

En las simulaciones numéricas, se admitió la hipótesis de equilibrio local y, por tanto, la respuesta del suelo frente a acciones mecánicas y químicas es instantánea. Se representan las deformaciones en función del tiempo solamente para propósitos de presentación.

6.4.1. Ensayos de hinchamiento

Di Maio (1996) realizó una serie de ensayos edométricos en muestras remoldeadas de la bentonita de Ponza. Se trata de una bentonita natural con 80% de fracción arcillosa y un índice de plasticidad de 320%. La fracción arcillosa se compone principalmente de una montmorillonita sódica. Las muestras han sido preparadas mezclando el polvo de arcilla con agua destilada hasta una consistencia cercana a su límite líquido (que vale 400% para agua destilada y cercano a 100% para salmueras).

En los ensayos edométricos, inicialmente se consolidó las muestras hasta una tensión axial fijada entre 40 y 2500kPa y después se las expusieron a soluciones salinas saturadas, reemplazando el agua en las celdas.

En los ensayos de la figura 6.4, tres muestras de la bentonita de Ponza fueran inicialmente consolidadas a 640kPa y a continuación individualmente expuestas a soluciones saturadas de NaCl, KCl y CaCl₂. Se verifica que en los tres casos la exposición a las salmueras produce una gran retracción en las muestras. Se sometió el suelo de referencia a estas mismas acciones mecánicas y químicas. El modelo presentó resultados cualitativamente similares a los experimentales (figura 6.5).

Para estos ensayos, se pueden explicar las diferencias de comportamiento de las muestras expuestas a las diferentes soluciones salinas fijándose únicamente en el comportamiento de la microestructura. La muestra expuesta a la solución saturada de CaCl₂ se contrae más por dos razones, primero porque la succión osmótica aplicada por esta solución es de 185MPa, superior a las succiones osmóticas de las soluciones saturadas de KCl (24MPa) y NaCl (39MPa). Estas succiones se obtienen a partir de la ecuación (5.2) para una temperatura de 25°C, donde el actividad del agua viene dada por el modelo geoquímico para salmueras (Harvie and Weare, 1980).

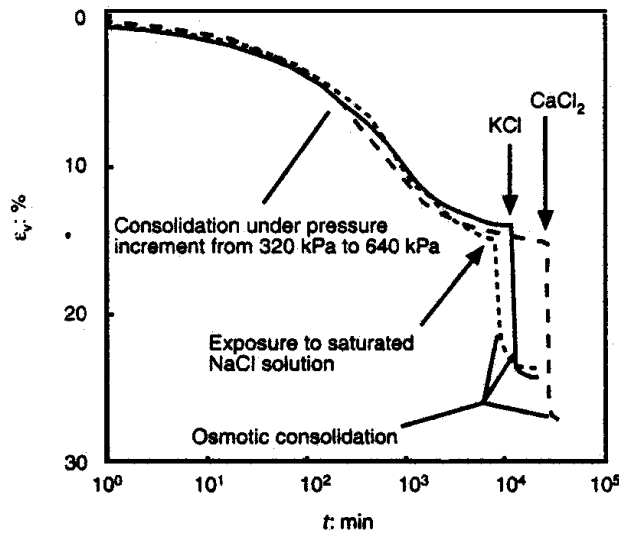


Figura 6.4. Exposición de la bentonita de Ponza a soluciones saturadas con distintas sales (Di Maio, 1996).

La segunda razón es el intercambio de cationes. Cuando se expone la arcilla sódica a una solución saturada de CaCl_2 , el Ca^{2+} en la solución irá reemplazar el Na^+ y demás cationes en el complejo de cambio de la arcilla. Dado que el valor de β_m^{Ca} es inferior al de los demás cationes (tabla I), β_m dado por la ecuación (5.5) disminuirá induciendo una retracción en el suelo.

Aunque la succión osmótica de la solución saturada con NaCl es superior a la succión osmótica de la solución de KCl , el intercambio de cationes que tiene lugar en la muestra expuesta a la solución de KCl hace que esta se deforme un poco más que la muestra expuesta a la solución de NaCl .

En la figura 6.6 se puede ver otro conjunto de ensayos realizados por Di Maio (1996), donde las muestras de bentonita, después de consolidadas a tensiones entre 40 y 960 kPa, son expuestas a una solución saturada de NaCl y subsecuentemente a agua destilada. Esta exposición a diferentes tipos de soluciones causa un ciclo de retracción e hinchamiento que deja deformaciones permanentes en la muestra. La retracción inicial no es totalmente recuperada por el subsecuente hinchamiento.

En la figura 6.7, el modelo aplicado al suelo de referencia reproduce el mismo tipo de comportamiento observado en el experimento. Se verifica, tanto en el ensayo como en el modelo, que cuanto mayor es la carga aplicada menores son las deformaciones. Esto es así porque cuanto mayor es la carga aplicada mayor será la rigidez de la microestructura (ecuación (5.14)).

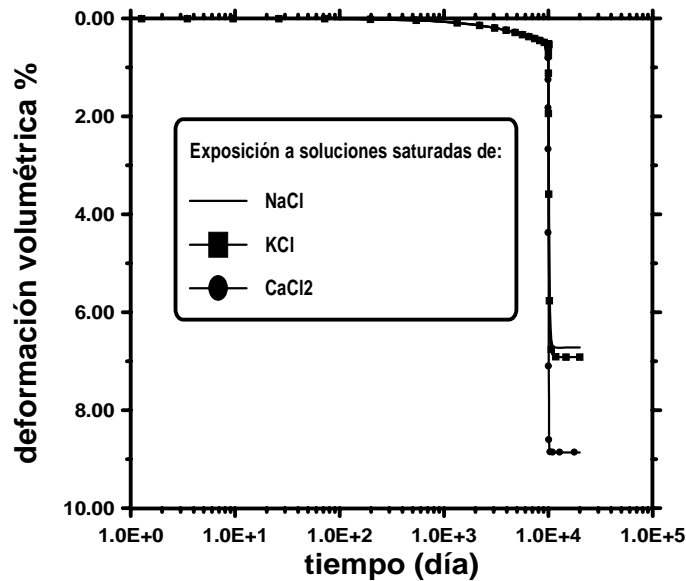


Figura 6.5. Modelación del comportamiento del suelo de referencia frente a la exposición a soluciones saturadas de NaCl, KCl y CaCl₂. Reproducción cualitativa del ensayo de la figura 6.4.

Según el BExCM, deformaciones microestructurales inducen en la macroestructura deformaciones plásticas. Se denominó mecanismo β a este mecanismo de interacción entre los dos niveles estructurales. La deformación neta de retracción al final del ciclo significa que las deformaciones macroestructurales plásticas de retracción superan las deformaciones plásticas en la expansión.

De hecho esto es lo que indica la figura 6.8 para el ensayo de tensión media aplicada de 10MPa, donde se dibujan los valores que van tomando las funciones de interacción f_I y f_D a lo largo de ciclo. Los puntos A, B y C en las figuras 6.7 a 6.10 indican la trayectoria de este ensayo.

Se verifica que a lo largo del ciclo los valores de f_I durante la retracción son superiores a los valores de f_D en el hinchamiento. Por tanto, según la ecuación (5.23), las deformaciones plásticas de retracción (secado: "suction increase") serán superiores a las de hinchamiento (mojado: "suction decrease").

En la figura 6.9, se puede ver el acoplamiento entre el mecanismo β y la superficie de fluencia de la macroestructura establecido en la ley de hardening de esta última (ecuación (5.25)). Cuando hay retracción en la macroestructura (trayectoria A→B), esta se densifica y por tanto p_o^* aumenta, causando un efecto de sobreconsolidación. Por otro lado, el hinchamiento macroestructural (trayectoria B→C) resultará en una macroestructura más abierta, disminuyendo la presión de preconsolidación p_o^* .

