

ÍNDICE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES | 1 |
| 2. | OBJETIVOS Y METODOLOGÍA | 3 |
| 3. | GEOLOGÍA | 5 |
| 3.1. | GEOLOGÍA GENERAL DEL DELTA DEL LLOBREGAT | 5 |
| 3.2. | UNIDADES GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL DELTA DEL LLOBREGAT | 7 |
| 3.3. | DATOS DISPONIBLES PARA EL ESTUDIO DEL TRAZADO | 8 |
| 3.4. | GEOLOGÍA DEL ENTORNO DEL TRAZADO PREVISTO. | 10 |
| 4. | HIDROGEOLOGÍA A ESCALA DEL DELTA | 16 |
| 4.1. | UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS..... | 16 |
| 4.2. | PIEZOMETRÍA | 17 |
| 4.2.1. | <i>Acuífero Superficial (CDSb)</i> | 17 |
| 4.2.2. | <i>Acuífero Principal (CDM)</i> | 19 |
| 4.2.3. | <i>Acuíferos Inferiores (CDI)</i> | 21 |
| 5. | HIDROGEOLOGÍA LOCAL DEL TRAZADO | 22 |
| 5.1. | DESCRIPCIÓN DE LA RED DE OBSERVACIÓN HIDROGEOLÓGICA | 22 |
| 5.1.1. | <i>Desarrollo y limpieza de los piezómetros</i> | 24 |
| 5.1.2. | <i>Ubicación y cotas de los piezómetros de control</i> | 25 |
| 5.2. | PIEZOMETRÍA | 25 |
| 5.2.1. | <i>Acuífero Superficial (CDSb)</i> | 26 |
| 5.2.2. | <i>Cuña de Limos (CDSa)</i> | 32 |
| 5.2.3. | <i>Acuífero Principal (CDMa) y Acuífero Inferior (CDIb)</i> | 34 |
| 5.3. | INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS | 36 |
| 5.3.1. | Acuífero Superficial | 36 |
| 5.3.2. | Cuña de Limos | 37 |
| 5.3.2.1. | Descripción de los nuevos pozos de bombeo y piezómetros de control para la caracterización hidráulica de la Cuña de Limos | 37 |
| 5.3.2.2. | Descripción del ensayo..... | 40 |
| 5.3.2.3. | Interpretación del ensayo | 41 |
| | Metodología | 41 |
| | Modelo numérico | 41 |
| | Resultados | 42 |
| 6. | DEFINICIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO PARA LA EXCAVACIÓN | 45 |
| 6.1. | SIMULACIÓN DEL BOMBEO EN EL ACUÍFERO SUPERFICIAL..... | 45 |
| 6.2. | MODELO EN SECCIÓN VERTICAL PARA SIMULAR LOS GRADIENTES HACIA LA EXCAVACIÓN | 48 |
| 6.2.1. | Modelo numérico | 48 |
| 6.2.1.1. | Discusión de resultados..... | 51 |
| 6.3. | SOLUCIÓN ADOPTADA | 53 |
| 6.3.1. | Diseño de los Pozos Sangradores | 54 |
| 6.3.2. | Caudales y niveles de bombeo..... | 54 |
| 6.3.3. | Simulación del comportamiento hidráulico en los Limos durante el bombeo entre pantallas | 58 |
| 6.3.4. | Distancias entre pozos sangradores y funcionamiento hidráulico..... | 64 |
| 6.3.5. | Sistemas de observación: Piezómetros de control | 65 |
| 6.3.6. | Presiones de agua | 66 |
| 7. | ESTUDIO DEL EFECTO BARRERA | 68 |
| 7.1. | MODELACIÓN NUMÉRICA EN SECCIÓN VERTICAL | 68 |
| 7.2. | MODELACIÓN NUMÉRICA EN PLANTA A ESCALA REGIONAL..... | 69 |
| 7.3. | RESULTADOS..... | 71 |
| 7.4. | DISEÑO SISTEMAS DE DRENAJE | 80 |
| 8. | SÍNTESIS Y CONCLUSIONES | 82 |
| | REFERENCIAS | 86 |

ANEJOS

ANEJO 1: UBICACIÓN EN PLANTA DATOS GEOLOGÍA Y SECCIONES TIPO DEL TÚNEL

ANEJO 2: INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO

ANEJO 3: DATOS ENSAYO DE BOMBEO EN LA CUÑA DE LIMOS

ANEJO 4: RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PASADAS DEL MODELO EN SECCIÓN VERTICAL DE LAS PANTALLAS

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Mapa de obras civiles en el Delta del Llobregat [1]. | 1 |
| Figura 1.2 Mapa de ubicación del trazado del tramo Hospitalet-Can Tunis del AVE (coordenadas UTM). | 2 |
| Figura 3.1 Cortes geológicos del Delta del Llobregat [28]. | 5 |
