

Soluciones combinadas de impermeabilización y refuerzo estructural por inyección de impregnación mediante microcemento en túneles de metro.

J. Ruiz⁽¹⁾, A. Gil⁽²⁾, D. Plana⁽³⁾, C. López⁽⁴⁾, J. Cornelles⁽⁵⁾

(1)Ing. Geólogo, (2)Ing. de Caminos, (3) Ing Geólogo, (4)Dr. Ing. Geólogo, (5) Geólogo Eurogeotècnica, SA, Sant Cugat del Vallès, Barcelona, España

PALABRAS CLAVE: Ascenso nivel freático, filtraciones agua, inyección por impregnación, microcemento, impermeabilización, refuerzo estructural.

RESUMEN: En la ciudad de Barcelona y sus alrededores se ha podido observar durante los últimos años una subida progresiva de los niveles de agua subterránea. Una de las tipologías de infraestructuras principalmente afectadas por este ascenso en los niveles freáticos lo constituye la red de metro y los ferrocarriles subterráneos en los que se han producido filtraciones de agua que han llegado incluso a afectar el servicio. Las inyecciones de impregnación, sin rotura del terreno, mediante microcemento se presentan como una solución al tratamiento de impermeabilización que aportan a la vez un refuerzo de la estructura mediante la mejora del suelo. Esta tipología de mejora del terreno se presenta desde el punto de vista medioambiental como una técnica con un producto químicamente estable frente a las resinas siendo una alternativa a estos componentes en la inyección de suelos medios a finos.

1. Introducción

Durante la construcción de algunas de las estaciones y tramos de túnel de la línea de metro de Barcelona el nivel freático se situaba bastante por debajo del nivel inferior de la solera. Este hecho provocó que se ejecutaran las contrabóvedas y losas hormigonadas contra los muros de las hastiales sin disponer de ningún tipo de junta de impermeabilización en la conexión.

En los últimos años, el nivel freático de Barcelona ha experimentado una subida notable, provocando filtraciones importantes dentro de las estaciones y de los túneles afectados, que ha motivado la realización de diversas actuaciones de impermeabilización, que no han solucionado de forma definitiva el problema.

Otros problemas que genera esta situación de ascenso del freático y las filtraciones constantes a través de los elementos estructurales son la degradación que ello supone para el hormigón y armados de la estructura, la modificación de las sollicitaciones para las que esta fue diseñada y el agotamiento del factor de seguridad frente a la flotabilidad de todo el conjunto o de la solera en la contrabóveda.

2. Anàlisi de la situació actual:

La situación actual para un caso particular de la red de metro corresponde a una existencia de subpresiones generadas por un N.F. situado a 5 metros por encima del límite inferior de las pantallas de los hastiales que produce filtraciones constantes con vías de agua abiertas y una degradación estructural de la pantalla causado por las variaciones del nivel freático y las filtraciones existentes, una probable agresión al hormigón y armaduras con un incremento de la porosidad del hormigón y una situación de debilitamiento generalizado de la estructura. Como se ha señalado como efecto del ascenso del nivel freático tenemos la existencia de una subpresión en la contrabóveda de la estación. Esta subpresión es ligeramente mas grande que el peso propio de la contrabóveda y la losa, con lo que se generan unos esfuerzos adicionales en la estructura existente que se concentra principalmente en la zona de conexión de esta. Ello

provoca también una pérdida de la presión de confinamiento del terreno por debajo de la contrabóveda. Las condiciones del caso se han analizado mediante un proceso de modelización numérica a través del código Plaxis (PLAXIS b.v. Delft). Dicho código es apto para el análisis de suelos y rocas mediante el método de los elementos finitos. Los detalles de dicho análisis se especifican en el siguiente apartado.

3. Análisis numérico

Para caracterizar el material que configuraba la zona afectada, se utilizó el modelo constitutivo de Mohr–Coulomb que se ajustaba de manera adecuada a la naturaleza granular del material. En la tabla 1 se presentan sus parámetros geomecánicos.

