

Drenaje mediante bombeo vs. profundidad de muros pantalla en el control de los asentamientos del terreno durante excavaciones profundas

Enric Vázquez-Suñé¹, Estanislao Pujades^{1,2}, Jesus Carrera¹, Victor Vilarrasa^{1,3}, Silvia De Simone^{1,2}, Anna Jurado^{1,2}, Alberto Ledesma⁴, Gonzalo Ramos⁵, Antonio Lloret⁴

¹ GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain

² Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech, Barcelona, Spain

³ Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA 94720, USA

⁴ Dept. Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech, Barcelona, Spain

⁵ Dept. of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech, Barcelona, Spain

Mail de contacto: enric.vazquez@idaea.csic.es

RESUMEN

Las excavaciones profundas que afectan a acuíferos pueden ser realizadas mediante la combinación de métodos como son el drenaje por bombeo en pozos con la construcción previa de muros pantalla y excavación posterior (cut and cover method). Estos muros pantalla pueden ser continuos (pantallas de hormigón) o pilas de Jet-grouting. Los muros pantalla a menudo se alargan más de lo que es estructuralmente necesario, lo que disminuye el riesgo de levantamiento de fondo de la excavación y así se reducen los asentamientos del terreno causados por la propia excavación y el drenaje, pero por el contrario, se incrementan mucho los costes de ejecución.

Se analizó la eficacia de impermeabilización de un recinto a excavar mediante pantallas de hormigón y pilas de jet-grouting en un terreno de sedimentos preconsolidados. Se ha aplicado a dos excavaciones de grandes pozos verticales (Shafts) durante la construcción del túnel del tren de alta velocidad en Barcelona situado junto a la Basílica de la Sagrada Familia. La impermeabilización de las pilas de Jet-grouting o muros pantalla se han cuantificado mediante ensayos hidráulicos antes y después de la construcción del recinto. Se han analizado diversos escenarios de drenaje en el que la variable a considerar han sido la profundidad de los muros pantalla. En estos escenarios se han comparado los caudales, los descensos de nivel y los asentamientos en relación a la profundidad de las pantallas a construir.

Palabras clave: Drenaje, excavaciones, asiento del terreno, jet-grouting, muros pantalla.

ABSTRACT

Deep excavations in aquifers may be constructed by combining pumping with the cut and cover method. These enclosures are often lengthened more than is structurally necessary, which diminishes the risk of heave, in order to reduce settlements caused by pumping and the involved discharges. Jet-grouting piles are sometimes adopted for lengthening.

We analysed the water-proofing efficiency of jet-grouting and the need for water isolation in preconsolidated sediments. We used data obtained from two shaft excavations during the construction of the high speed train tunnel in Barcelona located adjacent to the Sagrada Familia Basilica. Jet-grouting was characterised using pumping tests before and after the construction of the enclosure. A number of dewatering scenarios were considered at the two shafts by varying the depth of the enclosures. The flow rate, drawdowns and settlements at the different scenarios were compared to observe the efficiency of lengthened the enclosures.

Keywords: Excavation, dewatering, settlement, jet-grouting, diaphragm walls.

Introducción

Para el crecimiento de las ciudades es necesaria la construcción de estructuras subterráneas. Hay diversas técnicas que

pueden ser utilizadas para excavar por debajo del nivel freático. Algunas de estas técnicas se basan en evitar la entrada de agua subterránea en la excavación mediante la impermeabilización de las paredes, mientras

otras están basadas en el bombeo del agua subterránea. Las diferentes técnicas pueden ser combinadas para optimizar su eficacia, aumentando la seguridad y reduciendo los costes de la excavación (Powers, et al., 2007). Por ejemplo, el método "Cut and Cover", que consiste en excavar entre muros pantalla, se puede combinar con el bombeo desde pozos profundos (Forth, 2004). Las pantallas proporcionan estabilidad a las paredes de la excavación y evitan la entrada de agua por los laterales (Xanthakos, et al., 1994). Su profundidad debe ser suficiente para soportar la presión del suelo y el agua que los empuja hacia la excavación (Lancellotta, 1995). Pero a veces, las pantallas se alargan más de lo estructuralmente necesario hasta alcanzar una capa de baja permeabilidad, con la finalidad de reducir o eliminar el bombeo, ya que algunos autores atribuyen grandes asentamientos al descenso de presión causado por el bombeo (Hsi y Small, 1992, Gue y Tan, 2004). Sin embargo, la contribución de esta medida (que aumenta el coste) a la seguridad de la excavación es cuestionable.

Otros autores sostienen que el bombeo es responsable de sólo una pequeña parte del total de los asentamientos. Otros factores, tales como la inclinación de las pantallas durante la excavación o problemas que pueden surgir durante la construcción de pantallas o columnas de jet-grouting contribuyen considerablemente a los asentamientos (Wong y Patron, 1993). Además, la distribución espacial de asentamientos causados por bombeo es bastante suave, es decir, el bombeo no causa grandes asentamientos diferenciales, salvo en caso de cambios laterales significativos en las condiciones geológicas y geotécnicas. Por otro lado, el bombeo garantiza condiciones estables y secas en el fondo de la excavación (Pujades, et al., 2012).

