



CAPÍTULO 6.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Material de Escombrera

Una vez el material de vertido se ha colocado en la escombrera, es de gran interés predecir su comportamiento a largo plazo. Las propiedades viscoplásticas de la sal condicionan el proceso de compactación del material salino a corto plazo. Debido a este confinamiento bajo carga y a la presencia de agua, los granos de sal sufren un proceso de disolución y recristalización parecido a una cementación, que aumenta la resistencia del material granular de la sal, y tiende a formar una roca de cierta compacidad.

La escombrera de Súría está constituida en su mayor parte por agregados de sal limpia con una pequeña porción de material insoluble, y por otra parte, por la mezcla de estos agregados de sal con lodos.

La densidad de los agregados salinos varía entre $1,72 \text{ g/cm}^3$ y 2 g/cm^3 , obteniéndose los valores más altos en función de la profundidad, y de un mayor contenido de material insoluble. La porosidad varía entre 0,31 para las muestras más superficiales a 0,07 a 65 m de profundidad. La humedad en términos de peso de salmuera/peso de sólidos varía entre el 0,64% y el 9%, aunque en la muestra más superficial se ha medido una humedad del 12,5%. El grado de saturación calculado en las muestras presenta incertidumbres importantes dada la baja porosidad del material, aunque en todos los casos, se han medido valores por debajo de la unidad, lo que indicaría que las muestras han perdido humedad durante su transporte y almacenamiento. El tanto por ciento de material insoluble que contienen las muestras es variado, concentrándose el mayor % de insolubles a los 17m y a los 53 m de profundidad. Esto es debido, a que la zona central de la escombrera, de donde procede el sondeo S1 estudiado, se encuentra encima de una antigua balsa de lodos, mezclándose estos lodos, en parte, con el material salino. El peso específico de las partículas sólidas varía entre $2,19$ a $2,20 \text{ g/cm}^3$ para muestras sin lodo, para muestras con lodo es de $2,24 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, de forma aproximada, puede considerarse que la salmuera de los poros en la escombrera tiene una concentración de 0,36 g de sal/g de agua.

Para caracterizar el comportamiento de la sal en la escombrera se han realizado ensayos mecánicos en el laboratorio a partir de muestras extraídas de sondeos. Se ha observado que la resistencia a la compresión simple disminuye prácticamente de



forma lineal con el aumento de la porosidad (desde valores de 2 MPa para porosidades del orden de 0,31 en muestras extraídas a 6 m de profundidad, a valores del orden de 20 MPa para porosidades alrededor de 0,10, en muestras extraídas a más de 50 m de profundidad). Probablemente, a partir de esa profundidad la resistencia (al igual que la porosidad) tiende a estabilizarse y ya no crece mucho más. El módulo elástico varía entre 200 y 1200 MPa. En muestras con intercalaciones de capas de lodo, muestran una resistencia menor que las muestras sin lodo a la misma profundidad. Para profundidades entre 20 y 70 m, la resistencia a compresión simple es del orden de 8 MPa, con una ligera tendencia a aumentar con la profundidad. En una muestra, donde la rotura se ha producido a través de una capa lodo, la resistencia ha sido de sólo 30 kPa.

En los ensayos edométricos realizados sobre la sal granular, bajo condiciones saturadas con salmera, a 23°C de temperatura, durante dos meses, se observa que el índice de poros varía de 0,9 a 0,4 para la muestra más superficial (S1TP1,) y de 0,75 a 0,2 para la muestra a 65 m de profundidad.

Los agregados salinos en procesos de compactación prolongados, como es el caso, están sometidos a condiciones térmicas, hidráulicas y mecánicas importantes, por lo que suceden fenómenos del tipo: Termo-hidráulico-mecánicos (THM). Estos factores producen en el material tres estados de deformación principalmente: Un primer estado relacionado con el proceso de reorganización de partículas, producido durante las primeras horas de cada nuevo escalón de carga, alcanzando valores de velocidad de cambio del índice de poros elevadas de 10^{-6} a 10^{-7} s⁻¹. Un segundo estado, donde los mecanismos implicados corresponden a mecanismos de disolución/precipitación, combinado con procesos de fluid-assisted diffusional creep (FADT), con velocidades de cambio de 10^{-7} a $3 \cdot 10^{-8}$ s⁻¹. Y, por último, un tercer estado, de deformación lenta, donde el índice de poros cambia alcanzando los valores más bajos con una velocidad de cambio en el índice de poros baja, alcanzando valores de $3 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-8}$ s⁻¹.

Las velocidades observadas pueden ser reproducidas con un modelo constitutivo del tipo: $\partial e / \partial t = -A \sigma^\alpha \phi^\beta e^\gamma$, que describe la compactación del material granular bajo cargas entre: 0,05 MPa a 1,5 MPa, variando su índice de poros de 0,9 a 0,2. Los valores del parámetro α obtenidos han sido de 1-2,64 y los de γ obtenidos han sido de 6-5,65. El valor de $A \phi^\beta$ ha variado mucho en las dos muestras ensayadas, probablemente debido a que se ha considerado una granulometría con un único tamaño de grano, y por la composición de las dos muestras ($7 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-3}$). Los resultados realizados en el laboratorio son comparados con las predicciones del modelo constitutivo de variación de la porosidad, explicándose así los perfiles de



porosidad medidos en la escombrera para cada una de las profundidades calculadas. Con este modelo además se puede predecir la velocidad de aumento de la resistencia en la sal. Con los parámetros más desfavorables se predice una resistencia a compresión simple de unos 3 MPa a 20 m de profundidad al cabo de unos 100 días. Medidas de permeabilidad han sido realizadas durante el ensayo edométrico mostrando un rango entre 10^{-13} - 10^{-15} m² para índice de poros mayores a 0,15.

Terreno natural

La escombrera se apoya sobre terreno natural de la época del eoceno en su gran mayoría, formado por calizas, margas y lutitas principalmente. Estos materiales se encuentran fracturados debido a la tectónica alpina producida por el plegamiento de los Pirineos. Estos movimientos, también pueden haber originado deslizamientos relativos entre las capas más duras y las más blandas. Por este motivo, a la hora de evaluar la resistencia al corte de los materiales más blandos, es necesario contemplar el valor de la resistencia residual, ya que una vez deformadas presentan un comportamiento cuasi-frágil.

Las muestras de caliza muestran la resistencia a compresión simple más alta, seguida de las areniscas y lutitas rojas, por último las margas y las lutitas más superficiales son las que muestran una resistencia menor. Respecto al ángulo de rozamiento residual, se ha encontrado un valor de 16,7° para la muestra S3TP1, y de 27,5° para la muestra S3MI1. Esta última muestra, por tanto, nos muestra una composición mineralógica menos activa estable a la vez que menos plástica.

Lodos

Las muestras de lodo estaban saturadas previamente, teniendo una humedad muy elevada, la cual, no varía significativamente con la profundidad. Su densidad, por lo contrario, disminuye con la profundidad, esto puede ser debido a que los lodos más superficiales en la balsa de Súría, podrían estar consolidados.