

Consolidación del terreno con inyecciones para el taladro piloto de ejecución con “raise boring” de la tubería forzada de la C.H. La Muela II

Soil consolidation by injection grouting of the pilot hole formed by raise boring for the penstock of the Muela II hydroelectric plant

Pedro R. Sola Casado. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Consultor. Ingeniería de Infraestructuras y Túneles. Madrid (España). psolac@ingenieriadeinfraestructuras.com
Ignacio Díaz González. Ingeniero Técnico de Minas
Jefe de Obra. UTE LA MUELA II - SACYR-CAVOSA. Madrid (España). idiaz@gruposyv.com

Resumen: El pozo inclinado de 46° con 6'50 metros de diámetro final, para la tubería forzada de la Central Hidroeléctrica de la Muela II atraviesa una alternancia cretácica de calizas y margas, habiéndose previsto en los primeros 380 metros de su longitud, una ejecución con una excavación de 1'80 metros de diámetro con “Raise-boring”, previa a la destroza final. Ante la inestabilidad del terreno que impedía alcanzar el diámetro de 12 1/4 pulgadas, del ensanchamiento final del Taladro Piloto, se optó por efectuar una mejora del mismo mediante inyecciones con un tubo-manguito, instalado desde una galería auxiliar, en 60 metros del taladro perforado inicialmente. El presente artículo describe la definición y desarrollo de este tratamiento con lechadas de cemento y microcemento, inyectadas por impregnación y fracturación con presiones elevadas, de 30 bares, y volúmenes controlados, de 150 a 40 litros por episodio, así como las conclusiones del análisis de los resultados, que permitieron realizar con éxito la finalización del Taladro Piloto y la posterior excavación de este tramo del pozo inclinado.

Palabras Clave: Pozo; Raise-boring; Margocalizas; Inyecciones

Abstract: The 6.5 metre diameter sloping bore required for the housing of the penstock to the Muela II Hydroelectric Plant runs at an angle of 46° through a cretaceous formation of chalk and marl, and where it was established to form the first 380 metres of its length by 1.80 metre diameter raise boring prior to the final bench excavation. In view of the instability of the soil which made it impossible to reach the diameter of 12? inches, it was decided to improve the ground prior to the final widening of the pilot hole, using grout injections from a pipe installed from the auxiliary gallery, throughout the 60 metres length of the initial pilot hole. The present article describes the definition and development of this treatment with cement and micro-cement grouts, injected by impregnation and fracturing under high pressure of 30 bars and controlled volumes of 150 to 40 litres per session. The article gives the conclusions obtained from an analysis of the results of the work and which made it possible to successfully complete the pilot hole and the ensuing excavation of this section of the sloping bore.

Keywords: Bore; Raise boring; Chalk Marl; Injections

1. Introducción

La construcción de un pozo inclinado 46° y con 690 m de longitud total, por IBERDROLA GENERACIÓN y para la tubería forzada de la Central Hidráulica La Muela II, se previó con un procedimiento de excavación en su tramo superior de 380 m que incluía el método “Raise-Boring” mediante un taladro piloto de 12 1/4” de diámetro, previo al escarificado

a 1,80 m de diámetro, y la destroza hasta los 6.5 m del diámetro final.

El terreno atravesado es un macizo rocoso cretácico, con estratificación subhorizontal, compuesto por litologías, de dureza muy variable, desde calizas algo arenosas y calizas margosas, a margas y areniscas margosas.

La perforación y sucesivos recrecidos desde los 6 3/4” iniciales, para obtener ese diámetro final del

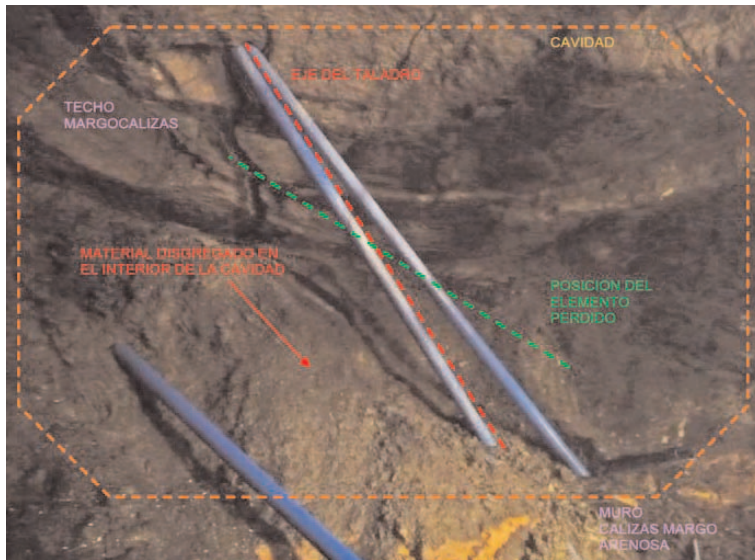


Fig. 1. Detalle de la marga gris laminada, donde quedó atrapada la batería drillcon, en la galería auxiliar.

taladro piloto, sufrieron sucesivas incidencias tales como pérdidas de los fluidos de perforación y desvíos de dirección, que culminaron con la rotura y pérdida en el taladro, de la sarta de perforación hacia el PK 360 del mismo, cuando se realizaba un nuevo reperfilado a 8 1/2" de diámetro, una vez que no había sido posible terminar el ensanche final a 12 1/4" de diámetro.

Ante esta situación y las evidencias proporcionadas tanto por las incidencias durante la perforación, como por los reconocimientos con cámara en el propio taladro y con un sondeo mecánico con recuperación de testigo, se optó por realizar un tratamiento de mejora con inyecciones en los 60 m del taladro piloto por encima de una galería auxiliar, hacia el P.K. 360 y por encima de la cota 500, véase Fig. 1

El objetivo de ese tratamiento con inyecciones fue mejorar la resistencia e impermeabilidad, en un radio medio de 0,5 a 1 m, de esos 60 m del taladro piloto, consolidando y sellando las pasadas margosas alteradas y fisuradas, y/o fracturadas y karstificadas en las calizas, origen de los problemas antes citados, de modo que una vez finalizado, pudiera volver a efectuarse el escariado del taladro piloto, en fases sucesivas, hasta el diámetro final de 12 1/4", necesario para el varillaje del "Raise-Boring".

Aprobado ese tratamiento, y realizado entre el 20 de Agosto y el 10 de Septiembre de 2009, el presente artículo:

- Expone los fundamentos técnicos del procedimiento elegido y de los parámetros principales de su aplica-

ción, a partir de la experiencia existente en los tratamientos similares con inyecciones en suelos y rocas.

- Describe el procedimiento de ejecución y el desarrollo de los trabajos de inyección (episodios, pasadas y mezclas empleados), y recoge las magnitudes principales de los mismos (volúmenes, presiones y caudales) analizando la relación y/o variación, de la porosidad rellenada y las presiones iniciales y finales, con la naturaleza y características del terreno a lo largo del taladro piloto.
- Y por último, extrae conclusiones respecto al objetivo buscado, caracterizando el grado de mejora finalmente alcanzado a partir de las condiciones del terreno inicial.

2. Información de partida

2.1. Inyectabilidad del terreno

De acuerdo con los estudios geológico-geotécnicos del emplazamiento de la Central Hidráulica, el tramo del taladro piloto objeto del tratamiento, atraviesa litologías cretácicas con estratificación subhorizontal, del denominado paquete C1, cuya composición varía dentro de una amplia gama de sedimentos calcáreos, que va desde calizas y calizas margosas, más o menos arenosas, a margocalizas, margas y margas arcillosas, también con tramos arenosos.

La resistencia de la matriz de esta parte del macizo se incrementa, como es de esperar, con el contenido de carbonatos, y los niveles margosos presentaron resistencias a compresión simple de roca blanda a media, con valores de 7 a 17 MPa, correspondiendo el límite inferior a las margas grises laminadas.

En este marco general, la información más precisa y representativa de la parte del macizo atravesada por el taladro piloto, estuvo proporcionada por el sondeo nº 4 EL PADUL del estudio general, con cota de boca 547,07 y 264 m de longitud, cuyo emboquille se realizó a unos 139 m de aquel; por el sondeo inclinado, realizado, tras los problemas citados durante la perforación del Taladro Piloto, que con unos 47° de inclinación, recuperó testigo en unos 90 m de longitud, entre las cotas 474 y 539; y el desarrollo de la propia perforación del taladro piloto, y su posterior inspección con cámara de video.

