

8. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Hidrogeología

Un aspecto importante del perfil es que la distribución lateral de los materiales de las diferentes unidades es muy continua. Los resultados obtenidos en las diversas campañas hidrogeológicas en el trazado han permitido distinguir 3 de las 4 unidades acuífero que constituyen el modelo conceptual de la UPC del sistema deltaico del Llobregat. De techo a base:

1. Acuífero Superficial:

- Constituido por arenas medias a gruesas hacia base arenas finas.
- En la zona central del trazado el techo y la base de este acuífero se han localizado a cotas aproximadas de 0 msnm y -7 msnm respectivamente. Por encima de este acuífero, estratos de limos y arcillas con pasadas de arenas finas. En la base del acuífero se ha localizado en todo el trazado una capa de arcillas de unos 3 m de espesor medio.
- El sentido del flujo en el trazado se ha interpretado SW-NE, tendiendo a ser más perpendicular hacia el Este. Los niveles más altos se han medido en el piezómetro situado en el extremo Oeste (máximo: +0.810 msnm), los niveles menores en piezómetro situado en el extremo Este (mínimo: -0.095 msnm).
- Todos los piezómetros muestran una evolución de niveles en el tiempo muy similar. Las máximas oscilaciones están controladas por el régimen de precipitaciones.
- La transmisividad media obtenida es del orden de 500 m²/d (o 70 m/d de conductividad hidráulica media). Las mayores transmisividades se han obtenido en los bombeos realizados al Este de la traza, del orden de 1200 m²/d).

2. Acuífero Principal:

- Constituido por clastos subredondeados de hasta 8 cm de diámetro con matriz de arenas finas a limos.
- El techo se ha localizado en la cota -31 msnm en el extremo Oeste y -35 msnm hacia el Oeste. La potencia es de unos 8 m.
- Los niveles medios medidos están entorno a -7 msnm. En el periodo observado no se han registrado fluctuaciones abruptas. Sin embargo en periodos de grandes avenidas podrían producirse ascensos de varios metros en plazos breves. Durante el intervalo 1965-2001 esta situación se ha dado 5 veces.

3. y 4. Acuíferos Inferiores:

- En los sondeos se ha identificado una de estas unidades acuífero. Cabría la posibilidad de que estuvieran amalgamadas o que solo se preservara una unidad.
- Constituido por clastos heterométricos de litología variable, hacia techo y base arenas. La matriz está constituida por finos de color ocre.

- El techo se ha localizado a la cota -45 msnm en el extremo Oeste y -52 msnm hacia el Oeste. La potencia es de unos 5 m.

Estas unidades acuífero están separadas por unidades acuitardo o niveles de baja permeabilidad. La unidad que separa el acuífero Inferior del acuífero Principal está constituida por finos de color ocre-anaranjado. La unidad que separa el acuífero Principal del Superficial está constituida por finos recientes de color gris. Esta unidad, tradicionalmente llamada Cuña de Limos está constituida por arenas-limosas, limos-arcillosos y arcillas grises, que en ocasiones presentan abundantes conchas de moluscos, materia orgánica, micas moscovitas y laminaciones subparalelas. A partir de correlaciones con CPTU se han definido 6 alternancias, que tienen en la base arcillas que pasan gradualmente a limo, limos arenosos y arenas finas hacia techo. Los niveles y presiones de agua medidas en los pozos y piezómetros ubicados en la Cuña de Limos indican un detrimento progresivo de niveles hacia la base de esta unidad. A grandes rasgos los niveles son los siguientes:

- Niveles de -1.5 msnm en las cotas -11 a -12 m.
- Niveles de -4 msnm en las cotas -16 a -18 m.
- Niveles de -5 msnm en las cotas -24 a -26 m.

Se han realizado tres ensayos hidráulicos en los materiales de la Cuña de Limos. De éstos, dos han sido de tipo pulso y uno de bombeo, mucho más fiable. La interpretación de éste sugiere conductividades de entre 10^{-3} m/día, para los tramos más limoso-arcillosos, y 0.1 m/día para los más arenosos. Estos valores, junto con los de compresibilidad obtenida (coeficientes de almacenamiento de entre 10^{-3} 10^{-4} m^{-1}) confirman la viabilidad del drenaje mediante sangradoras previsto entre pantallas.

