

Recomendaciones AETESS para la ejecución y control de las inyecciones de compensación

Pedro R. SOLA CASADO

INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
COMITÉ TÉCNICO DE AETESS

1. Introducción y objeto

Desde los pasados años noventa, las inyecciones de compensación se han mostrado como un procedimiento eficaz para reducir, o eliminar, los movimientos indeseables causados por la subsidencia asociada a las excavaciones de túneles, o a cielo abierto, en el ámbito urbano.

La finalidad tan singular y específica de este tipo de inyecciones, implica introducir en el terreno, de forma controlada, un volumen de mezcla suficiente para compensar el efecto de la subsidencia, y eliminar o reducir los movimientos en las estructuras y servicios afectados.

Todo ello supone las siguientes diferencias respecto a los tratamientos convencionales con inyecciones con los que se busca una mejora de las propiedades geotécnicas del terreno (resistencia, rigidez y permeabilidad):

- a) El efecto de compensación de movimientos propiamente dicho comienza después de que se consiga la mejora del terreno en el radio de influencia de las inyecciones.
- b) El diseño y la ejecución de estas inyecciones no responden a las propiedades geotécnicas iniciales y finales del terreno, sino principalmente a un agente externo como es la excavación de un túnel o zanja, cuyo desarrollo condiciona totalmente el de las inyecciones de compensación.
- c) La medida, seguimiento y análisis de los movimientos de las estructuras y entorno afectados son BASICOS para permitir comprobar los resultados y efectuar modificaciones en las inyecciones si fuera necesario.

Estas diferencias imponen peculiaridades y condicionantes en la ejecución y control de este tipo de inyecciones, y por tanto en las mediciones y valoración económica de los trabajos, que el Comité Técnico de AETESS, basado en la experiencia de las empresas españolas especialistas, considera del mayor interés tratar en estas Recomendaciones AETESS.

2. Condicionantes de ejecución

En general, la ejecución de las inyecciones de compensación comprende tres capítulos bien diferenciados, los dos primeros antes de la excavación, y el último durante y/o después de ella. Son los siguientes:

- I) Realización de los taladros cubriendo con posibles puntos de inyección la superficie horizontal de actuación (Área de Compensación).
- II) Inyección de acondicionamiento, previa al inicio de la excavación, para mejorar el terreno de modo que cualquier inyección posterior se traduzca inmediatamente en una expansión volumétrica que se propague desde el punto de inyección. (Pretratamiento)
- III) Inyección de compensación propiamente dicha, que consiste en introducir en el terreno, en la situación y momento adecuados, los volúmenes de mezcla (lechada o mortero) que reduzca o elimine los movimientos. Puede efectuarse al mismo tiempo que la excavación tratando que los movimientos no se produzcan (Inyección concurrente o proactiva), o como respuesta a los movimientos ya producidos (Inyección observacional)

2.1. CONFORMACIÓN DEL ÁREA DE COMPENSACIÓN

Este área a tratar se determinará en planta teniendo en cuenta tanto la cubeta de subsidencia prevista, y/u obtenida con el seguimiento de los movimientos, como la cimentación y demás características de las estructuras y servicios afectados.

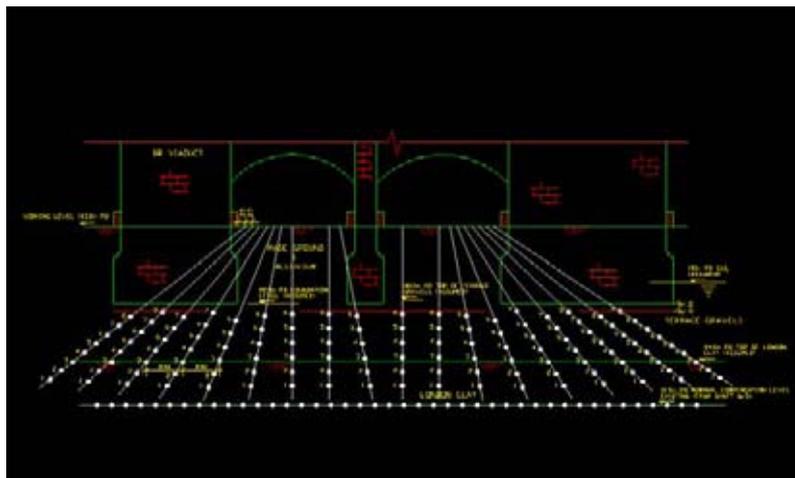


Figura 2.1. PLANO DE COMPENSACIÓN DESDE SUPERFICIE.

