

6. DEFINICIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO PARA LA EXCAVACIÓN

El túnel se excavará entre pantallas de 1 m de espesor, cuya separación es de 11 m. En los planos del *Anejo 1* se muestra el perfil longitudinal del trazado y las secciones tipo del túnel. La profundidad de las pantallas se ha limitado a la cota -28 msnm a fin de proteger el acuífero Principal.

La excavación afecta a la totalidad de los materiales que configuran el acuífero Superficial y la mayor parte de la base de la excavación transcurre por la denominada Cuña de Limos que separa el acuífero Superior del Principal. Los materiales que configuran la Cuña, además de limos arcillosos poco permeables, contiene abundantes niveles de arenas limosas, relativamente permeables y competentes. El modelo conceptual de formación del Delta permite asegurar que estos niveles tienen bastante continuidad. Los CPTU contrastados con los sondeos han permitido distinguir una capa de arcillas continuas de 1 a 3 m de espesor en las cotas de -8 a -12, la permeabilidad de estos materiales, muy inferior, contrasta con el material que tiene en su base (de dos a tres órdenes de magnitud, véanse los resultados de la interpretación de ensayo de bombeo en el *Apartado 5.3.2.3*), lugar dónde podrían anularse las tensiones efectivas debido a la concentración de pérdidas de carga.

Sobre esta base, se han realizado diversos modelos numéricos de flujo en elementos finitos a fin de determinar el impacto que las aguas en la obra, así como la evaluación de la propuesta del proceso constructivo para la excavación.

6.1. Simulación del bombeo en el Acuífero Superficial

Para evaluar la viabilidad de drenar el acuífero Superficial mediante bombeo entre las pantallas, se ha realizado un modelo bidimensional en planta. La geometría, dimensiones y condiciones de contorno del modelo se muestran en la *Figura 6.1*. La malla se muestra en la *Figura 6.2*.

La secuencia de cálculo responde al siguiente proceso constructivo:

1. Construcción de un tramo de 50 m de pantallas.
2. Bombeo en un pozo ubicado a 25 m de las pantallas de cierre, manteniendo el nivel a la cota -6,5 msnm.
3. Construcción de un segundo tramo de 50 m de pantallas (esto implica cambiar su transmisividad de 200 m²/día del acuífero a los 0,1 m²/día de las pantallas .
4. Activar el bombeo en un segundo pozo ubicado a 60 m del primer pozo, manteniendo el nivel a la cota -6,5 msnm

Los resultados se muestran en las *Figuras 6.3 a 6.6*. Como se puede observar, el drenaje se produce con relativa rapidez, dejando un nivel prácticamente horizontal entre los pozos de bombeo y el fondo de las pantallas.

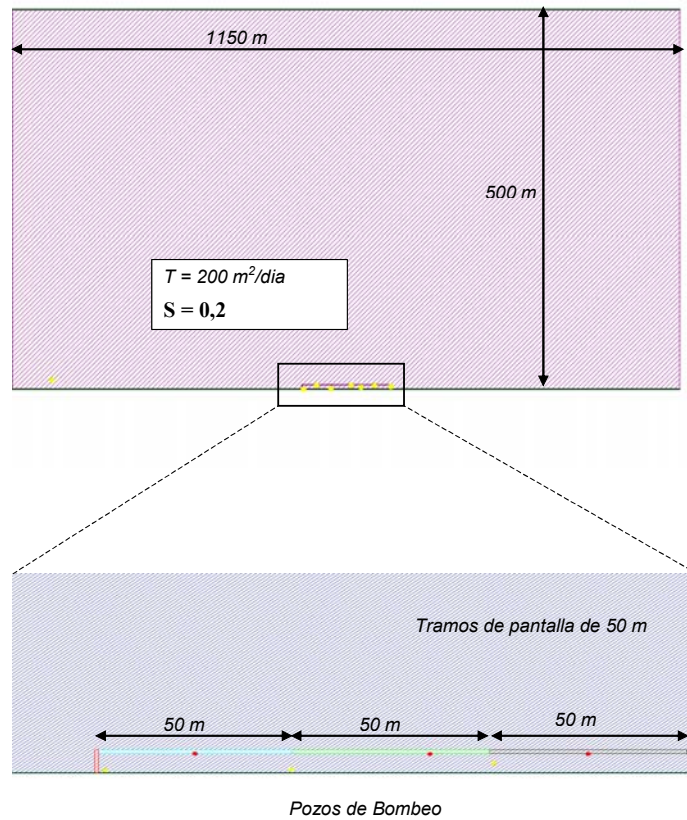


Figura 6.1 Geometría del modelo bidimensional plano para la simulación del bombeo entre pantallas en el acuífero Superficial.

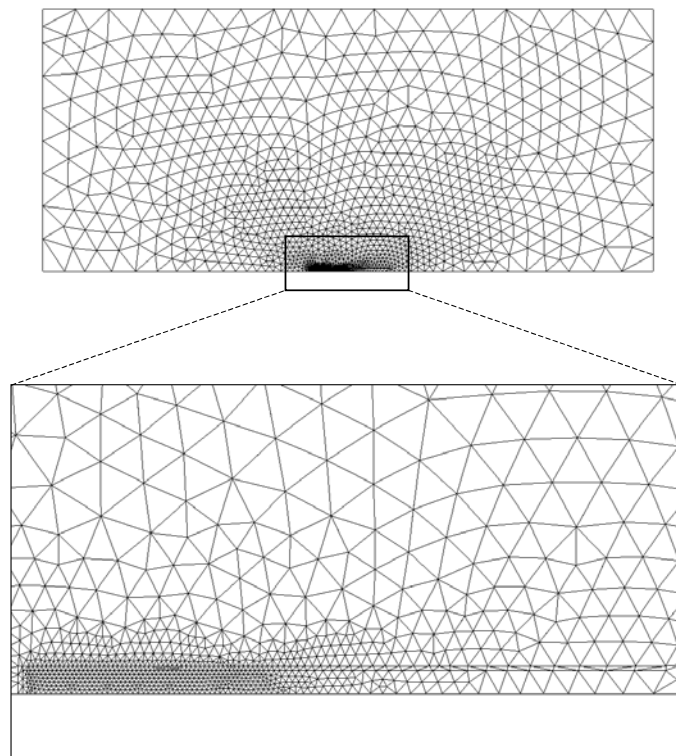


Figura 6.2 Malla del modelo bidimensional plano para la simulación del bombeo entre pantallas en el acuífero Superficial.

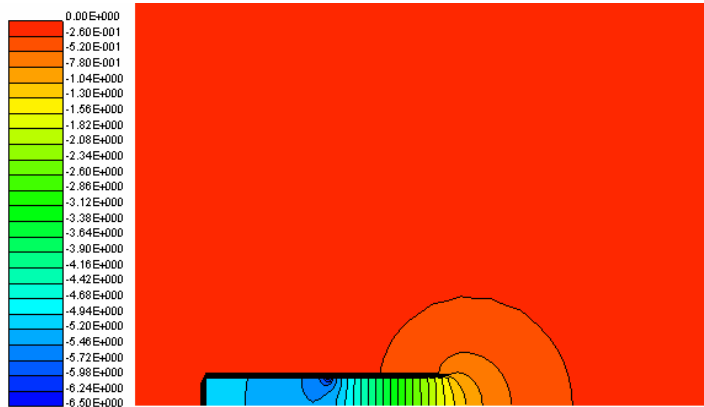


Figura 6.3 Resultados tras 1 día de bombeo en el primer tramo de pantalla

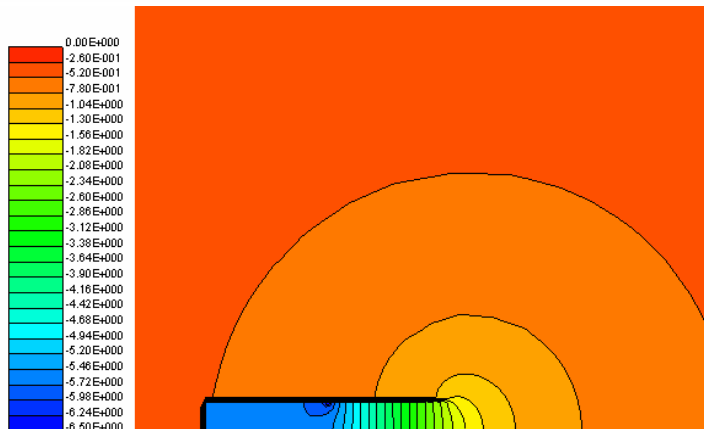


Figura 6.4 Resultados tras 30 días de bombeo en el primer tramo de pantalla

Figura 6.5 Resultados tras bombear 0.01 días en un pozo situado a 60 m del primero.

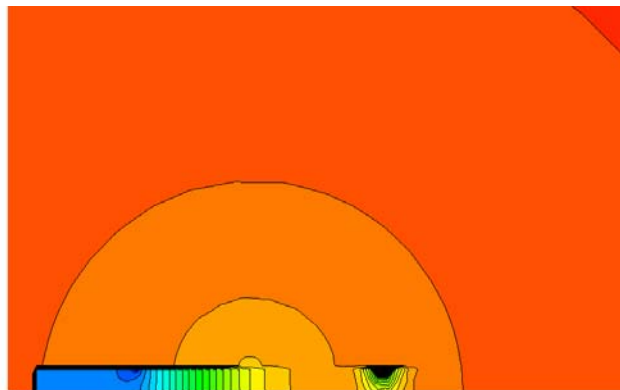
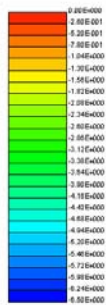
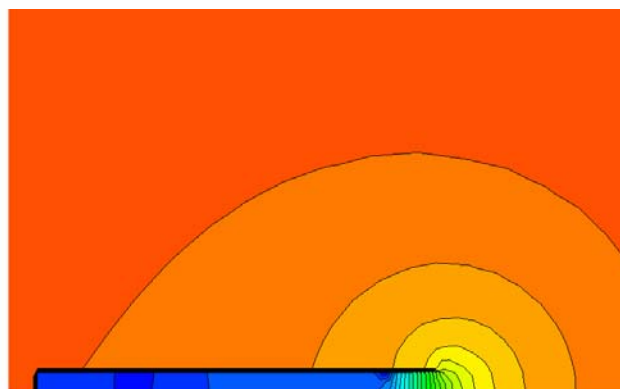
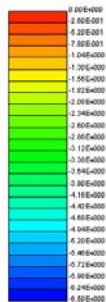


Figura 6.6 Resultados tras bombear 2 días en un pozo situado a 60 m del primero.



