

Consolidación del terreno con inyecciones en el nuevo acceso al Aeropuerto de Barajas (Madrid)

C. OTEO (*); L. SOPEÑA (**);
P. SOLA (**); A. S. MONROE (**);

RESUMEN Una de las nuevas carreteras de acceso al aeropuerto de Madrid había sufrido asentamientos debidos a un relleno mal compactado sobre el cual estaba cimentada. La solución adoptada no debía interferir de ninguna manera en el paso del tráfico durante la consolidación del relleno. El método adoptado consistía en una serie de columnas de jet grouting y de inyecciones de compactación ejecutadas desde el arcén y tratando el relleno flojo, consolidando el terreno y provocando un levantamiento controlado para compensar los asentamientos y recuperar el estado inicial de la carretera.

GROUND CONSOLIDATION USING GROUTING AT THE NEW ACCESS ROAD TO BARAJAS AIRPORT (MADRID)

ABSTRACT One of the new access roads to Madrid's airport suffered from settlement caused by badly compacted fill upon which the road was founded. A solution was to be designed in such a way as not to disrupt the flow of traffic during the consolidation of the fill. The method adopted consisted of a series of jet grouting and compaction grouting columns undertaken from the hard shoulder of the road within the loose fill, thus consolidating it and also causing a certain amount of controlled heave to compensate for the settlements and to restore the road to its original position.

Palabras clave: Consolidación; Inyecciones de compactación; Jet grouting; Compensación de asentamientos; Nivelación de precisión; Electroniveles.

1. INTRODUCCIÓN

La autovía A-10 es el acceso al aeropuerto de Barajas desde la Zona Norte de Madrid, partiendo desde el cinturón M-40. Fue terminada en 1992, y casi desde esa fecha, un tramo de unos 250 m cercano al enlace del aeropuerto, PK 6,050 a 6,300, vino sufriendo importantes asentamientos que se tradujeron en ondulaciones y grietas en el firme.

Como los sucesivos recorridos de éste último no resultaron suficientes, se optó por una consolidación del terreno existente bajo los 2 m superiores del terraplén de apoyo de la calzada, por medio de un tratamiento con inyecciones ejecutado desde los bordes, de modo que no interrumpiera el tráfico.

La solución adoptada, basada en experiencias anteriores en Madrid, ha empleado tanto inyecciones tipo Jet grouting como de compactación, buscando el mejor balance técnico y económico.

Los trabajos que se ejecutaron en el año 1995, comenzaron por un reconocimiento geotécnico de detalle y una zona

de pruebas para definir el diseño final de los taladros y los parámetros de ambos tipos de inyección, así como para comprobar los resultados obtenidos con el tratamiento.

2. RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE DETALLE

El diseño preliminar del tratamiento con inyecciones estuvo basado en un reconocimiento geotécnico con sondeos mecánicos, ensayos de laboratorio con las muestras obtenidas en ellos, y ensayos penetrométricos dinámicos, que definieron el corte tipo bajo el firme que se indica en la tabla I.

Las variaciones en espesor y compacidad (o consistencia) del relleno bajo el terraplén aconsejaron realizar un reconocimiento adicional para conocer con mayor precisión la parte incompetente del relleno que es la fuente de los movimientos del firme, sobre todo al colapsar con el agua de infiltración desde la superficie, y que como se verá más adelante condicionaba tanto el tipo de inyección para mejorarlo, como la distribución y longitud de los taladros a ejecutar. Además, debía comprobarse que la zona de prueba elegida era representativa del conjunto del tratamiento a realizar (véase figura 1).

Realizado el reconocimiento con un sondeo mecánico y 42 ensayos penetrométricos dinámicos tipo Borros, situados en los bordes a lo largo del tramo con asentamientos, los resultados permitieron diferenciar tres subtramos, denominados zonas

(*) Universidad Politécnica de Madrid.

(**) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX - M^º de Fomento.

(***) GEOCISA, Geotecnia y Cimientos, S.A.

ESPESOR (m)	CAPA	DESCRIPCION
2 a 3	Terraplén	Arena limo-arcillosa, marrón, media a densa compacidad ($N \approx 15$ a 25).
2 a 12	Relleno vertido	Arena limo-arcillosa y arcilla arenosa, marrón y gris verdosa, muy floja a media ($N = 2$ a 20).
por debajo	Terreno natural	Arena limo-arcillosa y arcilla arenosa, marrón y grisácea, media a muy densa ($N \approx 20$ a 60).

* De arriba a abajo, $N =$ golpes SPT, Finos T 200 ASTM No plásticos a Plasticidad Media.