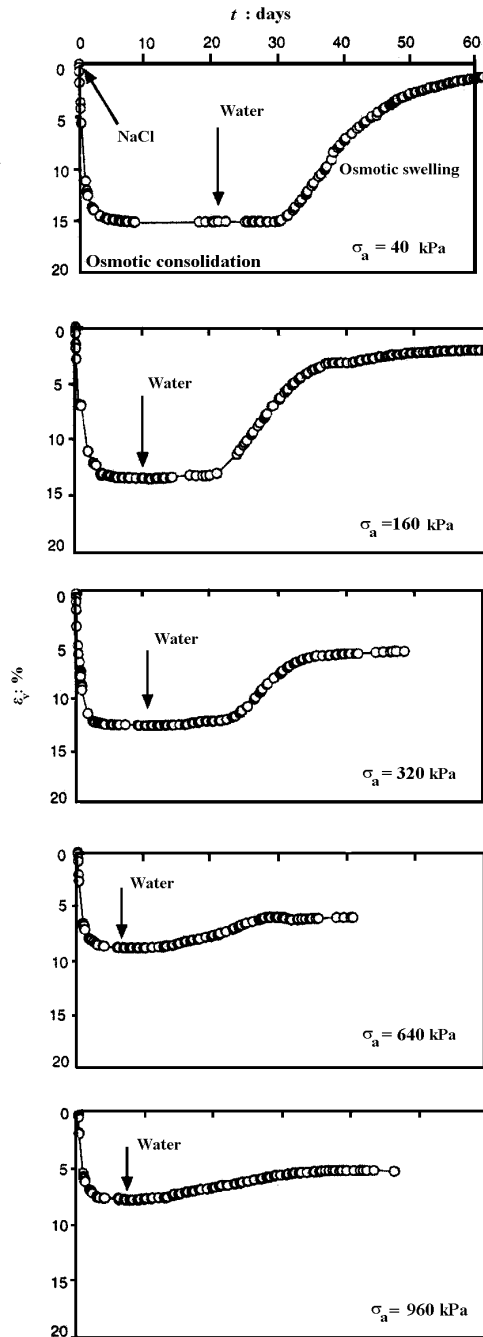


Figura 6.6. Bentonita de Ponza expuesta a NaCl y re-expuesta a agua a diferentes cargas axiales (Di Maio, 1996).

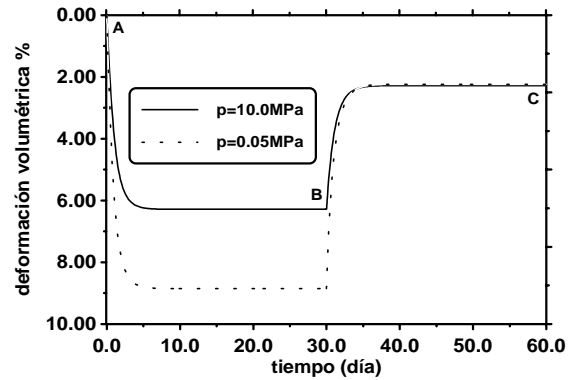


Figura 6.7. Respuesta del modelo al ciclo de exposición a solución de NaCl y agua.

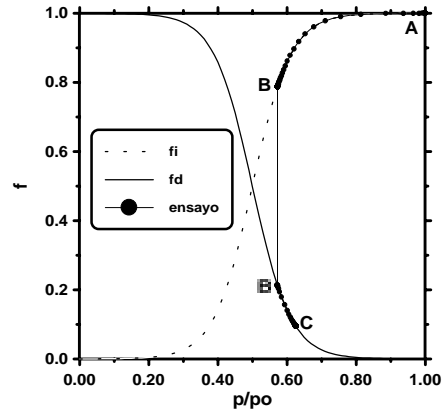


Figura 6.8. Valores de las funciones de interacción a lo largo del ensayo realizado bajo la carga de 10MPa.

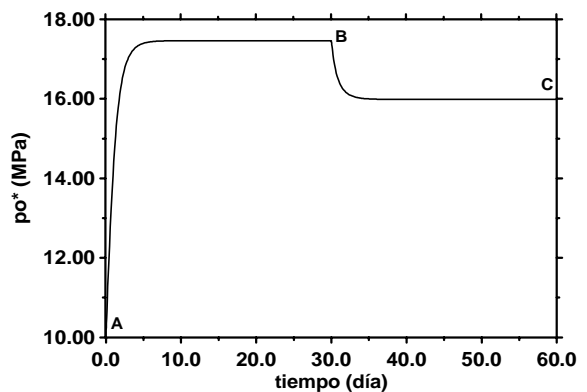


Figura 6.9. Evolución de la tensión de preconsolidación del ensayo realizado bajo la carga de 10MPa.

Analizando únicamente el comportamiento de la microestructura en la figura 6.10, se verifica que en realidad esta presenta al final del ciclo una pequeña deformación neta de expansión. Esto ocurre porque los cationes intercambiables KX , MgX_2 , y CaX_2 fueron removidos cuando se expuso la muestra a la solución saturada de $NaCl$, dejando el suelo homoionizado de sodio y por ello con una microestructura más expansiva en el momento en que se reemplaza la salmuera por el agua destilada. De esto se concluye que el mecanismo de acoplamiento entre macro y micro estructuras (mecanismo β) es necesario para explicar el comportamiento elastoplástico del suelo presentado en la figura 6.6.

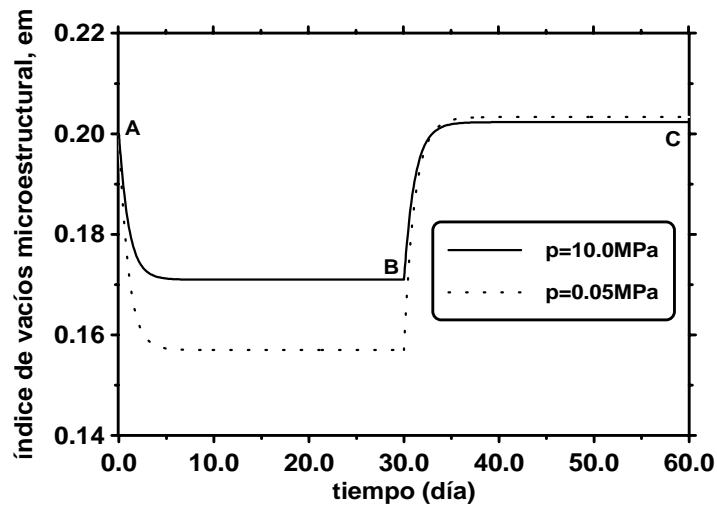


Figura 6.10. Evolución del índice de vacíos micro de los ensayos realizados bajo las cargas de 10MPa y 0.05MPa.

En los ensayos de la figura 6.11 se puede ver el efecto combinado del comportamiento de la arcilla de Ponza sometida a sucesivas acciones químicas y mecánicas. Se prepararon las muestras a su límite líquido utilizando agua y una solución saturada de $NaCl$. Por esta razón el índice de vacíos inicial de la muestra preparada con la solución salina es alrededor de $1/7$ de la preparada con agua. De esta figura, Di Maio (1996) observa que la curva de descarga de la arcilla con solución inicialmente saturada de $NaCl$ es prácticamente horizontal mientras que la muestra saturada con agua presenta un gran hinchamiento. También en esta figura, se aprecia como muestras inicialmente saturadas con agua fueran sometidas al siguiente ciclo: carga hasta tensión axial de 1200kPa (figura 6.11(a)) o 40kPa (figura 6.11(b)), exposición a $NaCl$, carga otra vez hasta 2500kPa, descarga y finalmente exposición a agua. En estos ensayos se verifica la dependencia de la retracción con la tensión axial aplicada cuando se expone la muestra a la solución salina. El hinchamiento final debido a la re-exposición de las muestras a agua alcanza la curva de descarga de la arcilla no expuesta a la solución salina.

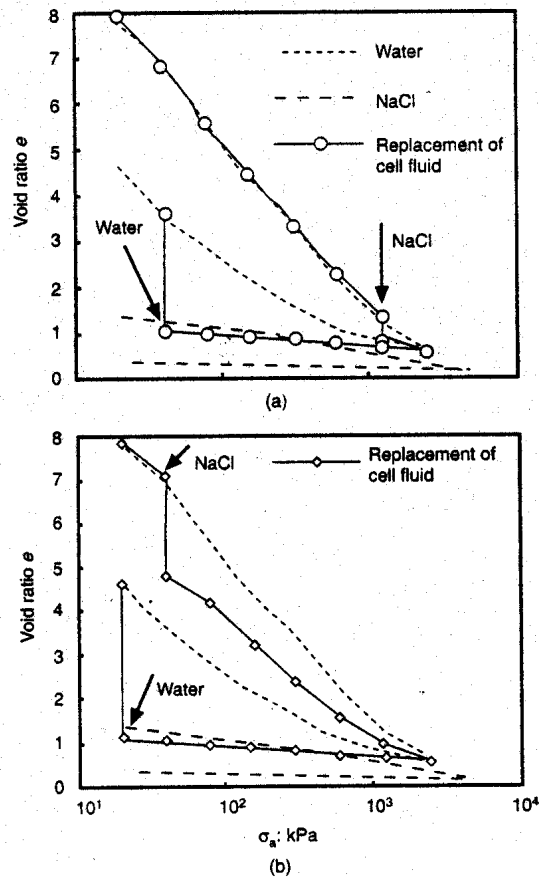


Figura 6.11. Bentonita de Ponza sometida a acciones combinadas químico-mecánicas (Di Maio, 1996).