En relación con la inyectabilidad del macizo, en el tramo tratado del taladro piloto, la información más re-

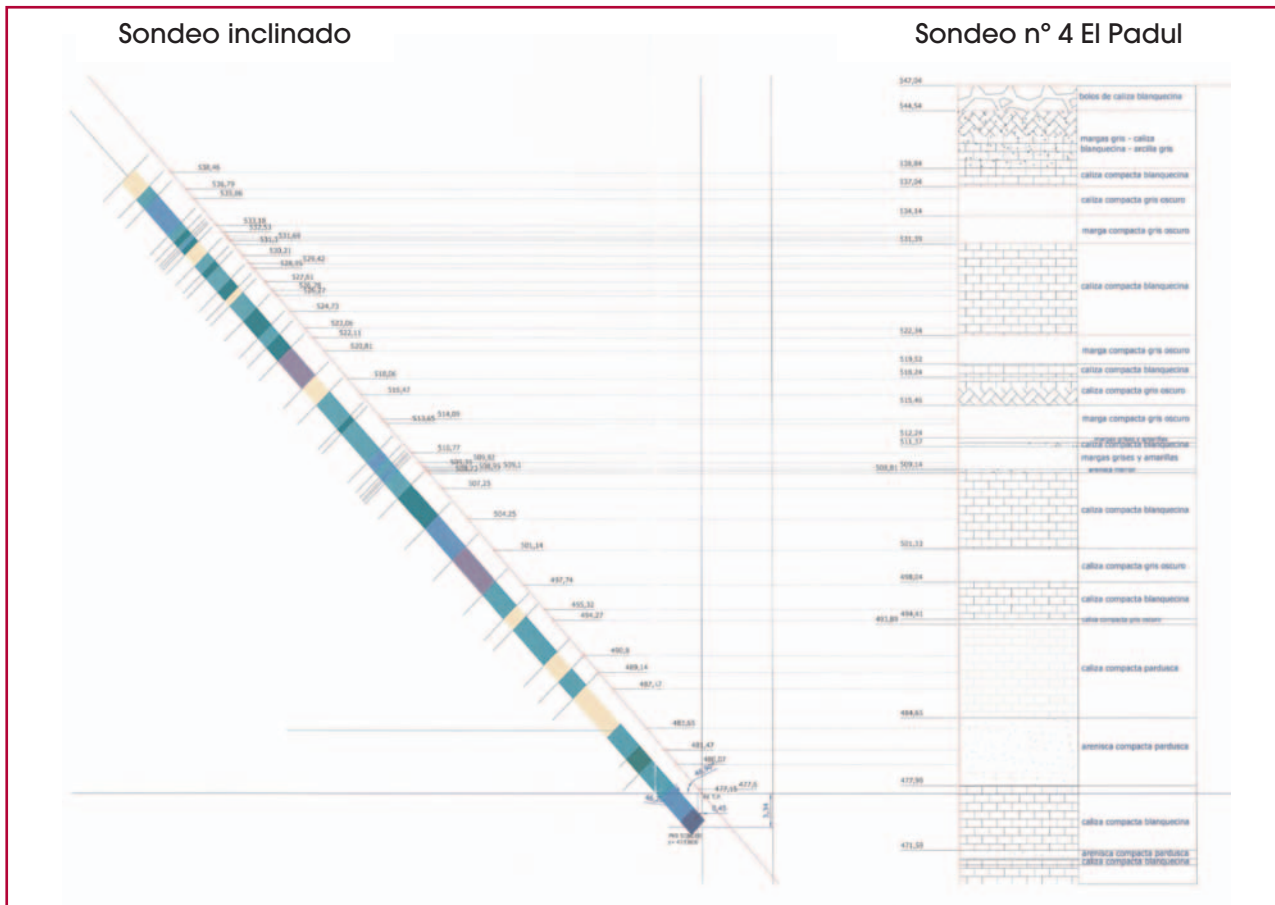


Fig. 2. Cortes del macizo rocoso según sondeo n°4 El Padul, y el sondeo inclinado, emboquillado a unos 35 m de éste.

levantada suministrada por esos trabajos citados fue la siguiente:

a) Sondeo n° 4

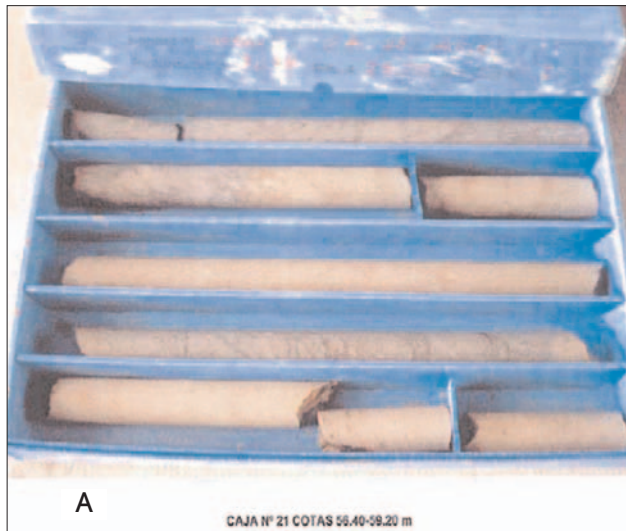
- Las litologías encontradas fueron caliza compacta blanquecina en el 51% de la longitud, con espesores de 0,87 a 9,05 m; caliza compacta gris oscuro, en el 16%, con espesores de 1,33 a 2,90 m; marga compacta gris oscuro, en el 31%, con espesores de 0,87 a 3,22 m; y arenisca marrón con un solo nivel de 0,33 m. En el conjunto entre las cotas del tramo tratado se diferenció una alternancia con 16 niveles con espesores de 0,33 a 9,05 m, y una media de 2,65 m, véase Fig. 2.
- La recuperación de testigo fue prácticamente del 100% en toda la longitud, mientras que hubo pérdidas del agua de perforación en marga hacia la cota 532,8, y en caliza blanquecina a la cota 529,4.
- La admisión de cemento inyectado fue de unos 86 Kg/m entre las cotas 522,4 y 536,5 y de 28 Kg/m en-

tre las cotas 500 y 522,4. Estas admisiones, suponiendo un radio de 1 m en la inyección, equivalen a una porosidad rellena del 1 y 0,3% respectivamente, cifras propias de una roca con fracturas abiertas y espesor milimétrico, que permiten la penetración de lechadas de cemento

b) Sondeo inclinado

- Las litologías perforadas fueron caliza micrítica, marrón ocre, con alguna intercalación margosa, RQD mayor de 90, en el 10% de la longitud, con espesores de 0,70 a 2,2 m, Fig. 3; caliza margosa, a veces arenosa, gris oscura, con fósiles, RQD mayor de 90, con una fractura de circulación de agua, y oquedades con calcita recristalizada, en el 41%, con espesores de 0,20 a 4 m; margocaliza gris con intercalaciones margosas y nódulos calcáreos, RQD mayor de 90, en el 22%, con espesores de 0,45 a 2,3 m; y margas grises laminadas, con testigo que se rompe por laminación y baja resistencia, en el 19%, con espesores de 0,25 a 4,30 m, FIG. 3. En el conjunto del tramo in-

Fig. 3. Testigo de caliza micrítica marrón (a) y marga gris laminada (b), recuperado en el sondeo inclinado.



yectado se ha diferenciado una alternancia con 31 niveles con espesores de 0,2 a 4,3 m y una media de 1,69 m.

- Durante la perforación, hacia 51,2 m de longitud hubo un agarre de útil de perforación, que obligó a entubar los 51 m iniciales para continuar perforando por el interior.

c) Perforación del taladro piloto y otros

Su desarrollo e incidentes fueron un buen indicio del comportamiento de estas litologías que se alternan, de modo errático y muy frecuente, a cotas muy variables.

- Pérdidas del agua, y del lodo perforación, en los PK 286, 296, 297, 309, 312 y 347 entre otros del tramo tratado, incluso con caudal de lodo de 380 l/mi y

cuando se espesó a viscosidades por encima de 200s.

