

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: C5
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

EJEMPLOS DE TRATAMIENTOS

PONENTES: Pedro Sola

I.C.C.P.

GEOCISA

Día: 28/05/07

Hora: 18:15 A 20:15

MASTER UNIVERSITARIO DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Madrid, junio 2006

**"Técnicas especiales en los tratamientos del terreno: INYECCIONES
DE DESPLAZAMIENTO Y COMPENSACIÓN**

Pedro R. Sola Casado

***Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Desarrollo
GEOCISA, Geotecnia y Cimientos, S.A.***

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN

2. INYECCIONES DE DESPLAZAMIENTO

2.1. Concepto y objetivos

2.2. Sistema de inyección y mezclas

2.3. Campo de aplicación

2.4. Taladros y admisiones

2.5. Presiones y resistencia

2.6. Ejemplos

2.6.1. Recalce de un edificio en Santa Eugenia (Madrid)

2.6.2. Recalce de Cocheras El Sacedal (Metro de Madrid)

3. INYECCIONES DE COMPENSACIÓN

3.1. Descripción general

3.2. Objetivos y aplicaciones

3.3. Principios básicos

3.4. Modelo teórico

3.5. Procedimiento de inyección

3.6. Taladros

3.7. Programa de inyecciones

3.8. Controles

3.9. Ejemplos

3.9.1. Metro de Londres: JLE 102, Tramo Greenpark – Waterloo

3.9.2. Metro de Lisboa: Línea D, Tramo Vale de Chelas – Oriente

3.9.3. Metro de Madrid: Ampliación 1.996 – 2.001

4. BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCIÓN

En construcción, la inyección de lechadas o morteros de cemento se generalizó entre los ingenieros franceses y británicos, a finales del siglo XIX, en los trabajos de aprovechamientos hidráulicos, tanto en la impermeabilización y consolidación de las cimentaciones de presas de fábrica, como en el tratamiento de relleno y cosido del trasdós de los revestimientos de tuneles y la corona afectada por la decompresión de la excavación. De principios del siglo XX, en 1931, son los estudios del profesor Lugeon que definían, función de la admisión en los ensayos de agua a presión, la profundidad que debería alcanzar la pantalla de impermeabilización de una presa.

La generalización de los tratamientos de macizos rocosos con lechadas de cemento y sus buenos resultados promocionaron la extrapolación de estas lechadas a trabajos en suelos, sobre todo cuaternarios aluviales, y la búsqueda de nuevos procedimientos que ampliasen su campo de aplicación.

El obstáculo más importante a salvar era la dificultad de que las lechadas de cemento penetraran, o se difundieran, por los huecos de los suelos sin romper su estructura, y por ende, dar lugar a movimientos parásitos incontrolados.

El nuevo camino más natural para resolver este problema fue el empleo de mezclas más finas y penetrantes, como las lechadas estables, las inyecciones químicas y los microcementos. Sin embargo, otra alternativa, nacida a finales de los años cincuenta, fueron las inyecciones de fracturación ("Claquage" o "squeeze"), que aprovechan la fracturación hidráulica, inducida por las altas presiones al romper el terreno, para colmatar con la mezcla inyectada las fisuras así creadas junto con los posibles huecos y fisuras naturales (figura 1). El resultado final es un terreno armado e impermeabilizado por la red de fisuras rellenas con la mezcla inyectada, así como consolidado, en cierto grado, por los pequeños desplazamientos del proceso de hidrofracturación.

Por otra parte, al comienzo de los años cincuenta, las inyecciones con morteros secos o de consistencia muy baja (<60 mm), comenzaron a emplearse para rellenar huecos bajo pavimentos y estructuras. Poco después, tales inyecciones permitieron levantar de forma controlada ("jacking"), losas y cimentaciones, dado que esas mezclas formaban una intrusión homogénea que permanecía muy cerca del punto de inyección.

Algo más tarde, estas experiencias condujeron a las inyecciones de compactación ("compaction"), ya descritas por Graf en 1969, que se basan en la expansión, sin penetrar en el terreno compresible y causando una rotura en forma de esfera, o cuña, alrededor del punto de inyección, de mezclas muy viscosas que provocan inicialmente compresión en su entorno y desplazamientos después (figura 1). El resultado es una zona tratada englobando bulbos de mezcla inyectada con el terreno entre ellos más compacto, pudiéndose producir

desplazamientos, significativos y controlados, durante el proceso de inyección, que pueden permitir compensar movimientos ("Compensation") del terreno, cimentaciones de estructuras, u otras construcciones.

Este ultimo tipo de inyecciones es el que se trata principalmente en lo que sigue haciendo especial mención de las aplicaciones más recientes y prometedoras, tanto para la mejora o densificación del terreno, inyecciones de compactación o baja movilidad ("low mobility grouting" LMG), como para la compensación de movimientos, inyecciones de compensación ("Compensation grouting")

En todo caso conviene tener presente que la separación entre las inyecciones de fracturación y de desplazamiento es clara en el concepto, pero no tan nitida en los casos reales. En definitiva, el que predomine uno u otro efecto dependerá del terreno inicial, de la mezcla y procedimiento de inyección, y sobre todo, del resultado final buscado.

2. INYECCIONES DE DESPLAZAMIENTO

2.1. Concepto y objetivos

En la última década, han comenzado a recibir este nombre las inyecciones de compactación, y a veces de fracturación, cuando tanto en los recalces de estructuras (figura 2) y tratamientos de terrenos (figura 3), como en la construcción de tuneles urbanos (figura 4), se aplican bien para mejorar las propiedades del terreno y eliminar los movimientos que dañan estructuras, bien para impedir los debidos a la subsidencia de las excavaciones profundas

Como se ha comentado ambos tipos de inyección rompen el terreno y, sólo difieren en que la compactación induce tensiones de densificación o consolidación localizadas en el punto de inyección sin mezclarse con el suelo, mientras que la fracturación interesa a mayor volumen de terreno, a favor de las fisuras rellenas por la mezcla por hidrofracturación, o siguiendo discontinuidades preexistentes. Según el objetivo buscado y el terreno tratado, se utiliza uno u otro tipo de inyección.

Las mezclas empleadas en cada caso facilitan estos mecanismos diferentes: en la compactación, un mortero seco permanece alrededor del punto de inyección formando "bolas o cuñas planas"; en la fracturación, una mezcla más fluida y penetrante fisura el terreno y forma una red de lajas, mucho más delgadas que en el caso anterior.

De modo general puede afirmarse que cuando se pretende provocar la mejora de un suelo por densificación, así como cuando el objetivo comprende levantamientos controlados y/o compensar movimientos de subsidencia, debe predominar claramente el efecto de desplazamiento o compactación sobre el de fracturación.

En todo caso, el resultado de ambos procesos es doble:

- En primer lugar se obtiene una mejora del terreno tratado tanto por la densificación o consolidación del mismo entre puntos de inyección, como por el "armado" o rigidización provocado por las "bolas", "cuñas", o "lajas" de mezcla inyectada.
- Y después pueden conseguirse expansiones o levantamientos controlados como consecuencia de los desplazamientos inducidos por la mezcla a presión actuando en grandes superficies. Este último efecto es el que hace posible la compensación de movimientos.

2.2. Sistema de inyección y mezclas

La técnica típica de las inyecciones de compactación comprende taladros verticales, atravesando el terreno a mejorar hasta el techo de un nivel competente, en los que se introduce con hincia o perforación una entubación recuperable de acero

El método de inyección más frecuente es de abajo arriba, por escalones de 0,3 – 0,6 m, extrayendo el tubo a medida que se inyecta el mortero. A veces se procede de arriba-abajo, perforando los bulbos del mortero inyectado en cada escalón, hasta alcanzar el techo del nivel competente

La conveniencia de poder repetir los episodios de inyección en un mismo punto sin nuevos taladros, así como de poder inyectar con taladros muy alejados de la vertical ha llevado a intentar emplear el procedimiento clásico de los tubos-manguito

Este procedimiento recogido en la figura 5, es el que consigue un mejor control del flujo de inyección, al diferenciar cada tramo de un taladro, y sobre todo, permite efectuar reinyecciones, usando, incluso, mezclas diferentes, en taladros de cualquier dirección, diferente de la vertical. Estas características lo han impuesto rotundamente en las inyecciones tanto de impregnación como de fracturación.

El inconveniente principal de este sistema hasta hace poco era que solo podía emplearse con mezclas muy fluidas, tipo lechada de cemento como máximo. Esta limitación lo hacía inaplicable cuando fuera preciso emplear mezclas secas o morteros como es el caso típico de las inyecciones de desplazamiento para mejora del terreno (inyecciones de compactación). No obstante, en los últimos años Geocisa ha modificado los diseños tradicionales, y ha logrado inyectar, sin limitación en el número de reinyecciones, mezclas de cemento con consistencia de mortero semiseco (cono de Abrams 12 - 18 cm).

Los morteros más apropiados para las inyecciones de compactación son suelos-cemento, con cono de 20 a 40 mm, que contienen cemento ordinario, arena para hormigones, y del 25 al 75% del total de materiales finos como limo, cenizas volantes u otros agregados puzolánicos.

La arena es necesaria para suministrar fricción interna a la mezcla y permitir el control de inyección sin que se aleje del punto de inyección. Las arcillas u otros plastificantes que facilitan el bombeo, disminuyen la fricción interna de la mezcla y facilitan la fracturación hidráulica. En general, conviene que al menos un 20% del árido tenga un tamaño no inferior a 5 mm.