6.2. Modelo en sección vertical para simular los gradientes hacia la excavación

El rebaje del nivel freático para la excavación en seco inducirá un gradiente vertical entre pantallas hacia la excavación, debido a que el gradiente en esta dirección es muy superior al gradiente lateral, se ha supuesto que el flujo tiene lugar en un plano vertical perpendicular a las pantallas.

La sección vertical modelada debe considerarse hipotética y representativa de las condiciones generales de la obra, más que de una sección concreta. Por ello, respecto a la geometría, se ha supuesto que la excavación llega a la cota -10 msnm (representativa de la zona intermedia del túnel). También se ha supuesto que el acuífero Superficial llega a la cota -7 msnm. En algunas zonas, por debajo de esta cota hay unas arenas limosas que pueden ser algo transmisivas.

Respecto a las condiciones de contorno, se ha supuesto que, a una distancia grande (500 m), el nivel no se ve afectado. Se han considerado que a gran distancia los niveles de arenas limosas del acuitardo pueden estar más o menos conectados hidráulicamente.

Se han realizado dos hipótesis en cuanto a los niveles del acuífero Principal. Los pozos sangradores se han considerado como nudos con condición de contorno mixta. El coeficiente de goteo hacia las mismas se ha estimado suponiendo válida la fórmula de Thiem en su entorno:

$$\alpha = \frac{Q/L}{\Delta h} = \frac{2\pi K}{\ln(R/r_w)}$$

donde α es el coeficiente de goteo, L la longitud asociada, r_w el radio de la sangradora, R es la mitad del tamaño horizontal de los elementos adyacentes y K la permeabilidad de la capa de limos.

El régimen se ha supuesto estacionario para poder evaluar las condiciones a largo plazo. Debe tenerse presente, sin embargo, el tiempo que tarda en llegarse a condiciones próximas al mismo, este punto se trata en el *Apartado 6.3.3*.

6.2.1. Modelo numérico

La entrada de datos está definida por:

- Malla
- Zonas de conductividad hidráulica
- Condiciones de contorno

La malla consta de unos 800 nudos y 1200 elementos y se muestra en la *Figura 6.6*. El dominio se extiende 1000 m en la dirección horizontal y 40 en la vertical. La malla está más refinada en la zona de pantallas.

Las zonas de conductividad hidráulica se muestran en la *Figura 6.7*. Como se puede apreciar, se han definido 8 zonas distintas: 2 zonas para representar los acuíferos, 5 para los limos y 1 para las pantallas.

Los valores asignados a cada zona de conductividad hidráulica se han variado, considerando 4 geologías básicas, *Tabla 6.1*. Como se puede apreciar, al acuífero Superficial se le ha asignado una conductividad de 20 m/día y al Principal de 200 m/día, en todas las pasadas. Las diferencias estriban en la secuencia de valores de las conductividades de los limos (0.1 para las arenas limosas y 0.001 para los limos arcillosos). Otro factor que se ha tenido en cuenta es el grado de conexión hidráulica entre las capas del acuitardo a gran distancia (Geologías G3 y G4).

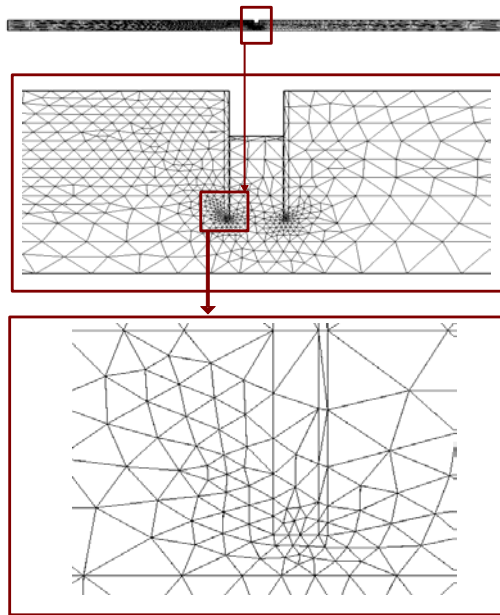


Figura 6.7 Diseño de la malla de elementos finitos.

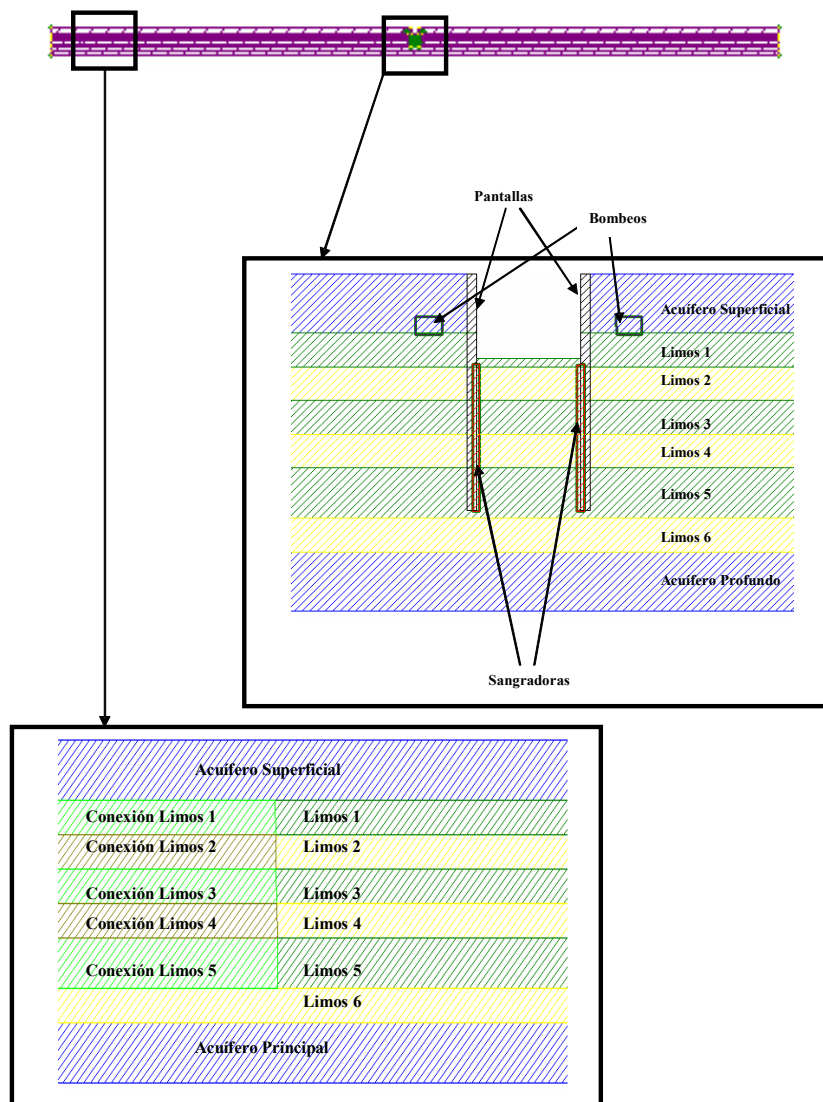


Figura 6.8 Dominio a escala del modelo (Longitud 1000 m., Altura 40 m), detalles de las zonas de conductividad hidráulica y ubicación de las sangradoras y bombeos.

Este modelo se realizó antes de realizar los ensayos de bombeo y previo a los resultados de los CPTU. Sin embargo, las presiones y niveles son mas sensibles a los valores relativos que a los absolutos y una vez realizado los ensayos y obtenidos los resultados de los CPTU, se considera que las estimaciones que se hicieron son suficientemente buenas. La interpretación de los ensayos de bombeo sugieren conductividades de entre 10^{-3} m/día, para los tramos más limoso-arcillosos, y 0.1 m/día para los más arenosos.

Tabla 6.1 *Tabla de conductividades hidráulicas asignadas a cada zona de geología del modelo*

Zona	Profundidad		Conductividad hidráulica de los estratos (m/día)			
	Techo	Base	G1	G2	G3	G4
Acuífero Superficial	0	-7	20	20	20	20
Acuífero Principal	-33		200	200	200	200
Limos 1	-7	-11	0.001	0.1	0.1	0.001
Limos 2	-11	-15	0.1	0.001	0.001	0.1
Limos 3	-15	-19	0.001	0.1	0.1	0.001
Limos 4	-19	-23	0.1	0.001	0.001	0.1
Limos 5	-23	-29	0.001	0.1	0.1	0.001
Limos 6	-29	-33	0.1	0.001	0.001	0.1
Conexión Limos 1	-7	-11	0.0011	0.11	0.11	0.11
Conexión Limos 2	-11	-15	0.0011	0.11	0.11	0.11
Conexión Limos 3	-15	-19	0.11	0.0011	0.11	0.11
Conexión Limos 4	-19	-23	0.0011	0.11	0.11	0.11
Conexión Limos 5	-23	-29	0.11	0.0011	0.11	0.11

Asimismo, se han considerado 3 conductividades distintas para las pantallas, *Tabla 6.2*. Se ha denominado “pantalla izquierda” a la pantalla que está aguas arriba del flujo subterráneo. Para simular un flujo en el acuífero Superficial, se ha asignado al borde de aguas arriba una condición de contorno de nivel fijo de +2 m y al borde de aguas abajo nivel fijo de valor 0.

