



2.3 Comportamiento mecánico de los materiales salinos: propiedades del fluido de transporte y microestructuras asociadas

2.3.1 Mecanismos de deformación de la sal

El conocimiento del comportamiento mecánico de la sal y los agregados salinos se hace imprescindible debido a sus propiedades físicas como la alta impermeabilidad, el comportamiento viscoplástico y también hay que tener en cuenta, que se trata de un material altamente deformable y reactivo.

El comportamiento mecánico de la sal está íntimamente ligado a procesos térmicos, hidráulicos y químicos del medio (Figura 2.23).

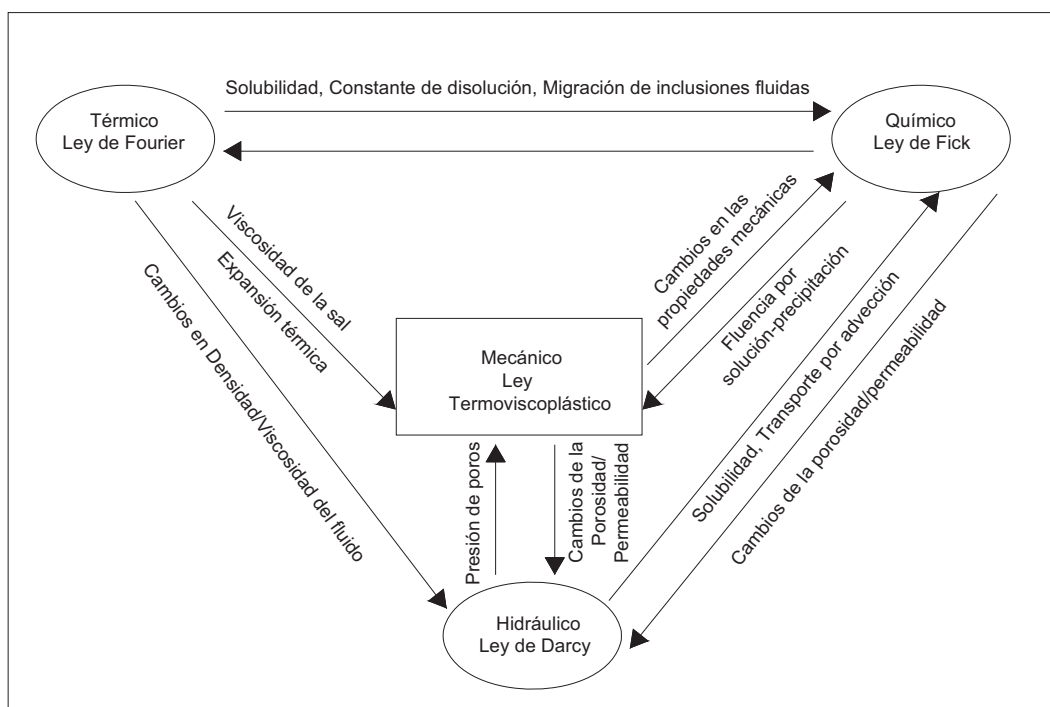


Figura 2.23.- Procesos y mecanismos característicos de los materiales salinos. Luna (2000).

La temperatura es un factor muy importante para evaluar la deformación de la sal, debido a que un incremento térmico provoca una disminución de la viscosidad. En esta tesina este factor se considerará constante en todo momento en el laboratorio y será de $\pm 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, de este modo no se considerará que se produzcan cambios termales y con ello cambios de viscosidad del material. De todas maneras en contraste con otros tipos de rocas, las cuales, requieren temperaturas muy altas la roca salina muestra



procesos de deformación en el tiempo a temperatura ambiente, como ya comentaremos más adelante.

Davis y Reynolds (1996) agrupan los mecanismos de deformación en cinco categorías generales: (1) microfracturación, cataclasis y deslizamiento friccional; (2) maclado mecánico y “kinking”; (3) creep por difusión; (4) creep por disolución; y (5) creep por dislocación.

Cataclasis es un mecanismo de fractura frágil donde la deformación ocurre por golpe, generalmente en el contacto entre granos. Es un proceso relativamente independiente del tiempo, ocurre cuando una carga externa es aplicada o incrementada. Implica la formación, crecimiento y coalescencia de microfracturas y el deslizamiento friccional a favor de dichas microfracturas o bordes de grano.