En la figura 6.12 se puede ver que el modelo es capaz de reproducir cualitativamente este comportamiento. Se verificó que, al igual que en el ensayo, el hinchamiento final debido a la exposición al agua alcanza la curva de descarga de la arcilla no expuesta a NaCl. Esto ocurre cuando se vuelve a cargar ambas muestras (salina y no salina) hasta una tensión de preconsolidación lo suficientemente alta (10MPa) para que las dos líneas de consolidación virgen se encuentren, llevando las muestras a un mismo estado final con respecto las variables de historia e y p_o^* , aunque siguiendo diferentes trayectorias (con y sin exposición a solución salina).

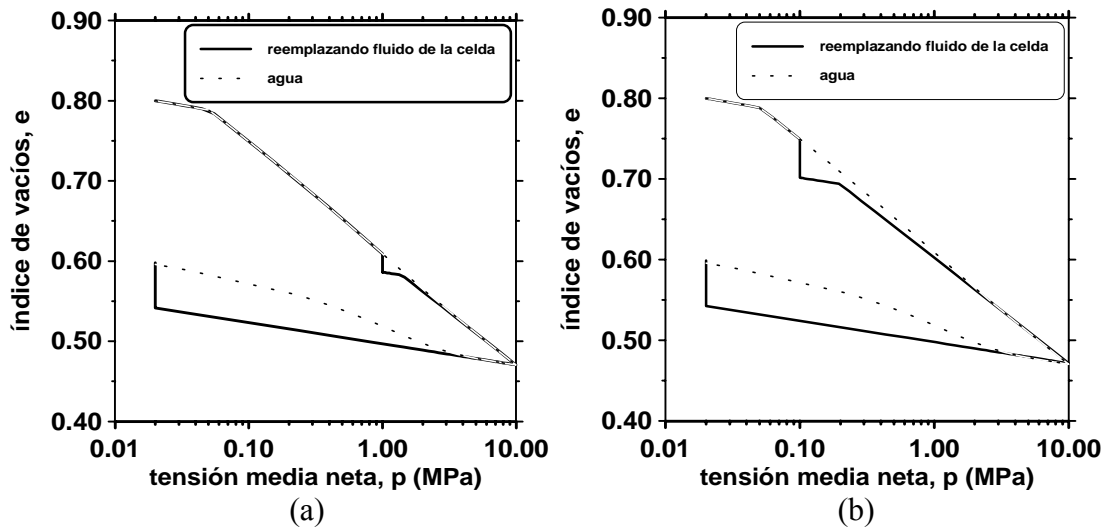


Figura 6.12. Respuestas del modelo a la exposición a solución salina para diferentes tensiones de confinamiento y re-exposición a agua después de descargada la muestra.
 (a) Exposición a solución salina a carga aplicada de 1MPa.
 (b) Exposición a solución salina a carga aplicada de 0.1MPa.

6.4.2. Ensayos de presión de hinchamiento

Cuando se restringe el hinchamiento de un suelo expansivo a un volumen inferior al de su máximo hinchamiento, el suelo desarrollará una presión de hinchamiento. Esta propiedad de los suelos expansivos es una de las principales razones de su utilización como material aislante en los almacenamientos de residuos radiactivos. Por tanto, es de gran interés conocer los efectos de acciones químicas en la presión de hinchamiento de los materiales expansivos utilizados en estas aplicaciones.

Para soluciones salinas, las acciones químicas básicas aquí consideradas son los cambios de succión osmótica y el intercambio de cationes. Estas dos acciones tienen lugar a partir del momento en que el material expansivo entra en contacto con un agua de diferente composición a la del agua inicial de los poros, como por ejemplo la hidratación de la barrera arcillosa con el agua proveniente de la roca alojante en un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos profundo.

En este apartado, se presentan ejemplos de aplicación del BExCM ilustrando como estas acciones químicas influyen en la presión de hinchamiento del suelo de referencia. Al igual que en el apartado anterior, para comparaciones cualitativas se utilizarán resultados experimentales de presiones de hinchamiento medidas en suelos expansivos sometidos a soluciones de distintas composiciones químicas.

Daupley (1997) realizó una serie de ensayos en una roca arcillosa del sur de Francia² verificando la influencia de la química del agua de los poros en la presión de hinchamiento de este material. En la figura 6.13, en uno de estos ensayos se satura el material con agua de concentración salina diluida y posteriormente se la reemplaza por agua de composición 0.7N de NaCl. Se verifica que el contacto con el agua salina hace que la presión de hinchamiento aumente hasta un valor de 1.2MPa y, en este punto, el ensayo fue interrumpido.

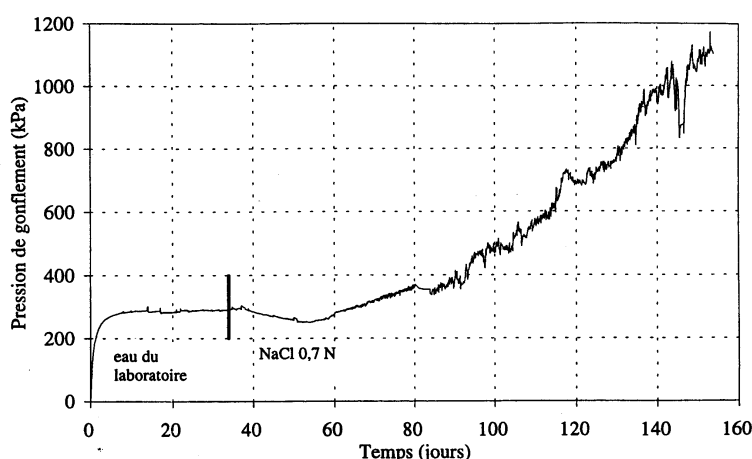


Figura 6.13. Ensayo de presión de hinchamiento en una roca arcillosa puesta en contacto con una solución salina 0.7N de NaCl (Daupley 1997).

Aunque se trata de un material arcilloso de baja porosidad ($<0,1$), donde flujos osmóticos pueden tener lugar, el proceso de *consolidación osmóticamente inducida* no explica el aumento de la presión de hinchamiento de la figura 6.13. Tratándose de un ensayo a volumen constante y considerando el principio de las tensiones efectivas, para que no salga agua de la muestra se generará una presión hidráulica negativa en su interior y para mantener el mismo estado de tensiones efectivas (y no deformar), el suelo tendría que responder con una disminución de la presión (total) de hinchamiento.

En otro ensayo con este mismo material (figura 6.14), Daupley (1997) siguió inicialmente la misma secuencia de exposición del ensayo anterior (figura 6.13), pero antes que se procediera el aumento de la presión de hinchamiento debido a la exposición a la solución 0.7N de NaCl, se expuso la muestra a una solución saturada de esta misma sal y se verificó una disminución de la presión de hinchamiento.

² Arcillita de baja porosidad ($<0,1$) y baja conductividad hidráulica ($<10^{-13}$ m/s), presentando dos direcciones principales de anisotropía (paralela y perpendicular al plano de estratificación) y fracción arcillosa constituyéndose básicamente de illita y caolinita (Daupley, 1997).

Conforme se vio anteriormente, Karnland (1997) también verificó la disminución de la presión de hinchamiento cuando expuso una bentonita compactada (MX-80), inicialmente hidratada con agua destilada, a una solución saturada de NaCl (figura 6.2).

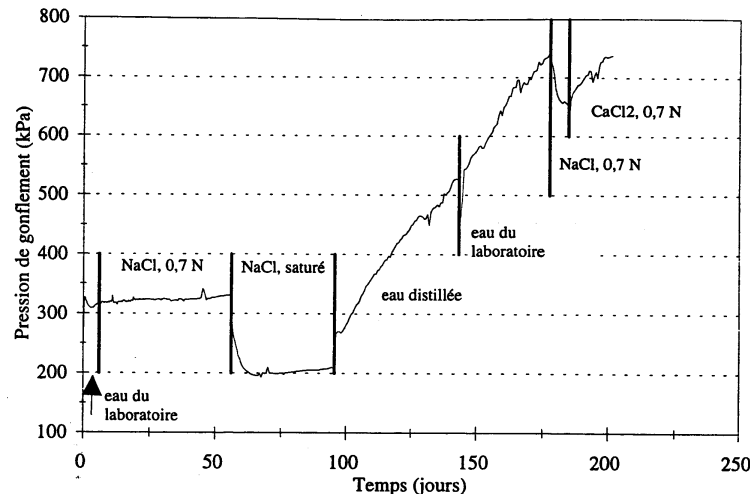


Figura 6.14. Ensayo de presión de hinchamiento en una roca argilácea puesta en contacto con varios tipos soluciones salinas (Daupley 1997).