Tabla 6.2 *Tabla de conductividades hidráulicas asignadas a las pantallas.*

Zona	Conductividad hidráulica de las pantallas (m/día)		
	P1	P2	P3
Pantalla izquierda	0.00001	0.1	0.01
Pantalla derecha	0.00001	0.1	0.01

Las condiciones de contorno se muestran en la *Figura 6.9* y en la *Tabla 6.3*. Se han considerado variantes respecto a:

- Sangradoras hasta profundidad de pantalla: Si / No
- Acuífero profundo: Fluyente / No Fluyente
- Rezume: Si /No

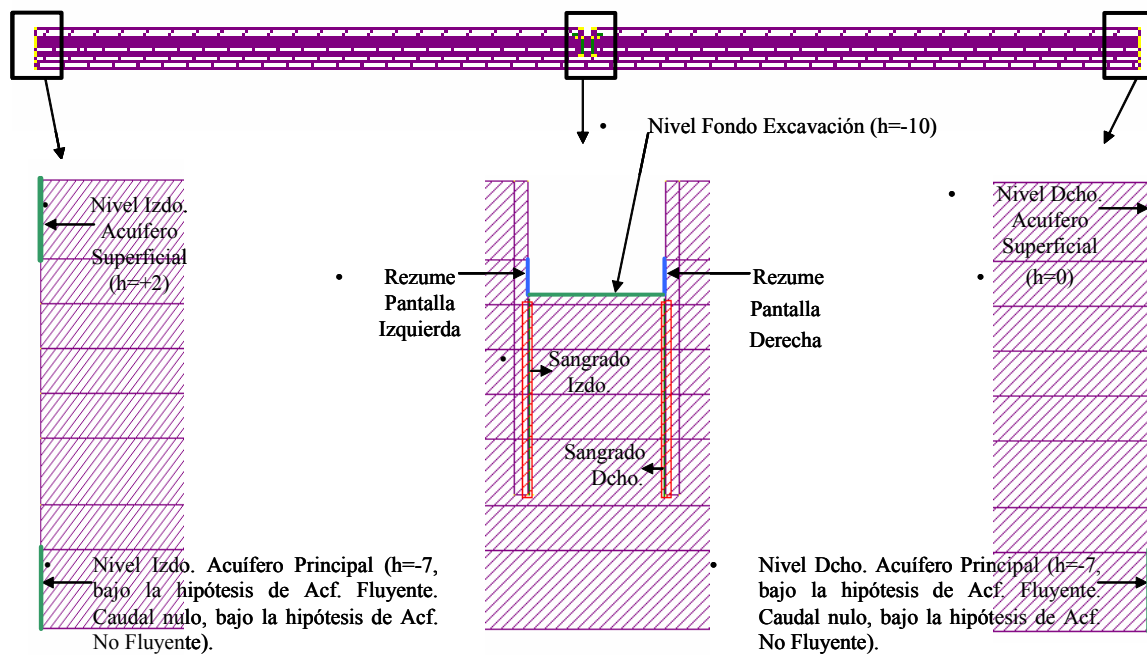


Figura 6.9 Condiciones de Contorno del modelo.

Tabla 6.3 Síntesis de condiciones de contorno consideradas.

	Condiciones de Contorno				
	C1	C2	C3	C4	C5
Sangradoras	Si	Si	Si	No	No
Acuíf. Principal	No Fluy.	No Fluy.	Fluy.	Fluy.	No Fluy.
Rezume	No	Si	Si	Si	Si

A modo de ejemplo, la pasada G1P3C5 se ha realizado con las conductividades hidráulicas descritas en la geología denominada G1, conductividad hidráulica de las pantallas P3 y bajo las condiciones de contorno correspondientes a C5.

6.2.1.1. Discusión de resultados

En el *Anejo 4* se muestra una síntesis de cada pasada, conteniendo:

- Mapa de niveles (isopiezas)
- Presiones de agua en las pantallas
- Gradientes verticales hacia la excavación
- Factor de Seguridad (cociente entre las tensiones totales, considerando peso específico del suelo = 1.9 t/m^3 , y las presiones de agua)

Pasada de referencia

La pasada que se ha considerado de referencia es la denominada G1P3C5. La geología de esta pasada coloca las capas de limos menos permeables (arcillosos) en el fondo de la excavación y en la base de las pantallas. Asimismo, se ha adoptado una conductividad hidráulica intermedia en las pantallas (0.01 m/d), rezume en las pantallas, acuífero Principal no fluyente y no se consideran sangradoras.

Los niveles calculados se muestran en las *Figuras 6.10 y 6.11*. En la primera se puede observar que los niveles son apreciablemente más altos del lado de aguas arriba y que la excavación actúa drenando la capa de limos. Se puede apreciar asimismo que existe una considerable concentración de las líneas de nivel en las zonas más cercanas a la excavación.

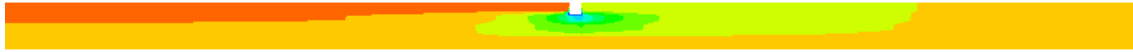


Figura 6.10 Niveles calculados escala global para la pasada de referencia (G1P3C5).

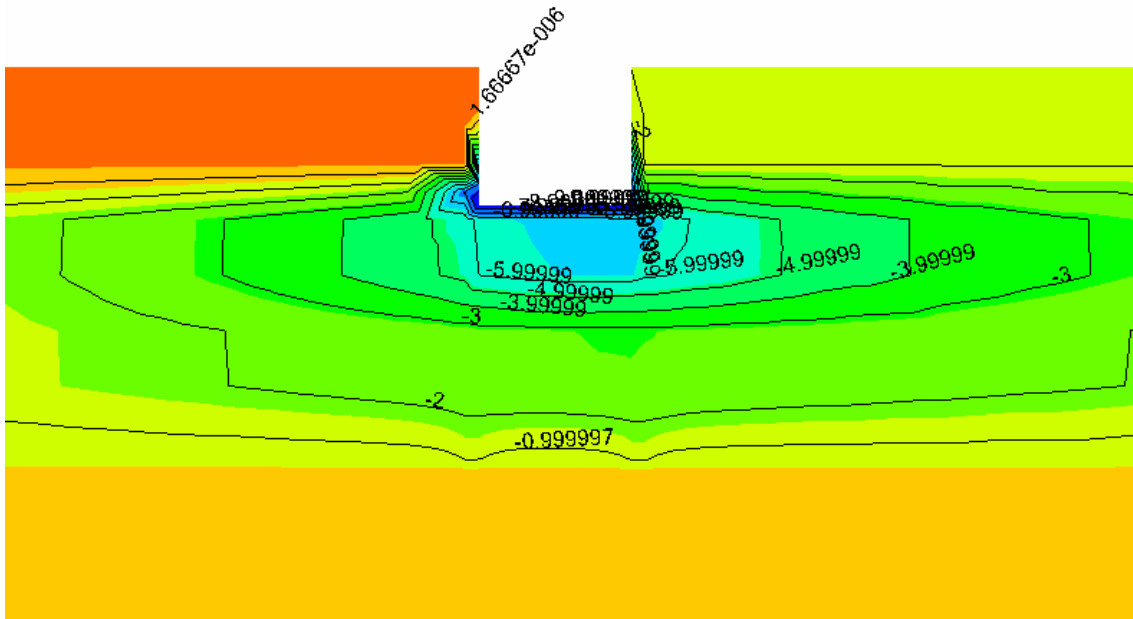


Figura 6.11 Zoom de la figura anterior. Mapa de isopiezas alrededor de las pantallas resultante de la pasada de referencia.

Se han considerado dos pares de geologías análogas entre sí (G1 respecto a G4 y G2 respecto a G3) bajo las mismas condiciones de contorno y con la misma conductividad de pantallas. La variante ha sido que las capas de limos-arenosos se han conectado hidráulicamente con el acuífero Superior. Los resultados muestran que esta conectividad no ejerce prácticamente influencia en el modelo.

Sifonamiento y gradientes verticales

Considerando las pantallas prácticamente estancas y sin sangradoras, se observa gran diferencia entre considerar el acuífero Principal fluyente (G1P1C4 y G2P1C4) o no fluyente (G1P1C5 G2P1C5). Bajo estas condiciones, sin contar con el efecto favorable de nivel menor en el acuífero Principal, se dan elevados gradientes hacia la excavación en los estratos menos permeables y factores de seguridad inferiores a 1,25. Si se considera el efecto favorable del acuífero Principal se obtienen factores de seguridad superiores a 1,25. Sin embargo, en la hipótesis de geología G2 se obtienen elevados gradientes verticales (superiores a 0,5) en los estratos menos permeables. Al colocar sangradoras los gradientes se concentran en profundidad, de forma que las zonas próximas a la excavación quedan liberadas de altos gradientes resultando factores de seguridad significativamente mayores en esas zonas (del orden de 1,8).

Variando la conductividad de las pantallas a una conductividad intermedia (P3) la situación es más desfavorable. Se obtienen, sin sangradoras (C4 y C5), gradientes elevados hacia la excavación y factores de seguridad inferiores a la unidad, se considere o no el efecto favorable del acuífero Principal fluyente. Siendo más desfavorable la geología G2 (*Figura 6.13*). El efecto de colocar sangradoras, además de concentrar los

acuitardo. Para reducir esta incertidumbre se ha realizado un modelo numérico (*Apartado 6.3.3*) que ha permitido simular el comportamiento hidráulico de la Cuña de Limos a partir de los datos obtenidos en el ensayo de bombeo interpretado en el *Apartado 5.3*.

El proceso constructivo general propuesto para la excavación es el siguiente:

1. Preparación de una plataforma de trabajo situada del orden de 1.5 m por encima del nivel freático del acuífero Superficial (véase *Apartado de piezometría*).
2. Construcción de muretes guía.
3. Construcción de módulos de pantallas.
4. Excavación de pozos sangradores en el interior del recinto de pantallas, hasta la cota de las pantallas y de piezómetros de observación en los limos. El bombeo en estos pozos rebaja el nivel del agua en el acuífero Superficial y drena las capas areno-limosas del acuitardo.
5. Excavación hasta cota -4 msnm.
6. Si en dicho momento se han 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 empujes sobre las pantallas).
8. Excavación hasta la base.

6.3.1. Diseño de los Pozos Sangradores

En lugar de tratar de forma independiente los pozos de bombeo para el acuífero Superficial y los pozos de descarga para liberar presiones en los limos, se ha diseñado un sólo pozo para cumplir ambos objetivos. Consiste en un sondeo de gran empaque (400 mm) hasta la profundidad de las pantallas (-28 msnm), donde se introduce una tubería de PVC ranurada (de 0.5 a 0.7 mm), tanto en la zona del acuífero Superficial como en la Cuña de Limos, dejando un tramo ciego de 2 a 3 m en el fondo para la ubicación de la bomba. Se han hecho dos propuestas en cuanto a la longitud del tubo, uno que alcance la cota -21 (*Figura 6.15*) y otro la cota -27 msnm (*Figura 6.16*). Puesto que habrá rejilla en zonas donde el material es muy fino, la elección del ranurado y del prefiltro es muy importante para evitar la entrada de finos en el pozo, evitando a la vez reducciones de permeabilidad en torno al pozo. Se han propuesto dos variantes en cuanto al diseño del prefiltro. En ambos casos las arenas calibradas de 0.5 a 1 mm, tanto del prefiltro como en el resto del sondeo, una variante lleva además prefiltro de resina epoxi y la otra no, en éste último caso es muy importante que las ranuras de la tubería no superen los 0.5 mm.

En el ensayo realizado en el pozo del trasdós de las pantallas (P-L1, véase *Apartado 5.3.2*) el agua bombeada, ha salido clara aunque no completamente limpia.