TABLA I. Corte Tipo del Terreno

A, B y C de la figura I y tabla II, en donde las diferencias en el espesor del relleno a tratar, y especialmente en el ancho de la calzada, aconsejaron tres tipos de perfiles transversales distintos por la combinación de taladros con Jet grouting e inyecciones de compactación.

Los suelos componentes del terraplén y del relleno vertido eran productos arenosos de excavación del terreno natural, sólo diferentes en compacidad. Se consideró que el relleno debía ser consolidado cuando su compacidad era floja a muy floja (N del Borros inferior a 8-10 golpes, equivalente a N del SPT inferior a 10-13 golpes).

ZONA	Terraplén (m)	Relleno a tratar (m)	N_b (golpes)
A	2 a 3	6 a 8	2 a 8
B	2 a 3	3 a 8	1 a 9
C	2 a 5	3 a 9	3 a 10

TABLA II. Espesores de terraplén y relleno a tratar.

3. ZONA DE PRUEBA

El grado de mejora a conseguir con el tratamiento de consolidación se estableció, inicialmente, en aumentar la compacidad del relleno como mínimo hasta una densidad relativa media, que debía ser mayor por encima de los 5 m de pro-

fundidad (N medio del SPT no inferior a 15) que en el resto por debajo (N medio no inferior a 10).

Ante la necesidad de verificar las hipótesis del diseño preliminar, los parámetros de ejecución y los efectos inducidos en superficie por los dos procedimientos de inyección, así como los resultados obtenidos y los controles a efectuar, fue necesario realizar unas pruebas a escala real en una zona sin tráfico (figura 1), y con espesores de relleno a tratar de unos 8-9 m, iguales a los máximos bajo la calzada con tráfico.

Los ensayos comenzaron por la ejecución de taladros de Jet grouting simple, con consumos de cemento entre 300 y 500 Kg/m, con inclinaciones de 30° y 45° con la horizontal, a fin de conocer el comportamiento del terreno, y sobre todo, los movimientos producidos en superficie.

Los resultados indicaron que con 300 Kg/m el rechazo era muy pequeño, y con 30° de inclinación se produjeron obstrucciones y midieron levantamientos bruscos en superficie de hasta 60 mm, mientras que con 45° estos últimos fueron tan solo de 20 mm.

Las pruebas de la consolidación propiamente dicha se efectuaron con dos tipos distintos de tratamiento con la disposición de secciones definidas en las figuras 2 y 3, que se ensayaron en áreas adyacentes. El primero entre las secciones 1 y 3 compuesto por una combinación de Jet grouting e inyecciones de compensación, mientras que el segundo, entre las 4 y 6 comprendieron sólo Jet grouting. Las longitudes de taladros fueron de 4,5 a 10,5 m, y las inclinaciones entre 30° y 60° con la horizontal.