El modelo aquí presentado ofrece una explicación para este comportamiento. En la figura 6.15, en dos ensayos realizados con las mismas condiciones iniciales para el suelo de referencia (definidas en la tabla III) se expone una muestra a una solución 1M de NaCl y la otra a una solución saturada de NaCl (6.1M). Se fijó la presión de hinchamiento inicial en los dos ensayos a 4MPa. En esta figura, se verifica que la exposición a la solución saturada disminuye la presión de hinchamiento mientras que para la solución 1M de NaCl hay un aumento de la presión de hinchamiento.

Este comportamiento viene regido por la microestructura. Por un lado el aumento de la succión osmótica en los dos casos presenta una tendencia a la retracción de la microestructura y consecuentemente una disminución de la presión de hinchamiento. Por otro lado, las soluciones de NaCl promoverán la sustitución de los cationes en el complejo de cambio de la arcilla por el sodio en solución. Este intercambio de cationes resulta en una tendencia a la expansión de la microestructura y, consecuentemente, en un aumento de la presión de hinchamiento. En el ensayo con la solución saturada de NaCl la tendencia a retracción microestructural por aumento de succión osmótica supera la tendencia al hinchamiento dada por el intercambio de cationes y por eso la presión de hinchamiento disminuye. Pero en el caso de la solución 1M de NaCl, la succión osmótica es muy inferior a la de la solución saturada y gana la tendencia al hinchamiento dada por el intercambio de cationes, lo que resulta en un aumento de la presión de hinchamiento al final del ensayo.

Para el ensayo de la figura 6.14, el modelo también ha sido capaz de reproducir cualitativamente la siguiente fase de exposición de la muestra a la solución de agua destilada (entre 100 y 150 horas), que resultó en un aumento de la presión de hinchamiento. En las fases posteriores del ensayo, tal como se observa en la figura, el reemplazo del tipo de solución se hace cuando todavía no se estabiliza la presión de hinchamiento, lo que indica que tampoco el proceso de difusión de sales de la etapa anterior se ha concluido. Desde el punto de vista de la modelación, esto implica que no se conocen las condiciones iniciales de cada fase y, por tanto, se decidió no simular las fases finales de este ensayo.

Se consideró para los ensayos de la figura 6.15 que el suelo tenía una tensión de preconsolidación inicial de $p_o^* = 8\text{MPa}$. En este caso, la razón de sobreconsolidación inicial vale $p/p_o = 0,5$ y, conforme se observa en la figura 6.16, ambos ensayos empiezan en el punto de equilibrio (A). Los puntos A, B y C indican las trayectorias de estos ensayos en las figuras 6.15 y 6.16.

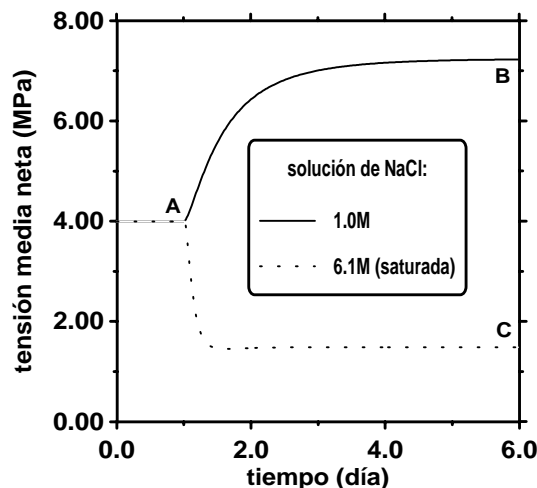


Figura 6.15. Evolución de la presión de hinchamiento del suelo de referencia expuesto a soluciones de NaCl de diferentes concentraciones.

Sería interesante verificar como los resultados varían con la tensión de preconsolidación inicial. Suponiendo inicialmente $p_o^* = 5\text{MPa}$, al poner la muestra en contacto con la solución 1M de NaCl esta ya no alcanzará el valor anterior de 7MPa de presión de hinchamiento (figura 6.17). En este caso, el estado de tensiones alcanza la superficie de fluencia de la macroestructura, causando un colapso macroestructural. Como se trata de un ensayo a volumen constante, la microestructura expandirá más que en el caso anterior y por ello la presión de hinchamiento no aumentará tanto. Este fenómeno de colapso químicamente inducido en la macroestructura y la consecuente disminución de la presión de hinchamiento están directamente relacionados con el estado de compactación del suelo. Una tensión de preconsolidación más pequeña está relacionada con una macroestructura más abierta y colapsable.

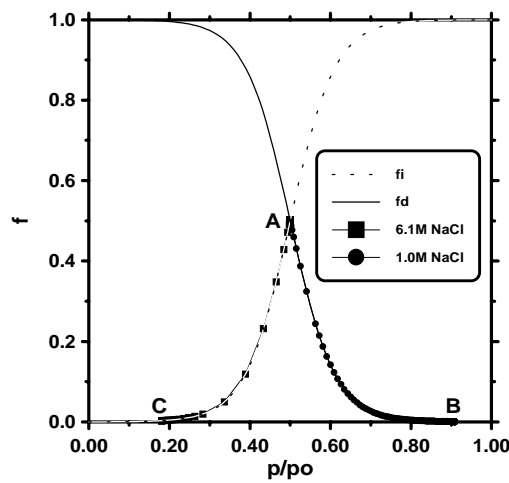


Figura 6.16. Valores de las funciones de interacción a lo largo de los ensayos de presión de hinchamiento para diferentes soluciones de NaCl.

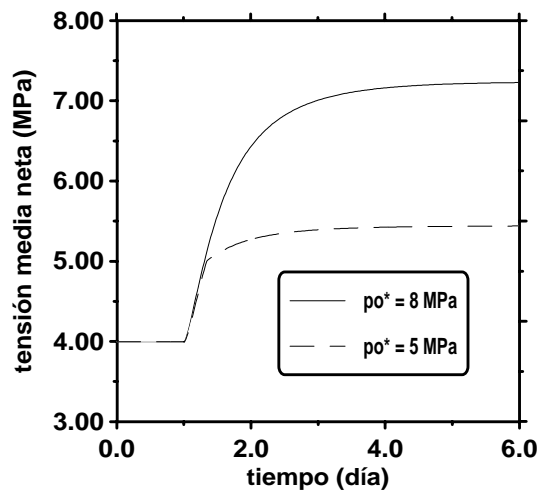


Figura 6.17. Ensayos de presión de hinchamiento exponiendo suelo hipotético a solución 1M de NaCl considerando diferentes presiones de preconsolidación iniciales.

6.5. PROBLEMAS DE CONTORNO QUÍMICO-MECÁNICOS

Santamarina & Fam (1995) realizaron dos programas experimentales de ensayos: uno utilizando un equipo edométrico modificado y otro realizado en una celda de compresión isótropa. Además, utilizaran tres tipos suelos: polvo de sílica ("silica flour"), caolinita y bentonita.

En los ensayos, después de una fase de consolidación mecánica, se expusieron estos tres materiales a soluciones concentradas de KCl. La intención era averiguar el efecto de las fuerzas entre partículas (de naturaleza físico-química) para diferentes materiales de granulometría fina. En un extremo se encuentra el polvo de sílica, relativamente granular, que representa un material no plástico. En el otro extremo se encuentra la bentonita, de granulometría muy fina, naturaleza coloidal, que representa un suelo plástico.

La bentonita y caolinita se tratan de arcillas sódicas y el principal cation en el agua de los poros era el sodio, tal como el suelo de referencia presentado en la sección 6.3. La caolinita tiene un límite líquido de 50%, un límite plástico de 35% y una capacidad de intercambio de cationes (CIC) entre 20 y 30 meq/100g de sólido. La bentonita tiene un límite líquido de 250%, un límite plástico de 50% y una capacidad de intercambio de cationes (CIC) entre 80 y 85 meq/100g de sólido. Se prepararon las muestras utilizando una técnica de consolidación para lodos ("slurry") (Santamarina & Fam, 1995). La muestra de bentonita resultante tiene un índice de vacíos de 4,6. Más detalles de los ensayos y materiales utilizados se encuentran en Santamarina & Fam (1995) y Fam & Santamarina (1996).

De los tres materiales, como era de esperar, la bentonita fue el suelo que se presentó más deformable en la fase de exposición a la solución salina. En el polvo de sílica no se observaron deformaciones químicamente inducidas. Desde el punto de vista de las mediciones de deformaciones y presiones de poros en las muestras (ensayo edométrico modificado), la caolinita se comportó de manera semejante a la bentonita, pero deformando menos y generando presiones de poros menores. Las partículas de caolinita están en el límite superior del rango de tamaños para partículas coloidales y manifiesta un comportamiento que no siempre se explica a través de la teoría de la capa doble, mientras las bentonitas generalmente se comportan de acuerdo con esta teoría (Fam & Santamarina, 1996).