El maclado mecánico y el “kinking” son dos mecanismos de deformación menos agresivos que la cataclasis y el deslizamiento friccional. La deformación se produce por flexión, no por rotura, de la red cristalina.

Los tres tipos de creep tienen su origen en la actuación de mecanismos distintos, aunque en los tres casos se produce un cambio en la forma y el tamaño de los cristales en respuesta a la actuación de esfuerzos dirigidos. El creep por difusión cambia la forma y el tamaño de los cristales por el movimiento de átomos y vacíos en el interior de los cristales y a lo largo de los bordes de grano. El creep por disolución cambia la forma y el tamaño de los cristales por disolución y re-precipitación de material, ayudado por fluidos a lo largo de los bordes de grano o en los poros de la roca. Este tipo de creep también se denomina disolución por presión. El creep por dislocación, que es el mecanismo de deformación por excelencia, opera por deslizamiento intracristalino en la red de los minerales (movimiento de dislocaciones).

La deformación de la sal se realiza a partir de dos mecanismos de deformación, principalmente: Fluid Assisted Diffusional Transfer (FADT) y el Dislocation Creep (DC). Ambos procesos se dan a nivel microcristalino, aunque el FADT sólo es importante en presencia de agua y para tamaño de grano pequeño. Un esquema de estos dos procesos se puede observar en la Figura 2.24.

FADT se refiere a un mecanismo de deformación a nivel de superficie del material basado en una migración de la sal a través de la fase líquida, produciendo una transferencia de masa en el propio cristal o entre cristales diferentes. Esto es provocado por la existencia de gradientes de potencial químico en la solución acuosa. Estos gradientes se dan debido a concentraciones localizadas del campo de tensiones.

DC es un mecanismo intracristalino explicado según la teoría de dislocación basada en tres factores: deformación, temperatura y velocidad de deformación, común a todos



los cristales. Se pueden identificar dos mecanismos principales de dislocation Creep: dislocation glide (dislocación por deslizamiento) y dislocation climb (dislocación por escalonamiento). El primero describe la deformación de la sal mediante movimientos de traslación relativos entre diferentes puntos del cristal. En el dislocation climb, el movimiento intragranular induce un fenómeno de empuje entre las partículas que se hallan en contacto.

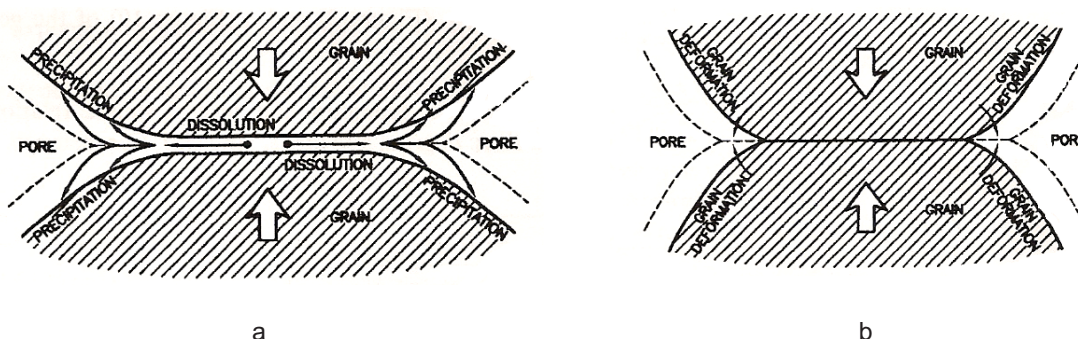


Figura 2.24.- a) mecanismo FADT, b) mecanismo DC

En la figura 2.24a se muestra como migra la sal produciendo una transferencia de masa entre cristales diferentes. A la Figura 2.24b la deformación se produce como vemos por un empuje entre las partículas.