6.3.2. Caudales y niveles de bombeo

Los ensayos realizados en el acuífero Superficial dan caudales de 1 a 4 l/s con descensos inferiores a 10 m. Los ensayos en la Cuña de Limos dan caudales del orden

de 1 l/min a 0.5 l/min. Además, a medida que se reduzca el espesor saturado la transmisividad también lo hará, de forma que si se mantiene el caudal constante será a costa de producir mayores descensos en el pozo. Se propone pues mantener fijo el nivel de agua en el pozo en vez del caudal, de manera que el caudal será decreciente en el tiempo. Por otro lado, la pendiente del cono de descenso en las proximidades del pozo será más pronunciada a menor transmisividad de las capas. Así pues, con el objetivo de mantener una presión aproximadamente hidrostática (por debajo de la cota máxima de excavación) durante el proceso de excavación en el intradós de las pantallas se propone que los niveles oscilen entre las cotas -12 a -16 o -18, el control de los niveles se puede realizar mediante el encendido y apagado de la bomba indicado por sensores de nivel. Asimismo se propone además la medición del caudal extraído.

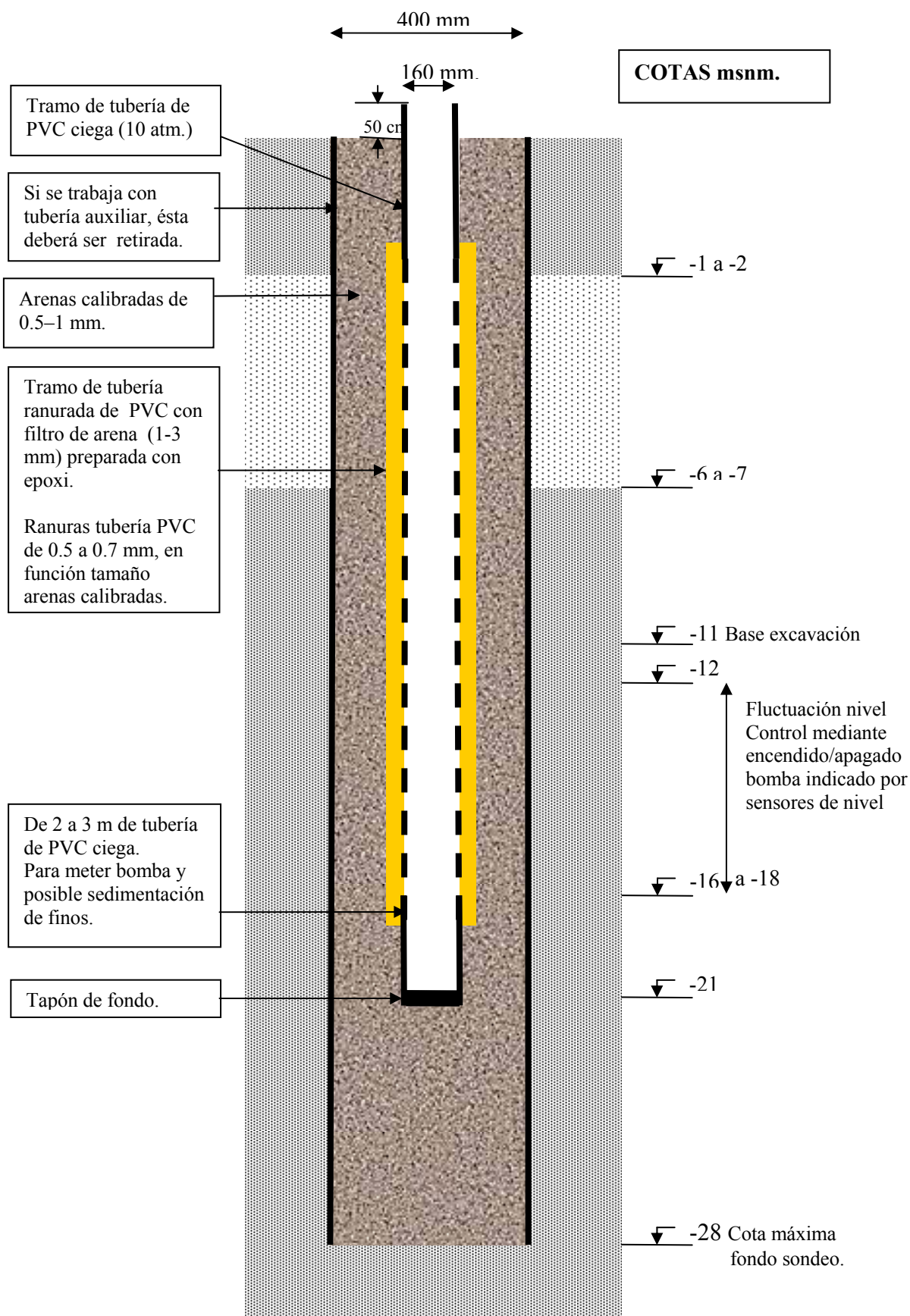


Figura 6.15 Esquema constructivo de los Pozos Sangradores. Variante con prefiltro de resina epoxi, en caso de no llevar ésta, las ranuras del tubo de PVC no deberían superar los 0.5 mm.

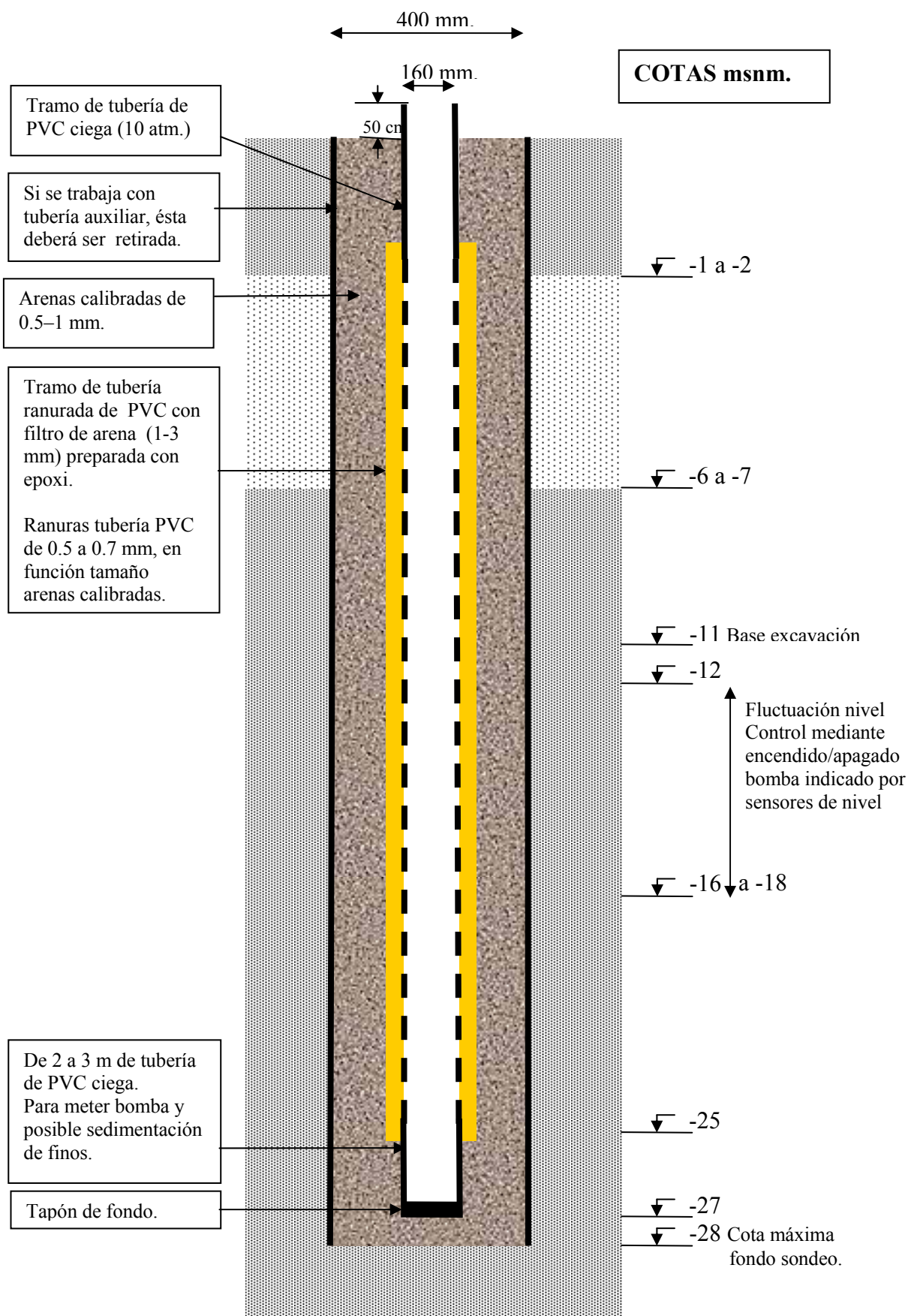


Figura 6.16 Esquema constructivo de los Pozos Sangradores. Variante con prefiltro de resina epoxi, en caso de no llevar ésta, las ranuras del tubo de PVC no deberían superar los 0.5 mm.

6.3.3. Simulación del comportamiento hidráulico en los Limos durante el bombeo entre pantallas

El objetivo de este apartado es simular el efecto de las sangradoras en los materiales que quedan por debajo del acuífero Superficial (a partir de la capa de arcillas que suelen encontrarse a cota aproximada de -10 m, véase correlación CPTU en el corte, *Figura 5.31*).

La simulación se ha realizado con el modelo utilizado para la interpretación del ensayo en los limos. Respecto a éste se han hecho rectificaciones en las zonas del pozo y en las condiciones de contorno. Son las siguientes:

- Condición de contorno en el pozo de nivel fijo= -15 m en el tramo $z \in [-15, -18]$ del contorno $x=0$.
- Conductividad hidráulica= 100 m/d en la zona del pozo ($x \in [0, 0.2]$) en $z \in [-10, -15]$.
- Conductividad hidráulica = 10 m/d en la zona del pozo ($x \in [0, 0.2]$) en $z \in [0, -10]$.
- Pantalla situada a 10 m del pozo. Conductividad hidráulica = $1E-4$ m/d, $1E-3$ m/d y $1E-2$ m/d y coeficiente de almacenamiento = $10E-5$.

Los parámetros hidráulicos utilizados han sido los obtenidos en el análisis 02. Los descensos calculados se muestran en las *Figuras 6.17 a 6.20* (evolución de las curvas de igual descenso para conductividades de la pantalla $1E-4$, $1E-3$ y $1E-2$ m/d, respectivamente) y en la *Figura 6.21* (evolución de descensos a distintas profundidades en el intradós de la pantalla opuesta al pozo de bombeo).

Como se puede observar en las *Figuras 6.17, 6.18 y 6.21* correspondientes a la pasada base (K pantallas= 10^{-4} m/d), se tardan unos 5 días en llegar a descensos apreciables en la pantalla situada frente al bombeo. El descenso continúa a ritmo sostenido hasta los 15 días. A partir de ese momento, la velocidad de descenso va bajando hasta estabilizarse a los dos meses.