Material	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{wet} [kN/m ³]	ν [-]	E [kN/m ²]	c [kN/m ²]	ϕ [°]	ψ [°]
Relleno	19	20	0.20	20000	0.01	35	5

Tabla 1. Material tipo ‘Mohr-Coulomb’. Valores del peso específico seco γ_{dry} , del peso específico saturado γ_{wet} , del coeficiente de Poisson ν , del módulo de Young E, de la cohesión c, del ángulo de rozamiento interno ϕ y del ángulo de dilatación ψ .

En la tabla 2 se presentan las características de los materiales utilizados para modelar los diversos elementos estructurales que aparecían en el modelo, es decir las pantallas y la bóveda y contrabóveda de la estación.

Material	γ_{nat} [kN/m ³]	ν [-]	e (espesor) [m]	E [kN/m ²]	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]
Bóveda y contrabóveda	25	0.2	0.40	$3.29 \cdot 10^7$	$1.316 \cdot 10^7$	$1.755 \cdot 10^5$
Muros pantalla	25	0.2	1.20	$3.29 \cdot 10^7$	$3.94 \cdot 10^7$	$4.74 \cdot 10^6$

Taula 2. Materiales tipo ‘Linear Elastic’. Valores del peso específico γ_{nat} , del coeficiente de Poisson ν y del módulo de Young E.

El análisis arrojó como resultado ya esperado una disminución de las tensiones efectivas de la zona afectada por el ascenso del nivel de agua. Este factor se hacía especialmente crítico en la zona situada por debajo de la contrabóveda en la que el factor de reducción de las tensiones efectivas afectaba a una zona previamente ya descomprimida. El análisis permitió también conocer la distribución de las solicitaciones en los elementos estructurales del túnel afectado por el ascenso del nivel freático y como dicho factor influía en los cambios simulados.

Se presentan a modo de ejemplo dos figuras en las que se muestra el estado de tensiones efectivas principales obtenidas a partir del modelo, para las hipótesis del estado del túnel de la estación en el momento de su construcción, y en las condiciones actuales con el ascenso del nivel freático experimentado.