2.3.2 Trabajos realizados hasta ahora

La deformación por fluencia lenta (compaction creep) es un comportamiento que ha sido estudiado por diversos investigadores a lo largo de los años. Uno de los más rigurosos estudios es el publicado por Spiers et al., (1989). En este estudio nos muestra, que el comportamiento viscoplástico de fluencia de la sal compactada, puede estar influenciado por los efectos de la salmuera provocando una disolución/precipitación, combinada con un proceso de fluid-assisted diffusional creep (FADC). Posteriormente otros estudios, no menos importantes, se han llevado a cabo teniendo en cuenta parámetros hidromecánicos de la sal compactada durante largos periodos de tiempo, estos parámetros son analizados mediante modelos numéricos teóricos (Olivella et al., 1992).

Los ensayos de compaction creep (DC) y de resistencia son los ensayos más comunes que se realizan en el laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de los materiales salinos. Por este motivo, trabajos experimentales de compaction creep y medidas de la permeabilidad sobre los materiales salinos son llevados a cabo



en esta tesina a lo largo de dos meses aproximadamente, teniendo en cuenta la tensión aplicada y la relación de vacíos durante todo el ensayo.

Diferentes parámetros pueden afectar al proceso de compaction creep. En general, los parámetros que pueden afectar al comportamiento de las sales son los siguientes:

- Impurezas (arcillas, anhidrita, etc...)
- Tamaño de grano
- Distribución del tamaño de grano
- Contenido de humedad
- Índice de poros inicial y final
- Tensión
- Relación de fuerza
- Temperatura

Los cinco primeros parámetros dependen del material propio, y los otros tres son parámetros controlados externamente.

Estos parámetros han sido estudiados por diversos autores. En el caso de la humedad (Spiers et al., 1989, 1986, 1984), el contenido de impurezas es estudiado en (Jonson et al., 1984), la temperatura (Spiers et al., 1989) y el tamaño de grano y su distribución (Spiers et al., 1989, 1984). El efecto de la tensión, tiempo y porosidad es estudiado en todos los estudios anteriormente citados.

El parámetro más comúnmente estudiado es el parámetro de la humedad, ya que es uno de los parámetros que más afecta al comportamiento mecánico del material salino. Cabe decir que toda el agua que contiene el mineral es considerada como salmuera.

A continuación se expresan cuatro efectos dependientes del contenido de humedad que pueden repercutir en el mineral salino:

- Efecto en la porosidad inicial
- Efecto en el contenido de humedad inicial
- Efecto a largo plazo en la relación de compaction creep, y
- Humedad última y desarrollo de la presión en el poro

El contenido de humedad en la sal es un factor importante en el proceso de compaction creep. Sales húmedas no son compactables tan rápidamente como el mismo material con una humedad mucho menor. (Spiers et al., 1989).



Muchos estudios han examinado la posibilidad de disipación de la presión de los poros en la sal granular compactada. Para presiones de poros desarrolladas, en la sal, la humedad dificulta que el poro se comprima.

Estudios que se han llevado a cabo en los últimos años (Urai et al., 1986 y Spiers et al., 1989) muestra el comportamiento viscoplastico en fluencia de una sal granular compactada, la cual, puede estar fuertemente influenciada por los efectos de la salmuera como fluido de recristalización y difusión en el proceso de fluencia. Sin embargo los mecanismos todavía no están muy claros.

El tamaño de grano es un parámetro con gran influencia en el comportamiento de compaction creep del material. Spiers et al. (1989) se muestran que el proceso de compaction creep para bajas tensiones ($<4\text{MPa}$) es proporcional a $1/d^3$, donde d es el tamaño de grano. Para altas tensiones ($\approx 8\text{MPa}$), esta relación es proporcional a $1/d^2$. Esta relación de bajas tensiones será aplicada en capítulos posteriores.

Variando el contenido de impurezas en la sal como arcillas, anhidrita, etc.. afecta al comportamiento mecánico del la sal granular. Contenidos de impurezas de menos del 20% prácticamente no afectan al comportamiento de la sal granular, mientras que contenidos del 30% o más de impurezas es predominante el comportamiento de las impurezas en el material salino.

Es evidente, que un importante incremento de temperatura da como resultado una disminución en la compactación del material (Spiers et al., 1989). Por otro lado, se sabe que la fluencia en una sal es sensible a los cambios de temperatura, en contraste con otro tipo de rocas, las rocas salinas muestran creep deformation a temperatura ambiente.