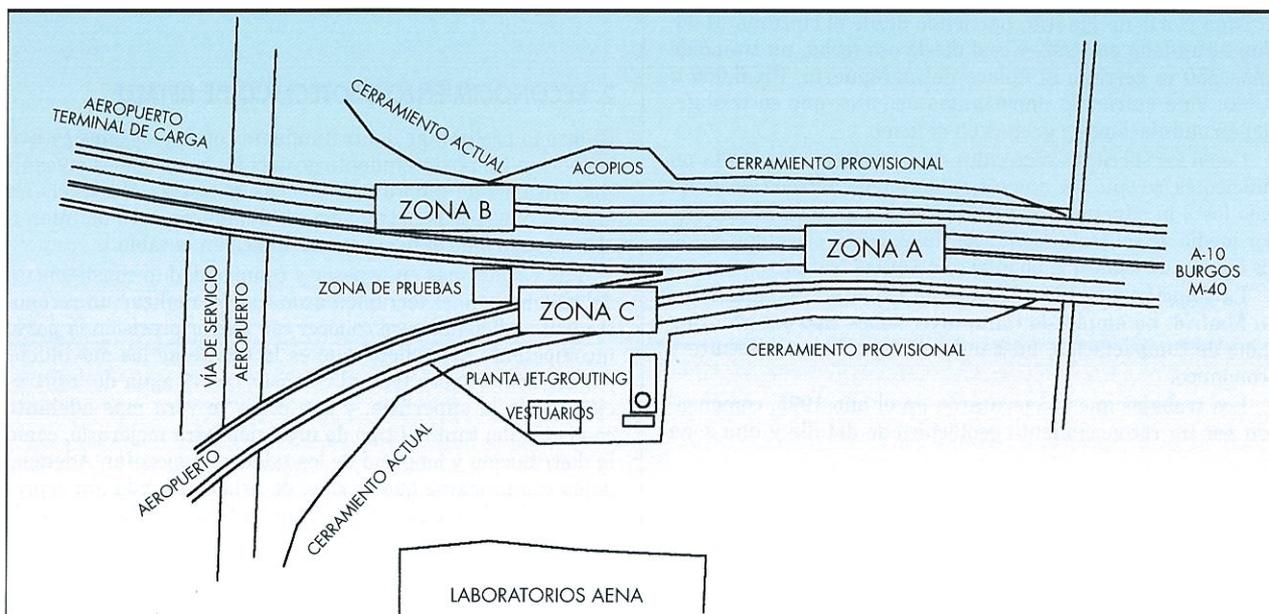


FIGURA 1. Planta de las zonas de tratamiento.

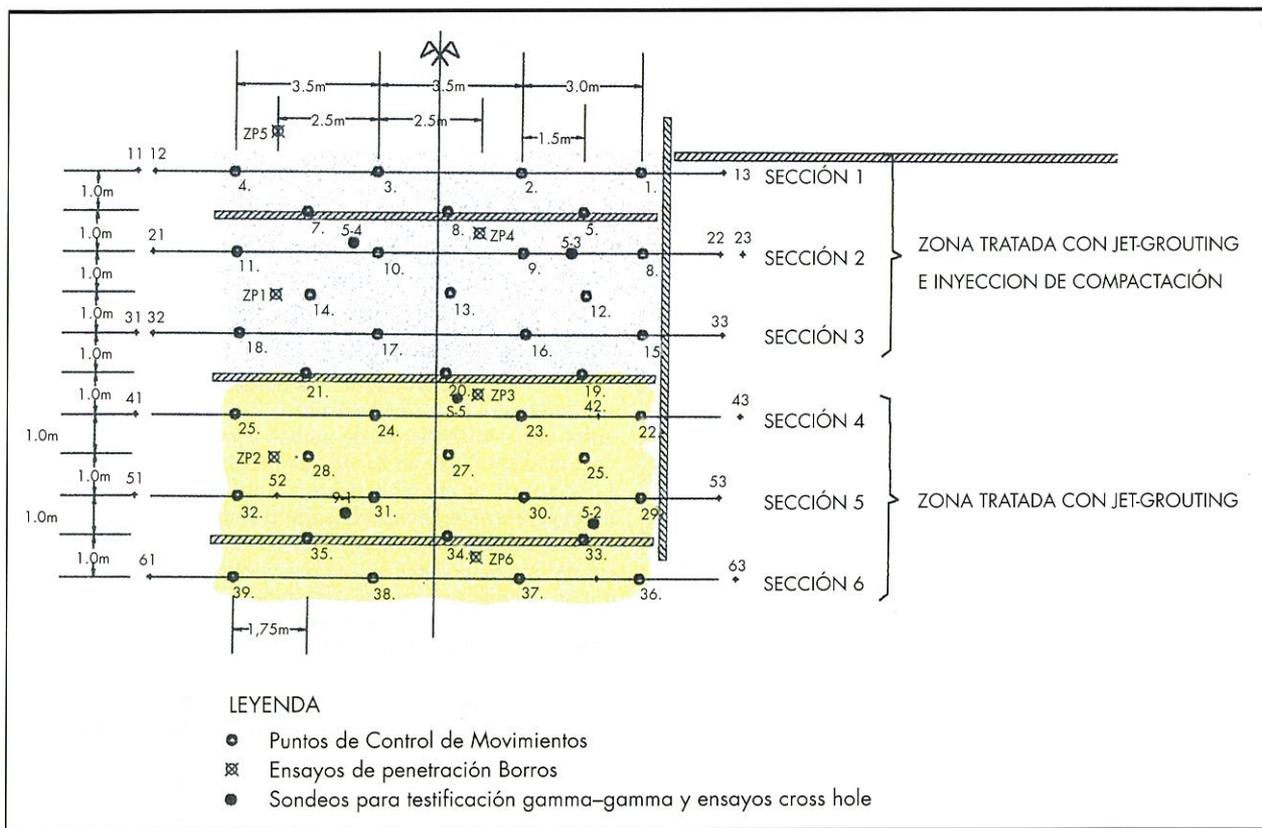


FIGURA 2. Planta de la zona de pruebas.