En esta sección se compararán (cualitativamente) los ensayos realizados sobre muestras de bentonita con las simulaciones numéricas para el suelo de referencia utilizando el modelo constitutivo químico-mecánico BExCM.

Aunque el modelo constitutivo considera que la transferencia de agua entre macro y micro estructuras es instantánea (equilibrio local), se tratan de problemas dependientes del tiempo. La evolución de la deformación y presión de poros en la muestra depende básicamente de la velocidad con que la sal disuelta se difunde, dada por el coeficiente de difusión molecular, y de la velocidad que las presiones de poros se disipan, que depende básicamente de la permeabilidad y compresibilidad del suelo. Por tanto, la dependencia del problema con el tiempo existe porque en la modelación se consideran los ensayos como problemas de contorno.

6.5.1. Ensayo edométrico modificado

Santamarina & Fam (1995) construyeron una celda edométrica con drenaje únicamente en la cara superior de la muestra (figura 6.18). Esta celda permite la medida continua de presión de poros (cara inferior de la muestra), velocidad de ondas de corte y constante dieléctrica durante la fase de exposición a la solución salina. En este análisis se considerará solamente las medidas de deformación vertical y presiones de poros.

Para la muestra de bentonita, después de finalizada la fase de consolidación primaria bajo una carga de 100kPa, se adicionó continuamente una solución 4,0M de KCl en la cara superior de la celda (figura 6.18).

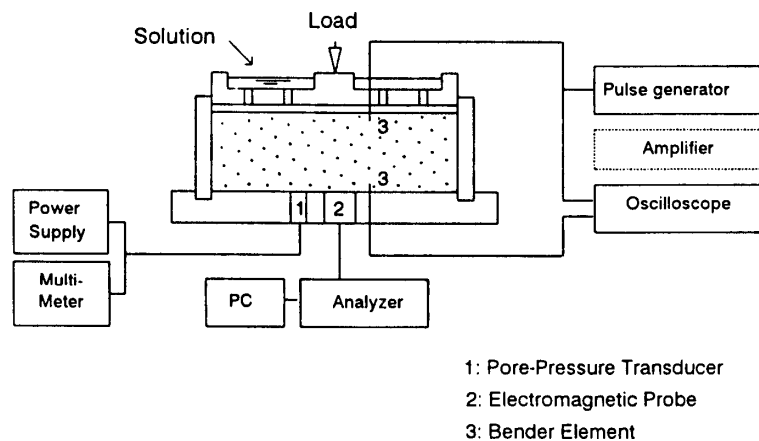


Figura 6.18. Esquema de la celda edométrica modificada (Santamarina & Fam, 1995).

En la simulación numérica se sometió el suelo de referencia a la misma secuencia de acciones mecánicas y químicas. Para ello, se utilizó una malla de elementos finitos unidimensional de 20mm y cien elementos. Las condiciones de contorno para la fase de exposición a la solución salina son: en la cara superior de la muestra se mantiene una carga constante de 100kPa, se fija la presión de poros a cero (se trabaja con *exceso* de presión de poros) y se imponen las concentraciones de la solución de KCl. En la cara inferior se considera contorno impermeable para los problemas hidráulico y de transporte y para el problema mecánico se fija el desplazamiento vertical.

Además de los parámetros de la tabla I, en este problema de contorno se adoptaron los siguientes parámetros adicionales para el suelo de referencia: permeabilidad intrínseca (constante) de $5 \times 10^{-19} \text{m}^2$, coeficiente de difusión molecular de $7,6 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ (tortuosidad = 1,0), no se considera dispersión mecánica y la capacidad de intercambio de cationes es de 80 meq/100g de sólido.

En las figuras 6.19 y 6.20 se puede apreciar como, en el ensayo y en la simulación numérica, las deformaciones verticales se desarrollan mientras la solución salina se difunde en la muestra. En el ensayo (figura 6.19), de la deformación vertical medida, sólo el 8% se puede atribuir a consolidación secundaria (Santamarina & Fam, 1995).

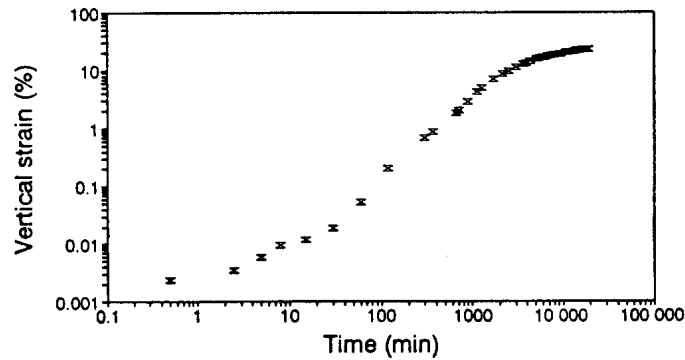


Figura 6.19. Resultado experimental: deformación vertical medida en la muestra de bentonita expuesta a la solución de 4,0M de KCl (Santamarina & Fam, 1995).

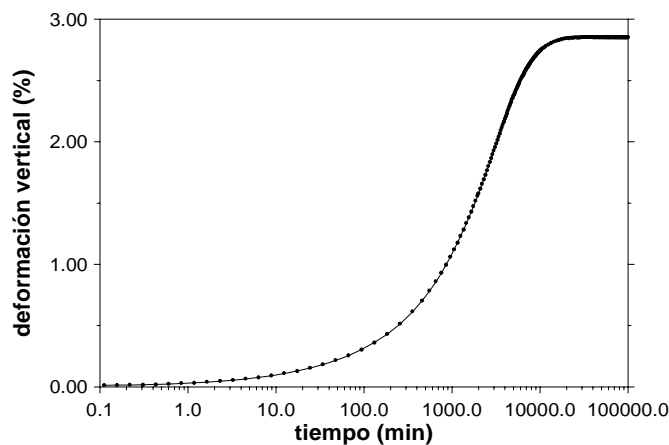


Figura 6.20. Simulación numérica: deformación vertical calculada en la muestra expuesta a la solución 4,0M de KCl.

Desde el punto de vista del modelo constitutivo propuesto, esta tendencia de disminución de volumen se explica analizando únicamente el comportamiento de la microestructura. El suelo de referencia representa inicialmente una arcilla sódica y la concentración del agua de los poros es diluida con respecto a una salmuera (tabla III). Cuando se expone la muestra a una solución 4,0M de KCl, la succión osmótica, que inicialmente era de 1,6MPa, aumentará hasta 19MPa.

Además, el K^+ en solución sustituirá los demás cationes intercambiables en el complejo de cambio del suelo. Cuando se expone la arcilla sódica a una solución saturada de KCl, el K^+ en

la solución irá reemplazar el NaX y demás cationes en el complejo de cambio de la arcilla. Puesto que β_m^K es inferior a β_m^{Na} (tabla I), se observó que durante el proceso de intercambio de cationes β_m en la ecuación (5.5) disminuye, induciendo una retracción microestructural.

Por tanto, la exposición del suelo de referencia a una solución concentrada de KCl causará aumento de succión osmótica e intercambio de cationes, teniendo como resultado la retracción de la microestructura, que a su vez inducirá en la macroestructura deformaciones plástica de retracción.

En las figuras 6.21 y 6.22 se presenta, respectivamente, la generación de presiones de poros positivas medida en la cara inferior de muestra y calculada en la simulación numérica con el suelo de referencia. Se observó (Santamarina & Fam, 1995) generación de presiones de poros positivas tanto en la caolinita como en la bentonita. Esto indica que el mecanismo de cambio de volumen osmótico predominante en estos materiales es la *consolidación osmótica*. La *consolidación osmóticamente inducida* originaría la generación de presiones de poros negativas en el interior de la muestra (Barbour & Fredlund, 1989).

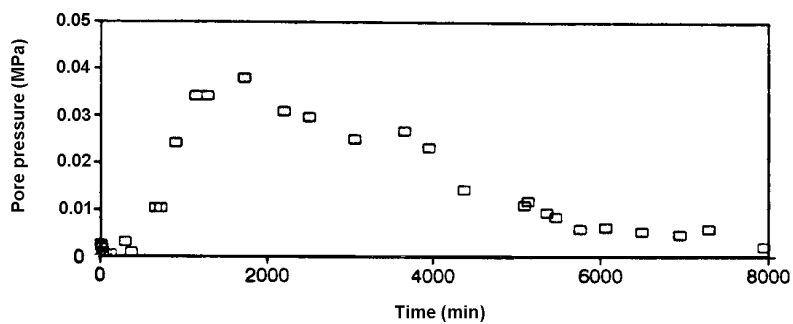


Figura 6.21. Resultado experimental: presiones de poros medidas en la cara inferior de la muestra de bentonita expuesta a la solución de 4,0M de KCl (Santamarina & Fam, 1995).