Alargar las pantallas es una práctica más o menos común (incluso cuando esto no es necesario estructuralmente) con el fin de evitar que el agua entre en la excavación. Esto es debido a que una de las condiciones que debe de cumplir el diseño de una excavación, es evitar el levantamiento hidráulico de la parte inferior de excavación. Esto se logra mediante la reducción de la presión de agua bajo la excavación. Otra opción es construir un recinto de jet-grouting para disminuir la conductividad hidráulica del suelo, lo cual pretende reducir los efectos del bombeo fuera de del recinto. El Jet-grouting comenzó a usarse en la década de 1970 para mejorar la resistencia al corte del suelo (Fang, et al., 1994) mediante la inyección de lechada en suelos compuestos por partículas

finas (es decir, materiales con conductividad hidráulica baja) (Berry, et al., 1988). Pero el jet-grouting también se usa para reducir la conductividad hidráulica del suelo (Davis y Horswill, 2002) en sedimentos con una conductividad hidráulica alta, que por lo general, están formados por materiales gruesos, para los que la técnica no fue diseñada. Aunque varios autores (Forth, 2004, Saurer y Lesnik, 2011) se muestran a favor de este uso del jet-grouting, pocos proporcionan valores a cerca de su conductividad una vez inyectado. Allan y Kukacka (1995) analizaron muestras de un suelo fino tratado con jet-grouting en laboratorio, obteniendo valores de conductividad hidráulica ($8 \cdot 10^{-6}$ a $8 \cdot 10^{-8}$ m/d). Por otro lado, Vilarrasa, et al., (2012) cuantificaron la transmisividad de un recinto de jet-grouting realizado en un material de gran conductividad para impermeabilizar una excavación. El valor transmisividad obtenido fue dos órdenes de magnitud menor que la de los sedimentos originales, confirmando de este modo la eficacia de la aplicación del jet-grouting. Sin embargo, esta reducción puede no ser suficiente debido a la pequeña anchura del jet-grouting. Además, el valor aportado era efectivo ya que la mayor parte del flujo se concentra en unas pocas aberturas, lo que puede dar lugar a problemas locales. Dado que la decisión de aplicar la jet-grouting no garantiza el éxito, se plantean las siguientes preguntas: ¿En que porcentaje se puede reducir la conductividad hidráulica? ¿Es esto suficiente? ¿Es rentable?

Estas cuestiones surgieron durante las excavaciones asociadas a la construcción del túnel para el tren de alta velocidad (TAV) en Barcelona, España. El túnel, que atraviesa Barcelona de SO a NE, fue excavado bajo la basílica de la Sagrada Familia (Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO), utilizando una tuneladora (TBM) (Figura 1). La construcción de la basílica (diseñada por Antonio Gaudí), que comenzó en 1882 y está todavía en curso, atrajo la atención de los políticos y de la prensa, que temían por la seguridad de la basílica. Un pozo de emergencia fue excavado cada 700 m de túnel. Estos pozos eran excavaciones profundas realizadas mediante la técnica de "Cut and Cover" en combinación con bombeos desde pozos profundos. Las medidas de seguridad se incrementaron para la construcción de los dos pozos situados cerca de la Basílica (Figura 1), que estaban en las calles de Bruc y de Padilla. Se consideraron tres opciones para la excavación de los pozos:

1. Pantalla cortas hasta la mínima profundidad requerida estructuralmente.

2. Pantallas largas hasta alcanzar un estrato de baja permeabilidad.
3. Pantallas cortas alargadas con jet-grouting hasta alcanzar un estrato de baja permeabilidad.

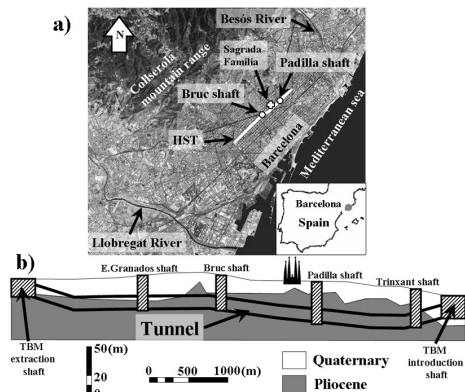


Figura 1. a) Vista en planta de los sitios de estudio. b) Perfil esquemático de la construcción.

El requisito principal de la Administración era reducir todo posible los movimientos en los edificios cercanos y el valor de 5 mm fue definido como el límite máximo para los asentamientos. Los análisis iniciales de las excavaciones incluyeron un cálculo hidromecánico del problema por medio de PLAXIS, y los desplazamientos fueron estimados teniendo en cuenta el bombeo y la excavación. Los parámetros de rigidez del suelo fueron derivados principalmente de presiómetros analizando la fase de carga-descarga, pero aquellos valores estaban por debajo de la rigidez real del suelo, lo cual será discutido más adelante. Por lo tanto, dados los grandes asentamientos estimados, la primera opción no fue considerada. Entonces, las opciones 2 y 3 fueron las elegidas para la excavación de los pozos de Bruc y en Padilla, respectivamente. Durante (y después de) la construcción de los pozos no surgieron problemas, pero el coste se incrementó considerablemente por las medidas de seguridad adoptadas (alargamiento de los recintos mediante pantallas y jet-grouting).

Los objetivos de este trabajo son: (1), desde un punto de vista hidráulico, estudiar la eficacia de alargar los recintos, cuando esta medida sólo se utiliza para evitar las subsidencias causadas por el bombeo y (2) cuantificar las propiedades hidráulicas a escala real de un recinto de jet-grouting.

Planteamiento del problema

Descripción geográfica, geológica e hidrogeológica

Es el suelo sobre el que se sitúa Barcelona esta compuesto por Cuaternario y sedimentos terciarios. Estos materiales se encuentran por encima de las formaciones Paleozoicas y/o Triásicas. En general, el túnel discurre por materiales Terciarios, pero en algunos lugares también atraviesa el Cuaternario (Figura 1b).

Los materiales terciarios son de edad Pliocena y se componen de arcillas, margas grises y secuencias de conglomerado con una matriz de arenosa-arcillosa. El Plioceno se caracteriza por una alternancia de estas litologías.