2.3.3 Creep en la halita granular (gráfico vapor- líquido)

El mecanismo de compaction creep de las sales está íntimamente relacionado con el tiempo.

Las primeras leyes sobre la deformación el tiempo fueron descritas sobre materiales metálicos, gomas y cristales, bajo tensiones constantes, presentando una deformación en el tiempo de forma logarítmica.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = B t^{-1} \quad (2.1)$$



donde:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad \text{deformación relacionada con la circulación de fluido}$$

B constante de laboratorio
t tiempo

Desde hace años, numerosas leyes sobre la deformación han sido propuestas. Las mejor aceptadas son aquellas leyes que describen exponencialmente el estado de deformación como una combinación entre tensión y temperatura de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = A \sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2.2)$$

donde:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad \text{relación de tensión con el tiempo}$$

A constante de laboratorio
 σ incremento de tensiones principales ($\sigma_1 - \sigma_3$)
n pendiente de $\log(\partial \varepsilon / \partial t) / \log \sigma$ graficado
 ΔH energía de activación necesaria para activar el mecanismo
R constante universal para gases
T temperatura en grados Kelvin

Los mecanismos de deformación en la sal incluyen:

- (1) Dislocation climb, and dislocation glide
- (2) Mecanismos de difusión incluyendo la porosidad y los límites del grano
- (3) Deslizamiento entre granos
- (4) Cataclasis

En la Figura 2.25, se puede observar la relación fuerza/temperatura con la deformación, la cual, está causada por diferentes mecanismos como ya hemos dicho. En esta figura se muestra que dependiendo de la temperatura y del nivel de tensión, la deformación en el tiempo está causada por diferentes mecanismos. Glide y climb (bajas y altas temperaturas) son mecanismos relacionados con la teoría de Dislocación. Estos mecanismos se suelen dar en mecanismos intracristalinos. Para altas temperaturas (T/T_m donde $T_m \approx 800^\circ\text{C}$ es la temperatura de fusión) se daría casos de mecanismos de difusión. Para bajas tensiones y temperaturas, el mecanismo más importante de deformación en el tiempo está basado en la difusión ayudado por fluido (fluid-assisted diffusional creep). La difusión puede darse entre el entramado de



los cristales (vacancy difusión or Nabarro-Herring creep) o a lo largo de los límites de los grano (Coble creep). Los granos de sal son disueltos en puntos de altas tensiones (contacto de granos) y precipitados en puntos de bajas tensiones (poros) (Spiers et al., 1989).