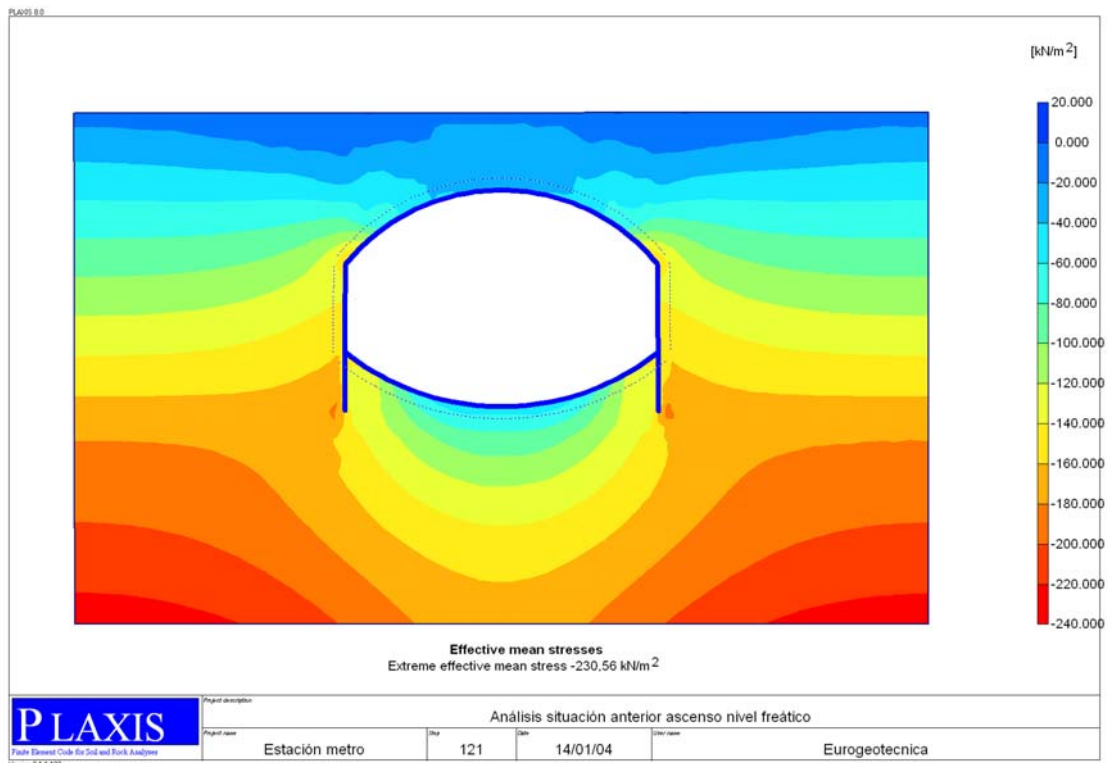


Figura 1. Diagrama de la distribución de las tensiones efectivas principales en el terreno. Se obtienen valores del orden de 70 kN/m² en la zona descomprimida por debajo de la contrabóveda (situación anterior al ascenso del nivel freático).

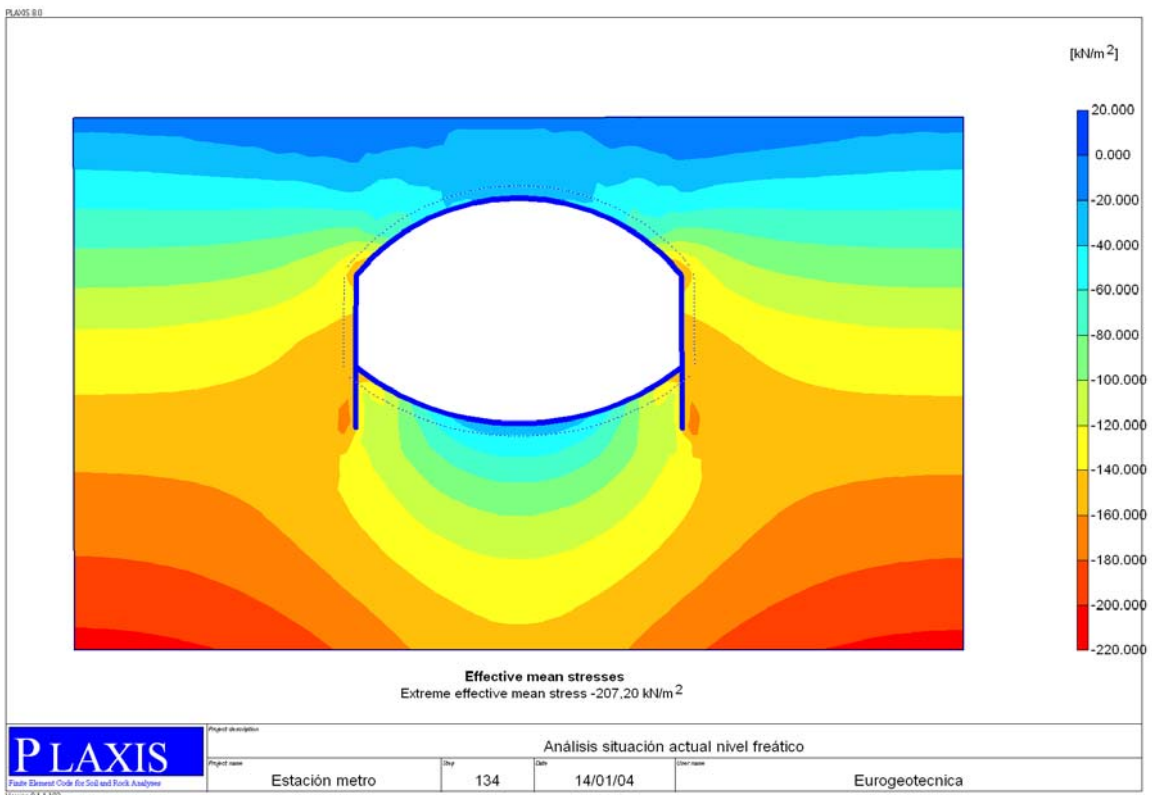


Figura 2. Diagrama de la distribución de las tensiones efectivas principales en el terreno. Se obtienen valores del orden de 20 a 40 kN/m² en la zona descomprimida por debajo de la contrabóveda (situación actual del nivel freático).