La ubicación en cota de esta área deberá situarse entre la fuente de movimientos y los elementos a proteger, cuidando que las grandes presiones y posibles escapes de inyección no afecten al revestimiento o paredes de excavación, ni a las solera y cimentaciones de las estructuras y servicios afectados.

Cuando se trate de suelos granulares, el nivel freático puede ser un condicionante de primera magnitud para situar la cota de compensación, pues deben evitarse los taladros embocados bajo el agua freática a no ser que se empleen dispositivos especiales para evitar la salida de agua con arrastres.

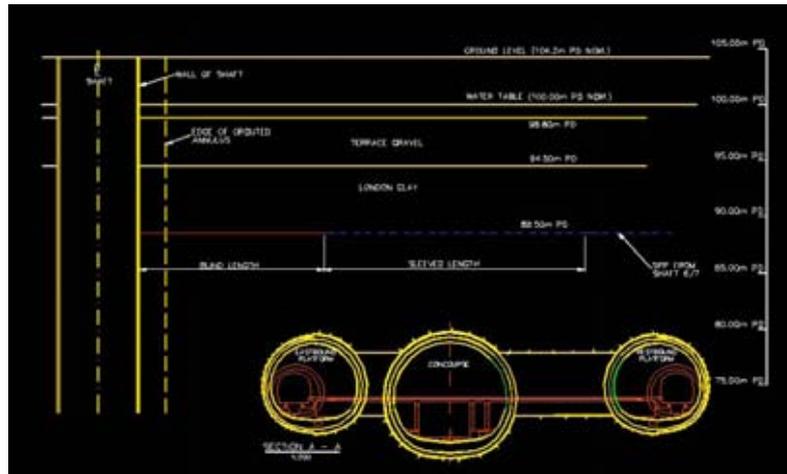


Figura 2.2. PLANO DE COMPENSACIÓN DESDE POZO.

Definida el Área de Compensación en planta y cota, se dispondrán los taladros de inyección con separaciones entre ellos, de modo que las distancias entre los posibles puntos de inyección estén entre 1,5 y 3,5 m, según la distancia del área de compensación a las estructuras y servicios afectados, y la máxima longitud de los taladros. (Menor separación para pequeñas distancias y grandes longitudes de taladros).

Los taladros de inyección podrán tener cualquier dirección, entre la vertical y la horizontal, ejecutable por los equipos actuales desde:

- Superficie, mediante perforaciones verticales o inclinadas.
- Pozos verticales dentro o próximos al Área de compensación, construidos “exprofeso” o de ventilación, ataque, etc.
- Estaciones u otros lugares subterráneos disponibles.



Figura 2.3. PERFORACIÓN DESDE POZO.

En general, se podrá emplear cualquier lugar de ubicación compatible con la geometría del Área de Compensación, y con espacio mínimo para emplazar los equipos de perforación y sus medios auxiliares; es decir, con un área libre equivalente a un pozo circular de 4,5 m de diámetro. Cuando un pozo esté encima del túnel a excavar, deberá tenerse en cuenta que la perforación con los equipos actuales requiere que el fondo del pozo descienda al menos unos 3 m debajo de la cota del emboquille de los taladros horizontales.

Los pozos deberán estar revestidos adecuadamente, y se tendrá en consideración el efecto sobre este último de los taladros para la inyección. Serán estancos y con todas las medidas auxiliares y de seguridad necesarias (desagüe, alimentación de energía y materiales, escalera, redes de protección, barandilla, etc).

Las perforaciones serán de 75 a 115 mm de diámetro, con entubación provisional cuando sea preciso, y se equiparán con tubos- manguito, de 50 a 75 mm de diámetro, metálicos o de PVC, con válvulas antiretorno cada 0,3 a 0,6 m. Los tubos de acero permiten mayor número de reinyecciones al disminuir el riesgo de obstrucciones, y deformaciones durante la inyección.



Figura 2.4. DETALLE DEL VAGÓN DE PERFORADO.

Las longitudes máximas de los taladros dependen de la fiabilidad de los equipos actuales en mantener la dirección teórica de la perforación. La experiencia actual indica que se obtienen desviaciones inferiores al 2% con longitudes hasta 50 m en taladros horizontales y hasta 35 m en los subverticales.

La separación de los puntos de inyección en el Área de Compensación y las longitudes máximas de los taladros son los factores a considerar para disponer una o dos capas de taladros. En todo caso, conviene que los taladros no se corten o crucen.

El replanteo y la edificación de los taladros deberán ser muy cuidadosos, pues el éxito en los resultados requiere que no haya errores en la situación de los volúmenes de mezcla inyectados.