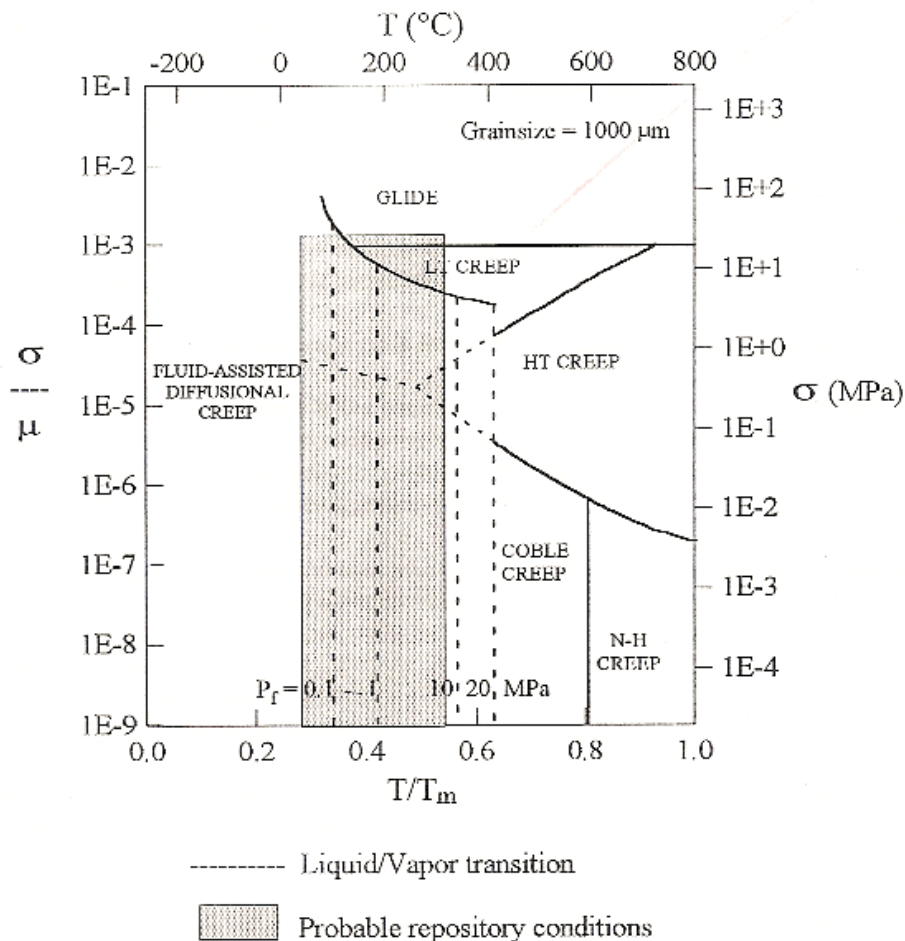


Figura 2.25.- Mecanismo de deformación del material salino. Flujo de presión P entre (0.1 a 20 MPa). σ fuerza desviadora, μ Módulo elástico, T Temperatura, y T_m Temperatura de fusión. (Spiers et al., 1989).

El deslizamiento entre los límites de grano es un proceso donde se produce el cambio de forma de los cristales adyacentes causado por los procesos de difusión y dislocation.

La deformación para cada uno de los mecanismos (a excepción del de cataclasis) tiene una pendiente característica (exponente n de la ecuación 2.2). Cada mecanismo tiene su rango de condiciones bajo condiciones de fuerzas y temperaturas diferentes, un único mecanismo (una única pendiente característica) no es posible para describir



el comportamiento de la sal bajo todos los rangos de temperatura y presión que puede adoptar el material salino.

Aunque la presión podría ser el mecanismo más importante, de deformación en los materiales salinos bajo compactación, este debe ir acompañado por un deslizamiento de los límites de contacto entre granos de manera que los granos se acomoden entre sí durante la deformación. En la sal granular, donde entre grano y grano existe porosidad, la cual, permite la movilidad de las partículas, el deslizamiento entre granos adquiere un papel importante en la compactación.

Transporte de fluido en las sales

El transporte de fluido en las sales, viene dado por la alta solubilidad de la sal en el agua, el fluido presente en la sal compactada, dada su concentración se habla de salmuera. Los principales mecanismos donde se puede dar el transporte de fluido en la sal granular: inclusiones de salmuera intragranular, y como relleno de porosidad sobre las superficies de los granos de sal. La salmuera se mueve en la halita granular bajo el efecto del diferencial de gradiente de presión y bajo el efecto del gradiente de temperatura.

Migración de la salmuera

Para explicar el fenómeno de la migración de la salmuera se proponen tres mecanismos: (a) Movimiento de la salmuera por gradiente de temperatura, (b) Transporte en fase vapor a lo largo de porosidad conectada, y (c) Transporte líquido debido a un gradiente de fuerza aplicada a la sal.

Movimiento de la salmuera por gradiente de temperatura

De los tres mecanismos, este movimiento es el más estudiado y aceptado. Una ecuación que explica la velocidad de la salmuera es la propuesta por (Orlander et al., 1980).

$$v = \frac{DC_s^{sat}}{\rho_s} \left[\left(\frac{(C_s^{sat})^{-1} dC_s^{sat}}{dT - S_0} \right) \nabla T - \left(\frac{\delta_h + \delta_c}{L} \right) \right] \quad (2.3)$$



Donde:

- v Velocidad de movimiento (cm/s)
- D Difusión de la sal en la salmuera (cm^2/s)
- C_s^{sat} Concentración media de la sal (mol/cm^3)
- ρ_s Densidad del sólido salino (mol/cm^3)
- S_0 Coeficiente empírico ($^\circ\text{C}^{-1}$)
- ∇T Gradiente de temperatura en la salmuera ($^\circ\text{C}/\text{cm}$)
- δ_h Fracción no saturada del lado caliente
- δ_c Fracción sobresaturada del lado frío
- L Longitud del gradiente térmico (cm)