Los resultados obtenidos permitieron confirmar las comprobaciones realizadas de forma previa sobre la estabilidad frente a las presiones hidrostáticas de la sección principal de la estación así como establecer de forma mas precisa la distribución de tensiones en el terreno y las estructuras afectadas por el ascenso del nivel freático. Uno de los factores evidenciados por dicho estudio correspondió a la confirmación del estado de equilibrio precario que presentaba el terreno en la zona situada por debajo de la contrabóveda. Este factor unido a un probable debilitamiento de la estructura tenía que ser considerado en cualquier actuación que se quisiera llevar a cabo.

4. Propuesta de soluciones y estudio de alternativas

La solución a adoptar debería contemplar la situación actual y futura, dado que esta última (ascensos del nivel freático) era mas que previsible, aportando una visión general de todo el problema. La solución tendría que ser en todo caso definitiva y duradera. También sería deseable que fuese independiente de la evolución del freático y ayudase a reforzar la estructura existente que presentaba fisuras y patologías evidentes. Como factores adicionales a tener en consideración se encontraban que la solución fuese adaptable al tipo de terreno que envolvía a la contrabóveda y hastiales de la obra así como posibilitar una ejecución por fases debido a las posibles heterogeneidades o variaciones espaciales así como a los condicionantes temporales.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se partió de la idea de crear un cajón de impermeabilización que contuviera la zona de la estación. Para llevar a cabo esta solución se consideraron diversas propuestas de soluciones que en fase de estudio previo se basaban principalmente en:

- Ejecución de muros pantallas convencionales excavados alrededor de la estación e inyección de la contrabóveda.
- Inyección del terreno mediante Jet-grouting.
- Impermeabilización con inyecciones de impregnación con cemento o microcemento al terreno situado bajo la contrabóveda y al lado de las pantallas.

Estas actuaciones se complementarían con otras de mejora estructural y de sellado de juntas a base de inyecciones de lechada de cemento en el trasdós de las pantallas para la colmatación de agujeros y de resinas en el interior de las fisuras, juntas de filtración, juntas entre pantallas entre si y con la losa de fondo.

Estas soluciones planteaban sin embargo una serie de problemas que se concretan en los siguientes puntos:

- La ejecución de pantallas convencionales (la solución mas competitiva desde un punto de vista económico) planteaba múltiples dificultades de ejecución principalmente debido a la falta de espacio o galibo para las pantalladoras al tratarse de una zona con alta densidad de infraestructuras en superficie y servicios. Las inyecciones de la zona de contrabóveda desde la superficie no eran factibles tampoco debido a las mismas dificultades.
- Vulnerabilidad al flujo de agua. La lechada se encuentra en estos casos expuesta al flujo de agua que puede lavarla total o parcialmente. Tiempos dilatados de fraguado en la lechada pueden conducir a que el flujo de agua transporte la lechada lejos de la zona de inyección. Este factor se encuentra agravado por la pérdida de cohesión y aumento de la permeabilidad por la fractura mecánica realizada previamente al tratamiento en el caso de inyecciones a presión (Jet-Grouting).

- Existencia de vacíos en el terreno que pueden no presentar retención a la lechada. En estas condiciones del terreno se considera más adecuada una inyección de baja presión de tipo tradicional que permite un tratamiento del terreno por fases limitando la cantidad de material inyectado por fase, tipo y composición de la inyección.
- Presiones de trabajo excesivas generadas dependiendo del tipo de inyección adoptado, en la zona de la contrabóveda especialmente.
- Pérdida de confinamiento en la zona entre pantallas que afecta a las presiones de confinamiento del terreno situado por debajo de la contrabóveda. Ello tiene como consecuencia que incluso con inyecciones de impregnación a muy bajas presiones se pueda llegar a romper o desplazar el terreno.