- Realización de numerosas cementaciones, por gravedad y con obturación desde la parte superior del taladro piloto, con resultados no definitivos.
- Desprendimientos de las paredes y fracturas abiertas, observadas en la testificación con cámara de video, tal como se aprecia en la Fig. 4

A la vista de todos estos antecedentes, se llegó a las siguientes conclusiones, respecto a la inyectabilidad del terreno a tratar entre las cotas 500 y 542:

- I) En este macizo con estratificación subhorizontal, un taladro inclinado 46° es más desfavorable que otro vertical, respecto a la estabilidad de las paredes, sobre todo con diámetros grandes, pues su orientación favorece los sobrecanchos y/o desprendimientos en los contactos entre litologías diferentes de la alternancia. Por tanto, el procedimiento de inyección habitual en macizos rocosos competentes, con obturación directa contra las paredes del taladro, no era adecuado para este caso, habida cuenta de la irregularidad del apoyo del obturador originada por los sobrecanchos y/o desprendimientos de los niveles menos resistentes, asociados especialmente a los contactos entre litologías. No obstante, el acceso a la parte inferior del tramo a tratar era posible desde la galería auxiliar, y se podría actuar desde ella.
- II) Localmente el terreno sería inyectable por "impregnación" (1), o penetración en diaclasas y

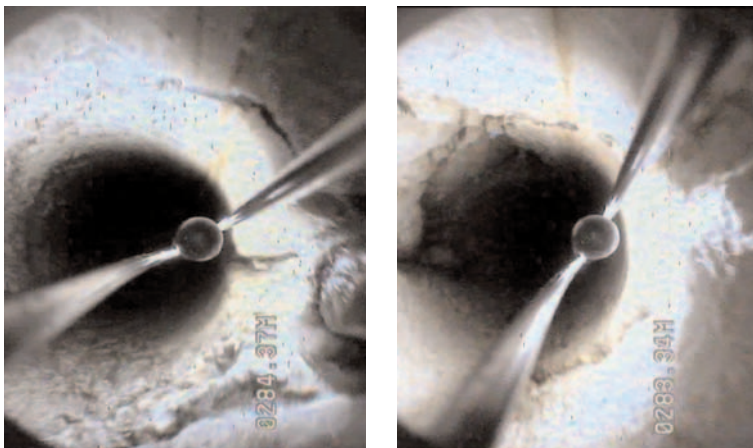


Fig. 4. Detalles de fracturas abiertas, oquedades y desprendimientos en la pared del taladro piloto, según la inspección con cámara de video.

oquedades, con mezclas de cemento, y sobre todo, con microcemento, pues así es cuando hay fracturas abiertas, como indican las pérdidas de los fluidos de perforación, y la inspección con vídeo. Ello estaba apoyado, además, por el hecho de que los lodos bentoníticos de perforación tienen una penetrabilidad inferior a las lechadas de cemento y microcemento, y había habido pérdidas totales tan sólo con la presión hidrostática correspondiente a la profundidad desde la boca del taladro. Las admisiones, en los niveles con oquedades kársticas, serían superiores al 1% registrado en el sondeo nº 4 antes citado, y en el resto, con menos discontinuidades, claramente por debajo de esa cifra.

III) Al menos las margas, fisuradas o diaclasadas y alteradas, o blandas, así como la corona, descomprimida y alterada alrededor del taladro piloto, podían ser inyectadas por "fracturación" mediante el procedimiento de tubos-manguito (1), empleando mezclas de cemento, y sobre todo, microcemento, con presiones elevadas y volúmenes controlados, especialmente en los niveles de margas, menos competentes, donde se podrían rellenar porosidades equivalentes de 5 al 10%.



Fig. 5. Testigos de muestra de margas arcillosas de presa de Contreras en Valencia (Sola, 2010).

Con esta información de partida, fue clarificador y decisivo tener en cuenta, de cara a la inyectabilidad, la experiencia de otras actuaciones de mejora con inyecciones en macizos rocosos con unas condiciones similares.

Tal fue el caso de la inyección de mejora con cemento, ensayada a escala real por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en las margas arcillosas, véase Fig. 5 de la presa de Contreras (Valencia) (2).

En este caso se inyectaron unos 300 Kg/m de cemento con presiones finales de 20 bares, que equiva-

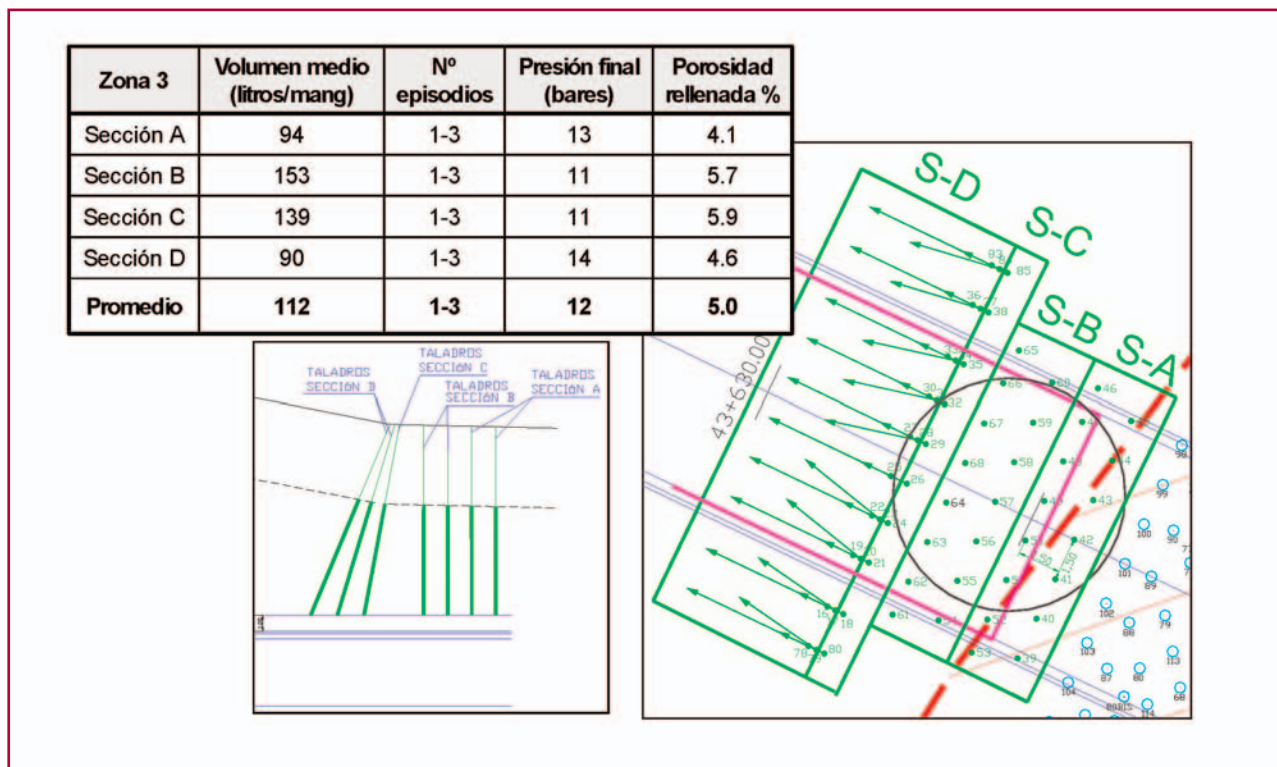
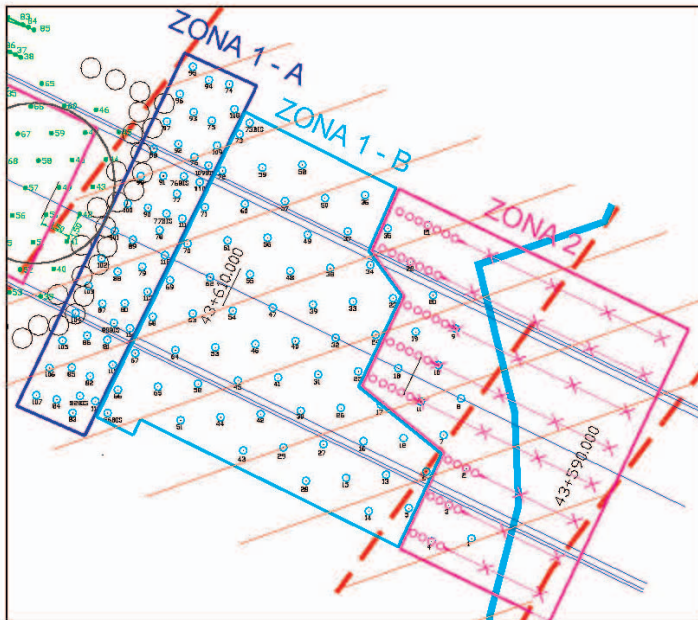


Fig. 6. Inyecciones en el túnel con chimenea. Túneles Guadarrama L.A.V. Madrid-Valladolid (Sola, 2010).

Zona	Volumen (lit/mang)	Nº episodios	Presión final (bares)	Porosidad rellenada (%)
Zona 1-A	79	1-3	18	2.9
Zona 1-B	64	1-3	19	1.7
Zona 2	60	1-3	19	1.0
Promedio	65	1-3	19	1.6

$$\mu = \frac{\text{Volumen inyectado}}{\text{Volumen zona tratamiento}} \times 100$$



len al 6-13% de porosidad rellenada para unos radios medios de 1,5-1 m respectivamente, logrando alcanzar una cohesión efectiva por encima de 1 MPa y cuadruplicar el módulo de deformación inicial.