El tiempo necesario de bombeo antes de la excavación viene condicionado por la condición de gradiente nulo en el tramo superior. Considerando que la excavación llegará a la cota -11 m y que el nivel en el tramo superior (cota -14, ver *Figura 6.21*) es de unos -2 m, sería preciso producir un descenso de 9 m. En realidad, lo necesario es mucho menor, ya que la excavación producirá una descompresión del terreno. Dado que está confinado, resulta difícil decir cuánto será preciso. Hemos estimado que un descenso de 5 m sería suficiente. Como se puede apreciar en la *Figura 6.17*, para ello serían suficientes 10 días en las condiciones de diseño, se requerirían casi 15 si la pantalla fuese de permeabilidad 0.001 m/d y no se llegarían a alcanzar nunca si la permeabilidad fuese de 0.01 m/día. Esta última hipótesis es francamente desfavorable (equivaldría a una arena fina), pero pone de manifiesto la importancia de cuidar las juntas. En estos casos, además, se producirán descensos también en el trasdós (*Figura 6.20*), por lo que conviene observar sus presiones a fin de conocer mejor el comportamiento del sistema.

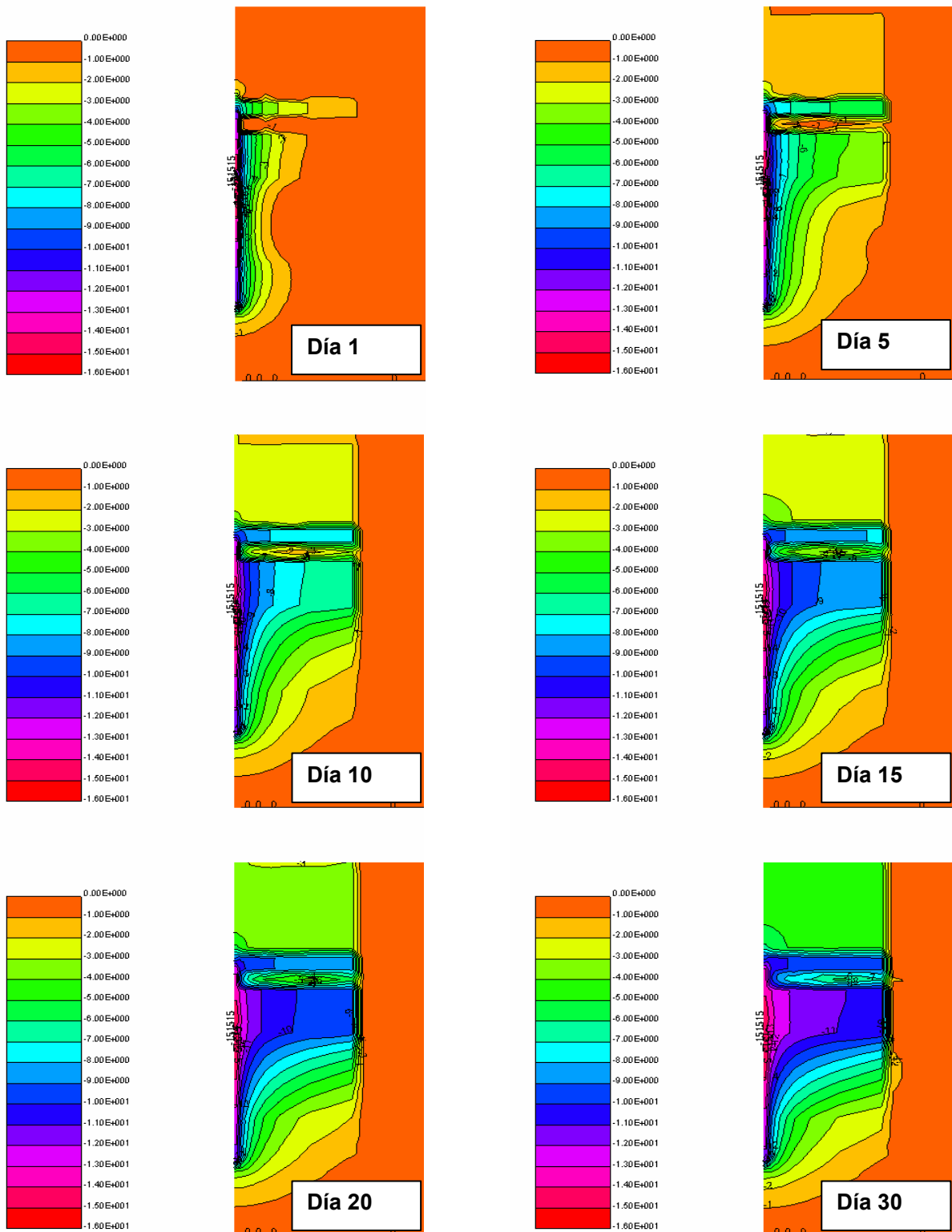


Figura 6.17 Secuencia temporal del bombeo en las sangradoras correspondiente a la pasada de referencia (K pantallas= $1E-4$ m/d).

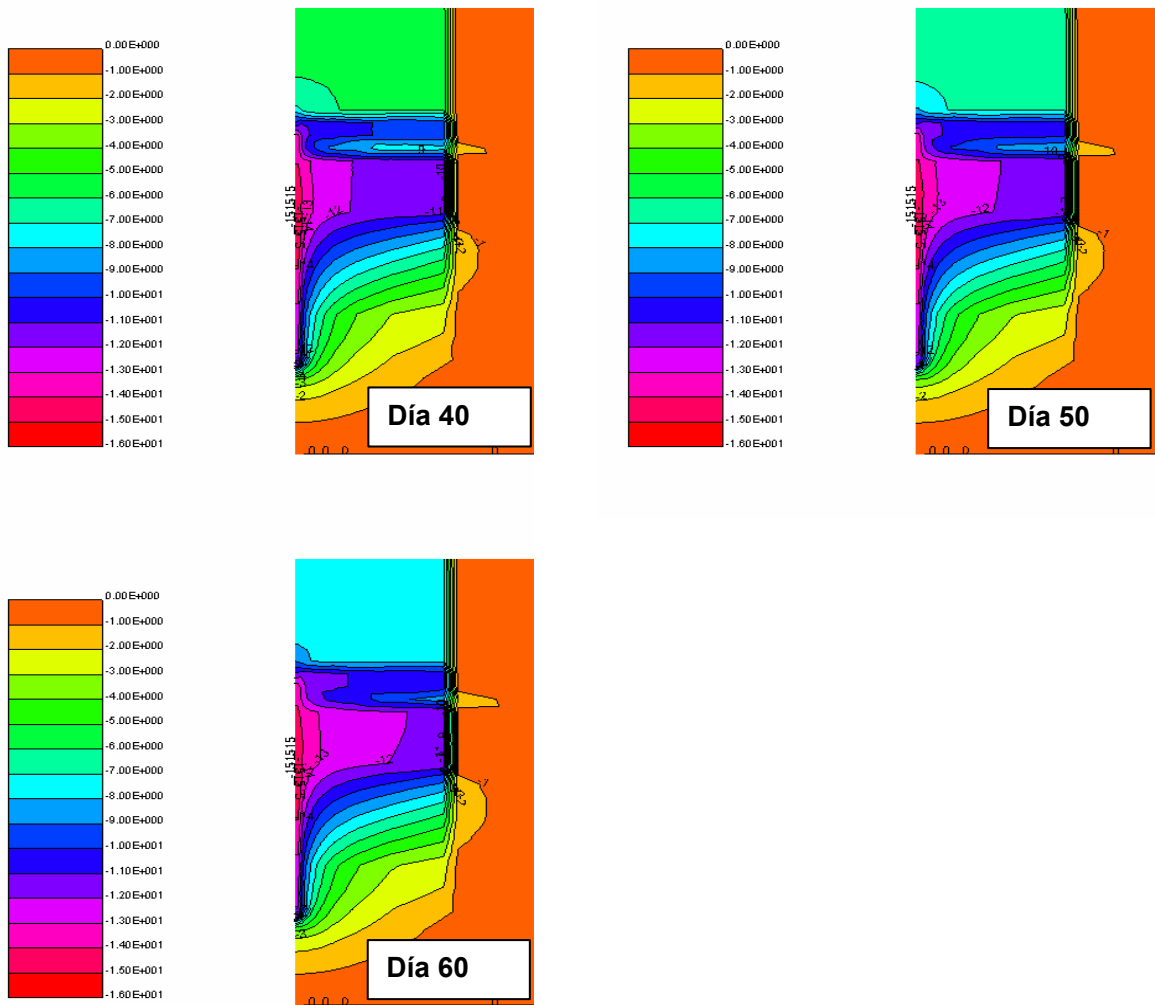
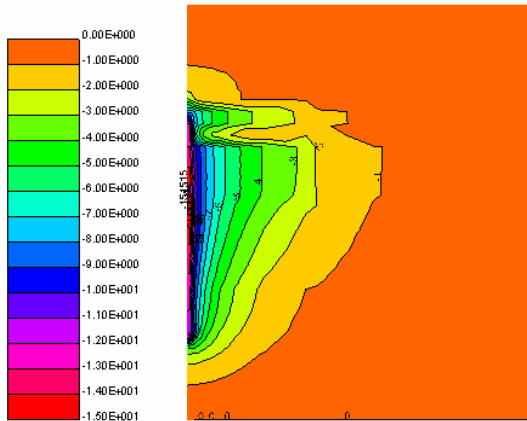
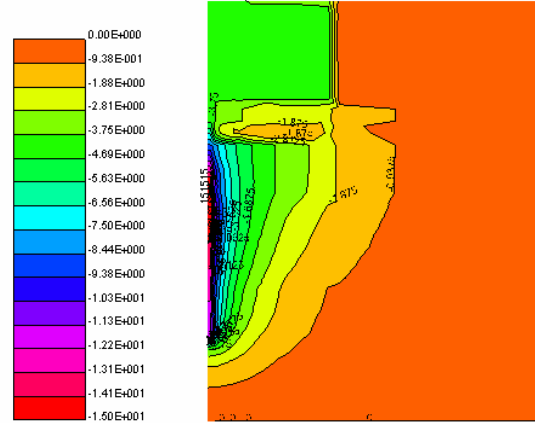


Figura 6.18 *Secuencia temporal del bombeo en las sangradoras correspondiente a la pasada de referencia (K pantallas= $1E-4$ m/d).*