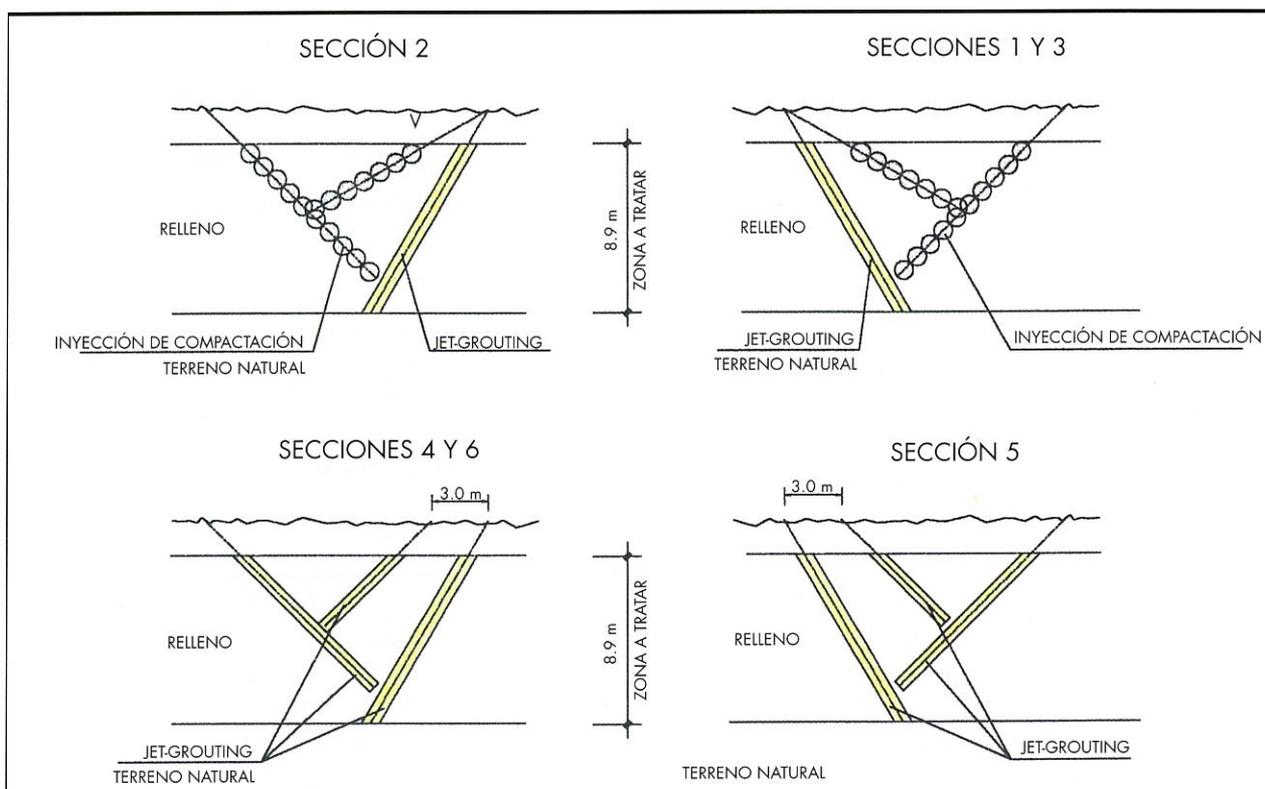


FIGURA 3. Secciones de la zona de pruebas.

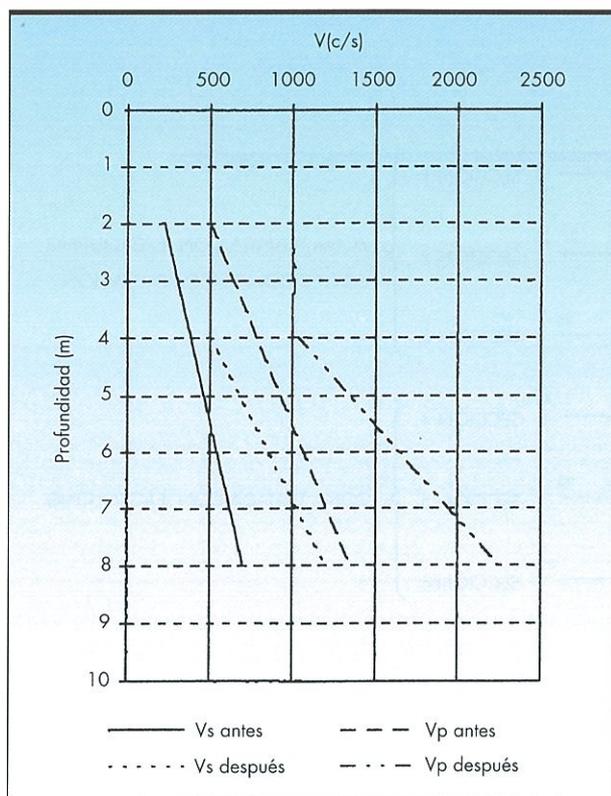


FIGURA 4. Comparación de velocidades Vs y Vp en los ensayos "cross hole".