Otra referencia ilustrativa es el tratamiento también con tubos-manguito y mezclas de cemento, en un tramo cizallado del macizo gnéssico, en la boca norte de los túneles de Guadarrama, donde la tuneladora provocó una chimenea al llegar el primer túnel (3).

Las inyecciones en la aureola de ese primer túnel, véase Fig. 6, registraron admisiones entorno al 5%, disminuyendo la porosidad rellenada desde la roca rota y decomprimida sobre la tuneladora, al macizo más intacto por delante.

Fig. 7. Inyecciones en segundo túnel. Túneles Guadarrama. L.A.V. Madrid-Valladolid (Sola, 2010).

Este mismo tratamiento, ejecutado previamente a la llegada del segundo túnel, véase Fig. 7, registró lógicamente admisiones menores, entorno al 1,6%, y el segundo túnel se excavó sin incidente alguno.

2.2. Procedimiento de inyección

a) Principios Básicos

El método de inyección con Tubo-Manguito (TM) permite una actuación selectiva, conociendo en todo momento el punto del taladro donde se está inyectando, junto con la posibilidad de repetir episodios, en un mismo punto, con mezclas diferentes, así como conocer y controlar, con precisión y detalle, los volúmenes, presiones y caudales de cada uno de ellos.

En este sistema muy experimentado en suelos y rocas blandas, la inyección se realiza a través de válvulas antirretorno, "manguitos", colocadas regularmente espaciadas en un tubo de plástico, metálico u otro material, que se instala perdido en un taladro perforado previamente con mayor diámetro, a cuyas paredes se une rellenando el contacto con una mezcla de "sellado" (2).

La inyección en el terreno debe comenzar rellenando las fracturas y oquedades y poros de mayor tamaño, que son la vía más fácil de "escape" de la mezcla; es decir, "impregnando" el terreno, continuar con los de menor tamaño (fisuras y pequeños poros), y finalizar "fracturando" el terreno, cuando su resistencia es baja, para crear una red de "lajas" de mezcla, véanse Figs. 8 y 9, que lo "arman" y compactan (4).

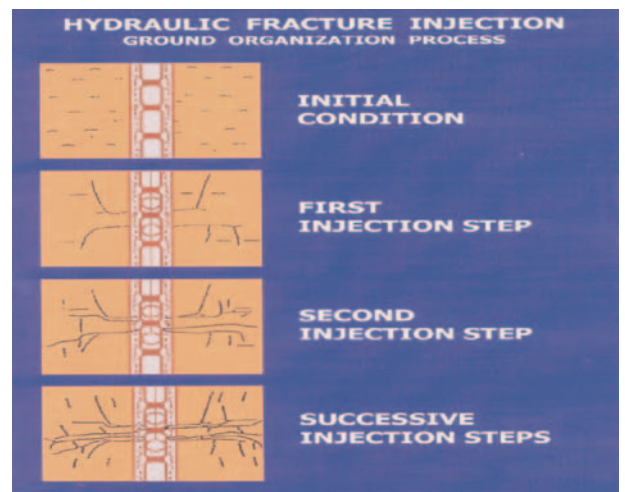


Fig. 8. Esquema con secuencia de episodios de inyección (Santos, a. et al. 2000).

En este caso, el comienzo debía ser con la inyección de lechadas de cemento, de más espesas a menos, a fin de rellenar por "impregnación" las fracturas y oquedades kársticas de los niveles de calizas menos margosas y más resistentes, calizas y calizas margosas en un 25% del tramo a tratar, y mejorar por "fracturación" los niveles de margas menos carbonatados y más fisurados, en más del 70% del tramo, como las margas grises laminadas.

Los volúmenes máximos en cada episodio, debían limitarse al dado por la porosidad equivalente que se esperaba rellenar con la inyección, de forma que no hubiera escapes incontrolados por fracturas u oquedades. De suceder esto, se guardaron tiempos de espera de 24 a 48 horas para permitir el fraguado y la ganancia de resistencia en la mezcla (5).

Las presiones finales de cada episodio de inyección son un parámetro muy importante en el control del proceso, y sobre todo, del resultado de mejora que se obtiene.

En la "impregnación", para una misma lechada deben irse incrementando en los sucesivos episodios en un mismo manguito, como índice de la "colmatación" de las fracturas más abiertas, y de la dificultad de penetrar en las más finas. Con mezclas más finas, como las lechadas con menor contenido de cemento, y especialmente con las de microcemento respecto a las de cemento, esas presiones tienden a bajar.

En la "fracturación", como la inyección no penetra, sino que ha de romper el terreno, ello tan sólo será posible cuando la resistencia de aquel es suficientemente baja para la presión de inyección. De forma aproximada, la siguiente expresión teórica relaciona, para inyección con caudal casi nulo (condiciones cuasiestáticas), la presión (P_i) con la resistencia efectiva a corte del terreno (C' , Φ'):

$$P_i = (\gamma h - u) + C' \cot \Phi' \quad (3)$$

Como la presión efectiva geostática ($\gamma h - u$) no cambia durante la inyección, y el rozamiento interno (Φ') mejora tan sólo unos grados, el incremento significativo de la presión final de inyección para caudales muy pequeños, refleja de modo directo la ganancia en la cohesión efectiva (c') del terreno, y por ende, la mejora que se va obteniendo con las sucesivas pasadas del tratamiento.

En este caso, los niveles margosos menos resistentes, que no podían ser "impregnados" por lechadas

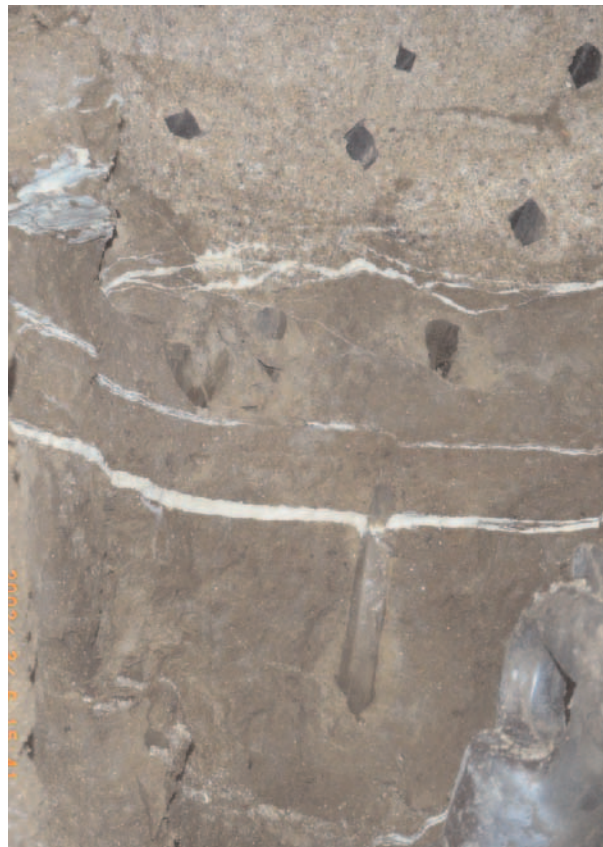


Fig. 9. Lajas de inyección de fracturación en suelo muy resistente (Sola, 2010).

fluidas de cemento, ni siquiera por las de microcemento, debían ser mejorados por "fracturación", y las presiones de inyección irían subiendo hasta el máximo fijado como objetivo. De acuerdo con la experiencia, presiones por debajo de 10-15 bares corresponderían a terrenos blandos e incompetentes, mientras que presiones por encima de 30 bares, serían propias de terrenos rígidos y duros, suficientemente mejorados por la inyección. (3)

Las mezclas a inyectar debían ser lechadas de cemento estabilizadas con bentonita, y de microcemento, con relaciones A/C en peso alrededor de 1, y resistencias mínimas para el cemento de 25 a 40 Kp/cm² a los 2 y 7 días respectivamente, y análogamente de 35 y 70 Kp/cm² para el microcemento.

El radio medio de alcance es menor con cemento que con microcemento, así mismo también disminuye en suelos con respecto a rocas con fracturas abiertas, y en inyecciones de fracturación respecto a las de impregnación. En terrenos inyectables con lechadas de cemento, este radio medio es de 1 a 1,5 m en suelos, y de 2,0 a 4 m en macizos rocosos, mientras que con microcemento se incrementa por encima del 50%.

b) Especificaciones para Ejecución

Se trataba de instalar un TM en el taladro piloto existente, desde la galería auxiliar, con manguitos entre los PK 300 y 360, y con prolongaciones "ciegas" en cada extremo, a modo de "tapones".

Para facilitar las reperforaciones posteriores, se seleccionó una tubería de PVC, con 140 x 126 mm de diámetros, uniones con rosca trapezoidal, 4.4 Kg/m de peso y resistencias de tracción y compresión de 3500 Kg y 16 bares. Los manguitos de goma con 150 mm de diámetro exterior debían disponerse en número de tres por cada metro, y los centradores se colocarían cada tramo de tubo de 2 m.