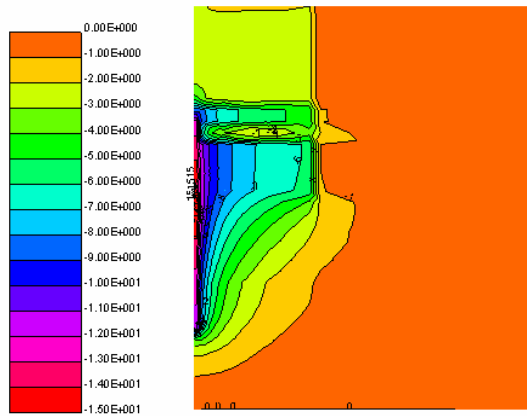
$K_{pan}=0.01$ m/d, $K_{poz}=100$ m/d 15 días



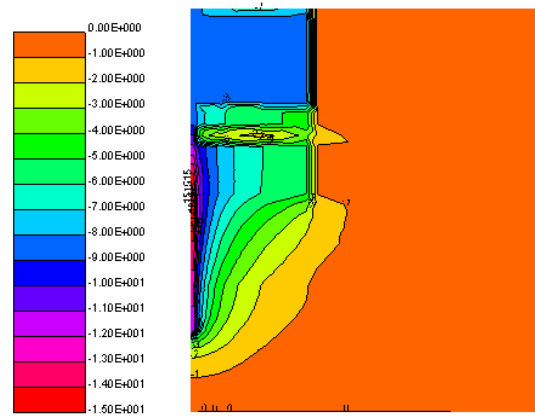
$K_{pan}=0.01$ m/d, $K_{poz}=1E8$ m/d 15 días



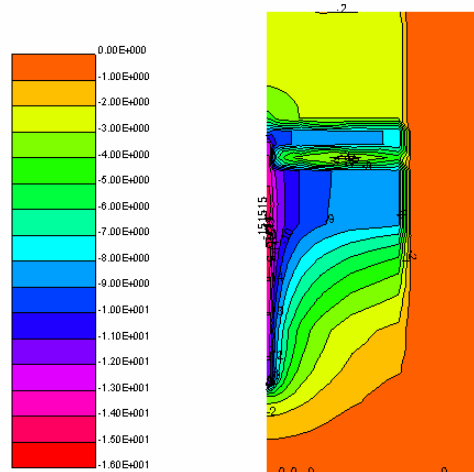
$K_{pan}=0.001$ m/d, $K_{poz}=100$ m/d 15 días



$K_{pan}=0.001$ m/d, $K_{poz}=1E7$ m/d 15 días



$K_{pan}=0.0001$ m/d, $K_{poz}=100$ m/d 15 días



$K_{pan}=0.0001$ m/d, $K_{poz}=1E6$ m/d 15 días

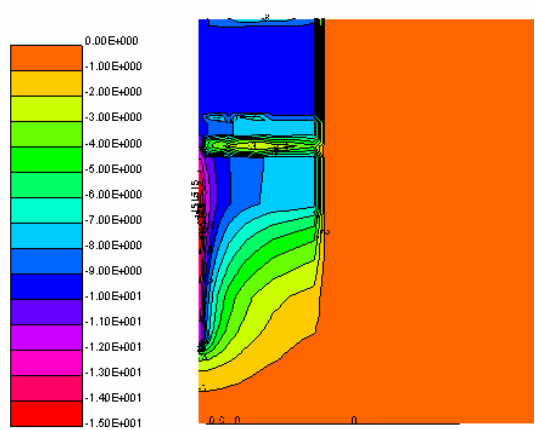
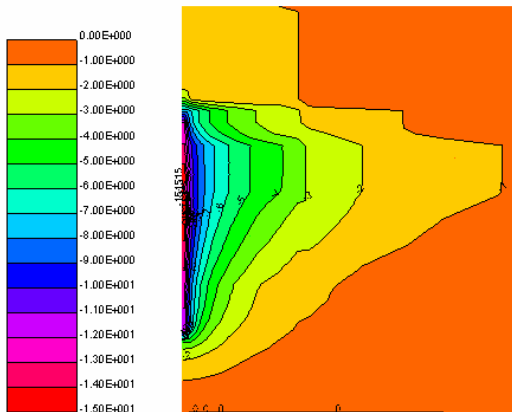
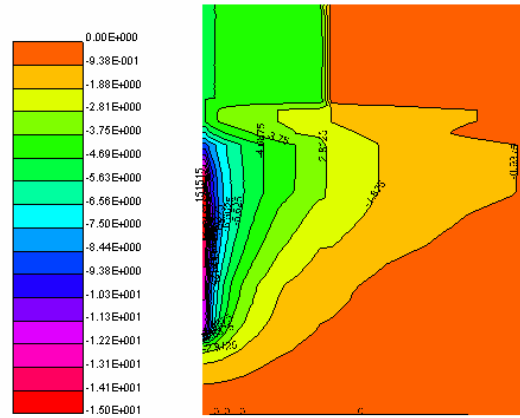


Figura 6.19 Comparación del bombeo en las sangradoras en diferentes pasadas, correspondientes al tiempo $t=15$ días.

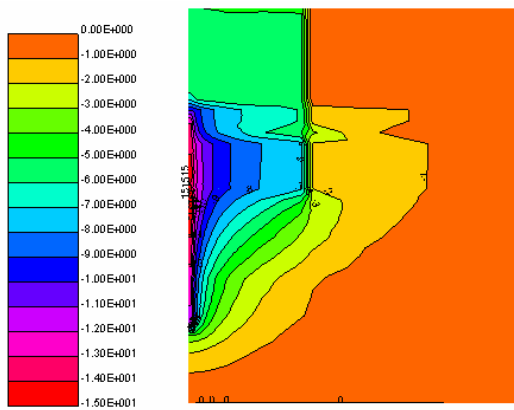
$K_{pan}=0.01 \text{ m/d}$, $K_{poz}=100 \text{ m/d}$ 60 días



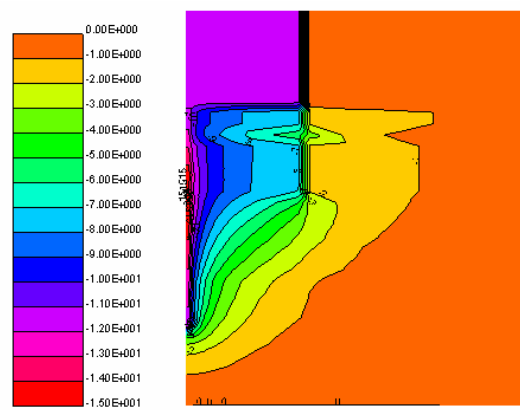
$K_{pan}=0.01 \text{ m/d}$, $K_{poz}=1E8 \text{ m/d}$ 60 días



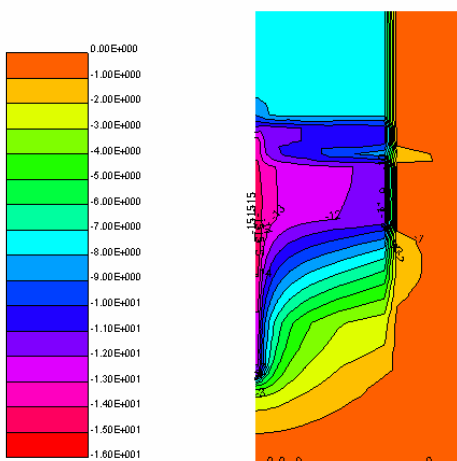
$K_{pan}=0.001 \text{ m/d}$, $K_{poz}=100 \text{ m/d}$ 60 días



$K_{pan}=0.001 \text{ m/d}$, $K_{poz}=1E7 \text{ m/d}$ 60 días



$K_{pan}=0.0001 \text{ m/d}$, $K_{poz}=100 \text{ m/d}$ 60 días



$K_{pan}=0.0001 \text{ m/d}$, $K_{poz}=1E6 \text{ m/d}$ 60 días

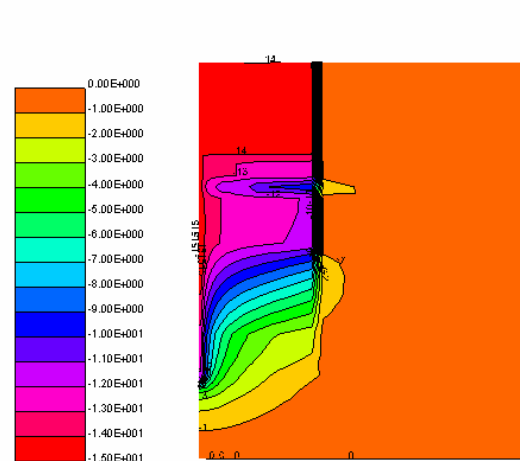


Figura 6.20 Comparación del bombeo en las sangradoras en diferentes pasadas, correspondientes al tiempo $t=60$ días.