2.3. Campo de aplicación

El campo más específico de las inyecciones de compactación es la mejora de suelos granulares de baja densidad relativa, con menos del 15-20% de finos si están saturados, ya sea de forma "masiva" para la cimentación de estructuras, pavimentos o terraplenes, ya sea de forma "localizada" en columnas para recalce de elementos estructurales

Las limitaciones más importantes están en las sobrepresiones intersticiales que pueden impedir una mejora efectiva de suelos salitrados poco permeables, y en la falta de control de la fracturación – desplazamiento, que ocasiona efectos indeseables o daños en el entorno de los taladros de inyección

En relación con la mejora de propiedades del terreno tratado, no debe olvidarse el aumento de uniformidad provocado por estas inyecciones, pues la intensidad del tratamiento suele ser mayor (admisiones de mezcla) en los puntos débiles o menos competentes que en el resto

En los últimos tiempos, esta técnica se ha comenzado a emplear para tratar terrenos calcáreos o yesíferos con karstificaciones, e incluso para la obturación y sellado de las vías o filtraciones de agua por el cuerpo y/o cimientto de las presas.

2.4. Taladros y admisiones

Los taladros para las inyecciones de compactación suelen ser verticales, con 50 a 100 mm de diámetro, perforados con hınca de una tubería recuperable de acero, o con perforación entubada.

La disposición suele ser en malla cuadrada con separaciones entre taladros de 2,5 a 3,5 m, que suelen ejecutarse, de forma alternada, en dos fases (primarios y secundarios). Esto último, comenzando por una zona representativa de todo el tratamiento, permite "afinar" y comprobar la separación de la malla, pues es conveniente que las admisiones de los taladros secundarios sean algo inferiores a las obtenidas con los primarios.

Al igual que en las inyecciones clásicas de impregnación, un tratamiento debe comenzarse por el perímetro de la superficie a mejorar, y continuar hacia su interior procurando conseguir un cierto efecto de "recintado".

Las admisiones pueden ser muy variables, pues el volumen inyectado debe rellenar los posibles huecos, (terrenos kársticos), y/o desplazar el suelo entre taladros para densificarlo.

En general, el volumen inyectado suele estar entre el 10 y 15% del volumen teórico de terreno tratado, con admisiones en torno a los 0,3 a 0,5 m³ por metro lineal de taladro

El volumen teórico a inyectar para densificar o compactar un suelo puede calcularse mediante:

$$V_i = \frac{df - d_o}{df} 100$$

siendo

V_i = volumen teórico efectivo a inyectar en porcentaje

d_o = densidad inicial del suelo

df = densidad final del suelo

No obstante, el volumen de mezcla que deberá inyectarse será algo superior (10 al 20%) para tener en cuenta las pérdidas por escapes, extrusión de la mezcla, etc.

En las inyecciones de compactación, los escalones de inyección dentro de cada taladro se suelen inyectar con un único episodio hasta conseguir el "rechazo", o cese de inyección, por alguna de las tres siguientes causas o criterios:

- Se alcanza el total del volumen de mezcla previsto para ese tramo del taladro
- Se alcanza la presión máxima especificada para un caudal también establecido.
- Se produce el levantamiento, o rotura con escapes, de la superficie del terreno

2.5. Presiones y resistencias

La presión de inyección, asociada al tipo de mezcla y caudal que penetra en el terreno es el parámetro principal a tener en cuenta para las bombas a emplear. Esta presión es la suma de la que produce la rotura en el terreno para introducir la mezcla, y de las pérdidas en el sistema de inyección que se elevan drásticamente con la viscosidad de la mezcla

Es conveniente que la presión tenga un crecimiento lento, lo cual puede implicar caudales de inyección pequeños, por debajo de 10 – 20 l/m. Los descensos de presión, dentro del crecimiento general, pueden ser debidos a llenado de huecos, escapes a conductos, o pérdidas de confinamiento lateral o superficial del terreno inyectado.

Las presiones en compactación dependen del terreno a mejorar, y de la profundidad y caudal de la inyección. En general, para profundidades por debajo de los 6 m se suele llegar hasta 45-60 bares, mientras que para los 3-4 m de profundidad se alcanzan 30-40 bares, y para los 2-3 m, unos 20-25 bares.

En todo caso, la presión que actúa en el terreno viene limitada por la resistencia del mismo a la rotura por levantamiento, que puede considerarse igual al peso del tronco de cono de terreno situado por encima del punto de inyección, con lo que su valor máximo será:

$$p_i = \frac{\gamma V_c}{A_i}$$

siendo

- p_i = presión máxima de inyección
- V_c = volumen del tronco de cono
- γ = peso específico del terreno
- A_i = sección horizontal de la intrusión (bola, cuña, laja) de inyección

La resistencia final de mezcla inyectada puede variar según el objetivo del tratamiento del terreno.

En los casos más frecuentes, donde se busca la compactación, o densificación, del suelo flojo, la resistencia de la mezcla no es limitativa, y bastará con que no sea inferior a la del terreno MEJORADO, lo que podría llevar a incrementos con la profundidad. En general, las resistencias suelen estar entre 0,4 y 2,0 MPa (4 a 20 kp/cm²) para el ensayo de compresión simple.

Cuando se trata de un recalce en el que la inyección debe formar "columnas" bajo las cimentaciones de una estructura, la resistencia de la mezcla es un factor crítico que debe evaluarse a partir de las cargas que deben ser soportadas y del diámetro y número de "columnas" de inyección. Además, al igual que en los pilotes, la resistencia a hundimiento de esas "columnas" de inyección debe comprobarse como la suma de la resistencia por punta y por fuste. Esta última puede estimarse con el empuje al reposo para las presiones horizontales.

Cuando la inyección debe formar conexiones estructurales en un macizo rocoso, con o sin huecos kársticos, la resistencia y el volumen de la mezcla deben ser suficientes para distribuir las tensiones entre los bloques de roca matriz. Es necesario un estudio cuidadoso, pues hay muchos factores a tener en cuenta, como tamaño y tipo de relleno de los huecos o juntas, grado de contacto entre la mezcla y la roca, etc. En general, las resistencias en estos casos suelen estar entre 7,0 y 30 MPa (70 y 300 kp/cm²).

2.6. Ejemplos

2.6.1. Recalce de un edificio en Santa Eugenia (Madrid)

En los recalces o mejora del terreno, en donde se vienen utilizando de antiguo las inyecciones de compactación, la última novedad desde finales de los ochenta, está siendo su empleo en terrenos kársticos (calcáreos o yesíferos), como el caso de un edificio dañado en Santa Eugenia (Madrid) (figura 6)

Este problema de recalce, en fase final de solución en estos momentos, ha tenido su origen en la subsidencia de un karst yesífero, situado entre 18 y 36 m de profundidad, que ha producido asentamientos totales en parte de los pilares de hasta 80-100 mm, con velocidades de hasta 1-2 mm/mes y distorsiones angulares entre pilares mayores de 1/100 (figura 7A).

El edificio tiene 52 x 28 m² de planta, ocho alturas y un sótano, estructura porticada de hormigón armado con luces de 4,5 a 7,0 m, y cimentación con pilotes "in situ" de hormigón armado con 12 a 14 m de longitud.

El corte tipo del terreno de arriba a abajo es: relleno artificial limo-arcilloso hasta los 2-4 m, arcillas y margas terciarias con calizas y sílex hasta 15-18 m, yeso masivo y margas yesíferas karstificados hasta unos 34 m, limo arcilloso yesífero muy blando y flojo hasta unos 36 m, y sustrato yesífero rocoso poco alterado y muy duro.

Tras el inicio de un primer recalce con micropilotes previstos hasta unos 25 m de profundidad, la solución definitiva del problema ha comprendido las siguientes etapas en lo relativo al recalce de la cimentación:

- Etapas 1ª: Acondicionamiento de estructura y del terreno

Ha comprendido:

- a) Instalación de referencias en los pilares para seguimiento con nivelación de precisión de los movimientos verticales, respecto a bases fijas ancladas en el sustrato inmóvil. Instrumentación de las grietas más representativas para seguir la evolución de los daños.
- b) Construcción de un apeo provisional en los pilares afectados para impedir un colapso súbito durante los trabajos de inyección (figura 8).

En cada pilar, un collar metálico con bulones pretensados transmite la carga a dos dinteles metálicos cimentados directamente sobre el terreno tras una mejora previa del relleno superficial con Jet-Grouting T1.

La puesta en carga se realizó, y se ha ido comprobando periódicamente, con dos parejas de gatos hidráulicos que permiten acuñar los dos soportes intermedios, que en cada pilar son los que transmiten la carga de modo permanente.

Este dispositivo además de reducir el riesgo de asientos bruscos ante el colapso de cavidades bajo los pilotes, ha permitido conocer el orden de magnitud de la carga en cada pilar, y lo que es más importante, su evolución con el tiempo.

- c) Inyección de acondicionamiento con mortero fluido, por gravedad, para recintar el área con problemas y rellenar huecos y grandes discontinuidades

En total se han efectuado 114 taladros de unos 42 m de longitud, en los que se han inyectado 804 m³ de mortero, con admisiones medias de 6 m³; variando entre 0,5 y 91 m³; por taladro, lo que da una idea muy expresiva de la irregularidad del terreno karstificado.

- Etapas 2ª: Mejora del terreno y estabilización de los asientos

Se ha efectuado con inyecciones de compactación por medio de una red de 32 taladros, con unos 3 m de separación, cubriendo la parte del edificio con movimientos (figura 9).