El primer término, representa la difusión de la sal en la salmuera, y el segundo término representa el índice cinético de la disolución y cristalización en el lado frío y caliente, respectivamente. Según los cristales esta velocidad puede cambiar, pero la mayor incertidumbre es el comportamiento en la zona límite de los granos de sal. Análisis teóricos y observaciones experimentales indican que el movimiento en estas zonas es más lento. La salmuera se deposita en los límites de los granos dando origen a una conexión de la porosidad.

Transporte en fase vapor a lo largo de la porosidad conectada

El transporte en fase vapor de la salmuera, se debe al vapor de agua que conecta la porosidad en la sal. El gradiente de potencial es la presión de vapor que hay en la salmuera. El agua en la salmuera se convierte en vapor que vuelve a la sal con el tiempo. La ecuación que gobierna la evaporación propuesta por (Hadley et al., 1981) es la siguiente:

$$J_v = \left(\frac{-\phi_c D_k}{KT} \right) \partial P_v / \partial z - \left(\frac{KP_v}{\mu KT} \right) \partial P_v / \partial z \quad (2.4)$$

Donde:

- J_v Flujo molecular del agua en estado vapor ($\text{molecule}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
- ϕ_c Porosidad conectada de la sal
- D_k Coeficiente de difusión Knudsen (cm^2/s)
- K Constante de Boltzmann's ($\text{erg}/\text{molecula} \cdot \text{K}$)



T Temperatura absoluta (K)

P_v Presión de vapor del agua (dina/cm²)

K Permeabilidad

μ Viscosidad del agua (poise)

1 ergio (erg) = $2,390 \times 10^{-8}$ caloría (cal)

1 Poise = $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

El primer término de la ecuación hace referencia a la componente de difusión de Knudsen en el flujo; y el segundo término equivale a la componente de flujo de Darcy. Cuando la muestra está sujeta a gradiente de temperatura, las inclusiones de salmuera migrarán de los límites entre granos y se sumará al volumen de agua.

Transporte de líquido por gradiente de fuerza aplicado en la sal

El transporte de líquido en la sal está provocado por la presión a la que está sometida la salmuera que encontramos en la porosidad interconectada y que se determina mediante la tensión que se le aplica a la sal. Este hecho, no es justificable en la mayoría de las rocas, pero en las sales sí, debido al comportamiento de fluencia en el tiempo (creep). Si la presión a la que está sometida la salmuera que rellena la porosidad es diferente de la fuerza aplicada a la sal, la sal fluye hasta que la presión en el fluido (salmuera) y en la roca es la misma.

2.3.4 La permeabilidad en la sal granular

Para explicar el movimiento del fluido de salmuera en la sal compactada, se puede modelar según la ley de Darcy, la cual, está basada en la conservación de la masa y que describe el movimiento del fluido a través de un medio poroso.

Se considera, un volumen representativo de porosidad media y se realiza la ecuación de balance de masa, en la cual, el cambio de volumen de salmuera es igual a la diferencia entre la cantidad de salmuera que entra y sale por cada lado del volumen considerado, en cualquier intervalo de tiempo. La relación viene dada por la siguiente expresión:

$$\nabla q + \frac{\partial \theta}{\partial t} + Q = 0 \quad (2.5)$$



Donde:

θ contenido de salmuera

t tiempo

q vector de flujo

Pero la ecuación que nos relaciona la permeabilidad, según la ley de Darcy viene dada por la modificación de la siguiente expresión general:

$$Q = KA \frac{h_A - h_B}{L} \quad (2.6)$$

donde K es la constante de proporcionalidad y se denomina conductividad hidráulica o permeabilidad. Esta expresión puede ser expresada en términos generales como:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (2.7)$$

donde dh/dl es conocido como el gradiente hidráulico. La cantidad dh representa el cambio en cota piezométrica entre dos puntos situados muy cercanos, y dl es una distancia muy pequeña.

El signo negativo indica que el flujo es en la dirección de cota piezométrica decreciente.