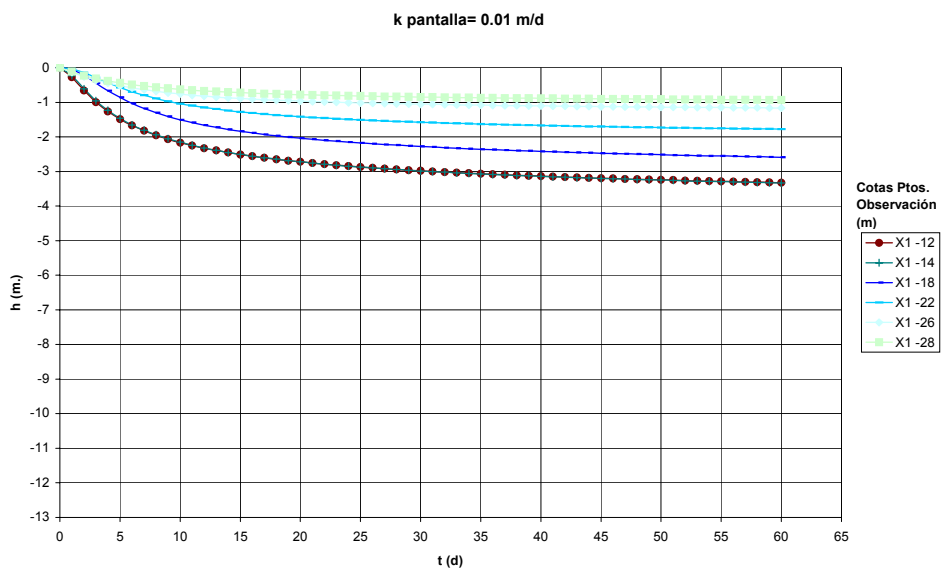
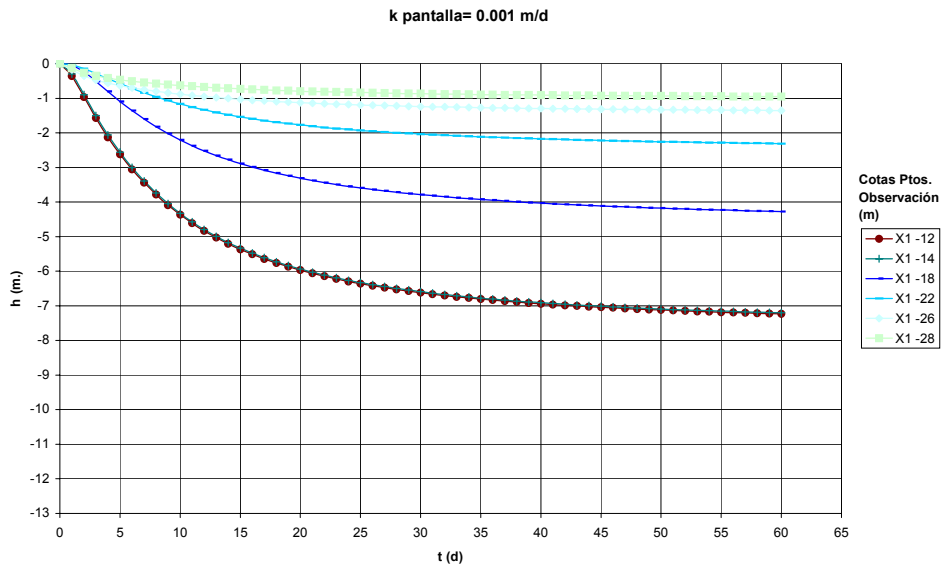
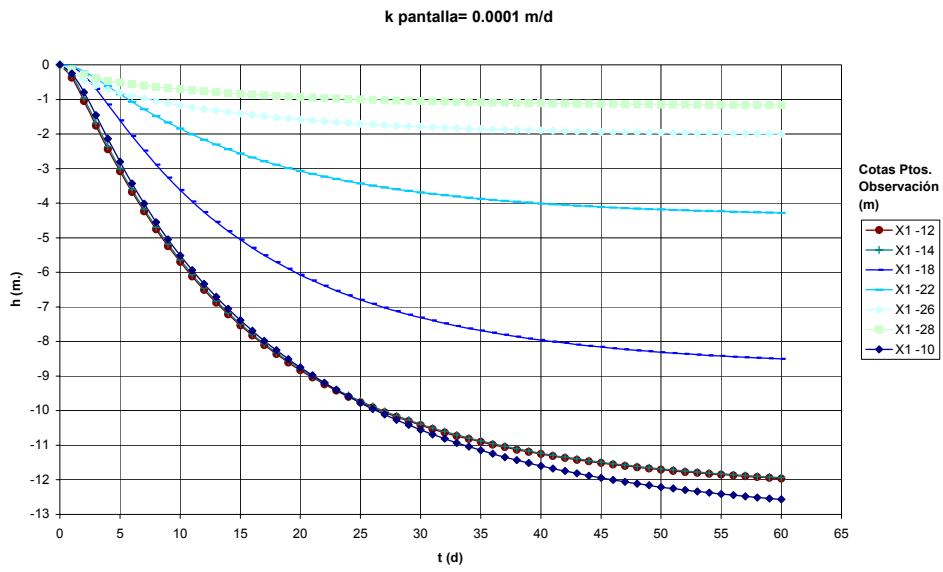


Figura 6.21 Evolución temporal de niveles a diferentes cotas, en puntos ubicados a 0.5 m del intradós de la pantalla alejada del pozo.

6.3.4. Distancias entre pozos sangradores y funcionamiento hidráulico

Los cálculos realizados se basan en que la distancia entre sangradoras es del orden de 25 m a lo largo de la traza y dispuestas al tresbolillo (*Figura 6.22*). En estas condiciones, la zona de influencia es aproximadamente semicircular, lo que ha simplificado los cálculos. En realidad, en función de la condiciones de trabajo, es probable que no sea posible mantener la equidistancia. En todo caso, no es necesario. En el tramo superior se puede suponer que los descensos dependen de r^2/t . Es decir, si la distancia se duplica, se obtiene un descenso análogo cuatro veces más tarde. Ello implica dos cosas. En primer lugar, si se dispone de más tiempo que el bombeo, se puede aumentar la distancia. En segundo lugar, el punto más desfavorable es el más alejado. Por ello, para acelerar el drenaje debe disminuirse la distancia máxima. Ello implica, por ejemplo que si un pozo debe desplazarse 10 m a lo largo de la traza, conviene que el anterior se desplace 5. De esta manera, la distancia máxima entre sangradoras sería de 30 m en lugar de 35 m.

Otra forma de acelerar el proceso es aumentar el descenso en el pozo de bombeo. Por este motivo, se ha propuesto que en las primeras sangradoras del tramo de pruebas, en las que el plazo está ajustado, se aumenta el descenso de 15 a 18 m. lo que ha requerido reprofundizar el tramo ranurado. También merece discusión el funcionamiento de los pozos sangradores. En realidad, el bombeo se produce a media altura (hasta la cota -18 msnm). El resto de la sangradora, hasta la -28 m, sólo tiene la función de transmitir el agua extraída desde la base, por ello su función no es tan crítica.

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). Por otro lado, tampoco 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, demás, posibles problemas con los lodos bentoníticos se propone situar los pozos a no menos de 1 m de distancia de las pantallas.

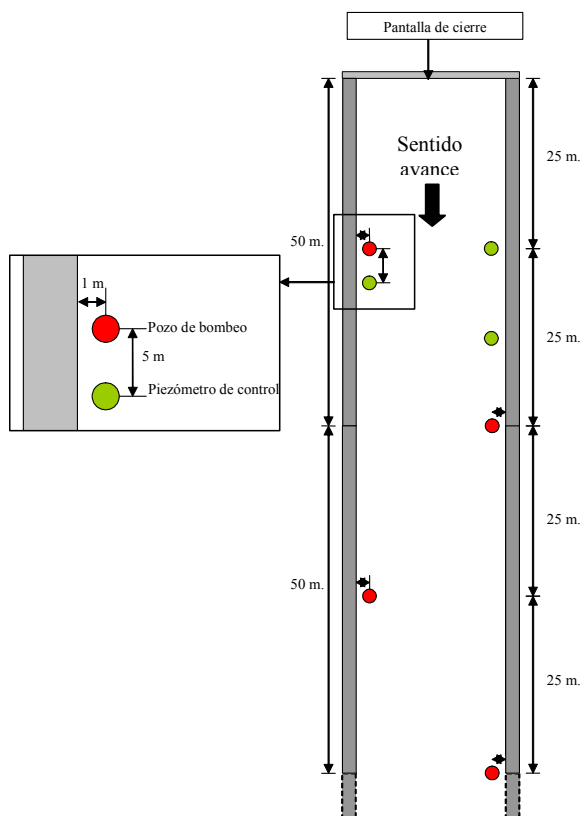


Figura 6.22 Esquema en planta de la ubicación de los pozos de bombeo (en rojo) y de los piezómetros de control (verde).

6.3.5. Sistemas de observación: Piezómetros de control

El drenaje propuesto tiene varios elementos innovadores. Por ello conviene una auscultación especial. Se propone observar los niveles mediante piezómetros de cuerda vibrante tanto en el trasdós como en el intradós de las pantallas.

Se ha optado por los piezómetros de control que en un único sondeo tienen tres sensores a profundidades diferentes. En la *Figura 6.23* se muestra el diseño de los piezómetros de control ubicados en la zona de pruebas. En particular, se propone instalar piezómetros a tres niveles ($z=-12$, -18 y -25 msnm) en tres sondeos. Uno próximo a un pozo de bombeo (a unos 5 m de distancia), otro enfrentado con el pozo de bombeo, pero situado al lado de la pantalla opuesta, y otro en el punto medio entre dos pozos de bombeo (a unos 12 m), véase *Figura 6.22*. Asimismo, se propone ubicar sondeos con el mismo diseño de piezómetros en el trasdós de las pantallas.

Durante la ejecución de los piezómetros de control hay que extremar las precauciones en el momento de retirar la tubería auxiliar para evitar arrastrar el filtro. Para ello, hay que hacerlo justo después de la introducción de la bentonita, antes de que ésta se moje y se expanda y forme un tapón con la tubería auxiliar.

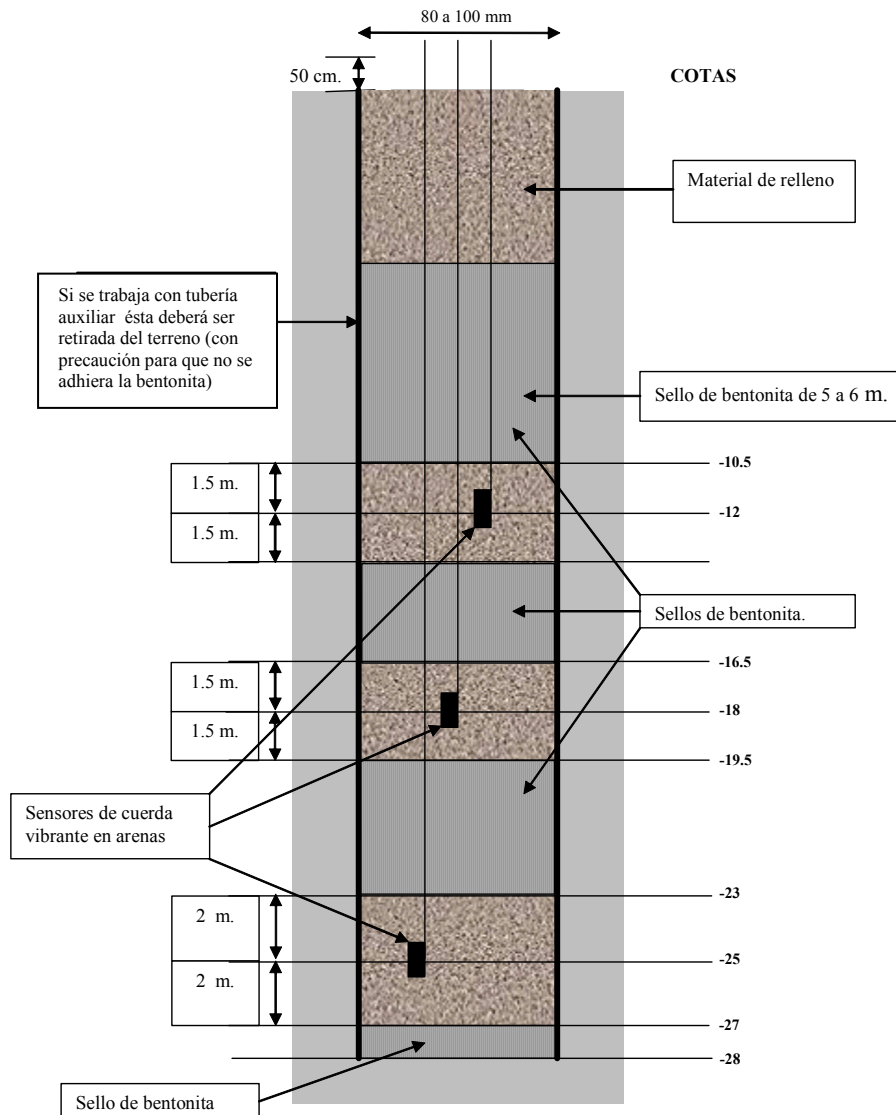


Figura 6.23 Esquema constructivo de los piezómetros de control en la Cuña de Limos.