| Figura 3.2 Corte geológico del Delta emergido y sumergido con datos del MOP y del IGME de sísmica de reflexión. Los deltas del Cuaternario Antiguo (Q1, Q2 y Q3) corresponden en parte al Complejo Detrítico Inferior. El delta moderno (Q4) se formó hace unos 18000 años, aunque su progradación se realizó en los últimos 6000 años [32]. | 6 |
| Figura 3.3 Modelo conceptual de los sistemas encajados del Complejo Detrítico Medio (CDM) y Complejo Detrítico Inferior (CDI). Los colores naranja (CDIb) y amarillo (CDM) corresponden a gravas y conglomerados, entre los materiales gruesos hay arcilla y arena. El blanco representa los limos y arenas finas del Complejo Deltaico Superior (CDSa), el gris claro corresponde a las Margas Azules Pliocenas, el gris oscuro al basamento Mioceno y pre-Mioceno. En el corte se representan los sondeos realizados para la obra del AVE (SPZ-4 y SPZ-16). | 7 |
| Figura 3.4 Columna estratigráfica del sondeo SPZ-12, con las fotografías correspondientes del testigo. Cerca del SPZ-12 está el CPTU-20. Se han representado los diagramas del CPTU tipo de suelo y q_e , a la derecha del mismo se han distinguido posibles secuencias granodecrecientes y las unidades de los Complejos Detríticos CDM y CDS. | 9 |
| Figura 3.5 Sondeos SPZ-16 y SPZ-4, en los que se observan los cambios de litofacias a profundidades de 60 a 63 m. | 10 |
| Figura 3.6 Facies de grava en el sondeo SPZ-16. Los materiales corresponden a la unidad hidrogeológica Acuífero Principal. | 11 |
| Figura 3.7 Sondeos SPZ-12, SPZ-13 y SPZ-14. La señal de color verde marca el límite entre las litofacias más arenosas y limosas, de las litofacias arcillosas. | 12 |
| Figura 3.8 Litofacias arenosas del sondeo SPZ-13. | 13 |
| Figura 3.9 Sondeo SPZ-14, donde se observan las gravas con niveles | 13 |
| Figura 3.10 Arcillas rojas de la unidad CDSc, sondeo SPZ-13. | 14 |
| Figura 3.11 Perfil geológico del trazado. | 15 |
| Figura 4.1 Piezometría media calculada en abril 2003. [36]. | 17 |
| Figura 4.2 Evolución temporal de niveles piezométricos de un punto del acuífero Superficial ubicado en medio del trazado del túnel. Niveles calculados con el modelo calibrado del Delta del Llobregat de la UPC. | 18 |
| Figura 4.3 Evolución de los principales piezómetros de acuífero Principal [38]. | 19 |
| Figura 4.4 Piezometría 2002 (interpolación lineal entre los datos de piezometría [40]). | 20 |
| Figura 4.5 Evolución de niveles en pozo PZP-2 situado en el acuífero Principal. | 21 |
| Figura 4.6 Evolución del nivel piezométrico en el piezómetro C-5''-b en el acuífero Principal [41]. | 21 |
| Figura 5.1 Evolución del fondo de los piezómetros ubicados en el Acuífero Superficial. | 24 |
| Figura 5.2 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 26 |
| Figura 5.3 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 27 |
| Figura 5.4 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 27 |
| Figura 5.5 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 27 |
| Figura 5.6 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 28 |
| Figura 5.7 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 28 |
| Figura 5.8 Evolución de los niveles en los piezómetros del acuífero Superficial. | 28 |
| Figura 5.9 Ubicación de los piezómetros donde se han tomado las medidas de los niveles en el Acuífero Superficial. | 29 |
| Figura 5.10 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 1 de Septiembre de 2003). | 29 |