La inyección de relleno entre el TM y el terreno había de hacerse desde el emboquille en la galería auxiliar inferior, con una mezcla con relación en peso A/C comprendida entre 1.8 y 2.4 y contenido de bentonita del 5 al 7 %. Su resistencia a compresión debía ser superior a 1 MPa en el momento de inyectar

Este sellado se daría por finalizado al rebosar la mezcla por la boca superior del TM, y en el caso de pérdidas de volumen superiores a cuatro veces por encima de los 7 m³ teóricos, se preveían inyecciones de silicato sódico por algunos manguitos, el espesado de la mezcla y/o empleo de acelerantes con o sin paradas en la inyección.

La inyección del tratamiento debía realizarse con los manguitos agrupados en tres conjuntos de elementos alternados, que se denominaron Primarios, Secundarios y Terciarios, y en "pasadas" en cada una de las cuales, se inyectarían todos los manguitos de cada grupo de los anteriores. Además, cada "fase" de inyección comprendería las tres "pasadas" correspondientes a los tres grupos de manguitos, y la inyección de cada manguito, hasta producirse alguno de los criterios de cese establecidos, sería un "episodio".

La mezcla a inyectar inicialmente era lechada de cemento estabilizada con bentonita, y podrían usarse aditivos espesantes (polvo aluminio o similar), y/o acelerantes (silicato sódico o productos comerciales), si era necesario. De acuerdo con la marcha del proceso y las admisiones obtenidas, se pasaría después a inyectar microcemento.

El tratamiento debía comprender al menos dos episodios en cada manguito, a fin de eliminar los falsos rechazos, y el cese o final de cada episodio requería alcanzar alguno de los siguientes hitos: presión

y/o volumen límites; caudal de inyección inferior a 2.5 y 1.5 l/mi para cemento y microcemento; no apertura del manguito con presiones de agua de hasta 45 bares; e incidencias en el entorno del taladro (surgencias, movimientos en paramentos, etc.)

La primera fase de inyección debía ejecutarse de abajo hacia arriba, ascendiendo sucesivamente por los manguitos desde la galería auxiliar, y las siguientes, según los resultados, podrían efectuarse en sentido contrario. El tiempo de espera entre pasadas en las dos primeras fases debía ser al menos de 24 horas, y también según los resultados, este intervalo temporal mínimo podría guardarse solo entre pasadas del mismo grupo de manguitos.

Los parámetros principales para cese de inyección en cada episodio variaban según la fase desde el inicio al final, como sigue:

- Volumen: disminuyendo desde 150 a 40 l
- Presión: aumentando entre 10 y 30 bares

La finalización del tratamiento requeriría un análisis del desarrollo y resultados de la inyección, teniendo en cuenta la magnitud de las admisiones y presiones obtenidas, y sobre todo, la relación entre las mismas y su evolución a lo largo de los trabajos.

Las lechadas de cemento a inyectar debían tener una relación A/C en peso de 1.2 a 0.85, con un contenido de bentonita alrededor del 3%, mientras que el microcemento con una finura de 12 micras, se emplearía con mezclas entre 1.4 y 1.6 de A/C en peso, y un aditivo dispersante en torno al 1%.

Los controles de calidad y ejecución comprenderían:

- Caracterización de las mezclas en laboratorio (densidad, viscosidad y resistencia a compresión a 2 y 7 días), así como durante la puesta en obra con control diario de densidad, y con toma de muestras cada 10 m³ en el sellado y cada 5 m³ en la inyección.
- Control de presiones y volúmenes con equipos dotados de caudalímetro manómetro y registradores de modo continuo e informatizado.
- Supervisión y presentación de resultados con inspección continua del entorno del taladro, y partes diarios con los datos principales de cada episodio de inyección (mezcla, volumen, presión, caudal e incidencias).

3. Desarrollo del tratamiento

3.1. Sellado del tubo-manguito al Terreno

Para ello se descendió 350 m, desde la boca superior del taladro, una sarta de perforación, y tras salir por la galería auxiliar, se le roscó una campana de centrado para alojar, recibir y guiar el inicio del tubo-manguito. Este se introdujo con la acción simultánea de empuje desde la galería auxiliar y de retirada de la sarta, con ello se evitó el riesgo de acodamiento en los "sobrecanchos" del taladro. Tras instalar el tubo-manguito (TM), Fig. 10, su sellado al terreno comenzó a finales de agosto de 2009, con un relleno ascendente hasta rebosar por el extremo superior del TM.

La mezcla empleada fue una lechada de cemento, con relación A/C en peso igual a 1,8, con un 6% de bentonita respecto al agua, para conferirle estabilidad, plasticidad, y "grosor" para obturar las fracturas de la roca. Su densidad y viscosidad fueron de 1,35 t/m² y 9 s, mientras que su resistencia a dos, cinco y siete días estuvieron entre 8 y 20 Kp/cm².

El relleno se realizó con caudales de unos 25 l/mi, y se utilizaron 8958 l de mezcla en total; esto es, unas 2,5 veces el volumen teórico de la corona entre el TM y las paredes del taladro con el diámetro 12 1/4 ".

De acuerdo con el procedimiento, el sellado se dio por finalizado cuando la lechada rebosó de modo continuo por el interior del TM, sin que fuera necesario usar espesantes, ni acelerantes para el fraguado.

3.2. Inyección de cemento

Ante el desarrollo del sellado sin "escapes" que indicaran comunicación del taladro con oquedades y/o grandes fracturas kársticas, se optó por comenzar la inyección del terreno, por los manguitos Primarios, con una mezcla de cemento con relación A/C en peso igual a 1, y un 3% de bentonita, que registró una densidad de 1,50 t/m³, viscosidad de 9s, y resistencia a dos y siete días, de 45 a 90 Kp/cm² véase Fig. 11.

De cara a la correlación de los resultados de la inyección con las características del terreno a lo largo del taladro tratado, se asociaron los manguitos al tipo de terreno detectado por el sondeo mecánico inclinado, teniendo en cuenta, además las incidencias y lo observado en la perforación del propio taladro piloto.

Así los niveles más calcáreos de caliza se clasificaron en cuatro tipos, que agruparon el 25% de la



Fig. 10. Detalle de la colocación del tubo-manguito desde la galería auxiliar.

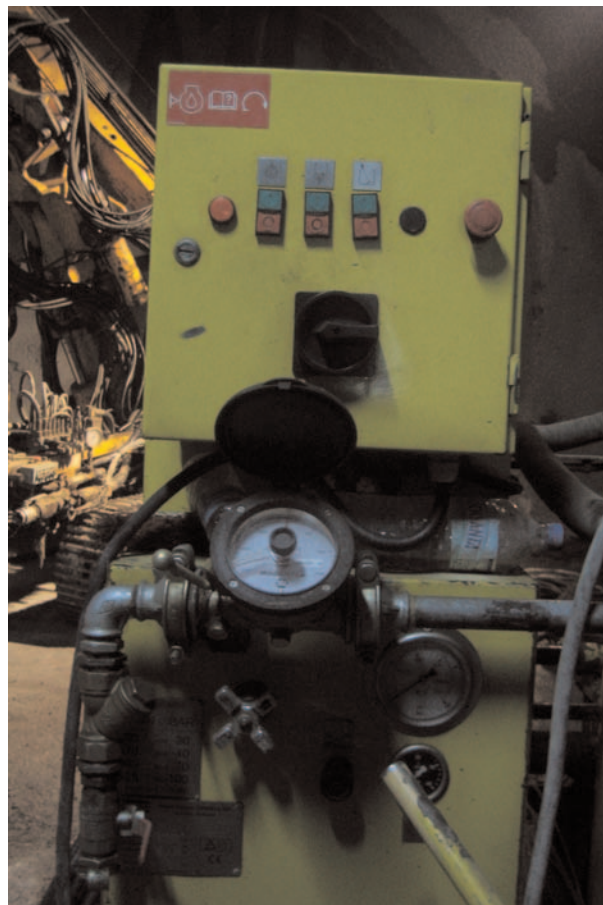


Fig. 11. Detalle del equipo de medida y registro de parámetros de inyección.

longitud total tratada: caliza con fractura abierta y pérdida de lodos (terreno A con el 3%), caliza con fractura abierta (terreno B con el 5%), caliza micrítica marrón (terreno F con el 5%), y caliza gris (terreno G con el 9%); mientras que en los más margosos se distinguieron tres tipos que suponen el 75% restante: marga gris laminada (terreno C con el 11%), margocaliza gris (terreno D con el 15%), y caliza margosa gris (terreno E con el 23%).