Se han realizado dos fases, comenzando con taladros primarios y finalizando con los secundarios, y la inyección con mortero seco de cada taladro se ha hecho de abajo a arriba en tramos de 1 a 2 m de longitud. Las presiones de rechazo han estado entre 20 y 30 bares, dándose por finalizado cada taladro cuando se obtenía un levantamiento de unos 5 mm, lo que se ha producido al inyectar hacia los 18 m de profundidad, justo por encima del techo del tramo karstificado.

El volumen de mortero inyectado en cada taladro ha sido de unos 20 m³; como media, oscilando entre 10 y 45 m³; y el caudal medio de unos 2 m³; cada hora. Las admisiones más importantes han sido en los 2 m más profundos del Karst (limos arcillosos yesíferos), donde se han tenido más de 4 m³/m, cifra muy por encima del 0,5 m³/m máximo obtenido en tratamientos normales de densificación (figura 10A)

El control de movimientos verticales se ha realizado con dos procesos independientes de nivelación con 0,1 mm de precisión, uno permanente y continuo con los trabajos, y otro de comprobación cada fin de semana.

El seguimiento de todos esos datos se ha efectuado con un programa específico de ordenador que ha permitido obtener "cuasi en tiempo real" la influencia de la inyección de cada taladro, la evolución en el tiempo de los movimientos y la distribución de las distorsiones angulares entre pilares.

- Etapas 3ª: Compensación de asientos diferenciales.

Una vez comprobada la efectividad de la mejora del terreno con la estabilización de los asientos, se ha aliviado el estado de la estructura reduciendo las distorsiones angulares, por medio del levantamiento de los pilares con asientos mayores.

Las admisiones medias de esta segunda fase de inyección se indican en la figura 10B, mientras que la evolución de los movimientos verticales se muestra en la figura 7B.

2.6.2. Recalce de Cocheras El Sacedal (Metro de Madrid)

El depósito 7 de las Cocheras de El Sacedal constituye el cierre de la línea 9 del Metro de Madrid. Se utiliza fundamentalmente para encerrar los coches de Metro de la citada línea.

Este depósito presentaba una patología de asientos en la losa de hormigón sobre la que se emplazan las vías, de tal magnitud (casi 200 mm) que afectaba a su operatividad. La causa de los citados asientos se debía a las malas propiedades del terreno que sustenta la losa, constituido por unos rellenos artificiales de diversa naturaleza con compactación deficiente.

La solución más inmediata y convencional consistía en levantar toda la playa de vías, lo cual implicaba el picado de toda la losa de hormigón; además del tratamiento de compactación del terreno para evitar futuros asentamientos. Esta actuación suponía unos enormes costes y obligaba a inutilizar temporalmente el depósito, afectando al funcionamiento de toda la línea 9.

Geocisa planteó la solución, finalmente adoptada, de realizar inyecciones de compactación y compensación de asientos bajo la playa de vías. Este método permitía, a un coste muy inferior, mantener operativas, en todo momento, seis de las ocho vías que constituyen la cochera (figura 11).

En primer lugar se realizaron inyecciones en un área de pruebas situada en la zona de máximos asentamientos, que consistieron en diversos taladros de inyección situados tanto debajo de la vía como debajo de los andenes. Estas pruebas permitieron fijar los parámetros de inyección (tipo de mortero a emplear, caudales, presiones) y los parámetros geométricos (forma de los domos de levantamiento, superficie afectada, efectividad de la inyección), tal como se aprecia en la figura 12.

Se decidió realizar el tratamiento del terreno en dos fases, una primera de relleno de huecos y compactación del suelo y una segunda de compensación de asientos

En la primera fase se adoptó una malla de taladros ligeramente inclinados y con separaciones entre 2 y 4 m con los puntos de inyección situados bajo el eje de la vía. Las profundidades del tratamiento se situaron en la franja comprendida entre 3 y 8 m. La mezcla empleada ha sido un mortero especial de cemento con un cono entre 80 y 160 mm, que ha permitido la auto-obturación en los taladros y la compactación del relleno al formar bolsas localizadas en el punto de inyección. Las admisiones medias fueron 750 l/m, en función del volumen de huecos existente.

Para la segunda fase se empleó una malla de talados de iguales dimensiones que la anterior e intercalada con ésta, pero con la diferencia de que la profundidad de inyección se fijó constante a 4 m. Además, las admisiones fueron variables para producir los levantamientos puntuales necesarios para la nivelación de las vías con los márgenes de tolerancia fijados en proyecto.

El resultado final fue una recuperación de los asientos de la playa de vías conforme a lo exigido por el cliente y que permite la total operatividad de las cocheras sin haberse producido distorsiones en el servicio de la línea 9 del Metro de Madrid como consecuencia de la obra (figura 13)

3. INYECCIONES DE COMPENSACIÓN

3.1. Descripción general

3.1.1. Contexto

La construcción de túneles en un medio urbano representa un desafío en cuanto a las actuaciones necesarias para el control de los trabajos que garantice la seguridad tanto de la estabilidad de los túneles como de las estructuras y servicios ubicados en las inmediaciones de las excavaciones. Como parte de este control están los tratamientos de terreno necesarios para la estabilidad del frente de excavación y para que los movimientos provocados por esta última no superen los límites admisibles.

En los últimos tiempos, la posible subsidencia debida a la construcción de túneles urbanos ha cobrado especial importancia, dado que una funcionalidad y servicios adecuados requieren trazados bajo las edificaciones y/o instalaciones preexistentes a profundidades relativamente pequeñas, en general en torno a los 20 m. Además, este problema potencial se acrecienta cuando tanto las exigencias de periodos constructivos cortos, como la concurrencia de actuaciones en diferentes tramos, lleva a que coincidan abiertos simultáneamente numerosos frentes de excavación, y sobre todo, a velocidades de avance muy elevadas, con medias por encima de 15 – 20 m diarios para las modernas máquinas tuneladoras.

En terrenos no rocosos, el medio más eficaz para combatir la subsidencia, y en especial las inestabilidades del frente, son, desde luego, los escudos con presión en el frente de excavación, ya sea con lodo bentoníticos (hidroescudos), o con el propio terreno excavado (escudos de presión de tierras, EPB en inglés). Puede afirmarse que en el empleo de máquinas EPB ha estado el gran éxito de la Ampliación del Metro de Madrid, recientemente culminada.

Sin embargo, los escudos modernos no siempre son la solución. Unas veces como en el caso de las estaciones de Metro o de grandes cavernas, porque no existen, o no son rentables, máquinas para las grandes secciones a excavar, otras porque existen irregularidades en el terreno, como lentejones rocosos duros o muy blandos, que pueden plantear problemas incluso con estas máquinas.

En estas ocasiones singulares, es cuando será preciso recurrir a los últimos avances que la técnica ofrece para minimizar los puntos del trazado con mayor probabilidad de este tipo de riesgos con medidas constructivas especiales como los tratamientos con inyección.

3.1.2. Aspectos generales

En la última década, han comenzado a recibir el nombre de inyecciones de compensación las inyecciones de compactación, y a veces de fracturación, cuando tanto en los recalces de estructuras y tratamientos de terreno, como en la construcción de tuneles urbanos, se aplican bien para mejorar las propiedades del terreno y eliminar los movimientos que dañan estructuras, bien para impedir los debidos a la subsidencia de las excavaciones profundas.

Ambos tipos de inyección rompen el terreno, y sólo difieren en que la compactación induce tensiones de densificación o consolidación localizadas en el punto de inyección, mientras que la fracturación interesa a mayor volumen de terreno, a favor de las fisuras rellenas por la mezcla por hidrofracturación, o siguiendo discontinuidades preexistentes. Según el objetivo buscado y el terreno tratado, se utiliza uno u otro tipo de inyección.

Las mezclas empleadas en cada caso facilitan estos mecanismos diferentes: en la compactación, un mortero seco permanece alrededor del punto de inyección formando "bolas o cuñas planas" en la fracturación, una mezcla más fluida y penetrante fisura el terreno y forma una red de lajas, muy más delgadas que en el caso anterior.

De modo general puede afirmarse que cuando se pretende provocar levantamientos controlados y/o compensar movimientos de subsidencia, debe predominar claramente el efecto de desplazamiento sobre el de fracturación.

Los desplazamientos en el entorno de los puntos de inyección comienzan a producirse en cuanto la presión es suficiente para romper el terreno. De forma esquemática, puede hablarse de una primera fase de desplazamientos que "densifica" el terreno en un radio de 1 a 2 m del punto de inyección (Fase de acondicionamiento), y de una segunda que produce un levantamiento "neto", en la medida que la mezcla inyectada es estable en volumen (Fase de compensación).

Esta segunda fase tiene un comportamiento muy difícil de predecir teóricamente, dado el cumulo de factores que entran en juego, relacionados tanto con el terreno como con la propia inyección. No obstante, la experiencia ha mostrado que la respuesta a un incremento de volumen, inyectado en la segunda fase, sigue de modo aproximado a una superficie de gauss (figura 14). Con esta base, Geocisa ha desarrollado su modelo SCOMET 3D que convenientemente "tarado" con resultados experimentales, permite predecir el resultados final de un conjunto de puntos de inyección con múltiples reinyecciones (figura 15).