Las inyecciones tipo Jet grouting se realizaron con presiones y caudales de 450 bares y 110 l/min, junto con consumos de 300 a 500 Kg/m de cemento con relación C/A igual a 1. La inyección de compactación fue con mortero de arena, ceniza y cemento-bentonita, de baja consistencia, presiones de hasta 25 bares y consumos de 300 a 700 l/m.

Los movimientos en superficie se midieron con nivelaciones periódicas, y con cinco líneas de electroniveles de lectura automática en tiempo real. Los movimientos máximos resultaron pequeños, con levantamientos de 20 mm y asentamientos de unos 10 mm.

La mejora lograda se comprobó mediante el antes y el después de ensayos penetrométricos Borros y geofísicos tipo cross-hole y diagrfía $\gamma\text{-}\gamma$, así como con la inspección visual de calicatas.

Las diferencias entre el antes y el después fueron similares en los dos tipos de tratamiento, resultando inapreciables en las diagrfías $\gamma\text{-}\gamma$, y significativas en los ensayos Borros, pues el N medio pasó de 2-8 golpes a 6-10 golpes en general. En cambio, fueron notables en los ensayos cross-hole, donde se obtuvieron incrementos en las velocidades del 43 al 67 % para las ondas de presión, y del 79 al 97 para las de corte, observándose una mayor diferencia (del 4 al 37 %) por encima de los 5 m de profundidad. Un muestra de estos últimos resultados se ha recogido en la figura 4.

Las inclusiones producidas en el terreno observadas en las calicatas fueron muy diferentes para la lechada del Jet grouting y el mortero de la compactación. Las primeras como ya era conocido en Madrid, mostraron un tronco central de suelo-cemento, de unos 0,2-0,4 m de diámetro equivalente, con abundantes y delgadas ramificaciones irregulares, que "armaban" el terreno entre taladros. Las segundas presentaban formas esféricas irregulares y cuñas

subverticales de mortero poco contaminado, con espesores de 0,2 a 1 m.

Con estos resultados y la experiencia en Madrid de tratamientos similares, se concluyó que la consolidación lograda era suficiente, y se realizó el diseño final del tratamiento bajo las calzadas con los mismos criterios.

4. DISEÑO FINAL

El diseño final dispuso una combinación de inyecciones de compactación y Jet grouting simple para las subzonas A y B (véase figura 5), con mayor ancho de calzada y mayores asentamientos en el firme, junto con una solución sólo con Jet grouting para la subzona C (figura 5), donde podía efectuarse el tratamiento desde los bordes con taladros inclinados más de 45° con la horizontal. La separación en planta entre las semisecciones de ambos tipos de tratamiento fue de 2 m al igual que en la zona de prueba (véase figura 2).

La secuencia de ejecución debía ser siempre desde los laterales hacia el centro de la calzada para "recintar", dando prioridad a los taladros de Jet grouting frente a los de compactación dentro de la misma sección. Los parámetros más característicos que se especificaron, se han resumido en la tabla III.

El consumo mínimo de 300 Kg/m en el Jet grouting debía aumentarse hasta el máximo de 500 Kg/m, si el rechazo era pequeño.

Por lo general, los volúmenes máximos en la compactación correspondían a una reducción equivalente de porosidad en el relleno del 5 % en las profundidades a 5 m bajo el firme, y del 7 al 10 % para el tramo por encima. El criterio de cese en un taladro por levantamiento fue de 10 mm para una fase de inyección, y de 30 mm para el total acumulado.

Además, en las áreas con más asiento en las subzonas A y B se previó una posible segunda fase de compactación con taladros intermedios a los iniciales, en caso de que las presiones de inyección y los levantamientos fueran muy bajos en los taladros de primera fase. Esta fase adicional tenía por objeto asegurar la mejora de compacidad requerida en el relleno, junto con la recuperación de parte de los asentamientos del firme mediante los levantamientos producidos por la inyección. Como estos últimos no debían empeorar las ondulaciones existentes, los volúmenes a emplear y los movimientos resultantes se establecieron con el programa SCOMET 3D (figura 6), que hace un análisis en tres dimensiones con levantamientos en forma superficie de Gauss, partiendo del tipo y volumen de mezcla, ángulo de influencia del terreno y factor de eficiencia del sistema.