Esta primera pasada en los manguitos Primarios, en general, presentó un cese de inyección por haberse alcanzado la presión límite de esta fase, excepto en dos manguitos del terreno A, caliza con fractura abierta y pérdida de lodos, en los que se llegó al volumen límite de 150 l, y otro del terreno E, caliza margosa gris, que anduvo también cerca con un volumen de 119 l. El volumen medio inyectado por manguito fue de 41 l.

A la vista de estos resultados, se consideró conveniente emplear una mezcla más fluida y penetrante en la primera pasada de los manguitos Secundarios, y se inyectó una lechada con A/C igual a 1,2, y un 3% de bentonita, que mostró una densidad de 1,45 t/m³, viscosidad de 7,6s, y resistencia a dos y siete días de 25 a 40 Kp/cm².

Al igual que sucedió con los Primarios, el cese de inyección fue por presión y tan sólo un manguito del terreno C, marga gris laminada, registró un volumen alto igual a 107 l. El volumen medio por episodio resultó de 37 l, similar a los Primarios.

3.3. Inyección de microcemento

Ante estos resultados, se optó por continuar con una mezcla, más penetrante todavía, en la primera pasada de los manguitos Terciarios, y se recurrió a una lechada de microcemento con A/C igual a 1,8, y 1,2% de dispersante, que registró una densidad de 1,32 t/m³, viscosidad de 5,6s, y resistencia a dos y siete días de 40 a 80 Kp/cm².

En esta pasada también el final de la inyección resultó por alcanzar la presión límite; sin embargo, se registraron volúmenes altos, entre 50 y 80 l por episodio, en los terrenos A, B, C, G; es decir, en los niveles de caliza, sobre todo con fracturas, y en la marga gris laminada. El volumen medio inyectado por manguito ha sido de 44 l.

A continuación, las pasadas segunda y tercera con todos los manguitos Primarios, Secundarios y Ter-

ciarios, se efectuaron con la misma mezcla anterior, y con unos resultados de cese por presión límite en todos los casos, que en la tercera pasada ya fue de 30 bares de exceso sobre las pérdidas en la línea. Los volúmenes medios fueron de 20 a 36 l en la segunda pasada, y bajaron a 8-10 l en la tercera.

En este contexto, se optó por una cuarta pasada, agrupando en un conjunto único, los manguitos Primarios, Secundarios o Terciarios, que ofrecían alguna duda por los parámetros de inyección (volúmenes y presiones asociadas a caudales finales), registrados en la tercera pasada.

Como era de esperar, en esta cuarta pasada todos los episodios cesaron por presión superior a 30 bares, asociada a caudales inferiores a 2 l/mi, y con volúmenes claramente inferiores a 5 l por manguito.

Finalmente, a modo de resumen, las admisiones más importantes se tuvieron en los siguientes lugares del tramo tratado:

a) Caliza con fracturas abiertas

Los terrenos A y B con un espesor conjunto del 8% en el tramo tratado, y situados hacia el PK 290, donde los volúmenes totales por manguito estuvieron entre 100 y 200 l, correspondiendo a las lechadas de cemento de 50 a 150 l. Ello ha supuesto unas admisiones de 300 Kg/m de cemento con 70 Kg/m de microcemento en unos casos, a 100 Kg/m de cemento con 140 Kg/m de microcemento en otros.

b) Marga laminada y contactos entre niveles

El terreno C con el 11% del espesor tratado, y comprendiendo cinco niveles dentro de la alternancia, así como los contactos entre niveles de diferente carbonatación, presentaron volúmenes notables, sobre todo de microcemento, y unas presiones en el primer episodio de inyección muy bajas.

Los volúmenes totales por manguito han sido de 60 a 180 l, correspondiendo al microcemento entre 30 y 120 l. Ello ha supuesto admisiones de cemento entorno a 90 Kg/m, y de microcemento de 60 a 180 Kg/m.

Las presiones finales del primer episodio de inyección, en dos o tres manguitos consecutivos en los 10 m justo por encima de la galería auxiliar, han sido de 10 a 16 bares.

Con estos resultados, y de acuerdo con el Procedimiento de Ejecución, se dio por finalizado el trata-

Tabla 1. Parámetros de inyección del tratamiento

PRIMERA FASE CON CEMENTO									
TERRENO	PRIMARIOS				SECUNDARIOS				TOTAL
	p.r.	p.i.	v.i.	q.i.	p.r.	p.i.	v.i.	q.i.	v.i.
A	14,70	17,50	118,3	10,00	24,50	39,13	49,25	10,00	167,58
B	20,24	25,90	52,20	9,00	23,93	36,44	46,57	8,57	98,77
C	32,84	19,49	27,71	9,00	25,47	13,42	45,17	9,05	72,88
D	37,16	19,56	23,11	9,00	28,52	14,76	24,45	7,75	47,57
E	31,59	21,31	26,74	8,00	28,88	15,51	24,39	7,28	51,13
F	30,98	23,66	40,00	8,00	26,00	17,10	31,83	8,98	71,83
G	21,39	25,81	52,56	9,00	23,83	41,41	47,63	10,00	100,18
MEDIA TOTAL	26,99	21,89	48,66	9,00	25,87	25,40	38,47	8,80	87,14

FASE FINAL MICROCEM. TODOS MANGUITOS				
TERRENO	p.r.	p.i.	v.i.	q.i.
A	57,60	38,42	1,15	1,44
B	53,67	35,17	0,58	0,13
C	37,15	31,83	5,52	1,84
D	46,77	32,98	1,46	1,74
E	43,56	32,99	1,68	1,82
F	43,50	31,40	4,06	2,70
G	50,44	37,31	0,41	1,64
MEDIA TOTAL	47,53	34,30	2,12	1,62

LEYENDA

p.r. presión rotura manguito con agua en bares
 p.i. presión final inyección con mezcla en bares
 v.i. volumen inyectado en litros
 q.i. caudal final de inyecciones en l/m

A	Caliza con fractura abierta (pérdida de lodos)
B	Caliza con fractura abierta
C	Marga Gris laminada
D	Margo-caliza Gris
E	Caliza margosa gris
F	Caliza micrítica marrón
G	Caliza gris

miento el día 9 de Septiembre de 2009, habiendo inyectado un total de 12,3 m³ de lechadas de cemento y microcemento, de los cuales 4,1 m³, hacia el 30%, han sido de cemento, y 8,2 m³ de microcemento.

4. Análisis de los resultados

Consistió en asociar los valores registrados de los principales parámetros de la inyección (presión, admisión y caudal), en cada pasada de los tres grupos de manguitos, con los distintos tipos de roca a lo largo del taladro, siguiendo su evolución hasta que tanto la porosidad rellenada total, como sobre todo, las presiones de inyección finales, con caudal cerca del rechazo, alcanzaron los objetivos dados por la experiencia.

La Tabla 1 refleja los valores medios de esos parámetros para sendas fases del tratamiento, la primera con cemento y la final con microcemento.

El análisis de toda esta información, junto con todo lo expuesto en los apartados anteriores, lleva a las consecuencias que se reflejan en la Tabla 1.

4.1. Inyección por "impregnación"

La inyección de los niveles de terreno más calcáreos, caliza gris y micrítica marrón (terrenos A, B, F y G en total con el 25% de la longitud tratada) fue "por impregnación" de sus fracturas u oquedades abiertas, algunas de ellas detectadas en el taladro piloto por las pérdidas de fluido de perforación, y con la inspección con cámara de video, y/o en el sondeo mecánico inclinado.

En estos niveles la presión de inyección máxima empleada, no superior a 40 bares, es insuficiente para fracturar la matriz rocosa de la caliza, y el desarrollo del tratamiento es típico del "colmatado" de discontinuidades, con apertura suficiente para que penetren las lechadas de cemento y microcemento.

En efecto, como indica la Fig. 12, los primeros episodios con cemento registran presiones finales relativamente bajas, de 17 a 26 bares, con admisiones, o volúmenes, variables con la intensidad de las fracturas abiertas, entre los 25 l de los niveles F y G más intactos, y los 50-120 l de los niveles B y A contracturas abiertas.