3.8. Ejemplos

3.8.1. Metro de Londres: JLE 102, Tramo Greenpark – Waterloo

El Contrato 102 para la construcción de la Prolongación de la Línea Jubilee, desde Green Park a Waterloo, del Metro de Londres comprende la construcción de casi dos kilómetros de tuneles bajo o muy cerca de edificios con gran valor monumental e histórico en las áreas de St. James, Westminster y Waterloo (figura 16)

El corte esquemático del terreno atravesado está compuesto, de arriba hacia abajo, por 3 a 6 m de relleno y aluvial limo-arcilloso, 4 a 8 m de terraza con gravas y arenas (Terrace Gravels), y unos 30 m de la arcilla de Londres (London Clay). El nivel freático suele estar en el techo de la terraza, variando algo con la marea (figura 17)

Los tramos entre estaciones se han previsto con un doble túnel, de 4,35 m de diámetro interior, excavado con un escudo de frente abierto y revestimiento con dovelas expandidas (figura 18).

Las estaciones con túneles de 7,00 m de diámetro interior, y las demás obras complementarias (accesos y conexiones), se ejecutarán con el Nuevo Método Austriaco (NATM). Este tipo de obras será importante en la conexión en St. James con la Línea Jubilee existente, y sobre todo, en las estaciones de Westminster y Waterloo (figura 19).

El proyecto ha previsto dos tipos diferentes: tratamientos de impermeabilización (pemeation) y/o de compensación de movimientos (compensation).

Los tratamientos de impermeabilización se han prescrito cuando el recubrimiento de la arcilla de Londres sobre la clave de los tuneles es inferior a 6 m.

Tal situación se ha dado en las áreas de las estaciones de Westminster y Waterloo, donde se han tratado unos 3 m de espesor de la terraza de gravas, por medio de inyecciones clásicas de impregnación con bentonita - cemento y silicato

Los tratamientos de compensación se han realizado bajo los edificios en donde la excavación de los tuneles hubiera provocado movimientos inadmisibles.

De acuerdo con las previsiones de proyecto, tal circunstancia se ha dado en las áreas de St. James, Westminster y Waterloo, en las que ha sido necesario disminuir los movimientos de subsidencia, por medio de inyecciones de compactación o fracturación, hasta lograr un daño en los edificios inferior al grado 2 de la escala de Burland (BRE)

Un condicionante importante ha sido que todos estos tratamientos NO se han podido ejecutar desde superficie, excepto dentro de una pequeña área de la estación de Waterloo.

Las características del terreno, la gran magnitud e importancia de los trabajos de compensación y los condicionantes del entorno y del ritmo de excavación de los tuneles han aconsejado:

- Efectuar la inyección de compensación tan cerca como sea posible de la clave de los túneles sin que estos resulten dañados, al ritmo dado por la excavación (figuras 20 y 21)

De este modo se ha disminuido la superficie de actuación de las inyecciones de compensación, reduciendo la longitud de perforación y de TAM de la red taladros, y se ha alejado el tratamiento del plano de apoyo de las cimentaciones de los edificios, aumentando la seguridad frente a irregularidades locales e imprevistos indeseables.

Además, como el ritmo de inyección se ha acoplado al de excavación del túnel, inyectando los volúmenes de mezcla correspondientes a la pérdida de sección del túnel producida en cada momento, los edificios han permanecido casi sin subsidencia con movimientos verticales (descensos y/o ascensos) muy pequeños (menos de 5 mm).

La figura 22 presenta una sección transversal al túnel con los asientos medidos en superficie cerca del estribo del Puente de Westminster, donde se realizó la primera inyección concurrente con la excavación del túnel más profundo (Westbound tunnel). La pérdida de sección medida fue del 3,3 % y el volumen total inyectado fue del 3% (1% en fase concurrente con la excavación y 2% en fase observacional después de la excavación). Con ello el asiento máximo se redujo a unos 3 mm.

La figura 23 es similar a la anterior en el edificio del RAC. Los movimientos calculados sin compensación eran de hasta 28 mm, y los medidos después de la inyección concurrente con la excavación del túnel estuvieron entre cero y 2 mm de ascenso.

- Efectuar la inyección de compensación en el mismo tipo de terreno en que se ha excavado el túnel; esto es, en la arcilla de Londres.

De este modo puede conseguirse el acople en LA VELOCIDAD entre la fuente de los movimientos (la pérdida de sección del túnel) y la compensación provocada por las inyecciones manteniendo los movimientos de los edificios dentro de los márgenes admisibles.

De acuerdo con la experiencia, los movimientos producidos por los tuneles excavados en arcillas saturadas como la arcilla de Londres, tardan en producirse mucho más tiempo que los de tuneles excavados en suelos granulares, en los que la respuesta es muy rápida (24 a 48 horas para el total del asiento desde el paso del escudo bajo un punto dado).

Actuar, por tanto, con las inyecciones de compensación en la grava cuando el tunel se excava en la arcilla de Londres, obligaría a varios escalones de inyección dentro de cada fase de las obras de excavación para no provocar un levantamiento inadmisible de los edificios, al "adelantarse" el efecto de la inyección a la subsidencia provocada por el tunel.

Por el contrario, con las inyecciones de compensación en la propia arcilla de Londres y muy cerca de la clave del tunel, el acople de velocidad entre su efecto y la subsidencia provocada por el tunel se logra de un modo natural, reduciendo al mínimo, los escalones de inyección dentro de cada fase de las obras de excavación.

- Emplear un procedimiento de inyección que ha permitido inyectar, con el máximo control posible, varias veces por medio de los mismos taladros; esto es, el procedimiento de tubos-manguito (TAM)

De este modo, mucho antes de la excavación del tunel, han quedado perforados e instalados los TAM en la red de taladros, y ha podido efectuarse una inyección preliminar de acondicionamiento (pretratamiento) para comprobar el funcionamiento de los equipos y sistemas de control, así como el grado de exactitud de los modelos de diseño.

Esto último tanto para las inyecciones de pretratamiento como para la compensación de la subsidencia de la excavación del tunel, se ha efectuado a partir de la relación entre los volúmenes de inyección y los movimientos de ascenso medidos con la instrumentación.

Estos resultados han permitido mejorar los planes de inyección de compensación previstos a partir de los modelos teóricos, de modo que las modificaciones durante la ejecución han sido mínimas.

La compensación de los movimientos de la torre del Big Ben es un ejemplo ilustrativo de todo el proceso, pues la fuente de movimientos además de la excavación de los tuneles, ha sido la gran excavación de la "caja" de la nueva estación de Westminster (figura 24).

La inyección para compensar estos últimos movimientos se diseñó con el programa SCOMET - 3D (figura 25), y los resultados obtenidos se muestran en la figura 26, en forma de deflexiones en el extremo superior de la torre, tras periódicas reinyecciones acompañadas a las excavaciones

- Emplear para la inyección una mezcla especial con gran cohesión y estabilidad volumétrica (para pérdida de agua y retracción)

De este modo, los planos de fracturación en la arcilla se han producido y han quedado confinados en los lugares previstos, mientras que los volúmenes a inyectar serán inferiores a la mitad del volumen que sería preciso con una lechada de cemento convencional, con el consiguiente ahorro de escalones y operaciones de inyección dentro de cada fase de las obras de excavación.

3.8.2. Metro de Lisboa: Línea D, Tramo Vale de Chelas - Oriente

En el marco de los diversos trabajos que se están ejecutando en Lisboa con motivo de la EXPO 98, se proyectó la prolongación de la línea D hacia la zona misma de la EXPO. El tramo Vale de Chelas/Oriente, con una longitud de 2.8 km, fue adjudicado a la UTE METREXPO (SPI Batignolles, Fomento de Construcciones y Contratas, Cobear, Somec y A Veiga)

En una de las secciones de este tramo, desde Vale de Chelas a Chelas, donde el túnel se excavaba con escudo de presión de tierras (EPB) (con 10 m de diámetro y avances medios de 10 m/día), la traza discurría, en un área de unos 100 m de longitud, por debajo de una zona con edificaciones cimentadas con pilotes que debían ser protegidas de los posibles daños por la subsidencia provocada por la excavación del túnel (figura 27)

El terreno en esta zona está constituido por tres niveles: desde superficie hacia abajo, un primer nivel formado por arcillas margosas hasta unos 12 m; bajo este una capa intermedia de caliza a veces oquerosa con espesor variable entre 2 y 4 m, y una última capa de calcarenita muy compacta pero sin apenas cohesión y en ocasiones alterada. En la zona en cuestión el túnel atravesaba estas dos últimas formaciones (figura 28).

GEOCISA fue adjudicataria de la ejecución de los tratamientos de terreno que consisten en un paraguas de jet grouting alrededor de la sección teórica del túnel e inyecciones de compactación - fracturación para compensación de asentamientos para la protección de los edificios circundantes (figura 28). Los trabajos se realizaron entre los meses de Septiembre y Octubre de 1996

El objetivo de las inyecciones de jet grouting (inyección de lechada de cemento a muy alta presión) era de mejorar la calcarenita poco compacta existente y permitir que el escudo pudiera realizar la perforación sin

ningún problema de inestabilidad en el frente de excavación. El sistema de jet grouting usado fue el de jet 1 (inyección simple de lechada de cemento) ejecutado desde el nivel de la calle y tratando debajo del nivel de la caliza (figura 28).