El conjunto de condicionantes llevaron a considerar como solución más ventajosa la impermeabilización con inyecciones de impregnación realizadas con la técnica del tubo manguito. Esta técnica consiste en realizar una inyección al terreno con tubos equipados con manguitos de inyección y el uso de lechadas estables de cemento y microcemento para la impermeabilización y mejora mecánica de todo tipo de suelos. Este método presenta numerosas ventajas: por un lado permite la inyección tantas veces como se quiera de un tramo sin necesidad de reperfectoraciones al actuar los tubos como válvulas antirretorno reduciéndose en fases sucesivas las presiones generadas en el terreno y por otro lado permite independizar completamente los trabajos de inyección de la perforación de los taladros. De esta forma se puede conseguir que la inyección sea lo máximo posible solidaria a la estructura existente y del espesor que se desee. Al respecto se consideraba óptimo un cajón de suelo-cemento de 2 m de espesor alrededor de la estación suficiente para solucionar los problemas de subpresiones y filtraciones. En la figura siguiente se muestra un esquema del tratamiento planteado en sección considerando las alternativas de inyectar el terreno del trasdós de los hastiales desde superficie o del interior del túnel del metro.

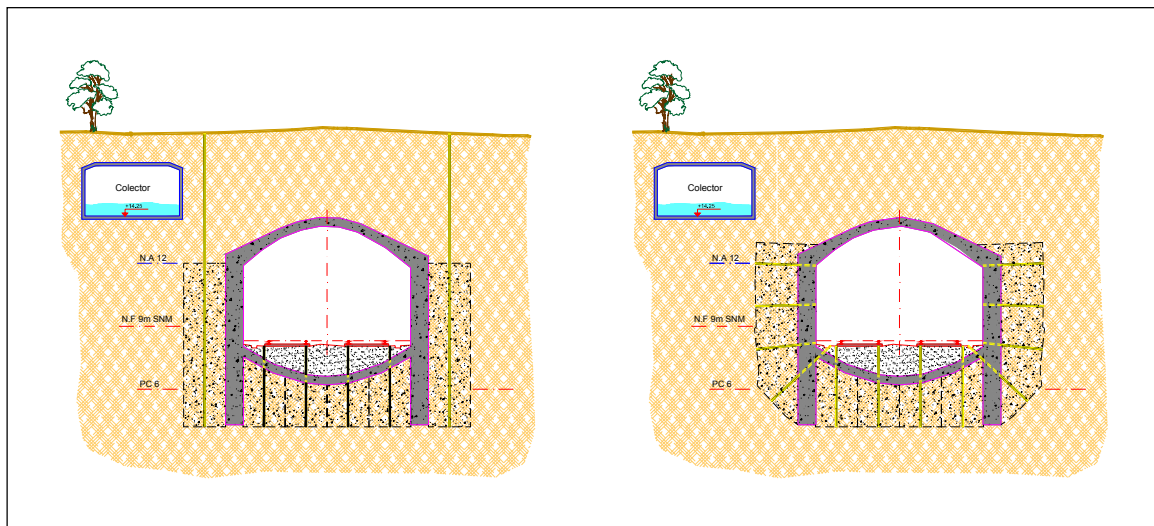


Figura 3. Esquemas de tratamientos de inyección por impregnación. El esquema de la izquierda muestra la alternativa de inyectar el terreno del trasdós de los hastiales desde la superficie mientras que el esquema de la derecha muestra la disposición de los tratamientos realizados desde el interior del túnel.

Dadas las características del terreno donde se estudiaba el proyecto se consideraba conveniente realizar las inyecciones de impermeabilización combinando cemento convencional con microcemento de forma que el tratamiento con este último permitiría llegar a valores de permeabilidad de 10^{-5} cm/s. Las proporciones de cemento/microcemento serían variables en función de las características y admisión del terreno.

5. Inyecciones de impregnación con microcemento

Las inyecciones de impregnación se definen como la sustitución del agua o del gas intersticial en un medio poroso, por una lechada a una presión suficientemente baja, que asegure que no se producen desplazamientos significativos del terreno. La permeabilidad inicial del terreno al agua constituye normalmente el criterio principal de elección del producto a utilizar para la elaboración de las lechadas de inyección. El rango de aplicación del microcemento lo constituye una permeabilidad inicial del terreno entre 10^{-1} y 10^{-3} cm/s mientras que el límite inferior de las inyecciones de cemento/bentonita lo constituyen los 10^{-2} cm/s. En general para la elección del conglomerante hidráulico para la lechada se deberá considerar además su granulometría en relación a las dimensiones de las fisuras o huecos existentes en el terreno a tratar. En este contexto las inyecciones de microcemento se plantean como una alternativa a la inyección de geles de silicatos al presentar una excelente durabilidad y estabilidad una vez inyectados contrariamente a estos lo que redundaría en una preservación del medio ambiente al no presentar lixiviación y ser químicamente estables.