Por último, en todo lo demás deberán seguirse los procedimientos y reglas de buena práctica de los tratamientos convencionales con inyecciones.



Figura 2.5. INSTALACIÓN Y EQUIPO DE PERFORACIÓN PARA POZO.

2.2. INYECCIÓN PARA ACONDICIONAMIENTO (PRETRATAMIENTO)

Esta primera fase de inyección debe realizarse antes del inicio de la excavación. Tiene por objeto tratar el terreno antes de ser afectado por la subsidencia, de tal forma que cualquier inyección posterior tenga una respuesta inmediata en términos de movimiento en superficie.

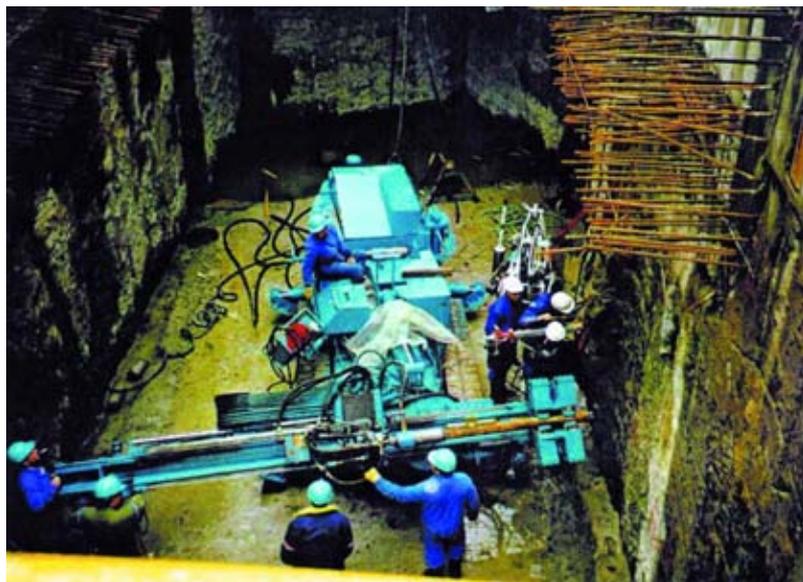


Figura 2.6. INYECCIONES DESDE POZO.

En la práctica significa elevar levemente toda la superficie del Área de Compensación hasta un máximo que suele ser de 2 a 3 mm, lo suficiente para comprobar que todo el terreno reaccionará a las inyecciones posteriores de modo inmediato y homogéneo en toda la zona del tratamiento.

El volumen total a inyectar dependerá principalmente del terreno, pues la inyección de esta fase rellena huecos y mejora el terreno por densificación y “armado”, con lo que las cifras finales serán muy superiores en los suelos poco competentes. Las admisiones totales por metro cuadrado en planta pueden oscilar entre unos 30 l/m² para terrenos terciarios y unos 300 l/m² para suelos para suelos cuaternarios y rellenos.

La secuencia de inyección será similar a la habitual en los tratamientos convencionales, con pasadas desde el perímetro hacia el interior distribuyendo los taladros en primarios y secundarios, y con volúmenes por episodio entre 250 y 70 l.



Figura 2.7. BOMBAS DE INYECCIÓN.

Las mezclas empleadas deben ser estables, pues las pérdidas de agua suponen una disminución del volumen efectivo inyectado, y consistentes para que produzcan intrusiones gruesas cerca del punto de inyección sin “escapar” hacia la excavación o hacia los edificios afectados.

La necesidad de múltiples inyecciones en el mismo punto y de utilizar los tubos-manguito, ha conducido a lechadas estables de cemento con bentonita como las mezclas más empleadas hoy día. Las dosificaciones en peso más usuales son:

- Cemento-Agua: 0,45 a 0,65
- Bentonita-Cemento: 0,04 a 0,06

Cuando sea necesaria una mayor consistencia, pueden añadirse cenizas volantes hasta conseguir mezclas con cono de Abrams de 150 a 220 mm, que pueden inyectarse con tubos-manguito y obturadores especiales.

2.3. INYECCIÓN DE COMPENSACIÓN

En esta fase se realiza la inyección de compensación propiamente dicha que consiste en inyectar, en el tiempo adecuado y en los puntos convenientes del Área de Compensación los volúmenes de lechada precisos para limitar o anular los movimientos causados por la excavación.

El proceso correcto exige acompasar necesariamente la secuencia y el programa de inyección a los movimientos de la excavación y comprobar los resultados obtenidos por medio del seguimiento de las estructuras y servicios a proteger.