Por encima del Plioceno se sitúa el Cuaternario, el cual puede dividirse en: Pleistoceno y Holoceno. Los depósitos Pleistocenos se componen de gravas con matriz de arcillosa en la parte inferior. Estos materiales aluviales quedan recubiertos por depósitos eólicos compuestos por limos marrón-amarillentos que contienen nódulos calcáreos. Por último, en la parte superior de esta secuencia puede haber un estrato de calcreta. Esta secuencia de materiales puede encontrarse repetida en algunos lugares hasta tres veces. Los depósitos del Holoceno se componen de:

- Depósitos torrenciales y aluviales formados por sedimentos detríticos finos (arcillas rojas o limos).
- Gravas y arenas aluviales.
- Arenas planicie costera.

La geología de los lugares de estudio (Bruc y Padilla) se caracterizó mediante la descripción y correlación de varios sondeos perforados. Además, un registro de Rayos Gamma fue obtenido de cada uno de los sondeos y usado para la correlación. La Figura 2 muestra las secciones geológicas de Padilla y Bruc, respectivamente. Los sedimentos Cuaternarios y Terciarios se pueden considerar como un solo acuífero con una heterogeneidad vertical considerable. Su transmisividad efectiva (T_{eff}) es 100-200 m²/d. La conductividad hidráulica (k) de las capas arcillosas oscila entre 0,001 y 0,01 m/d, y la de las de arenosa y/o grava varía de 0,1 a 10 m/d.

Descripción del estado del suelo

La estructura y los parámetros mecánicos de un suelo dependen directamente de los procesos sufridos por el suelo en el pasado. Las

primeras etapas de urbanización en Barcelona se asociaron con un aumento de la actividad industrial. Los bombeos de las industrias provocaron una disminución significativa de los niveles de agua subterránea y el posterior declive de las industrias urbanas condujo a la recuperación de niveles (Vázquez-Suñe, et al., 2005). Un efecto secundario de las fluctuaciones del agua subterránea fue la preconsolidación del suelo. Por lo tanto, el suelo se comporta elásticamente y tiene una rigidez considerable siempre y cuando las oscilaciones del agua subterránea no excedan el máximo descenso alcanzado durante el período industrial (10-15 m).

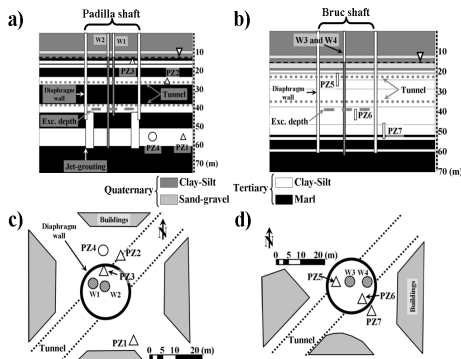


Figura 2. a) Perfil geológico de Padilla. b) Perfil geológico de Bruc. c) Vista en planta de Padilla. d) Vista en planta de Bruc.

Características de construcción

Se hicieron dos pozos circulares (pozos de Padilla y Bruc) de 19,7 m de diámetro y con profundidades de 41 y 40 m, respectivamente. Los recintos se profundizaron hasta alcanzar un estrato Terciario de baja permeabilidad con el fin de reducir el bombeo (Figura 2). Solo pantallas fueron usadas en el recinto de Bruc, alcanzando una profundidad de 61 m. Estas pantallas fueron hechas de hormigón armado desde la superficie hasta una profundidad de 45 m (profundidad mínima requerida estructuralmente) y sin armar de 45 a 61 m de profundidad. El recinto Padilla consistió en pantallas de hormigón armado hasta los 46,5 m y pilotes de jet-grouting de 42.5 a 61.5 m de profundidad (donde se encuentra el estrato de baja permeabilidad). El jet-grouting utilizado fue de "doble fluido" y sus características de construcción se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del jet-grouting.

Characteristics of the double fluid jet-grouting	
Pressure injection of cement	300 bars
Pumped rate of cement	Up to 400 l/min
Air pressure	10-12 bars
Maximum quantity of cement	1800 kg/m
Ratio water:cement	Between 1.0.87 and 1.1.05
Ascent velocity	6.5 m/min
Rotation velocity	10 r.p.m
Diameter of nozzle	4.6 mm

Conceptos básicos

Modelos numéricos hidrogeológicos

Diferentes modelos numéricos hidrogeológicos fueron usados para alcanzar los objetivos. Se utilizó el código de elementos finitos TRANSIN-IV (Medina y Carrera, 2003), con la interfaz VISUAL TRANSIN (UPC, 2003). Los modelos empleados fueron axisimétricos o multicapa dependiendo de la geometría de cada caso (Figura 3). Los límites laterales se situaron suficientemente lejos del punto de bombeo para asegurarse de que no se veían afectados por el bombeo. Los límites superior e inferior eran de flujo nulo y el caudal o el nivel se prescribieron en el pozo de bombeo.

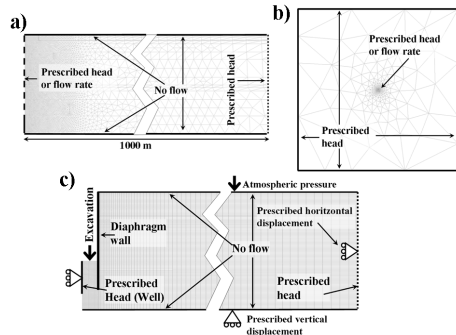


Figura 3. a) Modelo de flujo axisimétrico. b) Modelo de flujo multicapa. c) Modelo hidro-mecánico axisimétrico.

Los modelos numéricos fueron usados para estimar parámetros hidráulicos empleando los datos medidos durante los ensayos de bombeo. Los modelos también se usaron para simular varios escenarios de drenaje con el fin de escoger el mejor diseño.