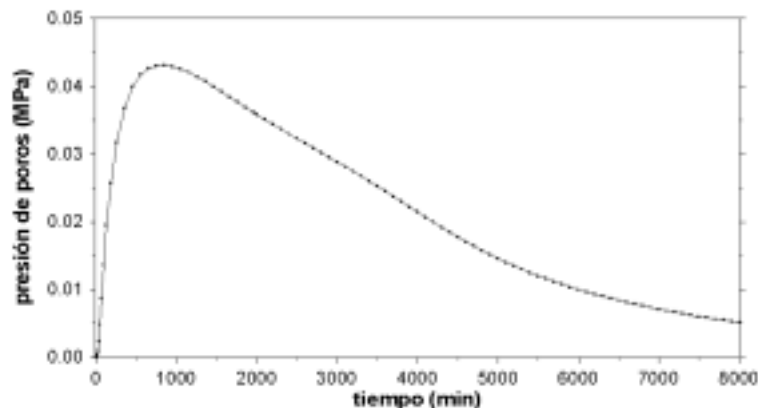


Figura 6.22. Simulación numérica: presiones de poros calculadas en la cara inferior de la muestra durante la fase de exposición a la solución 4,0M de KCl.

La generación de presiones de poros positivas representa la respuesta no drenada del suelo a la tendencia a retracción químicamente inducida, que es un fenómeno análogo a la consolidación mecánica, donde en este caso el aumento de las presiones de poros es debido a la aplicación instantánea de una carga que comprime el suelo saturado.

Se puede decir que esta generación de presiones de poros ocurre porque las sales se difunden en la muestra más rápidamente que las presiones de poros se disipan. Por tanto, el transporte de las sales disueltas en la muestra, que tiene como parámetro dominante el coeficiente de difusión molecular, predomina sobre el flujo de líquido. El flujo de líquido es el responsable de la disipación de las presiones de poros y su parámetro clave, la permeabilidad, es muy baja en arcillas.

En la figura 6.23 se puede apreciar el proceso de consolidación osmótica a través de las distribuciones de las variables hidro-mecánicas y químicas en la muestra (valores calculados para el suelo de referencia). Cambios de porosidad, concentraciones y presiones de poros están totalmente acoplados. En esta figura, se verifica como el K^+ se difunde hacia la cara inferior la muestra (a) y el suelo va adsorbiendo este cation hasta que en su complejo de cambio sólo se encuentre la especie KX (b). En este proceso de difusión, se generan presiones de poros positivas que se disipan a lo largo del tiempo (c), cambiando el estado de tensiones efectivas y generando un flujo de líquido saliendo de la muestra por su cara superior (d). A medida en que la sal se difunde y las presiones de poros se disipan, se verifica como la porosidad disminuye (e) y la muestra se deforma verticalmente (f).

6.5.2. Ensayos en celda isótropa

En esta celda, se aplica un estado de tensiones isótropo en la muestra permitiendo el drenaje por sus caras superior e inferior (figura 6.24). Se expone la bentonita a una solución saturada de KCl , que es continuamente reemplazada en la cara inferior de la muestra con el fin de mantener constante la concentración impuesta. Las mediciones realizadas en los ensayos que interesan para la presente validación cualitativa del modelo son las deformaciones verticales y volúmenes de líquido expelidos por las caras superior e inferior de la muestra durante las fases de consolidación mecánica y osmótica.

En la figura 6.25, las deformaciones verticales en la bentonita y los volúmenes de agua expelidos de los poros, medidos durante la consolidación mecánica (a) y la posterior consolidación osmótica (b), se encuentran representados en función del tiempo. La exposición de la muestra a la solución salina empezó después del final de la consolidación primaria, bajo una tensión efectiva de confinamiento de 105kPa.

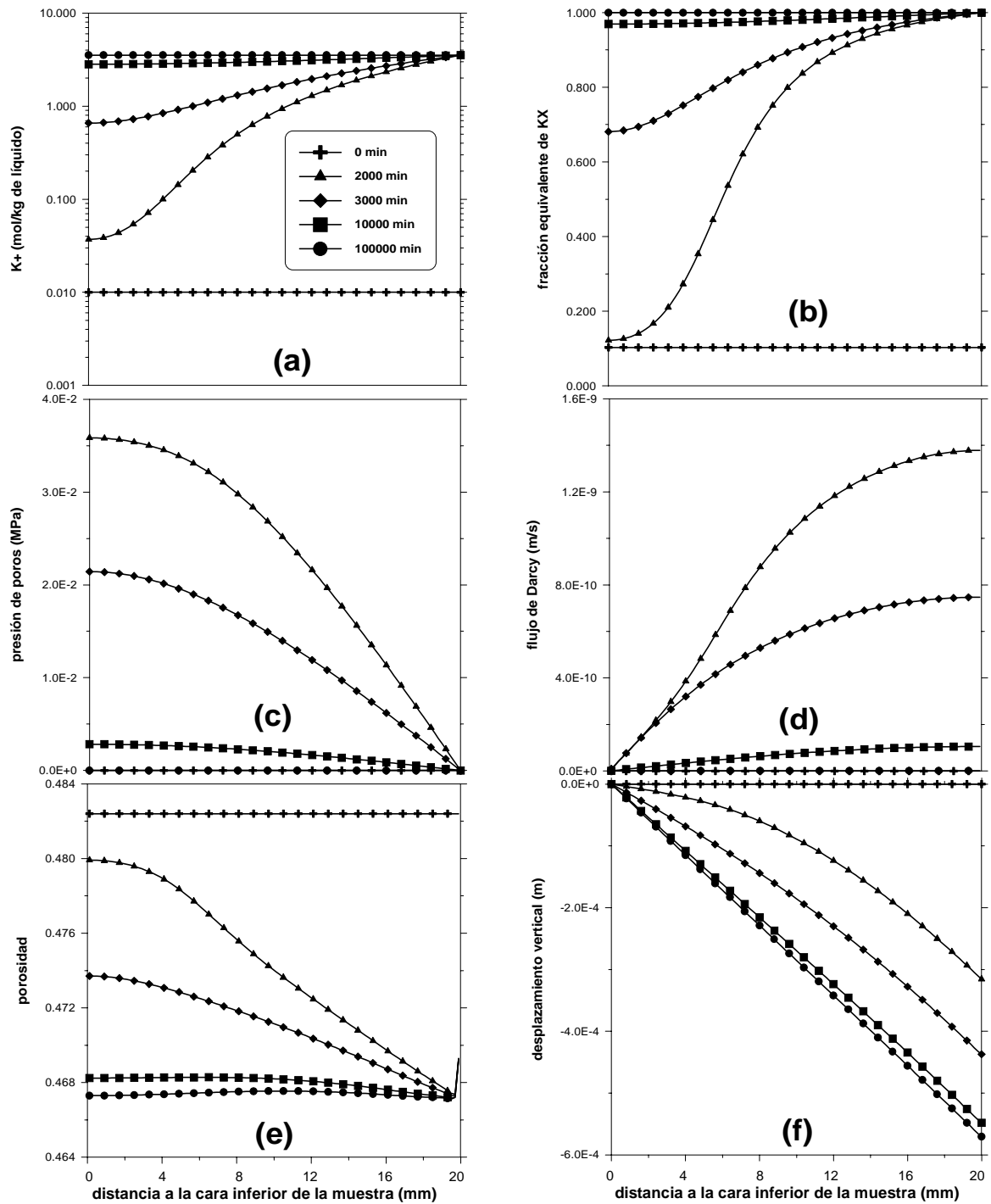


Figura 6.23. Simulación numérica del proceso de consolidación osmótica para el ensayo edométrico.

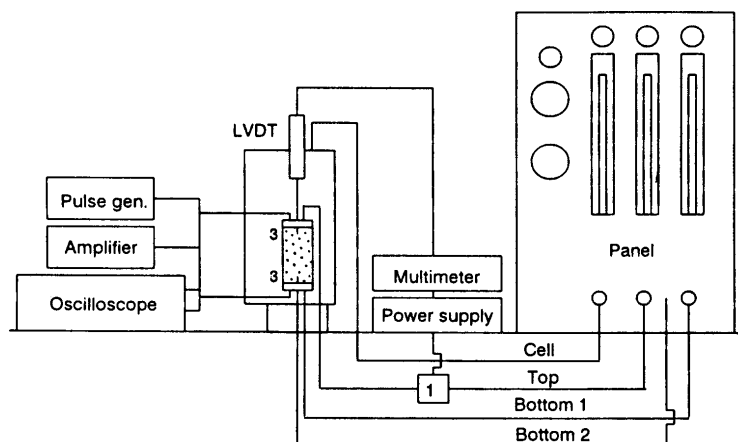


Figura 6.24. Esquema de la celda isotrópica (Santamarina & Fam, 1995).