Los controles especificados, fueron principalmente de ejecución, dada la necesidad de alterar el tráfico lo menos posible, comprobándose los resultados con ensayos cross hole y penetrométricos Borros en los bordes de las calzadas, así como los movimientos verticales como en la zona de prueba.

Jet Grouting Simple	Compactación
Lechada C/A = 1	Mortero (G-MFB1-1)
Presión Bomba = 450 bares	Presión taladro < 25 bares
Caudal = 100 l/mi	Caudal = 50-100 l/mi
Rotación = 13 rpm	Rotación = —
Viscosidad Marsh = 35 a 42 s	Cono Abrams = 9-13 cm
Consumos 300 a 500 Kg/m	Consumo = 300 a 1200 l/m

TABLA III. Parámetros de Inyección.

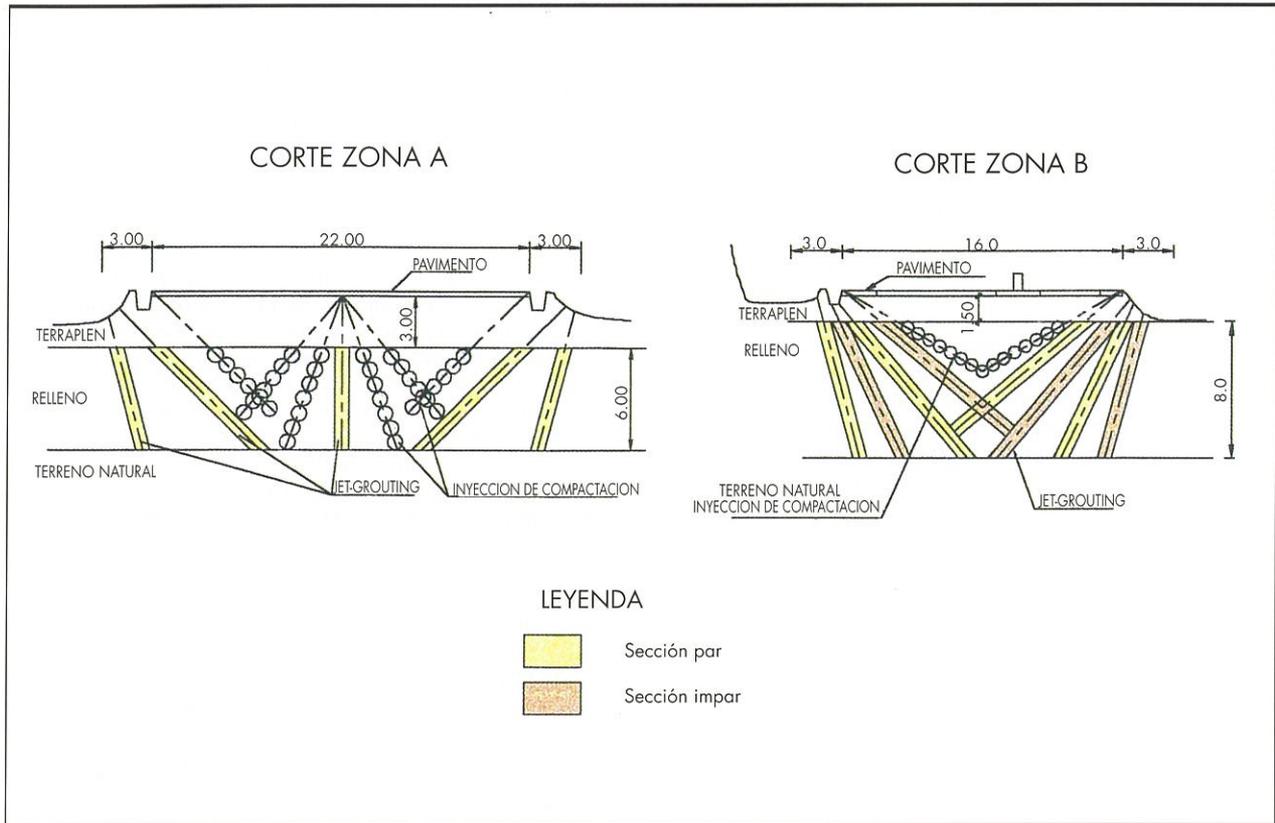


FIGURA 5. Secciones de tratamiento, Zonas A y B.