Estabilidad del fondo (factor de seguridad)

Se compararon los resultados de varios escenarios de drenaje, cuya principal diferencia era la profundidad del recinto y donde la estabilidad del fondo de la excavación debía estar garantizada en todos los escenarios. El

agua subterránea puede dar lugar a problemas de estabilidad en el fondo de la excavación como el sifonamiento o el levantamiento de fondo. La existencia de tensiones efectivas positivas son características de ambos problemas. La tensión efectiva vertical puede calcularse aplicando la ecuación de Terzaghi en la dirección vertical (Terzaghi y Peck, 1948)

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (1)$$

dónde σ'_v es la tensión vertical efectiva, σ_v es el esfuerzo vertical total y u es la presión del agua. El esfuerzo vertical total viene dado por

$$\sigma_v = z\gamma_s \quad (2)$$

y la presión del agua como

$$u = h\gamma_w \quad (3)$$

donde z es la profundidad del punto, γ_w es el peso específico del agua, γ_s el peso específico del suelo, que se asume de 20 kN/m^3 , y h es el nivel en el punto. Se alcanzan las condiciones inestables cuando $\sigma'_v \leq 0$, que ocurre cuando el sistema de drenaje (pozos y pantallas) no está diseñado correctamente. El sistema de drenaje debe asegurar $\sigma_v > u$ o $\sigma_v/u > 1$ en cada punto por debajo del fondo de la excavación. Pero en la práctica, debido a la incertidumbre del suelo, es común aplicar un factor de seguridad (SF) para garantizar la estabilidad. Por lo tanto, se adoptó un SF de 1,2,

$$SF = \frac{\sigma_v}{u} \geq 1.2 \quad (4)$$

Predicciones de asientos

Los asientos provocados por el bombeo fueron calculados en cada uno de los escenarios usando una aproximación analítica y un modelo hidro-mecánico acoplado. Ambas metodologías requieren conocer la compresibilidad de cada capa i (α_i), que puede ser derivada a partir del coeficiente de almacenamiento usando la ecuación propuesta por Jacob (1950) para acuíferos elásticos,

$$\alpha_i = \frac{S_i}{\gamma_w D_i} - \theta_i \beta \quad (5)$$

dónde S_i es el coeficiente de almacenamiento, D_i es el espesor de la capa, θ_i es la porosidad y β es la compresibilidad del agua, que es mucho más pequeña que las compresibilidades típicas del suelo y puede ser despreciada. De hecho, si β no es considerada $S_{Si} = \alpha_i \gamma_w$, donde S_{Si} es el coeficiente de almacenamiento específico de la capa i . Por lo tanto, para calcular los asientos

causados por bombeo, sólo necesitamos saber S_{Si} (o S_i), que puede obtenerse a partir de ensayos hidráulicos.

El cálculo analítico se realizó a partir del descenso a diferentes distancias y profundidades derivado del modelo de flujo. El asiento en la superficie del acuífero se calculó con la ecuación propuesta por Cashman y Preece (2001), la cual asume que todos los desplazamientos se producen en la dirección vertical,

$$\rho = \sum_i \gamma_w s_i D_i \alpha'_i \quad (6)$$

dónde ρ es la asiento total, s_i es el descenso en la capa i y α'_i es la compresibilidad de cada capa teniendo en cuenta que los desplazamientos solo ocurren en la dirección vertical. α'_i puede ser obtenido a partir de

$$\alpha'_i = \alpha_i \frac{(1 + \nu_i)}{3(1 - \nu_i)} \quad (7)$$

dónde ν_i es el coeficiente de Poisson de la capa i . Para validar el método analítico, también se calcularon los asientos numéricamente, donde se considera que los desplazamientos causados por bombeo no sólo son verticales.

El modelo de hidro-mecánico fue construido usando el código de elementos finitos CODE_BRIGHT (Olivella, et al., 1994, Olivella, et al., 1996) que resuelve problemas hidro-mecánicos acoplados en medios porosos. La Figura 3c muestra las condiciones de contorno del modelo. Suponiendo elasticidad lineal, los únicos parámetros mecánicos necesarios fueron el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson. Este se asumió que era 0,35 para todas las capas. El módulo de Young se obtuvo a partir de la compresibilidad (teniendo en cuenta que los desplazamientos no solo eran verticales), como

$$E_i = \frac{3(1 - 2\nu_i)}{\alpha_i} \quad (8)$$

Aplicación

La aplicación de los procedimientos mencionados implica, en primer lugar, la caracterización hidrogeológica, en segundo lugar, del recinto, y en tercer lugar, la predicción de la estabilidad de la excavación y las consecuencias del bombeo. Estos pasos se describen a continuación.

Caracterización hidráulica del suelo

Padilla

Un ensayo de bombeo se llevó a cabo en Padilla, antes de la construcción de las pantallas, para estimar los parámetros hidráulicos del suelo. Los pozos de bombeo y los piezómetros fueron diseñados de acuerdo con la geología de la zona. Las Figuras 2a y 2c muestran la profundidad de las rejillas y la ubicación de los tres piezómetros (PZ1, PZ2 y PZ3), y el pozo de bombeo (W1). Los niveles se midieron de forma manual y automática. El caudal de bombeo se midió con un caudalímetro electromagnético y fue de 4.5 l/s. El ensayo duró cuatro días, dos de bombeo y dos de recuperación. El ensayo se interpretó con un modelo axisimétrico de flujo. Las figuras 4a, 4b y 4c muestran el ajuste de las curvas de los piezómetros PZ1, PZ2 y PZ3. Los parámetros hidráulicos de las capas situadas por debajo de nivel freático se muestran en la Tabla 2. Estos resultados fueron verificados comparando la transmisividad efectiva obtenida numéricamente (180 m²/d), con la transmisividad obtenida analíticamente mediante la aplicación del método de Jacob (200 m²/d).