Considerando la fase de consolidación osmótica, en la figura 6.25(b) se puede constatar como el volumen expelido por la cara inferior de la muestra inicialmente es mayor que el volumen expelido por la cara superior. Esto era lo que se debería esperar, considerando que el proceso de difusión empieza en la parte inferior de la muestra. Después de aproximadamente 2000 minutos, los flujos de líquido son prácticamente iguales en ambas caras (Santamarina & Fam, 1995).

En la figura 6.26 se observa como la modelo numérico hidro-mecánico y químico reproduce cualitativamente los resultados experimentales de la figura 6.25. En este análisis, se utilizó una malla de elementos finitos unidimensional de 30mm (altura de la muestra) y cien elementos. Las condiciones de contorno para la fase de exposición a la solución salina son, para el problema mecánico, de aplicación de una carga constante isotrópica de 105kPa en toda la muestra y de desplazamiento vertical fijo en la cara inferior. Para los problemas hidráulico y de transporte, en la cara inferior de la muestra se fija la presión de poros a cero y se imponen las concentraciones de la solución de KCl. En la cara superior se considera drenaje libre: se impone presión de poros igual a cero y los flujos de solutos salientes de la muestra vienen dados en función del flujo de líquido expelido en esta cara. Los parámetros del material son los mismos utilizados para el suelo de referencia definido en las secciones anteriores.

Análogamente al ensayo edométrico, en la figura 6.27 se verifica el proceso de consolidación osmótica para el ensayo isotrópico: el K^+ se difunde hacia la cara superior la muestra (a) y el suelo va adsorbiendo este catión hasta que en su complejo de cambio sólo se encuentre la especie KX (b). En este proceso de difusión, se generan presiones de poros positivas que se disipan a lo largo del tiempo (c), cambiando el estado de tensiones efectivas y generando flujos de líquido saliendo de la muestra por ambas caras (d). A medida en que la sal se difunde y las presiones de poros se disipan, se observa como la porosidad disminuye (e) y la muestra se deforma verticalmente (f).

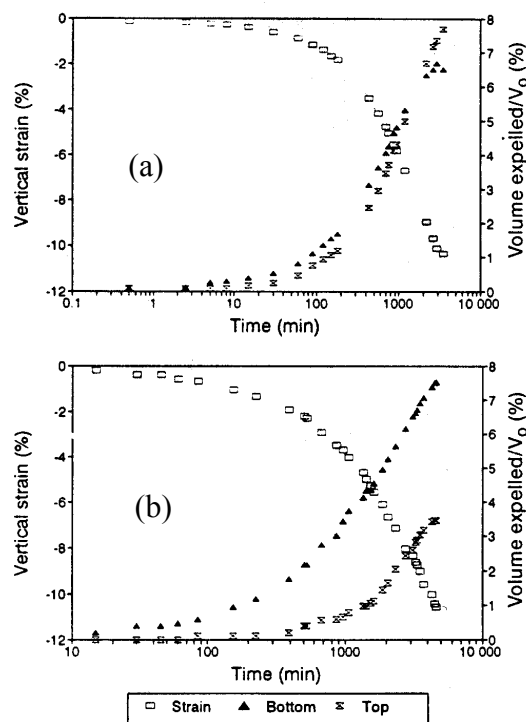


Figura 6.25. Resultados experimentales: deformaciones verticales y volumen expelido en las caras superior e inferior de la muestra de bentonita (Santamarina & Fam, 1995).
 (a) Consolidación mecánica de 70 a 105kPa.
 (b) Consolidación osmótica bajo la carga de 105kPa.

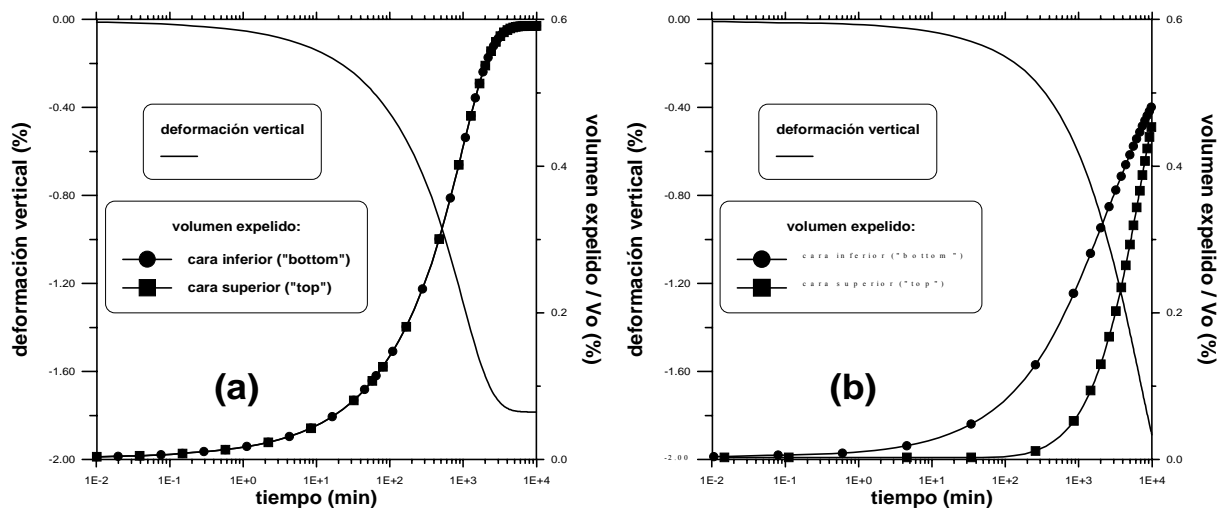


Figura 6.26. Simulación numérica: deformaciones verticales y volumen expelido en las caras superior e inferior de la muestra.
 (a) Consolidación mecánica de 70 a 105kPa.
 (b) Consolidación osmótica bajo la carga de 105kPa.