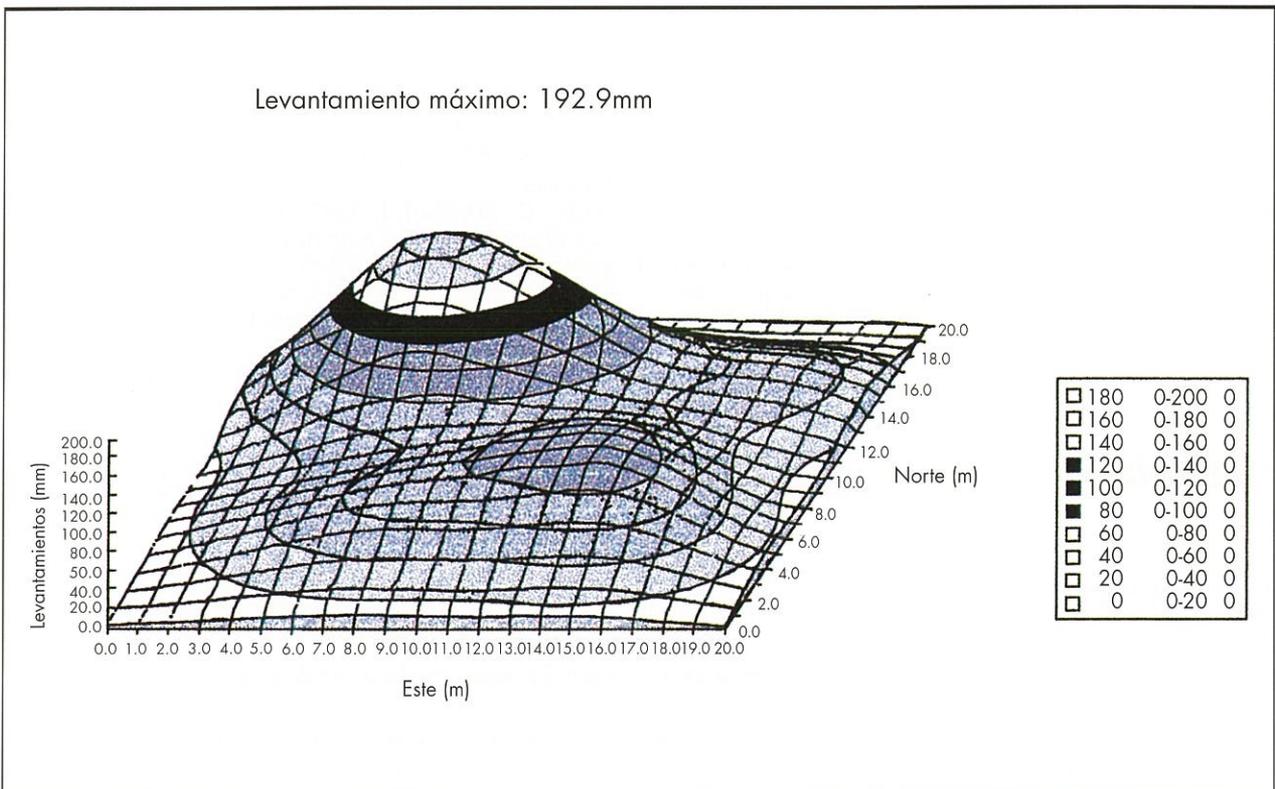


FIGURA 6. Salida gráfica del programa SCOMET 3D - Levantamiento producido por inyección.

5. EJECUCIÓN Y RESULTADOS

Las mediciones totales, ejecutadas según el diseño final anterior, fueron para las inyecciones de compactación 2045 m de perforación, 1226 m de taladro inyectado y 776 m³ de mortero inyectado, mientras que para el Jet grouting 1229 m de perforación estéril, 3929 m de taladro inyectado y 1493 t de cemento inyectado. Los consumos medios resultaron del orden de lo esperado: unos 400 Kg/m de cemento para el Jet grouting, y 900 l/m a 300 l/m para los dos tramos superior e inferior de la compactación.

Los resultados de los controles con ensayos cross hole estuvieron en el mismo orden que los obtenidos en la zona de pruebas. Los ensayos penetrométricos Borros no se consideran muy representativos, y son una cota inferior, pues se efectuaron en el borde exterior del arcén. A pesar de ello, casi dos tercios del total presentaron N_B por encima de 10 golpes, y el tercio restante nunca baja de 5-10 golpes en tramos superiores a 1 m, lo que sería equivalente a 8-13 golpes del SPT.