El diseño para las inyecciones de compensación comprendía cuatro fases: la primera de impermeabilización y relleno de huecos del plano de compensación (contacto entre arcillas y caliza). La segunda de precarga del terreno con objeto de compactarlo y prepararlo para la compensación. La tercera de compensación concurrente para recuperar los asientos simultáneamente al momento en que se fueran produciendo al paso del escudo. Y por último la cuarta de compensación observacional en la que se compensarían las zonas donde fuera previsible que se produjeran movimientos inadmisibles tras el paso del escudo. Para estas inyecciones se instalaron tubos a manguitos, reperforando los taladros previos empleados para el tratamiento de jet grouting, para permitir las re-inyecciones de los puntos de inyección tal y como lo requiere el tratamiento de compensación. Las mezclas utilizadas han sido lechadas de cemento con un cierto porcentaje de bentonita. Los niveles tratados han sido el contacto arcilla/caliza y la arcilla justo por encima de la capa de caliza.

En total se han inyectado 1680 m de jet grouting, y 126 5 m³ de mezcla en la inyecciones de compensación. GEOCISA ha realizado un control de movimientos antes, durante, y después de los tratamientos, en la zona de posible influencia, fundamentalmente mediante nivelación de precisión. Las previsiones de proyecto indicaban posibles asientos en torno a 25 - 30 mm correspondientes a una pérdida de sección del orden del 1.0 %. El resultado final del tratamiento ha sido mantener en todo momento los edificios y el terreno en un rango de niveles en torno a 3 - 5 mm de asiento y 4 - 8 mm de levantamiento máximo (figura 29).

3.8.3. Metro de Madrid: Ampliación 1996-2001

Esta ampliación del Metro de Madrid, durante el periodo de 1995 a 1999, con sus 56.3 km de nueva red y 37 estaciones bajo la ciudad de Madrid, supuso el comienzo de un método que en estos momentos se ha convertido en habitual en la construcción de túneles en Madrid cuando se precisa protección de las estructuras cercanas. Las inyecciones de compensación, como medida preventiva o como solución de contingencias, están ampliamente aceptadas. La Dirección General de Infraestructuras de la Comunidad de Madrid ha respaldado su uso y las han incorporado a las técnicas de tratamiento del terreno dentro de sus propios proyectos.

- **Geología en las zonas tratadas**

Todos los casos considerados están dentro de la ciudad de Madrid, siendo la geología similar en las diferentes actuaciones. La capa más superficial consiste en rellenos heterogéneos (3 - 6 m) bajo los cuales existe un aluvial de origen cuaternario (2 - 4 m), seguido por una sucesión de materiales arenosos densos con contenido de finos variable (10 m). Estos materiales forman estratos horizontales de espesor variable y

comprenden capas de arena ("arena de miga": < 25 % de contenido de finos), arena arcillosa ("arena tosquiza": finos entre 25 – 40 %), y arcilla arenosa ("tosco arenoso": 40 a 60 % de finos). Una arcilla firme (60 – 80 % de contenido de finos) se encuentra por debajo de los anteriores materiales

- Trabajos de inyección

Los trabajos fueron llevados a cabo desde pozos, desde superficie o desde dentro de la propia excavación (como en el caso de la caverna de la estación de Guzmán el Bueno). Siguiendo los principios de las inyecciones de compensación, la inyección se sitúa entre la fuente de posibles subsidencias (el túnel) y el área o estructura a proteger. De este modo, los taladros perforados desde superficie estaban inclinados con el objeto de ubicarlos bajo las cimentaciones de los edificios y, en los demás casos (desde pozos y caverna de estación), los taladros se perforaron horizontalmente, o casi horizontalmente, entre las cimentaciones y la clave del túnel.

El diseño del tratamiento tiene en cuenta el asiento previsto en la zona considerada o un porcentaje de pérdida de volumen asumido basado en la experiencia previa en los suelos de Madrid, de manera que con estos datos se puedan determinar los volúmenes a inyectar y la secuencia de inyección. El principio básico es la asunción, basada en datos observados en campo abierto y en trabajos de compensación previos, que la subsidencia producida por la excavación de túneles se aproxima a una distribución Gaussiana y que el material inyectado produce levantamientos en el terreno de una forma simétrica al asiento. La dificultad reside en predecir la pérdida de volumen inducida por la excavación y la relación existente entre el volumen de material inyectado dentro del terreno y el levantamiento efectivo producido. El factor que relaciona ambos volúmenes es conocido como factor de eficiencia.

Una parte muy importante del procedimiento de diseño, ajustado continuamente durante el tratamiento, son los resultados de la instrumentación instalada para el control de los movimientos en superficie, en profundidad y en las estructuras.

El procedimiento de inyección empleado en todos los casos descritos, y que es ahora un estándar para este tipo de tratamiento del terreno, consta de tres fases: pretratamiento, concurrente y observacional. El pretratamiento prepara el terreno para una respuesta inmediata en la fase concurrente y la fase observacional se utiliza para producir levantamientos una vez que la excavación ha pasado de lago, pero permanecen asientos residuales no deseados.

- Actuaciones realizadas

La siguiente tabla resume los trabajos que se han llevado a cabo en los últimos seis años durante los proyectos de ampliación anteriormente descritos e incluye el proyecto más reciente, próximo a su finalización en Mayo del presente año. En los siguientes párrafos se describen las características particulares de diversos ejemplos.

Tabla 1. Inyecciones de compensación llevadas a cabo en el Metro de Madrid

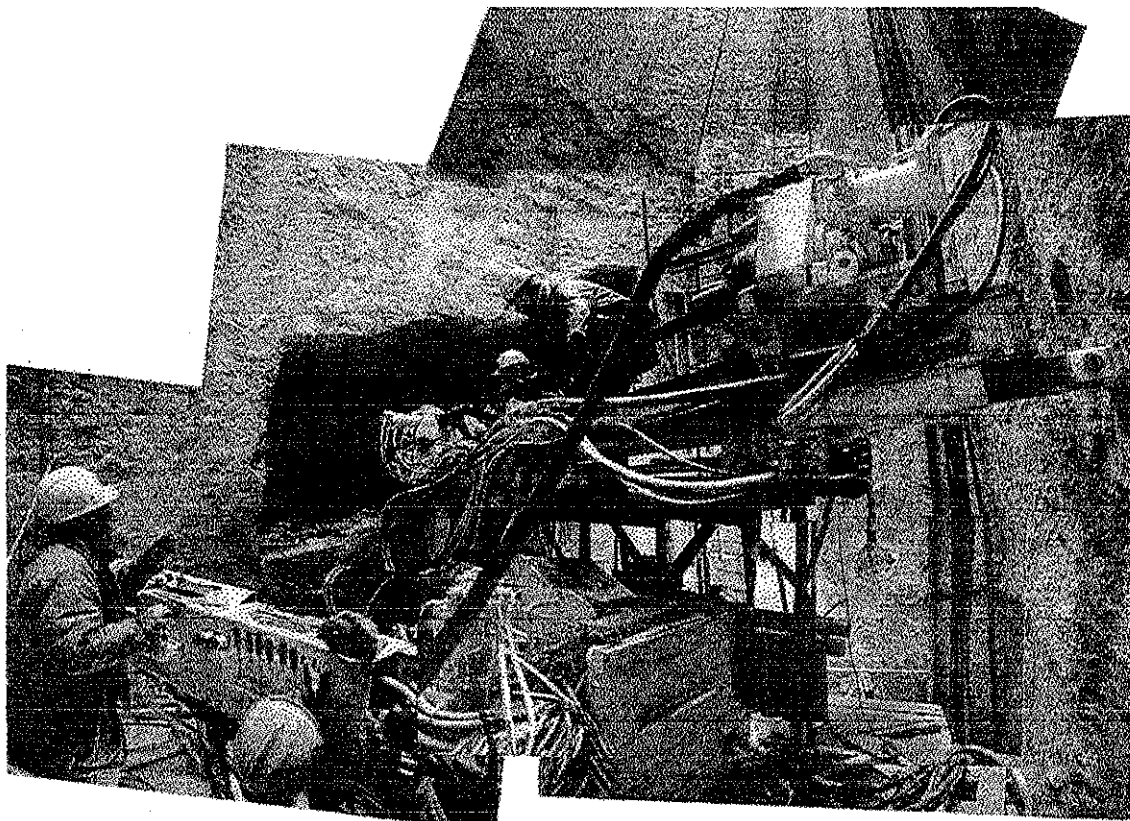
LOCALIZACIÓN	FECHA	TALADROS DE INYECCIÓN			TÚNEL			INYECCIÓN
		Dirección	ÁREA (m ²)	Longitud máxima (m)	Diámetro (m)	Proceso constructivo	Pérdida de volumen (%)	
Conexión de las líneas 8 y 10	11/96 – 05/97	Horizontal desde pozos	2880	55.1	10.5	Método Madrid (excavación manual)	0.5	Concurrente
Línea 7 tramo IV Calle Ramón Gómez de la Serna	06/97 – 09/97	Inclinados desde superficie	322	30	9.38	EPB	0.25	Concurrente
Línea 7 tramo IV Calle Santiago de Compostela	06/98 – 09/98	Horizontal desde pozos	1050	50	9.38	EPB	0.5	Concurrente
Línea 7 tramo III Estación de Guzmán el Bueno	01/98 – 04/98	Casi horizontales desde galería	2632	60.8	9.38	EPB	-	Observacional
Línea 4 tramo II Calle Santa Susana	01/98 – 10/98	Horizontal desde pozos	504	40	9.38	EPB	0.25	Concurrente
Ampliación línea 1 a Vallecas: Pº Federico García Lorca 38	04/98 – 10/98	Casi vertical	400	16	10.5	Método Madrid (excavación manual)	-	Observacional
Ampliación línea 1 a Vallecas: Pº Federico García Lorca 36	06/98 – 10/98	Casi vertical	300	22	10.5	Método Madrid (excavación manual)	-	Observacional
Línea 10 Estación de Tribunal	03/00 – 11/00	Casi horizontal desde pozo (10°)	2571	52.5	10.5	Método Madrid (excavación manual)	-	Observacional
Línea 10 a Metrosur tramo 1A Calle Sanchidrián	09/00 – 01/01	Horizontal desde pozo	875	29	9.38	EPB	0.08	Concurrente
Línea 8 – tramo Mar de Cristal a Nuevos Ministerios	01/01 – 05/01	Horizontal casi horizontal desde pozo e inclinado desde superficie	4187	63.5	9.38	EPB	0.2 – 0.6	Concurrente