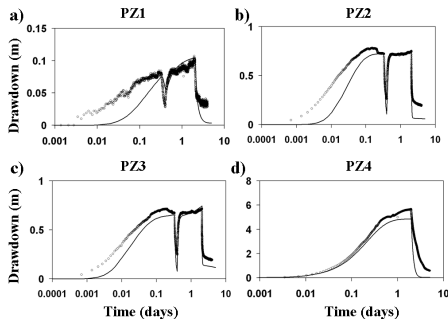


Figura 4. a), b) y c) Ajuste de las curvas de descensos del primer ensayo de Padilla. d) Ajuste de la curva de descensos del segundo ensayo de Padilla.

Tabla 2. Descripción y valores estimados del primer ensayo en Padilla.

Lithology	Top (depth)	Bottom (depth)	E (m/d)	S_v (m ²)
Sandy silt	0	0.2	0.21	2.40E-01
Silty silt with sand	0.3	1.2	0.04	6.00E-05
Fine - medium sand	1.2	2.9	0.12	3.00E-05
Silty clay	2.9	3.3	0.042	5.10E-05
Fine - medium sand with silt	3.3	5.1	0.41	2.40E-05
Sandy silt with sand layers	5.1	9.9	0.3	6.40E-05
Sands with some ill. clays	9.9	14.1	0.3	5.00E-05
Silty clay with some sand layers	14.1	24.6	0.072	9.00E-06
Fine - medium sand	24.6	29.1	26.46	9.00E-06
l.tal	29.1	37.5	0.0026	9.00E-06
l.t.tal - sand	37.5	47.15	5.3	9.00E-06
l.tal	47.15	57.15	0.004	1.00E-05

Bruc

Tres piezómetros fueron usados también en el ensayo de Bruc (PZ5, PZ6, PZ7). Las Figuras 2b y 2d muestran su ubicación y la profundidad de sus rejillas al igual que las de los dos pozos de bombeo usados (W3 y W4). El caudal, medido igual que en Padilla, fue de 10 l/s. El ensayo duró cuatro días, dos de bombeo y dos de recuperación y se interpretó numéricamente obteniendo unos ajustes (Figura 5) y resultados correctos. La transmisividad efectiva calculada utilizando el método de Jacob fue 140-170 m²/d, que es similar al obtenido integrando los valores de la Tabla 3.

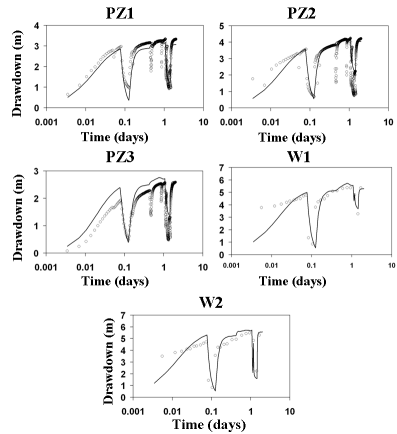


Figura 5. Ajustes de las curvas de descensos del ensayo de bombeo de Bruc.

Tabla 3. Descripción y valores estimados del ensayo de Bruc

Lithology	Top (depth)	Bottom (depth)	E (m/d)	S_v (m ²)
l.tal	0	1.0	1	1.00E-01
Clay	1.0	1.2	0.01	0.00E+07
Gravel and sand with clay matrix	1.2	13.6	10	0.25E+06
Clay	13.6	16	0.01	4.17E+06
Sand and gravel with clay matrix	16	19.5	7	4.00E+06
Clay	19.5	19.5	0.048	9.70E+06
Fine - medium sand	19.5	20.7	0.02	3.15E+06
l.tal	20.7	21.2	0.2	1.00E+05
Fine - medium sand	21.2	24.3	3.00	1.04E+05
Fine - medium sand with clay matrix	24.3	29.3	4.12	2.30E+05
l.tal	29.3	37.7	4.01	1.14E+05
Fine sand with clay matrix	37.7	40.4	3.00E-01	1.24E+05
Fine - medium sand with clay matrix	40.4	51.5	0.025	1.50E+05
l.tal	51.5	52.0	0.001	5.70E+05
Fine - medium sand with clay matrix	52.0	54.1	10.45	5.50E+05
l.tal	54.1	58.7	0.0009	1.15E+05
l.tal	58.7	60	1.00E-01	1.27E+05
l.tal	60	70	1.00E-01	1.50E+05

Caracterización hidráulica del recinto

Un segundo ensayo que consistía en bombear dentro y observar fuera se realizó para verificar la estanquidad de los recintos. Las pantallas del pozo de Bruc llegaban hasta un estrato terciario de baja permeabilidad y no se observaron descensos fuera cuando se bombeo, lo que sugiere que el recinto estaba bien hecho.

En el recinto de Padilla se bombeo para cuantificar las propiedades hidráulicas del jet-grouting y los descensos en el exterior fueron importantes cuando se bombeo. Se bombeo desde el pozo W2 que estaba ranurado en todo el espesor a través por las pantallas. Un nuevo piezómetro (PZ4 que sustituía al PZ1) y ranurado en la capa más transmisiva cruzada por los pilotes de jet-grouting fue usado (Figura 2c). El caudal medio bombeado fue de 5 l/s, y el ensayo duró cuatro días, dos de bombeo y dos de recuperación. Esta vez el ensayo se interpreto numéricamente utilizando un modelo multicapa dada la geometría del problema. La conductividad hidráulica efectiva del recinto jet-grouting obtenida fue de 0,6 m/d. La Figura 4d muestra el ajuste del PZ4.