6.3.6. Presiones de agua

El objetivo de este apartado es discutir los perfiles de presiones de agua a adoptar en el cálculo de las pantallas en el proceso constructivo.

Los perfiles bajo discusión se deducen del modelo presentado en el *Apartado 6.2.*, cuyos resultados se adjuntan en el *Anejo 4*. En el mismo se consideraban diversas hipótesis de cálculo. En las más desfavorables se suponía que las pantallas penetraban en un nivel de muy baja permeabilidad y que, de manera efectiva, el acuífero Principal no fluía, (Condición C2), por lo que su nivel es sensiblemente igual al del acuífero Superficial. En estas condiciones, el nivel en el trasdós de la pantalla era sólo ligeramente inferior al de los acuíferos (véase *Figura 6.24* y *Anejo 4*).

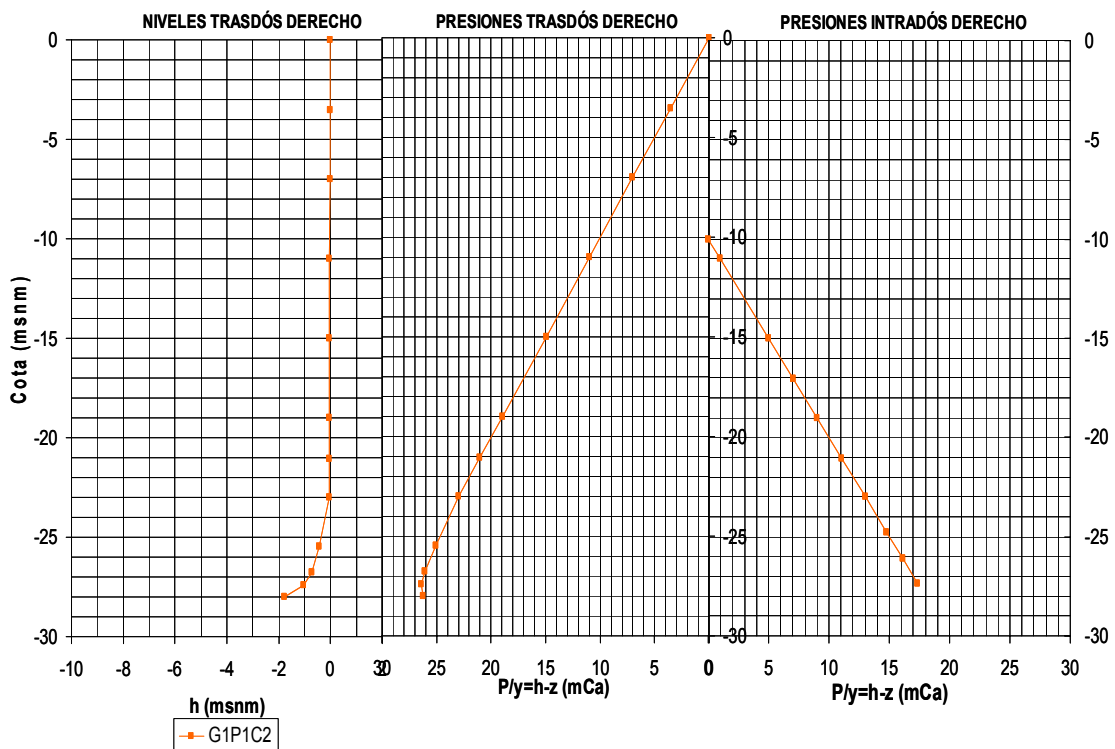


Figura 6.24 Niveles y presiones de agua suponiendo condiciones hidrostáticas en el intradós.

Es decir, los perfiles de presiones eran virtualmente hidrostáticos. Los datos obtenidos de entonces confirman que dichas hipótesis son excesivamente conservadoras. En particular, se han ido verificando las siguientes observaciones:

- 1) El nivel del acuífero Principal es de unos -7 msnm. Ello implica un flujo vertical hacia abajo a través de los limos, con la correspondiente pérdida de carga.
- 2) El nivel menos permeable de los limos se sitúa a techo de los mismos y está constituido por una capa arcillosa de unos 2 m de potencia y de muy baja permeabilidad. Por tanto, la mayor pérdida de carga se ubica en esta zona.
- 3) En coherencia con las dos observaciones anteriores, los niveles medidos en los piezómetros abiertos a la cota -25 a -30 son del orden de -5 msnm (véanse *Figuras 5.21* y *5.22*).

Todo ello apunta a que son razonables los siguientes perfiles de niveles (véase *Figura 6.25*).

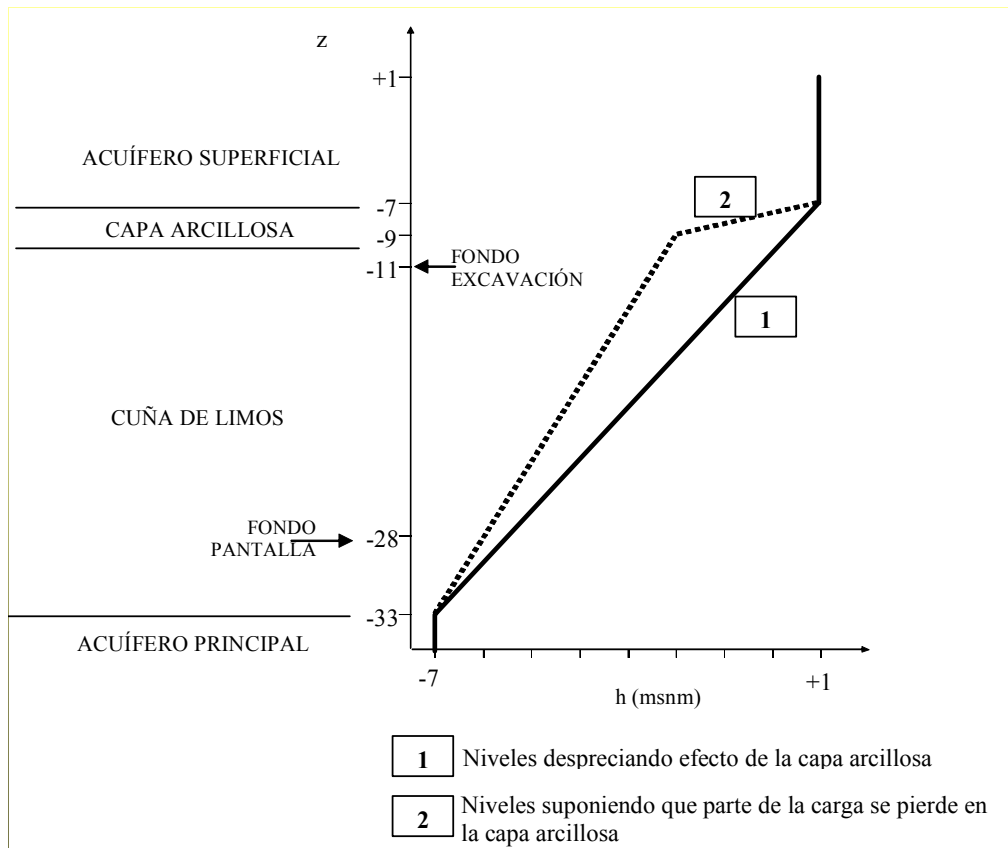


Figura 6.25 Posibles perfiles de nivel teniendo en cuenta los nuevos datos.

De los niveles de la Figura 6.25 se deducen las presiones de la Figura 6.26 (en ambos casos se supone que las sangradoras están operativas, de manera que puede suponerse perfil hidrostático en el intradós). En realidad, como se observa en las Figuras 6.18 a 6.20, en la base de la pantalla opuesta a la sangradora no llegará a producirse descenso, por lo que puede suponerse una sobrepresión adicional, tal como se muestra en la Figura 6.26.

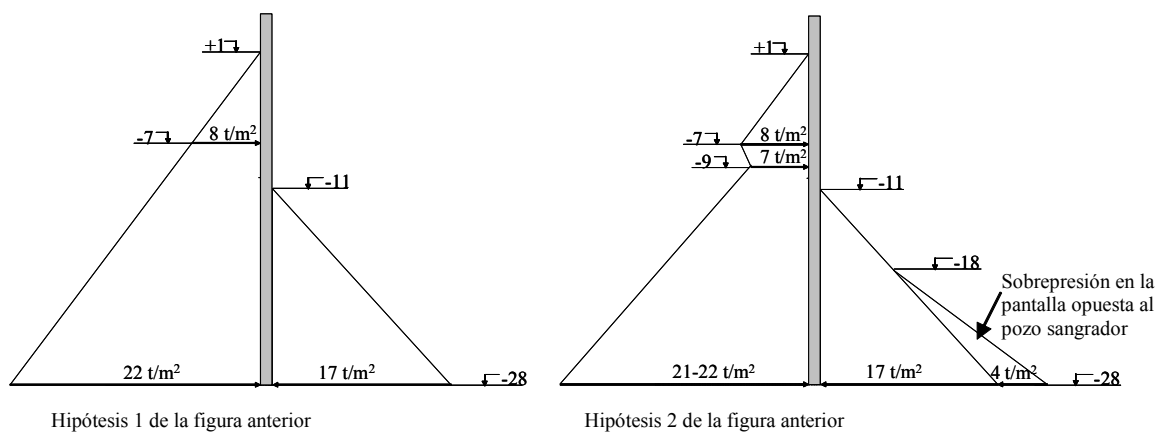


Figura 6.26 Posibles perfiles de presión teniendo en cuenta los nuevos datos.

Esta discusión pone de manifiesto el papel importante que juega el acuífero Principal en el juego de presiones de agua. Dado que sus presiones están fuera del control de la obra, podría producir preocupación que sus niveles subiesen de forma brusca. En realidad, el registro de niveles de los últimos 35 años pone de manifiesto que estos ascensos sólo están asociados a avenidas excepcionales (véase Apartado 4.2.2).