3.8.3.1. Conexión de las líneas 8 y 10

Este trabajo fue el primero en el que se utilizaron inyecciones de compensación en Madrid. Un nuevo túnel de metro se excavó bajo la arteria principal de Madrid, el Paseo de la Castellana, conectando dos líneas existentes. El área de inyecciones de compensación aquí descritas se corresponde al entorno de la Plaza de San Juan de la Cruz, donde el nuevo túnel pasa a una distancia de 3 m bajo un túnel ferroviario en permanente uso. Para

asegurar un tratamiento efectivo, previo a la fase de compensación se inyectó el terreno entre ambos tuneles. El objetivo de estas inyecciones de impregnación fue, por un lado, restaurar la resistencia del terreno para después perforar los 156 taladros desde donde se inyectaría, y por otro lado, preparar el terreno y formar una plataforma rígida que sirviera como capa de reacción contra la que actuarían las inyecciones de compensación

El área total tratada con inyecciones de compensación fue de 1920 m² con una longitud media de taladro de 34 m. Se inyectó una mezcla de cemento-bentonita especialmente diseñada y ensayada a través de tubos



manguito. Las densidades de inyección utilizada variaron entre 50 l/m² y 150 l/m², con densidades máxima resultantes en determinadas áreas tratadas de hasta 350 l/m². Estos volúmenes corresponden a una pérdida de volumen de suelo del 0.5%, estimada inicialmente, y que se mantuvo, ya que los resultados de la auscultación en la zona dieron de hecho una pérdida de suelo del 0.59 %. La instrumentación colocada en el túnel ferroviario dio un levantamiento máximo en las vías de entre 10 y 30 mm mientras que el asiento máximo fue siempre inferior a 5 mm. El propio túnel dio unos movimientos medios de entre 8 mm de asiento y 5 mm de levantamiento, y siempre manteniéndose en una banda de ± 15 mm.

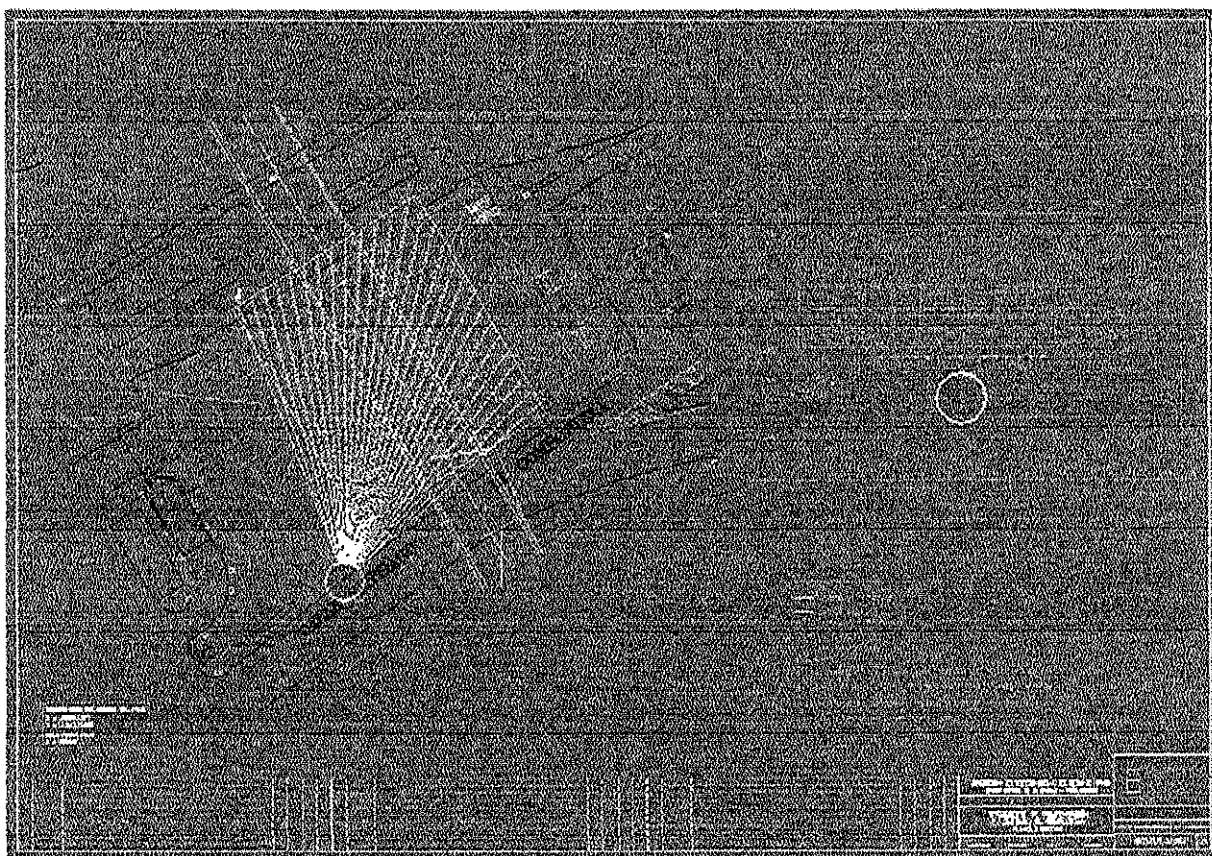
3.8.3.1 Línea 7 tramo IV: C/Santiago de Compostela

En el marco de las obras de prolongación de la línea 7 del Metro de Madrid, se llevó a cabo un tratamiento del terreno en la zona de la calle Santiago de Compostela, correspondiente al PK 1+778, junto al cruce de

la nueva línea con la M-30, con el fin de asegurar un adecuado comportamiento del edificio de 9 plantas y 3 sótanos situado unos 4.5 m encima del túnel a excavar, reduciendo hasta valores admisibles los asentos y distorsiones angulares que pudiera provocar esta excavación, como consecuencia de las modificaciones en el estado tensional inicial del terreno. Estos trabajos se ejecutaron en agosto - septiembre de 1997.

La inyección de compensación de asiento diseñada fue de fracturación o claquage para rotura del terreno y formación de cuñas con material inyectado. La inyección se efectuó con lechada de cemento-bentonita, a través de tubos manguito (TAM) de acero

Los TAM fueron dispuestos en un abanico horizontal entre la posición del túnel de Metro a construir y la cimentación existente de los edificios de la c/ Santiago de Compostela, desde un pozo construido a este efecto en la calle Santiago de Compostela (Figura 9). Se realizó una inyección repartida por delante y por detrás del frente de



excavación para ajustar en el tiempo y el espacio el tratamiento diseñado a la respuesta del terreno a la excavación del túnel. De este modo se definió un círculo de exclusión de inyección temporal alrededor del túnel activo para asegurar la estabilidad del túnel en construcción, que se fue desplazando concurrentemente con el avance del túnel.

La inyección se ejecutó en dos fases con los propósitos que se indican a continuación:

Fase 1: Pretratamiento

- Restituir la relajación de tensiones producida por la propia perforación para la instalación de los tubos manguito (TAM)
- Relleno de posibles huecos en el terreno.
- Reducción de la compresibilidad del terreno entre los TAM y las estructuras a proteger
- Crear un levantamiento inicial controlado, detectado por los dispositivos de instrumentación en la estructura o en el terreno (entre 0 a 5 mm)
- Tarar la respuesta inicial del terreno a la inyección.
- Limitar el alcance de la mezcla buscando una distribución lo más homogénea posible
- Garantizar un procedimiento de inyección seguro cerca de las estructuras

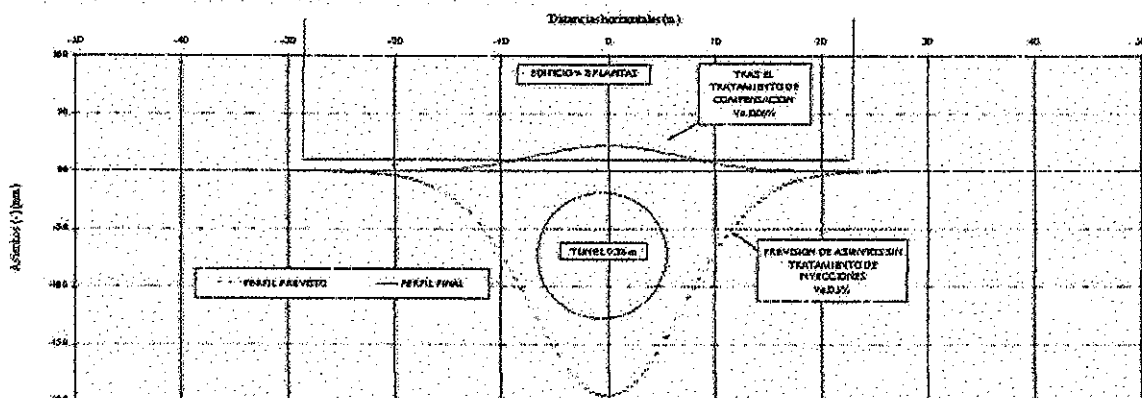
Fase 2: Concurrente y/o Observacional:

- Reducir los asientos inducidos por la excavación al ritmo al que ésta se produce, a valores admisibles por las estructuras a proteger asegurando la no afección a la excavación en curso
- La inyección de tipo observacional se iba a efectuar después de la construcción del túnel sólo en el caso en que la anterior no fue suficiente o que se observaran evoluciones que hicieran superar los valores establecidos como admisibles; sin embargo, finalmente no fue necesario

PERFIL TRANSVERSAL DE ASIENTOS DEBIDO A LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

Parámetros para ajuste de Gauss:				
	por L. GARCÍA	por L. GARCÍA	por L. GARCÍA	por L. GARCÍA
Diámetro excavado (m)	9.38	9.38		
Car. del tipo del túnel (m)	0.170	0.170		
Radio de cabeza (m)	25.8	25.8		
Asiento máximo (-) (mm)	33.5	2.3		
Desplazamiento del centro de la cabeza (m)	0.0	0.0		
PUNTO DE INTERSECCIÓN (entre la cabeza del)	730	730		
VOLUMEN DE ASIENTOS (mm)	0.34	0.04		
Porcentaje de volumen de asentos (%)	0.30%	0.06%		
MAXIMA PENDIENTE	1/591	1/5038		
R= A/(2.26)	0.77	0.78		

TUNEL:	LINEA TRAMO VERGENTE DE LA PALOMA - PTIS		
SECCIÓN:	P.K. 1+795	LECTURA:	Estación
NIVEL INICIAL (m)	65.05	NIVEL FINAL (m)	65.05
ALCANCE (m)	48.00	PROFUNDIDAD (m)	48.00
PROFUNDIDAD (m)	Tramo de 48.00 m de longitud de 48.00 m		
PROFUNDIDAD (m)	El nivel de fondo del túnel de 48.00 m de longitud		



Los criterios que rigieron para el cese de la inyección tanto en fase de pretratamiento como en fase concurrente, fueron los siguientes:

- Volumen máximo de cada episodio (definidos en los programas de inyección)
- Levantamientos puntuales superiores a 5 mm.

- 1/1000 de distorsión angular
- Rechazo de la inyección
- Presión de seguridad del sistema

Además de evidencias de movimientos, daños u otras influencias negativas en las estructuras a proteger, en su entorno, o en el propio túnel en construcción

Se establecieron programas de inyección específicos para las sesiones de inyección detallando los volúmenes y secuencia de inyección. Tratándose de un proceso dinámico, a la vista de los resultados obtenidos (instrumentación) se valoró la conveniencia de establecer nuevas variaciones en los parámetros inicialmente considerados. En este caso se consideró como hipótesis de partida, después de los correspondientes análisis teórico-empíricos, una pérdida de sección equivalente al 0.5 % de la sección teórica a excavar (diámetro de la sección circular equivalente: 9.5 m de diámetro).

El área en cuestión estuvo definida por un ancho de tratamiento de 30 m y una longitud de 35 m, lo que supone un total de 1 050 m² aproximadamente. El resultado final reflejado por la instrumentación fue de un levantamiento máximo del orden de 2 - 3 mm, lo cual corresponde aproximadamente a un porcentaje de volumen de asientos de 0.06 % (Fig. 10).

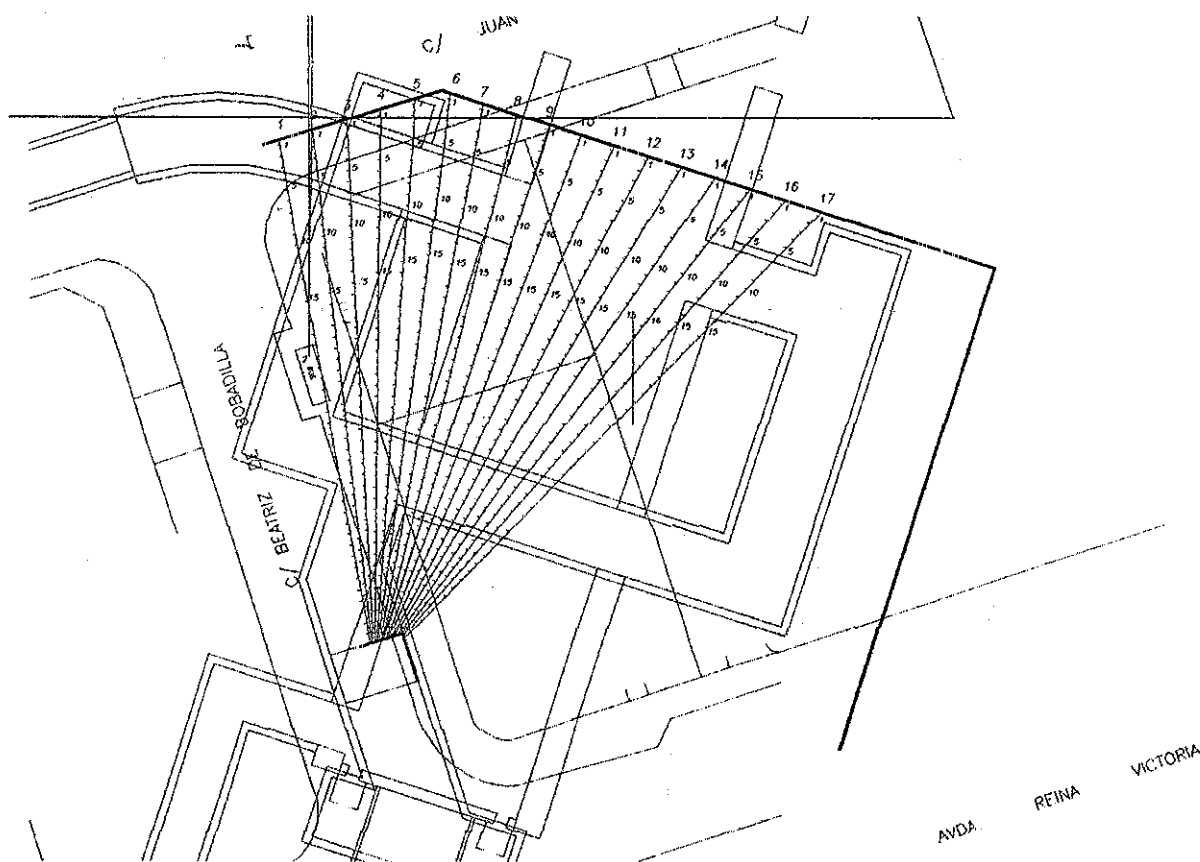
Los parámetros que rigió el tratamiento en cada caso fueron controlados y registrados automáticamente por los sistemas de bombeo. Estos registros alimentaron una base de datos para la generación de informes y para realizar análisis de tipo estadístico y poder establecer nuevas propuestas de trabajo.

- Línea 7 tramo III: Estación de Guzmán el Bueno

La previsión de asientos inicial para el área sobre la gran estación en caverna de Guzmán el Bueno no suponía razón alguna para la adopción de medidas adicionales de protección de los edificios en superficie ante un asiento excesivo. No obstante, con el inicio de la excavación de la caverna y con la posterior construcción de los túneles de acceso, los edificios de 8 plantas suprayacentes mostraron síntomas de grandes asientos por la aparición de fisuras, midiéndose valores máximos del asiento de 50 mm en la instrumentación colocada en la zona. Los trabajos en la estación se detuvieron hasta ejecutar las medidas necesarias para compensar parte de este asiento y para asegurar que no se producirían más con el resto de la excavación de la estación.

- Línea 7 tramo IV: C/ Ramón Gómez de la Serna

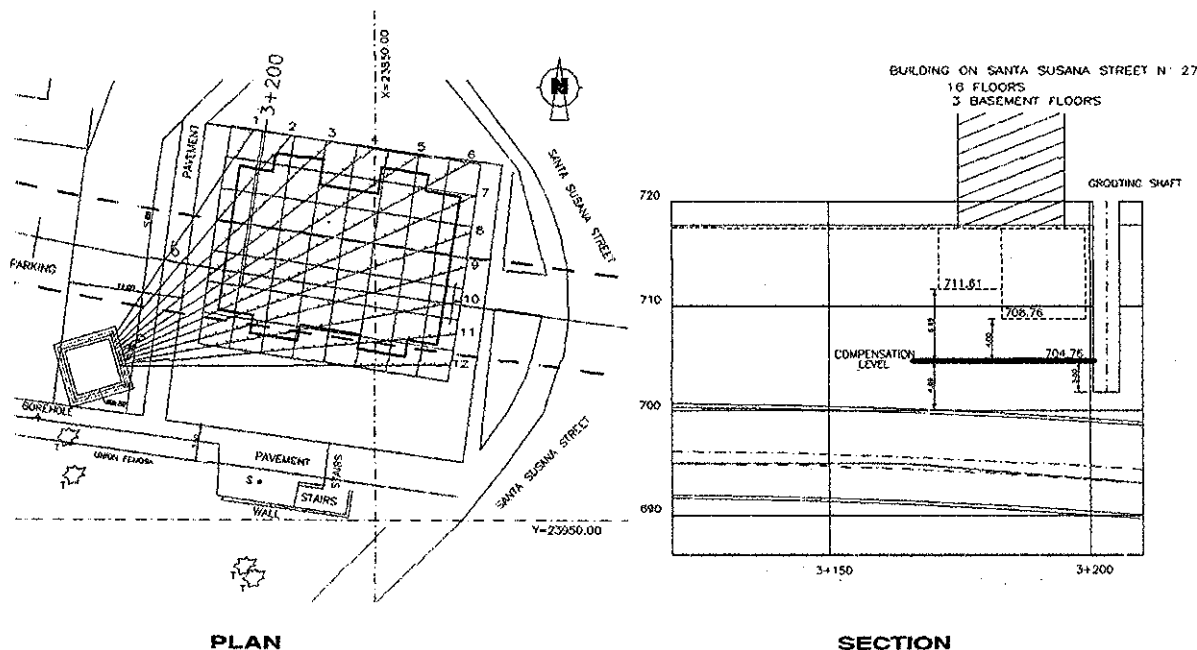
Junto a la entrada a la última estación de la ampliación de la línea 7, el nuevo túnel discurre en parte bajo un edificio pilotado, con una distancia mínima de 6 m entre la base de la cimentación y la clave del túnel. En esta zona la malla de compensación se perforó desde superficie mediante taladros inclinados, formando un plano de separación entre los pilotes de la cimentación y el túnel a excavar. La zona tratada en este caso es relativamente