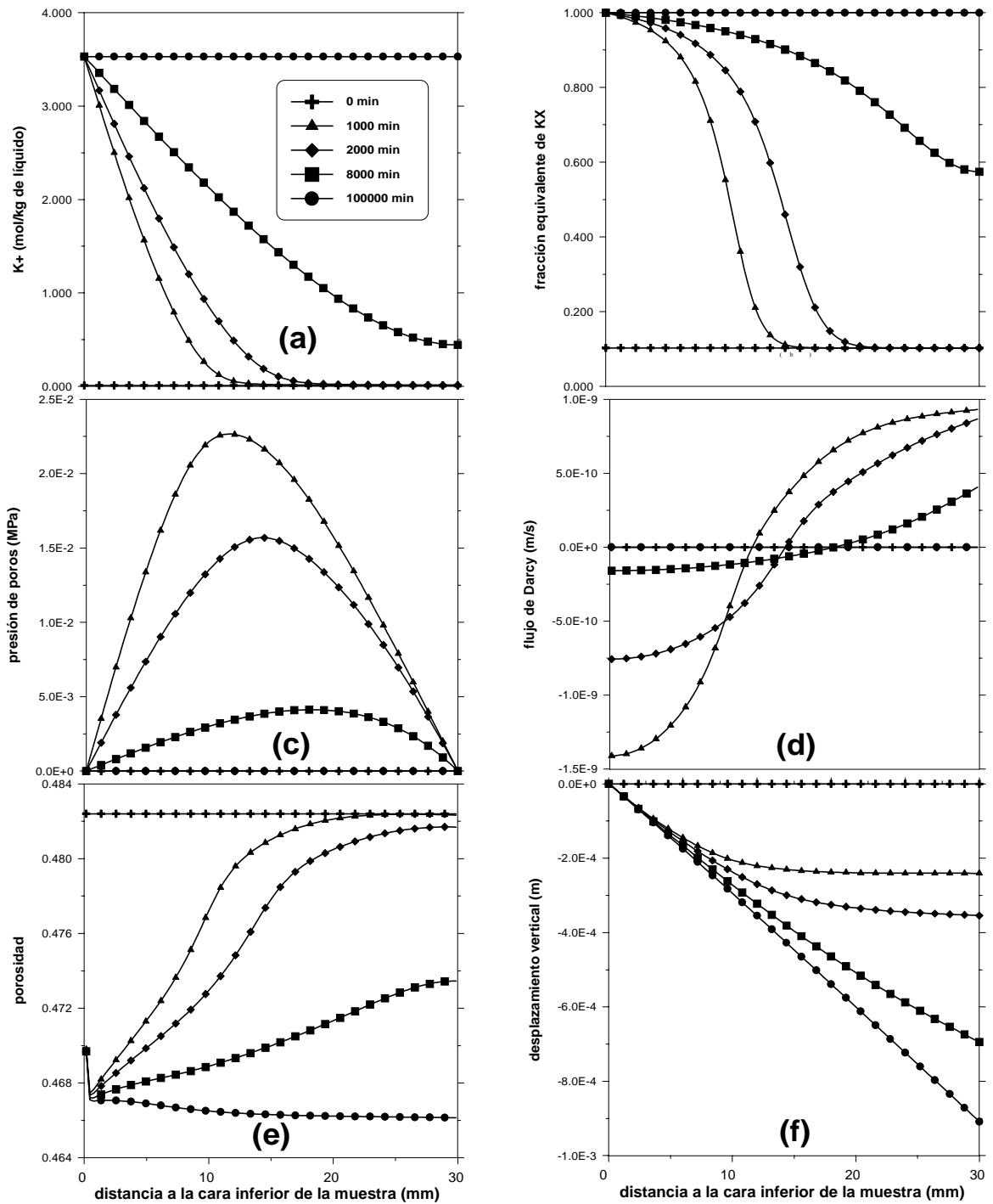


Figura 6.27. Simulación numérica del proceso de consolidación osmótica para el ensayo en celda isótropa.

Así como en el ensayo realizado por Santamarina & Fam (1995), en la figura 6.27(d) se verifica como en la simulación numérica inicialmente sale más agua por la cara inferior de la muestra (1000 minutos). Hacia los 2000 minutos, los flujos de líquido salientes de la muestra se parecen en ambas caras, tal como observaron Santamarina & Fam (1995) en el ensayo. Pero dando continuidad a la simulación numérica (se interrumpió el ensayo antes de los 5000 minutos), el modelo predice que el flujo saliente de la cara inferior disminuye más rápidamente que el de la cara superior (ver flujos calculados a los 8000 minutos).

Este ensayo también demuestra que el mecanismo de cambio de volumen osmótico predominante en estos materiales es la *consolidación osmótica*. La muestra expelle agua de los poros por ambas caras y, por tanto, no hay predominio de flujo osmóticamente inducido durante el proceso deformacional. En el caso de predominio del flujo osmótico, el caudal medido en la cara superior de la muestra sería entrante, ya que este flujo (ecuación (6.1)) va dirigido de la cara superior (bajas concentraciones salinas) hacia la cara inferior (altas concentraciones salinas).

6.6. LIMITACIONES DEL MODELO CONSTITUTIVO

Se intentó también reproducir cualitativamente el ensayo cíclico de la figura 5.2, realizado por Di Maio (1996). En la figura 6.28, se verifica que para el primer ciclo de exposición a salmuera y agua destilada el modelo se muestra cualitativamente de acuerdo con el ensayo, ambos presentando una retracción neta. Pero en los siguientes ciclos, el ensayo presenta un aumento progresivo de la expansión no explicado por el modelo. Di Maio (1996) argumenta que posiblemente esto se debe al progresivo reemplazo de los demás cationes presentes en la bentonita natural por el Na^+ . Esto explica de manera bastante razonable las diferencias entre el experimento y el modelo, ya que este último considera para las reacciones de intercambio de cationes la condición de equilibrio local, implicando que estas reacciones son instantáneas y totalmente reversibles. Por tanto, para el modelo, a partir del primero ciclo toda la arcilla se encuentra homoionizada de sodio.

El efecto de irreversibilidad es más visible en los ensayos en los que se expuso las muestras a soluciones saturadas de CaCl_2 , como en el caso presentado en la figura 5.1. Como el modelo geoquímico adoptado en este trabajo considera que las reacciones de intercambio de cationes son completamente reversibles e instantáneas, el BExCM no puede reproducir el ensayo de la figura 5.1 de manera satisfactoria.

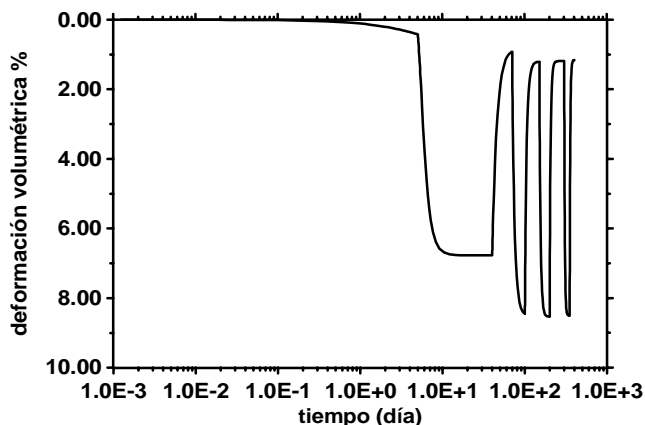


Figura 6.28. Respuesta del modelo a los ciclos de exposición de NaCl y agua. Reproducción cualitativa del ensayo de la figura 5.2.

Di Maio (1998) discute el comportamiento irreversible de la bentonita de Ponza expuesta a soluciones saturadas de CaCl_2 y KCl . Sus ensayos demuestran que para cargas bajas el comportamiento de este material es reversible, pero a cargas más altas la exposición a soluciones saturadas de estas sales causan deformaciones que no se recuperan cuando se reexpone la bentonita a solución de NaCl y agua destilada.

En la figura 5.1, las acciones químicas se hicieron bajo una carga de 320kPa y las deformaciones causadas por la exposición a CaCl_2 no se recuperaron con la reexposición a solución de NaCl y agua destilada. En contraste, Di Maio (1998) publica un ensayo (figura 6.29) que sigue la misma historia de acciones químicas bajo una carga de 40kPa y verifica la total reversibilidad de las deformaciones causadas por la exposición a CaCl_2 . La diferencia básica entre los ensayos de las figuras 5.1 y 6.29 es la carga axial aplicada.

Análogamente a lo que ocurre con las soluciones de CaCl_2 , Di Maio (1998) también verificó para las soluciones saturadas de KCl la dependencia de la irreversibilidad de la bentonita de Ponza con la carga aplicada. Di Maio (1998) considera que varios procesos pueden explicar la dependencia de este comportamiento químico-mecánico del material con el nivel de tensiones aplicado, por ejemplo tensiones elevadas pueden producir alteraciones en las condiciones termodinámicas de la capa doble creando regiones (entre los agregados de arcilla: microporosidad) donde los iones no pueden difundirse. Además, Di Maio (1996) afirma que es posible hacer reversibles las reacciones de intercambio a través de repetidas inmersiones de la arcilla en la solución saturada y a través del aumento de la temperatura de la solución.

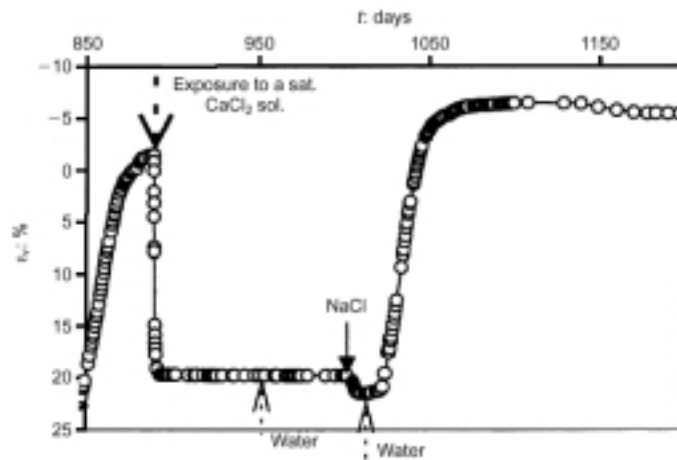


Figura 6.29. Efecto de la exposición de una solución saturada de NaCl previamente expuesta a una solución saturada de CaCl_2 . Ensayo realizado bajo una carga axial de 40kPa (Di Maio, 1998).

En base a estas evidencias y observaciones (también discutidas anteriormente en la sección 3.2), se considera que este comportamiento irreversible de la microestructura se debe a la irreversibilidad de las reacciones de intercambio de cationes bajo la aplicación de carga mecánica, concepto compatible con la hipótesis de deformaciones microestructurales reversibles. Pero, se necesita más evidencia experimental que avale esta conclusión, sobre todo en relación con la determinación de los cationes en el complejo de cambio de la arcilla sometida a acciones químicas bajo diferentes estados de tensiones.