La ecuación (2.7) puede ser modificada para mostrar que el coeficiente K tiene las dimensiones de longitud/tiempo, o velocidad. Este coeficiente ha sido denominado conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad:

$$K = -\frac{Q}{A(dh/dl)} \quad (2.8)$$

Hubbert (1956) mostró que la constante de proporcionalidad de Darcy, K , es una función de propiedades del medio poroso y el fluido que pasa a través de él. De hecho, es intuitivo pensar que un fluido muy viscoso, por ejemplo petróleo, se moverá a una tasa menor que la salmuera en un mismo tipo de suelo. La descarga es directamente proporcional al peso específico del fluido, γ , e inversamente proporcional a la viscosidad dinámica del fluido, μ . A partir de esta información podemos escribir:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.9)$$

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (2.10)$$

donde k es la permeabilidad intrínseca del suelo. En la última expresión ρ es la densidad del fluido y g es la aceleración de gravedad.

La cuantificación del coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica puede ser realizada a través de dos tipos de métodos diferentes. Los dos tipos de métodos que



existen son los indirectos y directos. Los métodos indirectos, como su nombre indica, vienen determinados por fórmulas empíricas, no es el caso de los métodos directos, los cuales se miden directamente en el laboratorio.

La permeabilidad o conductividad hidráulica de una muestra saturada se puede medir en laboratorio a través de dispositivos denominados permeámetros. Existen permeámetros de carga constante o de carga variable la diferencia entre uno y otro radica en que mientras el primero el fluido que atraviesa la muestra se mueve hasta alcanzar un cierto equilibrio, en el segundo caso, permeámetro de carga variable, el fluido pasa a través de la muestra sin que tener que llegar a un equilibrio. En este caso se produce un descenso del nivel del fluido, el cual, atraviesa la muestra.

La tasa a la cual el agua desciende por el tubo vertical viene dada por la siguiente expresión:

$$v_{\text{int}} = -\frac{dh}{dt} \quad (2.11)$$

Si multiplicamos por el área del tubo vertical, A_t , obtenemos el caudal pasante a través del tubo:

$$q_{\text{int}} = v_{\text{int}} A_t = -A_t \frac{dh}{dt} \quad (2.12)$$

Si A_c es el área de la muestra de suelo, podemos utilizar la ley de Darcy para calcular el caudal que drena desde el permeámetro en un tiempo cualquiera:

$$q_{\text{out}} = \frac{k A_c h}{L} \quad (2.13)$$

donde h es la carga hidráulica al tiempo t .

Si aplicamos el principio de continuidad podemos utilizar las expresiones dadas en (3.12) y (3.13) para escribir:

$$-A_t \frac{dh}{dt} = \frac{K A_c h}{L} \quad (2.14)$$

Esta ecuación puede ser reordenada para aislar la permeabilidad K :

$$K = -\frac{A_t L}{A_c h} \frac{dh}{dt} \quad (2.15)$$

Si integramos esta ecuación desde $t=0$ a $t=t$ con la condición inicial $h=h_0$ en $t=0$ obtenemos la siguiente expresión para la conductividad hidráulica a partir de un permeámetro de carga variable:

$$K = \frac{A_t L}{A_c t} \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.16)$$



Si utilizamos los diámetros del tubo vertical y de la muestra obtenemos:

$$K = \frac{d_t^2 L}{d_c^2 t} \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.17)$$

Al usar cualquier tipo de permeámetro se debe verificar que la muestra esté completamente saturada y que no existan burbujas de aire dentro de ella. De existir burbujas de aire en la muestra el valor de la conductividad hidráulica disminuye debido a la reducción en el área disponible para el escurrimiento de agua.

Por otra banda, el modelo de Kozeny considera la porosidad dependiente de la permeabilidad intrínseca del material:

$$K = k_0 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (2.18)$$

Donde:

ϕ_0 = Porosidad inicial

K_0 = Permeabilidad intrínseca para un diámetro promedio de porosidad del material.

Microestructuras asociadas a los mecanismos de deformación

La estructura típica a nivel microscópico de los agregados salinos es un sistema isla-canal, como el de la Figura 2.27, también se puede encontrar otras microestructuras menos conocidas asociadas a la disolución-precipitación de la sal (Figura 2.26), (Spiers et al., 1989).