El microcemento es un conglomerante hidráulico de carácter ultrafino destinado a la elaboración de lechadas para trabajos de inyección para consolidación y/o estanqueidad de terrenos de baja permeabilidad. Las inyecciones convencionales de cemento son consideradas como un fenómeno controlado por la relación de tamaños de las partículas de cemento y de los pasos de la matriz a inyectar. En el caso de suspensiones diluidas de microcemento, el fenómeno puede ser tratado como un proceso de filtración a través de una matriz granular ofreciendo un nuevo camino para obtener un mayor alcance en la penetración de las lechadas y mejorar la distribución de la inyección a través del medio poroso. La elaboración de lechadas de microcemento implican la utilización de un aditivo superfluidificante que se añade a la mezcla en obra, se trata de un agente dispersante para mantener las partículas y los flóculos entre 1 y 20 μm . Las lechadas de microcemento se elaboran y se inyectan con el mismo equipo que las suspensiones clásicas de cemento constituidas por un agitador de alta turbulencia (1.500 rpm), un mezclador de homogeneización y una bomba de inyección. El conjunto de características de los dispositivos en obra permiten combinar inyecciones de lechada con tamaños y caudales decrecientes de forma que en una primera fase se inyectaría cemento para pasar en fases posteriores a la inyección de microcementos mas finos.

El proceso de elaboración del microcemento incluye una precisión en el molido del orden de micras con un control muy estricto de la distribución granulométrica. En el gráfico adjunto se esquematiza el proceso de fabricación del microcemento

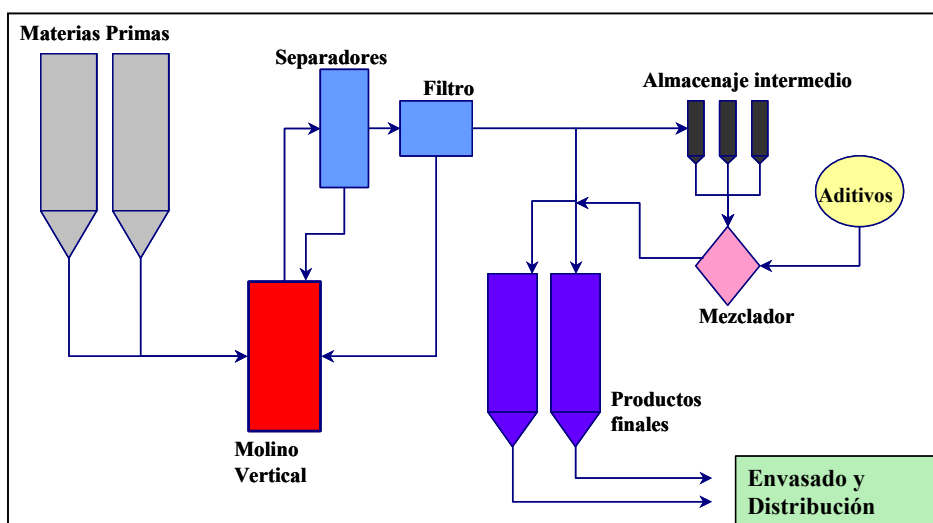


Figura 4. Esquema del proceso de fabricación del microcemento.

En el proyecto de inyección por impregnación de microcemento entran en juego diversas variables que deben de ser consideradas en conjunto con el fin de definir con la mayor precisión posible en fase de proyecto el proceso de inyección. Los principales factores considerados son:

- Admisiones previstas.
- Radio efectivo.
- Presión de inyección.
- Viscosidad y endurecimiento materiales.
- Tiempo de inyección.

En todo proyecto de inyección se deberán establecer una previsión de las admisiones que en el caso de impermeabilizaciones se situarán por término medio entre el 20 y el 40% del volumen a tratar. Estas previsiones se establecerán normalmente de acuerdo con la experiencia adquirida en el tratamiento de terrenos similares.