La influencia en el firme fue importante con las inyecciones de compactación, y pequeña con el Jet grouting. Las grietas se incrementaron y se produjeron levantamientos de hasta 190 mm con la típica configuración gaussiana de unos 10 m de ancho, resaltando sobre un levantamiento generalizado de 20 a 50 mm (figura 6). Por otro parte, estos levantamientos redujeron sensiblemente la cantidad de aglomerado asfáltico con que se regularizó el firme para finalizar los trabajos de reparación. La duración total de las obras fue de unos seis meses.

6. CONCLUSIONES

La reparación efectuada de un tramo de la Autovía A-10, en Madrid, ha permitido obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La consolidación de rellenos arenosos, muy flojos y con espesores de 3 a 9 m, puede realizarse con inyecciones de compactación y tipo Jet grouting simple, desde fuera de la calzada y de modo que el tráfico sea afectado mínimamente, siempre que el control sea constante con inspecciones visuales, nivelación de precisión y electroniveles en tubos enterrados.
- Los tipos de tratamientos más convenientes técnica y económicamente, son una combinación de ambas técnicas de inyección, que dependiendo del ancho de la calzada, deben comprender taladros de compactación para la parte central de aquella y taladros de Jet grouting para los latera-

les. Deberá disponerse una zona de prueba para comprobar las hipótesis iniciales de diseño.

- Los taladros de Jet grouting simple no deben disponerse con inclinaciones inferiores a 45°, y los de compactación no han presentado problemas especiales con inclinaciones de 30° respecto a la horizontal. Las separaciones de la malla de taladros estarán entre 2 y 4 m, siendo menor para las áreas más flojas.
- Los consumos medios resultantes fueron de unos 400 Kg/m de cemento para el Jet grouting simple, mientras que las inyecciones de compactación requirieron unos 900 l/m de mortero por encima de los 5 m de profundidad, y unos 300 l/m en las profundidades restantes inferiores.
- Los resultados obtenidos se han comprobado en la zona de prueba y en los bordes de las calzadas, siendo los ensayos penetrométricos Borros, y sobretodo, los ensayos cross hole los procedimientos más fiables para ello. Según estos resultados, la compacidad final obtenida ha sido media, con los valores mayores por encima de los 5 m de profundidad, tal como estaba especificado en proyecto. Además, las inyecciones de compactación permitieron recuperar de modo generalizado un asiento del firme de unos 20-50 mm, con máximos de hasta 190 mm en las áreas con mayores asientos iniciales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Demarcación de Carreteras del estado de Madrid por su apoyo y financiación, especialmente a D. Roberto Alberola, a D. José Ramón Paramio. También a D. Juan Jiménez Ogallar, Director de las Obras y a su ayudante D. Francisco Borreguero del Barrio por sus elevados interés y estímulo Técnicos durante la ejecución de las obras. Los trabajos de campo corrieron a cargo de D. Juan Antonio García y el control lo realizó E.I.S., a todos ellos agradecemos su colaboración.

8. REFERENCIAS TÉCNICAS

- OTEO, C., SOPEÑA, L. 1991. The use of jet grouting to improve loose fills. Proc. 10 th ECSMEF: 903-906 Rotterdam: Balkema.
- OTEO, C., SOPEÑA, L. 1993. Deep treatment of uncontrolled urban fills for the construction of a high capacity road system. Proc. Green '93: 563-573 Rotterdam: Balkema.
- SOLA, P.R., ROMO, P. 1995. Ground consolidation at the El Sacedal Madrid Metro train depot. Unpublished report.

ferrovial

FERROVIAL CONSIGUE LA GESTIÓN DEL AEROPUERTO DE ANTOFAGASTA, EN CHILE



Ferrovial, a través de su filial Cintra, ha resultado adjudicataria del concurso convocado por el Gobierno chileno para la Concesión del Terminal de Pasajeros del Aeropuerto "Cerro Moreno" de Antofagasta, la 2ª Región de Chile. Cintra explotará en exclusiva el aeropuerto por un plazo de diez años. El aeropuerto dispone de un tráfico actual de 500.000 pasajeros anuales, que se estima se eleve a 1.400.000 pasajeros anuales al final de la concesión.

1.700 millones de inversión

El aeropuerto de Antofagasta requerirá durante la concesión de una inversión cercana a los 1.700 millones de pesetas, con el fin de adecuar las instalaciones y edificios existentes para hacer frente a los fuertes incrementos de la demanda durante los próximos años.

Cintra tuvo que competir con otros cuatro consorcios competidores, entre ellos, el liderado por Lan Chile —actual operador de los aeropuertos chilenos Iquique y Calama— y el liderado por el operador del Aeropuerto de Concepción.