| Figura 5.11 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 17 de Septiembre del 2003). | 29 |
| Figura 5.12 Piezometría local en la traza obtenida mediante interpolación de mínima curvatura (medidas realizadas el día 17 de Septiembre del 2003). | 30 |
| Figura 5.13 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 9 de Octubre del 2003). | 30 |
| Figura 5.14 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante método de mínima curvatura (medidas realizadas el día 9 de Octubre del 2003). | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.15 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 16 de Octubre del 2003). | 31 |
| Figura 5.16 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 20 de Octubre del 2003). | 31 |
| Figura 5.17 Piezometría local en el trazado del túnel obtenida mediante interpolación radial (medidas realizadas el día 20 de Noviembre del 2003). | 31 |
| Figura 5.18 Piezometría local en la traza obtenida mediante interpolación de mínima curvatura (medidas PZ-1, PZ-2, PZ-3 y PZ-4 corresponden al día 14 de enero de 2004, el resto fueron tomadas el 12 de enero de 2004). | 32 |
| Figura 5.19 Evolución de niveles piezométricos en piezómetros ubicados en la cuña de limos. La rejilla del PZ-9 se encuentra aproximadamente entre las cotas -14.6 y -21.6 y la de PZ-10 entre -24.4 y -29.4. | 32 |
| Figura 5.20 Evolución de niveles piezométricos en el pozo P-L1. | 33 |
| Figura 5.21 Evolución de presiones de agua medidas en los sensores del piezómetro PZ-L1, corresponden a niveles de unos -1.5 m en Z=-11.3 m, -4m en Z=-17.35 y -5 en Z=-25.35 m. | 33 |
| Figura 5.22 Evolución de presiones de agua medidas en los sensores del piezómetro PZ-L2, corresponden a niveles de unos h=-1.5 m en Z=-12.5 m; h=-4m en Z=-17.5 y h=-5 m en Z=-26 m | 34 |
| Figura 5.23 Comparación de los niveles medidos entre los pozos ubicados en el acuífero Principal (PZP-2), acuífero Inferior (PZP-1) y en la Cuña deLimos (PZ-10 y PZ-9). | 34 |
| Figura 5.24 Diseño de los pozos (P-L1 y P-L2) para el ensayo de bombeo en la Cuña de Limos. El pozo P-L2 tiene el tramo de tubería de PVC ranurada con filtro de arena epoxi. El pozo P-L1 no tiene prefiltro de arena epoxi. | 38 |
| Figura 5.25 Esquema de los piezómetros de control (PZ-L1 y PZ-L2) ubicados a 3 m de los pozos P-L1 y P-L2. | 39 |
| Figura 5.26 Ubicación de los sensores de nivel de los piezómetros PZ-L1 y PZ-L2 y de la rejilla en los pozos P-L1 y P-L2. | 40 |
| Figura 5.27 Geometría del modelo para la interpretación del bombeo. | 42 |
| Figura 5.28 Gráficas dónde se comparan los valores medidos con los calculados. | 44 |
| Figura 6.1 Geometría del modelo bidimensional plano para la simulación del bombeo entre pantallas en el acuífero Superficial. | 46 |
| Figura 6.2 Malla del modelo bidimensional plano para la simulación del bombeo entre pantallas en el acuífero Superficial. | 46 |
| Figura 6.3 Resultados tras 1 día de bombeo en el primer tramo de pantalla | 47 |
| Figura 6.4 Resultados tras 30 días de bombeo en el primer tramo de pantalla | 47 |
| Figura 6.5 Resultados tras bombear 0.01 días en un pozo situado a 60 m del primero. | 47 |
| Figura 6.6 Resultados tras bombear 2 días en un pozo situado a 60 m del primero. | 47 |
| Figura 6.7 Diseño de la malla de elementos finitos. | 49 |
| 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. | 49 |