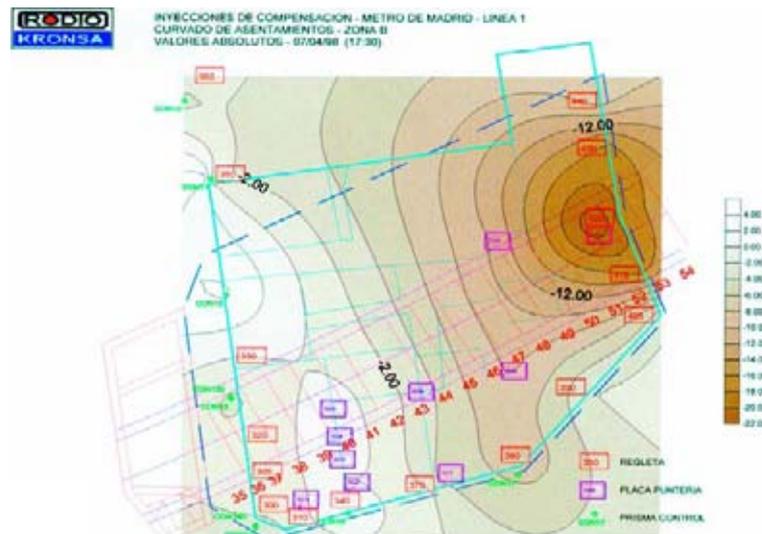


Figura 2.8. INSTALACIÓN Y EQUIPO DE PERFORACIÓN PARA POZO.

La primera de estas exigencias puede conseguirse más directamente actuando con la inyección a medida que se vayan produciendo pequeños movimientos de 5 a 10 mm, y tratando de compensarlos. Es el método OBSERVACIONAL que en ningún caso debe emplearse para producir “escalones” de levantamiento superiores a 5 mm cada vez, y el único disponible en excavaciones a cielo abierto.

Cuando la forma y cuantía de subsidencia asociada a la excavación es conocida, como en los túneles, la inyección de compensación puede efectuarse simultáneamente con el avance de la excavación, de modo que los movimientos no lleguen a producirse. Es el método CONCURRENTE o PROACTIVO que exige una buena comunicación y coordinación entre los equipos de excavación e inyección, y permite un mayor tiempo disponible para compensar posibles movimientos residuales.

En los casos singulares donde no se pueda inyectar para no dañar el túnel, o cuando se prevea un movimiento rápido con insuficiente respuesta en la inyección, podrá recurrirse a un levantamiento PREVIO y NETO de 5 a 10 mm, siempre con extrema precaución y por escalones inferiores a 5 mm.

En definitiva, esta fase de la compensación está condicionada por el avance de la excavación, y el rendimiento de los equipos de inyección debe acompasarse a ella, llegando incluso a tiempos de parada o espera más o menos largos, según la marcha de las obras y la magnitud de los movimientos.

Otro aspecto importante a considerar es la relación entre los volúmenes de asientos compensados y los de mezcla inyectados en esta fase de compensación. La experiencia indica que el cociente entre ambos, denominado factor o coeficiente de eficacia, es inferior a la unidad pudiendo variar entre un máximo de 1/3 a 1/5 para mezclas gruesas (lechadas con adiciones y morteros) inyectadas con el método concurrente o proactivo en terrenos terciarios, y un mínimo de 1/10 a 1/20 para lechadas inyectadas con el método observacional en suelos cuaternarios.

3. Controles de ejecución y resultados

3.1. PARÁMETROS A CONTROLAR

l) *Durante la fase de pretratamiento:*

Se deben controlar al menos los siguientes parámetros:

- **VOLUMEN DE ADMISIÓN EN CADA VÁLVULA**

Se controla mediante caudalímetros colocados en las bombas. Es necesario conocer las cantidades inyectadas en cada válvula para obtener un mapa de volúmenes que nos permitan tener datos sobre la tipología del terreno y poder tomar decisiones durante la fase de compensación.

- **PRESIÓN DE LA INYECCIÓN**

Se controla mediante los manómetros instalados en las bombas. Se establece un límite superior que denominado presión de corte. Cuando se alcanza la presión de corte en una válvula, la inyección se para y se da por finalizado el proceso en ese punto, aunque no se haya alcanzado el volumen de inyección preestablecido.

- **ELEVACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS A PROTEGER**

En la fase de pretratamiento se controla la elevación de las estructuras por dos razones:

- Dar por concluida la fase de pretratamiento al alcanzar la elevación límite preestablecida (generalmente en el rango de 2-3 mm).
- Controlar que si se producen elevaciones bruscas durante la inyección para poder interrumpirla y evitar daños mayores.