Sistemas de drenaje

Los sistemas de drenaje empleados en ambos sitios se compararon con escenarios alternativos. Las comparaciones consideraron el factor de seguridad, el caudal y los asientos exteriores debidos al bombeo. La profundidad estructural mínima del recinto se respeto en todos los escenarios. El pozo de bombeo se situó en el centro del recinto para permitir las comparaciones.

Padilla

Dos escenarios se consideraron para el pozo de Padilla. El primero idéntico a la excavación real (46,5 m de pantallas y pilotes de jet-grouting desde los 42,5 hasta los 61.5 m). El jet-grouting no se considero para el segundo de los escenarios, por lo que el recinto consistía sólo en las pantallas. El nivel se prescribió para obtener un SF de 1,2. En el primer escenario, el descenso en el pozo de bombeo tuvo que ser de 45 m mientras que en el segundo de 60m.

Los asientos debidos al bombeo se calcularon analíticamente en la superficie a 20 m del centro de la excavación (Ecuación 6) y numéricamente. Los asientos analíticos fueron de 1,9 y 3,1 mm para el primero y segundo escenario respectivamente. Los asientos calculados numéricamente fueron 1,6 y 2,2 mm. El caudal de bombeo aumentó de 1300 m³/d en el primer escenario a 2150 m³/d en el segundo escenario.

Bruc

Tres escenarios fueron considerados en el pozo de Bruc. El primero como el recinto real (pantallas hasta los 60 m). Los recintos de los otros dos escenarios eran menos profundos. En el segundo escenario, las pantallas llegaban hasta 54.1 m, y en el tercero, hasta los 51.5 m.

Igualmente, el nivel en el pozo se fijo a una profundidad tal que se garantizará la seguridad del fondo de la excavación aplicando la (Ecuación 4). El descenso fue de 25 m para el primero y 30 m para el segundo y tercer escenarios. Los caudales de bombeo fueron de 6, 45 y 520 m³/día, respectivamente.

Los asientos analíticos en superficie a 20 m del centro de la excavación, fueron de 1 y 2,4 mm para el segundo y tercer escenarios (para el primero fueron insignificantes), mientras que los asientos calculados numéricamente fueron 1,5 y 2,3 mm.

Evolución real del drenaje

Las soluciones adoptadas para la construcción de los recintos fueron las enfocadas a minimizar el bombeo (es decir, los primeros escenarios en los dos sitios). Por tanto, durante el drenaje de Bruc no se observaron descensos fuera del recinto. Por esta razón, sólo los datos recogidos durante la excavación del pozo de Padilla se incluyen en este estudio. El drenaje de la excavación de Padilla comenzó una vez completado el recinto (pantalla+jet-grouting). El drenaje se realizo usando cuatro pozos de bombeo (Figura 6). Los asientos fueron medidos en los puntos de que se muestra en la figura 6a. La figura 6b muestra la evolución del nivel durante el drenaje en PZ4 y en el pozo de bombeo. El máximo descenso en el interior del recinto fue de 45 m y unos 20 m fuera del recinto. La figura 6c muestra la evolución de los asientos en 5 puntos de control. El comportamiento elástico del suelo se pudo observar durante el ensayo de bombeo realizado a mediados de mayo de 2010. La mayoría de los asientos se produjo cuando el bombeo no estaba activo. Una caída moderada de 1mm se observo durante la segunda prueba de bombeo y el comienzo de la excavación. Dado que la caída es homogénea en todos los puntos de monitoreo y, ya que el recinto de jet-grouting se completó antes del segundo ensayo, la caída podría ser consecuencia de la distribución de esfuerzos posterior a la inyección del jet-grouting y la construcción de las pantallas.

Se puede observar que la pendiente de los asientos se reduce y permanece estable hasta mediados de Junio, cuando se observo un levantamiento de 0,5 y 0,8 mm. Posteriormente, cuando la excavación cesó, aproximadamente el 20 de junio, se observó un gran aumento de los asientos (1 mm). Por último, cuando cesó el bombeo (30 de junio) la evolución de los asientos estaba en su punto más bajo y se

observó una recuperación posterior de 0,8 mm en todos los puntos.

La estabilización medida a finales de Mayo, el aumento observado el 15 de junio y el hecho de que los asientos debidos al bombeo no se observaron cuando durante el inicio del drenaje, se atribuyen al rebote debido a la descarga causada por la excavación (Zhang, et al., 2013). De hecho, los asientos por bombeo sólo se observaron cuando la fase de excavación cesó.

La simulación del drenaje ajustó adecuadamente en PZ4 y en el pozo de bombeo (Figura 5b). Los otros piezómetros estaban inutilizados debido a daños sufridos durante las obras. Los asientos numéricos calculados fueron de 1,6mm y los analíticos fueron de 2,6mm. Ambos valores fueron más grandes que los observados (Figura 6c). Las diferencias entre los calculados y los medidos se pueden atribuir a dos factores. Por un lado, los asientos calculados pertenecen al régimen estacionario de flujo, que no se logró durante el drenaje. Por otra parte, el rebote del suelo debido a la descarga inducida por la excavación, la cual no fue modelada, dio lugar a un movimiento contrario con respecto a los asientos de bombeo.

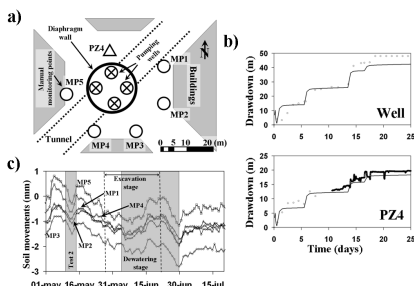


Figura 6. a) Puntos de observación de los asientos en Padilla. b) Evolución de los descensos durante el drenaje. c) Evolución de asientos.