El radio efectivo se encuentra directamente relacionado con la presión aplicada que en nuestro caso queda limitada por las consideraciones realizadas en el apartado de análisis de la situación actual. En el caso de suelos existen ecuaciones para la propagación de fluidos de Bingham y newtonianos porosos que llegan a tener en cuenta incluso la viscosidad en función del tiempo aunque según algunos autores (Kutzner 1996) es preferible estudiarlo a partir de la experiencia práctica que calcularlo mediante el uso de ecuaciones. Desde el punto de vista económico el radio efectivo y en consecuencia el número de perforaciones a realizar para poder impermeabilizar un mismo volumen de terreno tienen una gran incidencia en los costes totales del proyecto ya que presentan una relación inversamente cuadrática

La mayor área específica que representan las partículas de microcemento mejora las propiedades físicas y reológicas, tales como la viscosidad y su evolución en el tiempo, el rendimiento, la resistencia al corte y la capacidad de penetración, al emplear el microcemento como un agente dispersante. El tiempo de gelificación de la lechada de microcemento con dispersante varía entre los 60 y 120 minutos, para relaciones A/C de 0,6 a 4, reduciéndose, con la adición de un 1% de silicato sódico, hasta valores de 30 a 110 minutos para el mismo rango de A/C (Shroff et al, 1996) este valor condiciona el tiempo de inyección que a la vez se encuentra relacionado con la presión de inyección admisible y con el radio de inyección efectivo deseado o alcanzado. Como referencia de comparación tenemos que el periodo de bombeo en el caso de suspensiones de cemento es de 20 a 60 minutos.

Vemos por tanto que los factores implicados se presentan con un cierto grado de interdependencia y que algunos de ellos se pueden definir únicamente a partir de la experiencia ya sea adquirida en proyectos anteriores en terrenos similares o de alguna prueba de inyección que se considera preceptiva en caso de no disponer de estas.

6. Conclusiones

En la ciudad de Barcelona se ha producido en los últimos años un ascenso de los niveles freáticos que en algunos casos han afectado a infraestructuras enterradas como pueden ser sótanos o túneles de metro y ferrocarriles. El caso motivo de estudio presentaba además incógnitas desde el punto de vista estructural al no haberse previsto en proyecto dicha contingencia. Este factor junto a otros condicionantes del entorno condujeron a adoptar como solución más factible frente al problema la realización de un cajón de impermeabilización mediante inyecciones de impregnación. Para la realización de las inyecciones se ha previsto el uso de microcemento. El microcemento se presenta como una alternativa al uso de geles de sílice u otras lechadas químicas en materiales medios a finos. Una de las principales ventajas

que ofrece este material corresponde a su estabilidad química con las implicaciones medioambientales que ello conlleva. La solución planteada combina una mejora del terreno que aporta una reducción significativa al problema de las filtraciones de agua al interior del túnel de metro a la vez que un refuerzo estructural de los elementos considerados.

REFERENCIAS

- AJUNT. DE BARCELONA (1997) “**Estudi de les aigües subterrànies del pla de Barcelona. Document de síntesi**” elaborado por el Departament d’enginyeria del terreny de la UPC y Clavegueram de Barcelona. Barcelona.
- BIELZA FELIU, ANA (1999) “**Manual de técnicas de mejora del terreno**” Carlos López Jimeno. Madrid.
- CEDEX (2003) “**Curso sobre técnicas generales de refuerzo y mejora del terreno**”, Centro de estudios de y experimentación de obras públicas, Madrid.
- FANG, HSAI-YANG et al. (1975) “**Foundation engineering handbook**” Van Nostrnad reinhold, New York, NY.
- KUTZNER, C. (1996) “**Grouting of rock and soil**” A.A. Balkema. Róterdam.
- SEMSIG-AETESS (2004) “**Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS-4ª sesión mejora del terreno mediante inyecciones y Jet-Grouting**” Sociedad española de mecánica del suelo e ingeniería geológica-Asociación española de empresas de tecnología del suelo y subsuelo. Madrid.
- SHROFF, A.V. et al: (1996) “**Rehological properties of microfine cement dust grouts**” Gruoting and Deep Mixing, Ed. Yonekura, Terashi y Shibazaki. A.A. Balkema, pp 77-82.