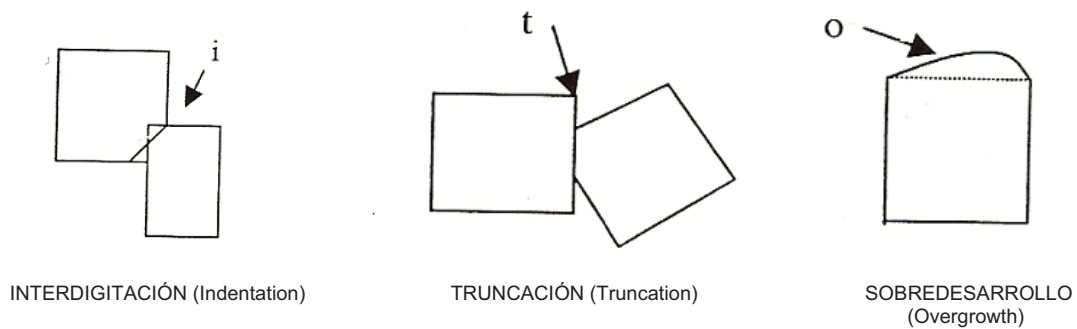


Figura 2.26.- Microestructuras asociadas a la deformación de la sal.

En el primer caso, la microestructura de interdigitación, los límites de los cristales de sal se intersectan y parte del cristal pasa a formar parte del cristal contiguo. Estas estructuras son frecuentes en los vértices de los granos de sal.



En el segundo caso, la microestructura de truncación, es habitual en cristales, los cuales, no han podido desarrollar alguna de sus caras o vértices, debido en muchos casos a que el cristal contiguo ha tenido una velocidad de desarrollo mayor, de esta manera trunca su crecimiento.

En el último caso, la microestructura de overgrowth, los materiales salinos favorecen el sobrecrecimiento de los cristales, pero es una microestructura, que no se conoce a la perfección (Spiers et al., 1990).

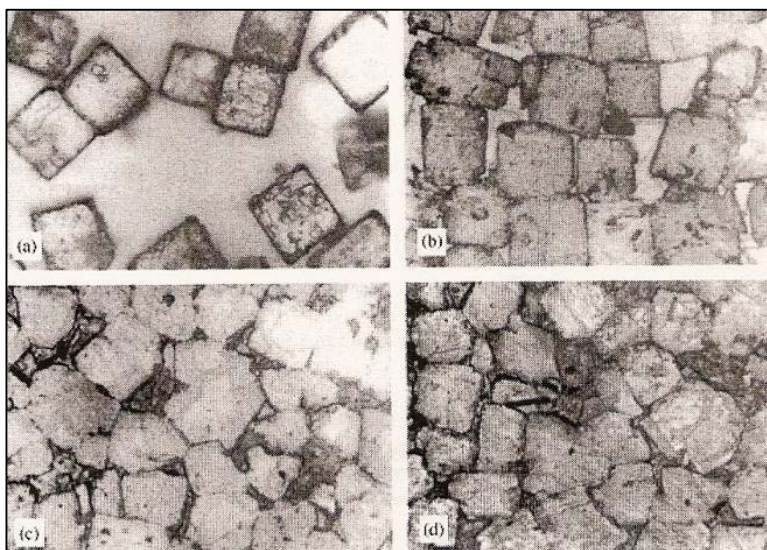


Figura 2.27.- Microfotografías obtenidas en el laboratorio por Spiers. (a) Material granular inicial ($d_0 = 275 \mu\text{m}$). (b) Sal compactada ($\epsilon_v = 11\%$, $d_0 = 410 \mu\text{m}$), donde se muestra la microestructura de isla-canal, (c) Sal compactada ($\epsilon_v = 20\%$, $d_0 = 410 \mu\text{m}$), donde se muestran estructuras de interdigitación, truncación y sobrecrecimiento, (d) Sal compactada ($\epsilon_v = 24\%$, $d_0 = 175 \mu\text{m}$), donde se muestran estructuras de interdigitación, truncación y sobrecrecimiento.