| Figura 6.9 Condiciones de Contorno del modelo. | 51 |
| Figura 6.10 Niveles calculados a escala global para la pasada de referencia (G1P3C5). | 52 |
| Figura 6.11 Zoom de la figura anterior. Mapa de isopiezas alrededor de las pantallas resultante de la pasada de referencia. | 52 |
| Figura 6.12 Niveles calculados a escala global para la pasada G2P3C5. | 53 |
| Figura 6.13 Zoom de la figura anterior. Mapa de isopiezas alrededor de las pantallas resultante de la pasada G2P3C4, en esta pasada se considera el acuífero Principal Fluyente (h=-7 msnm). | 53 |
| Figura 6.14 Mapas de isopiezas resultantes de pasadas realizadas bajo las mismas hipótesis que la pasada de referencia, salvo que en este caso, se han introducido sangradoras hasta la base de las pantallas. En la pasada de la izquierda se considera el acuífero Principal No Fluyente (G1P3C2), se observa una concentración de gradientes en la base de las pantallas donde se ha considerado la existencia de un estrato menos permeable. En la pasada de la derecha (G1P3C3) se ha considerado acuífero Principal Fluyente (h =-7 msnm). | 53 |
| 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. | 56 |
| 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. | 57 |
| Figura 6.17 Secuencia temporal del bombeo en las sangradoras correspondiente a la pasada de referencia (K pantallas=1E-4 m/d). | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.18 Secuencia temporal del bombeo en las sangradoras correspondiente a la pasada de referencia (K pantallas= $1E-4$ m/d)..... | 60 |
| Figura 6.19 Comparación del bombeo en las sangradoras en diferentes pasadas, correspondientes al tiempo $t=15$ días..... | 61 |
| Figura 6.20 Comparación del bombeo en las sangradoras en diferentes pasadas, correspondientes al tiempo $t=60$ días..... | 62 |
| 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..... | 63 |
| Figura 6.22 Esquema en planta de la ubicación de los pozos de bombeo (en rojo) y de los piezómetros de control (verde)..... | 64 |
| Figura 6.23 Esquema constructivo de los piezómetros de control en la Cuña de Limos..... | 65 |
| Figura 6.24 Niveles y presiones de agua suponiendo condiciones hidrostáticas en el intradós..... | 66 |
| Figura 6.25 Posibles perfiles de nivel teniendo en cuenta los nuevos datos..... | 67 |
| Figura 6.26 Posibles perfiles de presión teniendo en cuenta los nuevos datos..... | 67 |
| Figura 7.1 Mapa de niveles resultante del modelo del Apartado 6.2, bajo las hipótesis expuestas en este apartado para considerar el efecto barrera de las pantallas. Zoom con los niveles alrededor de las pantallas..... | 69 |
| Figura 7.2 Ubicación de la traza del túnel en el modelo del Delta del Llobregat. En verde se muestra la capa correspondiente al Acuífero Superficial, en rojo la traza del túnel, los puntos amarillos corresponden a puntos de control a partir de los cuáles se ha calibrado el modelo..... | 70 |
| Figura 7.3 Detalles de la malla de elementos finitos empleada en el análisis..... | 71 |
| Figura 7.4 Evolución temporal de los niveles que se observarían aguas abajo y agua arriba del túnel si se diesen las condiciones hidráulicas del período 1965-2001. Se representan los niveles con y sin pantallas y, en este caso, sin y con drenes (transmisividad equivalente de $T=5$ m ² /d y 25 m ² /d, según la densidad y diseño de los drenes)..... | 73 |