- Línea 4 tramo II: C/ Santa Susana

En este caso, se realizaron inyecciones de compensación bajo un edificio de 16 plantas en la calle Santa Susana debido a la excavación del nuevo túnel de la ampliación de la línea 4 bajo él. La coronación del túnel pasaba a 9 m bajo las cimentaciones. Debido a la inusual altura del edificio, se colocó instrumentación adicional a la habitualmente considerada en superficie y en profundidad (hitos de nivelación, extensómetros de varilla, etc.). Esto supuso la instalación de electroniveles en los dos muros adyacentes en la terraza de la primera planta.

Los trabajos de inyección finalizaron en Marzo de 1998, cubriendo un área de 504 m². Se excavó un pozo para perforar una malla horizontal de taladros entre la clave del túnel y la base de la cimentación del edificio. La máxima separación entre taladros fue de 3 m y su longitud media de 32.2 m. La figura 13 muestra una vista en planta y otra en sección de las inyecciones.



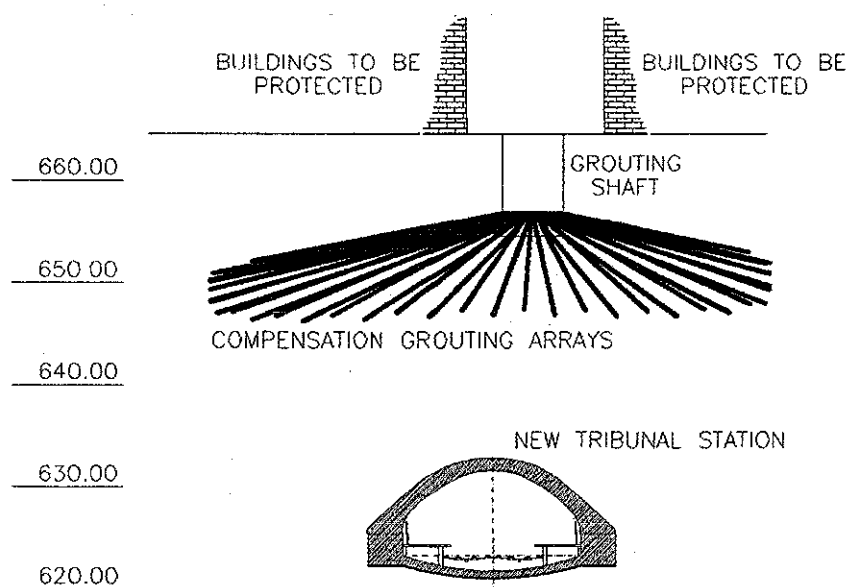
Durante la fase de pretratamiento, la instrumentación arrojó un levantamiento medio de 3 mm, parándose la inyección en ese instante. La máxima distorsión angular deducida de estos resultados fue de 1/4000, que estaba dentro de los límites fijados por el plan de auscultación previamente diseñado. El hito de nivelación situado delante del frente de excavación del túnel en la zona dio un levantamiento de 1 mm, mientras que el extensómetro de varilla ubicado en la misma zona no dio movimiento significativo alguno. La excavación del túnel continuó sin más episodios de inyección y el movimiento final registrado por la instrumentación se mantuvo todo el tiempo dentro de los umbrales establecidos, no requiriéndose inyecciones de compensación de observación posteriores.

- Línea 10: Estación de Tribunal

La estación de Tribunal existente en línea 10 debía ser ampliada como parte del último proyecto de ampliación del Metro de Madrid. Los trabajos suponían la construcción de una estación en caverna de 21 m de largo y 24 m de ancho utilizando el llamado Método Alemán alrededor de la excavación existente. Se excavaron tres galerías de avance (o túneles piloto), uno en la coronación y otro en cada hastial. Posteriormente la coronación y los hastiales de la caverna se excavaron por fases y se hormigonaron. Se procede a la demolición de la antigua estación, a la

excavación y hormigonado de las costillas y finalmente a la ejecución de la contrabóveda. Estas obras se realizaron de Junio de 2000 a Octubre de 2000.

Los taladros para las inyecciones de compensación se perforaron desde un pozo con una ligera inclinación, 10° respecto a la horizontal. Se realizaron las inyecciones de pre-tratamiento, con un total de 84,525 l de mezcla inyectados, obteniéndose densidades de la inyección de entre 25 y 62.5 l/m². Los valores máximos de levantamiento alcanzados durante esta fase del tratamiento fueron de entre 1 05 y 1 89 mm. Después de esta fase, y por el lento avance en la excavación debido al método utilizado, Se decidió la aplicación de inyección de observación. En caso de que los movimientos superaran los 2 mm de asiento, establecido este valor como umbral, comenzarían los trabajos de inyección. No obstante, desde el final de las inyecciones de pre-tratamiento hasta la finalización de la contrabóveda de la nueva estación, los máximos asientos observados estaban en el rango de 0 86 – 1 33 mm, por lo que no se consideraron medidas adicionales. En este caso, los trabajos pueden definirse mejor como una medida de contingencia o previsión que como una medida de compensación. En cualquier caso, de haberse producidos asientos mayores, estaban preparados todos los medios necesarios para actuar de inmediato y evitar el daño a las



edificaciones.

- Línea 10 : C/ Sanchidrián

Uno de los más recientes tratamientos de inyecciones de compensación llevado a cabo en Madrid se debe a la protección de un edificio de cuatro plantas localizado en el tramo 1A de la prolongación de la línea 10 a Metrosur. Este túnel, ejecutado mediante EPB, pasa bajo el citado edificio con sólo 6 m de recubrimiento entre la coronación del túnel y la cimentación del edificio. En esta distancia, se perforaron 23 taladros horizontales desde un pozo realizado al efecto, cubriendo un área de 2715 m². Se realizaron tanto las inyecciones de pretratamiento como las concurrentes. El movimiento medido una vez hubo pasado el túnel fue lo suficientemente pequeño como para no recurrir a las inyecciones de observación.

El edificio se auscultó de forma continua durante la inyección y los resultados transmitidos a la obra para el reajuste del programa de inyección. La fase de pre-tratamiento se detuvo una vez se alcanzó un levantamiento inicial de 3 mm. En lo que se refiere a las inyecciones concurrentes, los asientos inicialmente estimados eran mayores que los medidos, por lo que según avanzaba la excavación del túnel bajo el edificio y se medía el asiento, los volúmenes se reajustaban adecuadamente. Finalmente, la pérdida de volumen de suelo compensada fue del orden del 0.09%. Las inyecciones concurrentes se realizaron en 6 días, el tiempo que le llevó a la tuneladora cruzar el área (con varias paradas imprevistas en su transcurso).

BIBLIOGRAFIA

- Baker, W.H , Cording, E.J. and Mac Pherson, N.H. 1983. Compaction grouting to control movement during tunnelling Underground Space Vol. 7, Pergamon Press Ltd
- Chen, X.L , Liu, Y.H , Cao W H and He , Z.F , 1998. Protection for the former observatory during contruction of the Yan An Dong Lu tunnel. Proc. World Tunnel Congress. Sao Paulo, ed. Balkema, Vol 2, 1083-1088
- González, C., Deformations around a tunnel in soft ground PhD Thesis, Cantabria University, Spain, 2002.
- López Ruiz, A , Nuevas inyecciones químicas estructurales de base silicato en la Ingeniería Geotécnica Revista Informes de la Construcción del I.E.T. de la C y del C. # 341, June 1982, Spain
- Moreira, J And Flor, A. 1998 The Lisbon Metro-Strengthening of building standing above the tunnels in the city centre. Proc. World Tunnel Congress Sao Paulo, ed. Balkema Vol. 2, 1065-1070
- Sola, P.R., Monroe, A.S. and López Ruiz, A. 2000. Compensation grouting in the London, Lisbon and Madrid Subways GEO-DENVER 2000. ASCE. August 5-8 Colorado USA
- Sola, P.R , et al. Ground treatment for tunnel construction on the Madrid Metro. Proc. of 3rd Int. Conf. Grouting and Ground Treatment. ASCE. New Orleans, February, 2003, Vol II, pp 1518-1533
- Stilley, A.N , Compaction grouting for foundation stabilisation ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering New Orleans, February, 1982, pp 923-937.
- Warner, J Compaction grouting The first thirty years, ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. New Orleans February, 1982, pp 694-707.

Madrid, febrero 2006