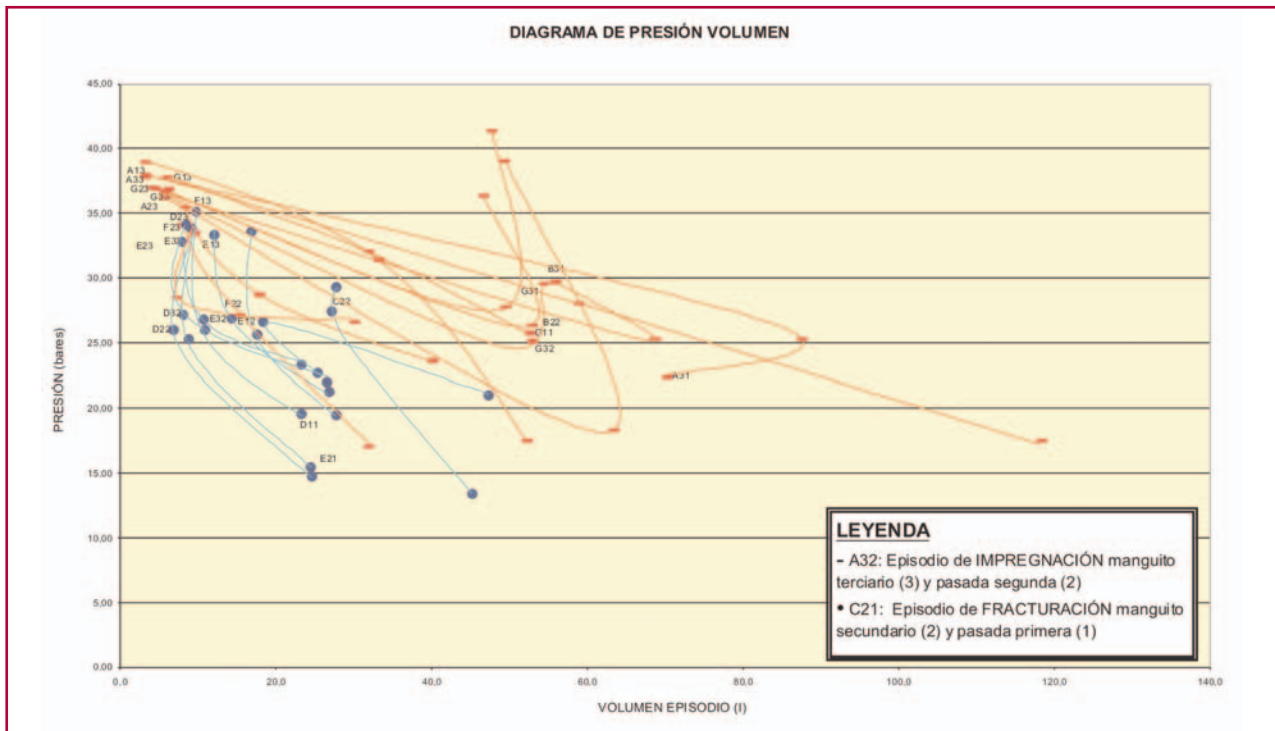


Fig. 12. Diagrama de presión volumen

En las pasadas siguientes con microcemento, a pesar de ser más penetrante que el cemento, se observa un incremento de presión hasta el máximo fijado por encima de 30 bares, asociado a una disminución de las admisiones hasta llegar al rechazo. Todo ello es la consecuencia de "forzar" la penetración de la inyección en las fracturas cada vez más finas, o en el llenado final de las más gruesas, que exige mayor presión, y consume menor volumen.

La porosidad rellenada en estos niveles puede evaluarse, a partir de los radios medios de alcance de la inyección, dados por la experiencia, y citados anteriormente, y en la Tabla 2 se han calculado para radios medios de 2 y 4 m según la mezcla.

Como este alcance medio para el microcemento, que ha sido el componente mayoritario de la mezcla inyectada, es más probable que haya estado más cerca de 4 m que de 2 m, las porosidades rellenadas, con cemento y microcemento, resultan iguales al 2,7% para la caliza con fracturas abiertas y pérdida de lodos (terreno A con el 3% de la longitud tratada), al 1,9% para la caliza con fracturas abiertas sin pérdida de lodos (terreno B con el 5% de longitud), al 1,0% también para la caliza micrítica sin fracturas abiertas aparentes (terreno F con el 5% de la longitud), y al 1,4% para la caliza gris sin fracturas abiertas aparentes (terreno G con el 9% de longitud).

De acuerdo con las referencias suministradas por la experiencia, y la información de partida, anteriormente expuestas, se llega a las siguientes consecuencias:

- La fracción de las porosidades rellenadas tan sólo con cemento, entre 0,1 y 1%, son muy similares a las que se registraron en la inyección con cemento en el sondeo nº 4 EL PADUL, entre las cotas 500 y 536,5; también algo inferiores a las observadas en el tratamiento del gneis cizallado del segundo túnel de Guadarrama para el AVE; y según la experiencia general, corresponderían a macizos rocosos con fracturas abiertas con frecuencia o intensidad por encima de la media.
- Además, también ha de tenerse en cuenta, que los lodos empleados para la perforación del taladro piloto, sobre todo los que tuvieron adiciones de espesantes, colmatantes y polímeros, debieron rellenar, en cierto grado, las fracturas con mayor apertura, y las posibles oquedades kársticas. Tal efecto debió reducir de modo notable las admisiones en el tratamiento posterior, efectuado con lechadas de cemento de mayor "penetración" que esos lodos con adiciones.
- Según las dos consecuencias anteriores, los niveles más calcáreos, de calizas grises y calizas micríticas marrones, que aparecen en el 25% de la

Tabla 2. Porosidades rellenadas para radios medios de inyección de 4m (impregnación) y 2m (fracturación).

TERRENO	INYECCIÓN DE CEMENTO			INYECCIÓN MICROCEMENTO			INYECCIÓN TOTAL		
	v.i.	n (4m)	n (2m)	v.i.	n (4m)	n (2m)	v.i.	n (4m)	n (2m)
A	169,33	1,01	4,04	291,78	1,74	6,97	461,12	2,75	11,01
B	91,20	0,54	2,18	223,84	1,34	5,34	315,04	1,88	7,52
C	58,71	0,35	1,40	179,57	1,07	4,29	238,29	1,42	5,69
D	63,11	0,38	1,51	79,86	0,48	1,91	142,97	0,85	3,41
E	67,74	0,40	1,62	85,57	0,51	2,04	153,31	0,92	3,66
F	95,00	0,57	2,27	95,75	0,57	2,29	190,75	1,14	4,55
G	52,56	0,31	1,25	204,54	1,22	4,88	257,10	1,53	6,14
MEDIA TOTAL	67,90	0,51	2,04	165,84	0,99	3,96	251,22	1,50	6,00
SUMA TOTAL	4523			10858			15381		

LEYENDA

- p.r. presión rotura manguito con agua en bares
- p.i. presión final inyección con mezcla en bares
- v.i. volumen inyectado en litros
- q.i. caudal final de inyecciones en l/m

- A** Caliza con fractura abierta (pérdida de lodos)
- B** Caliza con fractura abierta
- C** Marga Gris laminada
- D** Margo-caliza Gris
- E** Caliza margosa gris
- F** Caliza micrítica marrón
- G** Caliza gris

$$r = 4m \quad n\% = \frac{VI}{16755} \times 100 \quad r = 2m \quad n\% = \frac{VI}{4189} \times 100$$