Proceso constructivo propuesto

El riesgo de sifonamiento es sensible a la secuencia de niveles limo-arcillosos y arenosos del acuitardo. Este riesgo es pequeño si se considera el nivel medio de -7 msnm del acuífero Principal y las pantallas son estancas. En todo caso, los gradientes verticales hacia la excavación son apreciables, lo que reduce la resistencia de estos materiales. Para evitar este riesgo se propone el drenaje de estos materiales. Se ha propuesto el proceso constructivo siguiente:

1. Preparación de una plataforma de trabajo situada del orden de 1.5 m por encima del nivel freático.
2. Construcción de muretes guía.
3. Construcción de módulos de pantallas.
4. Excavación de pozos sangradores en el interior del recinto entre pantallas, hasta la cota de las pantallas y de piezómetros de observación.
 - Conviene que haya un mínimo de dos pozos entre el frente de avance de pantallas y el de excavación (para asegurar que éste no se inunde en caso de fallar uno).
 - No conviene que el último pozo quede demasiado próximo a la zona de construcción de pantallas para limitar los gradientes hidráulicos que se producirán en dicha zona.
 - Para evitar posibles problemas con los lodos bentoníticos se propone situar los pozos a no menos de 1 m de distancia de las pantallas.
5. Excavación hasta cota -4 a -5 msnm

6. Si en dicho momento se ha conseguido rebajar las presiones en los limos, se puede proceder al paso siguiente. En caso contrario continuar con el bombeo.
7. Construcción de la bóveda o/y otro sistema de entibación de las pantallas (el orden de este paso está sujeto a los cálculos de empuje sobre las pantallas).
8. Excavación hasta la base.

Funcionamiento de los pozos sangradores

Se ha simulado un periodo de drenaje de las sangradoras de dos meses. Las conclusiones de dicha simulación y de la experiencia del bombeo en los limos son las siguientes:

- Dada la incertidumbre y variabilidad de las conductividades hidráulicas en la Cuña de limos, es mejor fijar el nivel que el caudal. El caudal drenado irá bajando significativamente a lo largo del tiempo. Concretamente se propone fijar el nivel (controlado por sensores de nivel) a los cotas de -12 a -16 msnm, llegando incluso a -18 msnm en función de las presiones de agua medidas en los piezómetros de control y/o si se tiene que acelerar el proceso de drenaje.
- Las sangradoras se dispuestas alternativamente a cada lado del túnel (al tresbolillo) a distancias de 25 m a lo largo de la traza. Esta distancia puede aumentarse siempre que se alargue el periodo de bombeo.
- El periodo de bombeo, para distancias de 25 m, necesario antes de proceder a la excavación es de 15 días. Con ello se consiguen gradientes hidráulicos nulos en toda la longitud de la sangradora. En los puntos alejados (pantalla opuesta), esta condición solo se consigue en la mitad superior del intradós de la pantalla, ya que el acuífero Principal actúa como borde de nivel fijo. Sin embargo, ello es suficiente para asegurar condiciones estables en la mitad superior de los limos y tiene efecto neutro sobre la mitad inferior (el aumento del gradiente se compensa con el aumento de la presión de agua). En todo caso, para aumentar las presiones hidráulicas, puede ser conveniente subir los niveles de bombeo pocos días antes de la excavación final.
- El funcionamiento del sistema es relativamente poco sensible a variaciones razonables en la permeabilidad de las pantallas, pero requiere asegurar que las juntas entre pantallas no tengan continuidad longitudinal.
- El único punto delicado del sistema es la posible colmatación de las sangradoras. Para limitar este problema, se ha previsto un filtro de arena fina y, en función de los resultados, de arena con epoxi. En todo caso, debe preverse el posible desarrollo con aire comprimido durante la fase de construcción. Al final de la obra, las sangradoras deben sellarse con bentonita y mortero.
- El hecho de que el nivel del acuífero Principal se encuentre a -7 msnm implica una reducción considerable en las presiones de agua, especialmente en la parte inferior de las pantallas.
- Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, se propone la instalación de sensores de presión de agua tanto en el trasdós como en el intradós de las pantallas.

Efecto barrera

La simulación del efecto barrera requiere modelos que tengan en cuenta drenajes laterales.

Los resultados del modelo a escala regional han puesto de manifiesto lo previsible dada la componente perpendicular del flujo a la traza del túnel, esto es, aumentos de nivel aguas arriba y reducciones aguas abajo.

El modelo a escala regional ha permitido cuantificar el efecto barrera, así como la valoración de parámetros para el dimensionamiento de medidas correctoras.

En el periodo de referencia considerado los descensos aguas abajo alcanzan valores superiores a 0.6 m hasta aproximadamente 1 km de la traza. La situación con drenes capaces de mantener una transmisividad equivalente en el trazado de $25 \text{ m}^2/\text{d}$ es muy parecida a la citación de referencia. Respecto a la situación más desfavorable en el tiempo, los descensos pasarían de 3.5 m a 0.5 m si se adoptan medidas correctoras. Se propone, pues, adoptar dichas medidas. En particular, se propone perforar sondeos horizontales de 10 m de longitud cada 75 m de traza, conectados mediante una tubería libre que pasaría bajo la vía.