| Figura 7.5 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat sin la introducción del túnel..... | 74 |
| Figura 7.6 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la introducción del túnel..... | 74 |
| Figura 7.7 Comparación de las curvas de nivel del acuífero Superficial en la zona de la traza, correspondientes al mes de Diciembre del 2001. En gris, las curvas de nivel obtenidas sin el túnel. En negro, las curvas obtenidas con el túnel..... | 75 |
| Figura 7.8 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel, suponiendo que no se adoptan medidas correctoras..... | 76 |
| Figura 7.9 Zoom se las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel sin medidas correctoras..... | 76 |
| Figura 7.10 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la implementación del túnel y adoptando medidas correctoras mediante una Tequivalente de 5m ² /d..... | 77 |
| Figura 7.11 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la implementación del túnel y adoptando medidas correctoras mediante una Tequivalente de 25m ² /d..... | 77 |
| Figura 7.12 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=5$ m ² /d)..... | 78 |
| Figura 7.13 Zoom de las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=5$ m ² /d)..... | 78 |
| Figura 7.14 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=25$ m ² /d)..... | 79 |
| Figura 7.15 Zoom de las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=25$ m ² /d)..... | 79 |
| Figura 7.16 Propuestas para controlar el efecto barrera: (1) dejar un tubo de conexión entre lanzas atravesando las pantallas en la contrabóveda, (2) tubo de conexión bajo el nivel freático bajo la losa superior. La única restricción es que el punto más alto del sistema de drenaje quede a una cota inferior a la -1 msnm. Si se opta por la solución (2), el sistema debería ser totalmente estanco..... | 80 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 <i>Unidades hidroestratigráficas en el trazado del túnel. De techo a base:</i> | 14 |
| Tabla 5.1 <i>Resumen de las principales características de los piezómetros y pozos.</i> | 23 |
| Tabla 5.2 <i>Coordenadas UTM de los piezómetros de control (05/11/2003).</i> | 25 |
| Tabla 5.3 <i>Transmisividades y coeficientes de almacenamiento obtenidos de la interpretación de ensayos de bombeo en el acuífero Superficial.</i> | 37 |
| Tabla 5.4 <i>Resultados de la interpretación de los ensayos de pulso realizados en los sondeos PZ-9 y</i> | 37 |
| Tabla 5.5 <i>Conductividades hidráulicas estimadas y calculadas.</i> | 43 |
| Tabla 5.6 <i>Coefficientes de almacenamiento estimados y calculados.</i> | 43 |
| Tabla 5.7 <i>Desviaciones estándar asignadas a las medidas.</i> | 44 |
| Tabla 6.1 <i>Tabla de conductividades hidráulicas asignadas a cada zona de geología del modelo.</i> | 50 |
| Tabla 6.2 <i>Tabla de conductividades hidráulicas asignadas a las pantallas.</i> | 50 |
| Tabla 6.3 <i>Síntesis de condiciones de contorno consideradas.</i> | 51 |
| Tabla 7.1 <i>Parámetros hidráulicos asignados al túnel en el modelo.</i> | 70 |
| Tabla 7.2 <i>Parámetros hidráulicos asignados al túnel simulando mediante transmisividad equivalente la situación con medidas correctoras.</i> | 70 |
| Tabla 7.3 <i>Resultados del cálculo de dimensionamiento de los pozos horizontales (unidades en m-día).</i> .. | 81 |