Discusión

Diferentes medidas son adoptadas para minimizar los movimientos del suelo cuando una excavación se lleva a cabo bajo el nivel freático en una zona urbana. El diseño del bombeo se convierte en una cuestión importante en este contexto.

Un sistema de drenaje fue diseñado para llevar a cabo el pozo de Padilla con pantallas cortas. Pero el recinto se profundizó con pilotes de jet-grouting para minimizar los descensos exteriores y reducir los asientos causados por el

bombeo. El jet-grouting fue desarrollado para aumentar la resistencia al corte en suelos finos, por lo tanto su capacidad para impermeabilizar fue testada en el campo.

La conductividad hidráulica del recinto de jet-grouting de Padilla se calculó mediante la interpretación de dos ensayos de bombeo, uno realizado antes y otro después de la construcción del recinto. Los resultados muestran que el jet-grouting redujo la conductividad hidráulica de la zona tratada, pero el bombeo todavía era necesario. La permeabilidad de la zona se redujo desde 5,5 hasta 0,6 m/d. La reducción de la permeabilidad fue significativa (90%), mientras que la reducción del caudal requerido después de la comparación de los escenarios con y sin jet-grouting fue mucho más pequeña (2150 a 1300 m³/día, 40%), ya que la impermeabilización se limitaba a la zona tratada.

Dos escenarios con recintos de diferente profundidad se compararon para el caso de Padilla, el primero requería 1182 m² más de jet-grouting que el segundo, lo que aumenta el coste. Los resultados muestran que, aunque los asientos disminuyen cuando el recinto es más profundo, no desaparecen. Su magnitud era similar y ninguno de los escenarios habría planteado un riesgo para los edificios cercanos. Del mismo modo, el caudal de bombeo se reduce cuando se alarga el recinto, pero no se elimina, este siendo necesario para garantizar condiciones estables en el fondo de la excavación.

Los resultados del primer escenario (pantallas y jet-grouting), que fue el empleado, se compararon con las observaciones de campo. Los asientos medidos durante la construcción muestran la rigidez del suelo y su comportamiento elástico. Por lo tanto, los asientos debido al bombeo fueron pequeños y se recuperaron cuando este terminó. Los asientos medidos y calculados no fueron exactamente iguales. Los calculados (analíticos y numéricos) fueron superiores a los observados, aunque la diferencia fue pequeña. Sin embargo, los numéricos fueron más similares. Esto podría deberse a que los asientos calculados se obtuvieron para un régimen estacionario de flujo, que no se logró durante el drenaje. Por otra parte, el levantamiento de suelo debido a la excavación no fue modelado. Pero, los asientos numéricos y medidos eran comparables tomando en cuenta estas dos consideraciones. Las diferencias entre los resultados analíticos y los asientos medidos fueron mayores debido a que la solución analítica considera que todos los

desplazamientos se producen en la dirección vertical, cosa que no es del todo cierta. Pero en cualquier caso, la desviación no es muy alta y la metodología analítica también puede ser usada para aproximar asientos causado por bombeo en suelos preconsolidados. Por lo tanto, ambas metodologías fueron útiles para comparar los asientos de bombeo en varios escenarios.

El coeficiente de almacenamiento del suelo, que se obtuvo a partir de un ensayo de bombeo, se utilizó para determinar algunos de los parámetros mecánicos del suelo. Esto fue importante ya que las propiedades mecánicas se obtuvieron sin modificar el suelo, lo que no es posible cuando los parámetros mecánicos se calculan en el laboratorio o a partir de pruebas de campo en el interior de sondeos. De hecho, las estimaciones preliminares de los asientos debido al drenaje fueron mayores de los 5mm impuestos por la Administración, ya que los parámetros elásticos no eran reales.

Los resultados del pozo de Bruc fueron similares. Los efectos del bombeo se calcularon y compararon tres escenarios diferentes. El escenario 1 representaba el recinto empleado para la excavación, mientras los escenarios dos y tres significaban una reducción en las pantallas empleadas de 730 y 1050 m² respectivamente. Los resultados muestran que los asientos disminuyen con el aumento de la profundidad del recinto. Sin embargo, el aumento no es grande. En ninguno de los escenarios los asientos hubieran puesto en peligro los edificios cercanos. El caudal requerido para alcanzar condiciones estables también incrementa. Pero su magnitud indicó que el agua podría ser bombeada mediante el uso de un solo pozo de bombeo.

Por lo tanto, el coste adicional de alargar los recintos no se ve respaldado por los resultados. Si el suelo es preconsolidado, las excavaciones pueden abarataarse combinando recintos superficiales con bombeos desde pozos profundos.

Conclusiones

Varias conclusiones se pueden extraer de las observaciones y los resultados presentados en este estudio.

El jet-grouting se inventó para mejorar la resistencia al corte del suelo. Esta capacidad no se discute ya que ha sido probada. Pero el jet-grouting también se usa para impermeabilizar el suelo y reducir los efectos del bombeo fuera de excavaciones que necesitan drenaje. Este estudio demuestra que la reducción en la conductividad hidráulica de un suelo tratado con

jet-grouting puede no ser suficiente para eliminar el descenso y los asientos fuera del recinto.

Dos metodologías para calcular los efectos del bombeo en suelos preconsolidados se presentan en este estudio. El método analítico, que considera que toda la deformación tiene lugar en la dirección vertical, nos permite calcular los asientos con un error moderado. El método numérico, cuyos resultados también fueron comparables con los valores medidos, considera que los desplazamientos pueden ser en cualquier dirección. Ambos métodos dan resultados adecuados teniendo en cuenta que éstos se obtuvieron en régimen estacionario de flujo y que los métodos no tienen en cuenta el levantamiento del suelo debido al proceso de excavación.