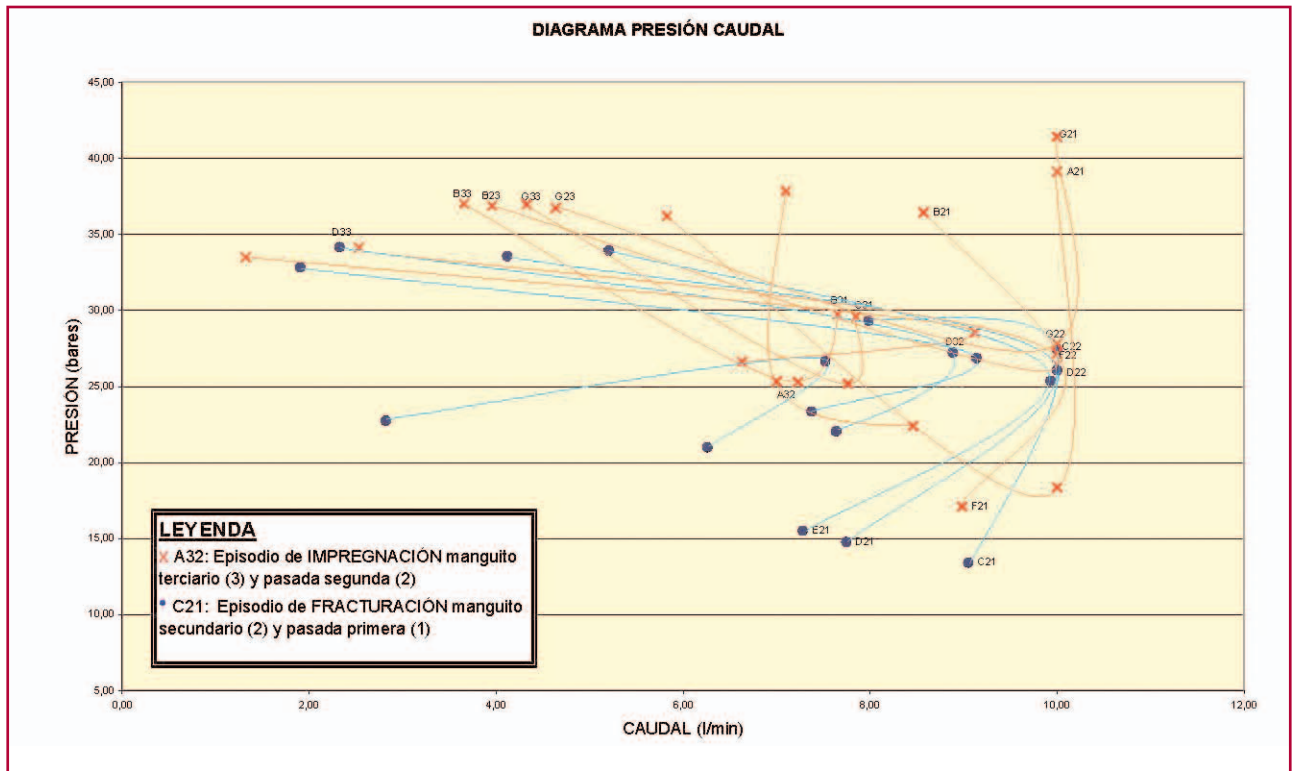


Fig 13. Diagrama presión caudal.

longitud tratada, presentan una fracturación abierta que ha sido inyectada con cemento y microcemento, que según las admisiones registradas, tiene una frecuencia o intensidad, por encima de media, y que es claramente mayor que la observada en el sondeo n° 4 EL PADUL, situado a unos 35 m del taladro piloto.

4.2. Inyección por "fracturación"

En el tratamiento de los niveles más margosos, marga laminada, margocaliza y caliza margosa (terrenos C, D y E en total con el 75% de la longitud), predominó el proceso de "fracturación" con rotura de la matriz al no poder penetrar las lechadas por las posibles fracturas finas, o fisuras.

En estos niveles, presiones iniciales bajas, de 15 a 20 bares, fueron suficientes para "hidrofracturar" la matriz con admisiones pequeñas entre 20 y 40 l por manguito, Fig. 12. Las presiones iniciales más bajas, entre 8 y 16 bares, se dieron en varios manguitos consecutivos, en la marga gris laminada y los contactos entre esos niveles más margosos entre sí, dentro de los 10 m justo por encima de la galería auxiliar, lo que puede atribuirse, en parte, a la decompresión originada por la excavación de esta.

Las pasadas siguientes registraron una elevación de las presiones, sobre todo a partir de la tercera pasada, hasta alcanzar la presión límite establecida de 30 bares, que va asociada a una reducción de los volúmenes hasta llegar al rechazo, con admisiones por debajo de 10 l por episodio.

Todo ello como se observa en el Diagrama de presión-caudal, Fig. 13, tiene lugar con caudales inferiores a 2 l/mi, con lo que esas condiciones de presión cuasiestáticas, constituyen un claro indicador del incremento de resistencia a corte del terreno mejorado con la inyección.

Al igual que con "impregnación", la porosidad rellenada puede evaluarse con las referencias disponibles.

Como en este caso, el alcance es bastante inferior al de la "impregnación", el radio medio es probable que haya estado cerca de los 2 m, con lo que según la Tabla 3, las porosidades rellenadas, con cemento y microcemento, resultan iguales al 5,7% para la margas laminadas, que son los niveles más blandos (terreno C con el 11% de la longitud) y al 3,4% para calizas margosas y margocalizas, de



Fig. 14. Vista del tramo de pozo excavado con la sección final.

comportamiento parecido (terrenos D y F con un total del 38% de la longitud).

5. Excavación del tramo de pozo y conclusiones

Tras un periodo de quince días, después de dar por finalizado el tratamiento de mejora con las inyecciones, se procedió al ensanchamiento del taladro piloto hasta las 12 1/4" de diámetro, seguido posteriormente por el escariado a 1.80 m de diámetro, y la excavación de destroza hasta la sección final del pozo, con 6.5 m de diámetro, véase Fig. 14.

De modo específico, respecto al problema existente y al desarrollo y resultados del tratamiento con inyecciones, caben las siguientes conclusiones:

- En taladros inclinados a través de alternancias rocosas con resistencias y diaclasas muy variables, como en este caso, el procedimiento de inyección frecuente en macizos rocosos competentes, por tramos con obturación directa contra las paredes del taladro, es mucho menos eficaz que el sistema de tubo-manguito, tanto por las dificultades en la obturación directa para alcanzar presiones elevadas, como por la poca viabilidad de realizar varias inyecciones repetidas en un mismo lugar. Además, en este caso la excesiva distancia del tramo a tratar respecto a la boca del taladro, hacía poco viable un tratamiento convencional durante la perforación del mismo.
- El desarrollo y los resultados del tratamiento realizado con el sistema de tubo-manguito en este terreno, confirma la experiencia existente de que se pueden mejorar las propiedades mecánicas y la impermeabilidad de los tramos menos competentes de macizos rocosos, inyectando cemento y microcemento con presiones elevadas, de hasta 30 bares, y volúmenes controlados en cada episodio.
- Las presiones iniciales tan bajas, sobre todo en los contactos entre niveles diferentes, donde se registraron de 8 a 16 bares, son propias de terrenos blandos, con un bajo comportamiento mecánico. Estos datos están en correspondencia con las admisiones habidas para un radio medio de 2 m, del 3,4 al 5,7%, que son similares a las del gneis decomprimido del primer túnel del AVE en Guadarrama, e inferiores tanto a las de la marga de la presa de Contreras, como a las de los tratamientos habituales en suelos.
- Las sucesivas pasadas de inyección han mejorado esas propiedades mecánicas, como indican el incremento obtenido en las presiones finales

de inyección de cada episodio, asociadas a caudales cercanos al rechazo. Las presiones alcanzadas al final, por encima de los 30 bares de la presión límite fijada, corresponden a rocas blandas a medias, en las que las fisuras o discontinuidades, han sido rellenadas o "cosidas" por mezcla cementante, bien por "impregnación" en los niveles calizos más resistentes, bien por "fracturación" en las margas más blandas y decomprimidas.

- De acuerdo con la experiencia, esas admisiones y sobre todo, las elevadas presiones finales de inyección, constituían indicadores fiables del logro de los objetivos del tratamiento, lo que fue confirmado posteriormente, por el buen comportamiento terreno en los sucesivos escariados del Taladro Piloto, y la excavación hasta la sección final del pozo sin problemas significativos.

6. Agradecimientos

Los autores de este artículo desean expresar su agradecimiento a IBERDROLA GENERACIÓN por autorizar la publicación del contenido del mismo.

Así mismo, agradecen a los componentes de los equipos de la Dirección de Obra, de IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN liderado por Millán García-Tola, del Contratista de las obras, de la UTE LA MUELA II SACYR-CAVOSA encabezado por Miguel Álvarez y Ramón Lecea, y de la empresa especializada ejecutora de los trabajos de inyección, de TECNASOL bajo la dirección de Javier Garcés, su colaboración en el suministro de la información y documentación fotográfica, así como en la asistencia prestada que han hecho posible la redacción de este artículo. ♦

Referencias:

- (1) MITCHELL, J.K. "Soil Improvement: State of the Art". *Proceedings of the 10th ICSMFE*, Stockholm (Sweden), 1981, vol. 4, p. 509-565.
- (2) SANTOS, A.; CUÉLLAR, V. "Mechanical improvement of fan angillaceous marl through cement-based reinforced grouting". *Grouting Soil Improvement. Geosystems Including Reinforcement*.

Han Rathmayer ed., Helsinki: Finnish Geotechnical Society, 2000, p. 287-293. ISBN: 951-682-601-6.

- (3) SOLA, P. "Inyecciones de fracturación y compactación". *Jornada de Mejora del Terreno de Cimentación y compensación y control de asentos*. INTEVIA, Madrid, 14 de Abril, 2010.

- (4) SOLA, P.R.; MONROE, A.S.; MARTIN, L.; BLANCO, M.A.; SAN JUAN, R. "Ground treatment for tunnel construction on the Madrid Metro". *Grouting And Ground Treatment: Proceedings of The Third International Conference*, New Orleans, LA, 10-12 February 2003. Reston, VA: ASCE, 2003. (Geotechnical Special Publication, 120). Vol. 2, p. 1518-1533. ISBN: 9780784406632.

- (5) SOLA, P.; MONROE, S. "Inyecciones de compensación en los Metros de Madrid, Londres y Lisboa". *Ingeopress*, 2000, nº 80, p. 72-79. ISSN: 1136-4785.