Los parámetros mecánicos necesarios para predecir los movimientos del suelo causados por el bombeo se obtuvieron a partir del coeficiente de almacenamiento del suelo, que se estimó mediante un ensayo de bombeo. Este método operando es una ventaja, ya que no modifica las propiedades del suelo, como es el caso de las pruebas de laboratorio o pruebas de campo realizadas en el interior de sondeos.

La profundidad de los recintos es a menudo incrementada para reducir los efectos de bombeo, lo que aumenta considerablemente el coste de la excavación. En este estudio, diversos escenarios variando la profundidad del recinto son analizados. En ninguno de los escenarios los asientos absolutos fueron significativos y además, los asientos diferenciales fueron insignificantes. El coste adicional generado por el alargamiento del recinto no está compensado por la reducción del caudal ni de los efectos del bombeo fuera del recinto. Las medidas de seguridad antes mencionadas fueron adoptadas, en Bruc y Padilla, dado que la construcción del túnel bajo la Basílica de la Sagrada Familia era un motivo de preocupación en la ciudad. De hecho, una comisión nombrada por la UNESCO actuó en calidad de observadores externos. Esa preocupación explica los bajos límites para los asientos permisibles establecidos por la Administración, en este caso en particular.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a ADIF (Administración), SACYR (empresa de construcción) e INTECSA-INARSA (Asistencia técnica), por su apoyo durante el seguimiento hidrogeológico de las obras. Los autores fueron designados por ADIF como asesores externos

durante la construcción del túnel. Igualmente este estudio está subvencionado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación (proyecto HEROS: CGL2007-66748 y el proyecto MEPONE: BIA2010-20244) y la Generalitat de Catalunya (Grup de Recerca CONSOLIDADO: Grup d'Hidrologia Subterrània, 2009-SGR-1057). E. Pujades y S. De Simone agradecen el apoyo financiero de la AGAUR (Generalitat de Catalunya) a través de "la beca para universidades y centros de investigación para la contratación de personal investigador novel (FI-DGR 2011 - FI-DGR 2012)".

Referencias

- Allan, M., Kukacka, L., 1995. Analysis of core samples from jet grouted soil. Brookhaven national laboratory – BNL-62357, Informal report, New York, United States of America.
- Berry, G., Shiriaw, J., Hayata, K., Tan, S., 1988. A review of grouting techniques utilised for bored tunnelling with emphasis on the jet grouting method. *Construction and Building Materials*, 2 (1), 34-41.
- Cashman, P.M., Preene, M., 2001. *Groundwater lowering in construction – A practical guide*. Spon press, London.
- Davis, G. M., Horswill, P., 2002. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England. *Engineering Geology*, 66, 1-18.
- Fang, Y. S., Liao, J.J., Sze, S. C., 1994. An empirical strength criterion for jet grouted soilcrete. *Engineering Geology*, 37, 285-293.
- Forth, R.A., 2004. Groundwater and geotechnical aspects of deep excavations in Hong Kong. *Engineering Geology*, 72, 253–260.
- Gue, S. S., Tan, Y. C., 2004. Two case histories of basement excavation with influence on groundwater. Keynote lecture, international conference on structural and foundation failures (ICSFF), Singapore, 2nd-4th August, 2004.
- Hsi, J., Small, J., 1992. Ground settlements and drawdown of the water table around an excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 24, 740-756.
- Jacob, C. E., 1950. Flow of groundwater, in Rouseff, H. (Eds.), *Engineering hydraulics*. John Wiley, New York, pp. 321-386.
- Lancellotta, R., 1995. *Geotechnical engineering*, second ed. Taylor and Francis, Abingdon.
- Medina A, Carrera J, 2003. Computational different type of data Geostatistical inversion of coupled problems: dealing with computational burden and different types of data. *Journal of Hydrology*, 281 (4), 251-264.
- Olivella S., Carrera J., Gens A. & Alonso E.E. (1994). Non-isothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport In Porous Media*, 15, 271–93.
- Olivella S., Gens A., Carrera J. & Alonso E.E. (1996). Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Eng. Computations*, 13, 87–112.
- Powers, J. P., Corwin, A. B., Schmall, P. C., Kaeck, W. E., 2007. *Construction dewatering and groundwater control - New methods and applications*, third ed. John Wiley and Sons, United States of America.
- Pujades, E., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., Jurado, A., Vilarrasa, V., Mascuñano-Salvador, E., 2012. Hydraulic characterization of diaphragm walls for cut and cover tunnelling. *Engineering Geology*, 125, 1-10.
- Saurer, E., Lesnik, M., 2011. Grid space optimization of jet grouting columns, in: Anagnostopoulos, Pachakis and Tsatsanifos (Eds.), *Proceedings of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, IOS Press, pp. 1055-1060. doi: 10.3233/978-1-60750-801-4-1055
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1948. *Soil mechanics in engineering practice*, second ed. John Wiley and Sons, United States of America.
- UPC (2003). *Código Visual Transin 1.1 R65*. Developed in the Department of Geotechnical Engineering and Geosciences (ETCG), UPC.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., Carrera, J., 2005. Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13, 522-533.
- Vilarrasa, V., Carrera, J., Jurado, A., Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., 2012. A methodology for characterizing the hydraulic effectiveness of an annular low-permeability barrier. *Engineering Geology*, 120, 68–80.
- Wong, L. W., Patron, B. C., 1993. Settlements induced by deep excavations in Taipei. *Proceedings of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, 787-791.
- Xanthakos, P., Abramson, L., Bruce, D., 1994. *Ground control and improvement*. John Wiley and Sons, United States of America.