Se controla mediante nivelación de precisión o los otros sistemas del apartado 3.2 siguiente.

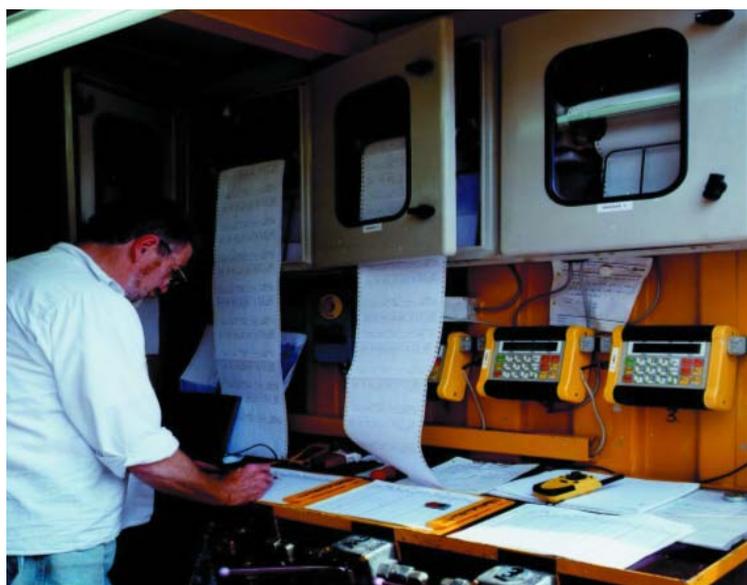


Figura 3.1. INTERIOR DE UN CONTENEDOR DE BOMBEO EN LA ZONA DE CONTROL DE PARÁMETROS.

II) *En la fase de compensación:*

Se deben controlar al menos los siguientes parámetros

- **VOLUMEN DE ADMISIÓN EN CADA VÁLVULA**

El control se realiza igual que en la fase de pretratamiento. Se deben registrar los volúmenes inyectados para poder establecer un mapa de volúmenes que permita la toma de decisiones las etapas futuras.

- **PRESIÓN DE LA INYECCIÓN**

Al emplear las mismas bombas que en la fase de pretratamiento la técnica y el control de la presión de bombeo es la misma. Generalmente se emplea la misma presión de corte que en la fase anterior (un valor típico es 60 bares).

Al alcanzar la presión de corte en una válvula durante la inyección ésta se para y se da por finalizada en esa etapa, pero esa válvula puede volver a inyectarse si se vuelven a producir asientos en su zona de influencia.

- **CONTROL DE MOVIMIENTOS DURANTE LA COMPENSACIÓN**

El control de movimientos durante la fase de compensación tiene dos aspectos diferenciados:

- Detectar los asientos producidos por la ejecución de las obras subterráneas.
- Seguir y controlar las elevaciones que produce la inyección para compensar dichos asientos.

El objetivo de este control es limitar los movimientos de las estructuras en un rango definido en el proyecto (un intervalo típico es de + 3 a – 3 mm) y que se considera aceptable para que las estructuras no sufran ningún tipo de daños.

Como en la fase de pretratamiento, este control también debe dar la alarma en tiempo real de cualquier movimiento anómalo que se produzca para poder cortar la inyección y evitar daños mayores o en su caso reforzar o modificar la inyección si se producen asientos no esperados.

3.2. SISTEMAS DE CONTROL DE MOVIMIENTOS

Actualmente los equipos de bombeo empleados en este tipo de inyecciones vienen dotados todos de caudalímetros y manómetros que se controlan por ordenador, por lo que su lectura se puede hacer de forma continua.

Es en el seguimiento y control de los movimientos de las estructuras a proteger donde existen diferentes sistemas y niveles. La elección del sistema adecuado y de los equipos necesarios tiene un componente económico importante, pero requiere un análisis de la sensibilidad de la estructura a los movimientos y del proceso constructivo de la obra subterránea.

Otras variables a tener en cuenta en este análisis son la accesibilidad a las estructuras que deben controlarse y el área afectada por el fenómeno de subsidencia.

Los sistemas de control se dividen en dos grandes grupos en función de la frecuencia de las medidas:

1) Sistemas de control discontinuos:

El control de movimientos se efectúa mediante medidas sistemáticas después de cada etapa de inyección, llevan asociados sistemas de respuesta rápida para detectar grandes oscilaciones puntuales durante la ejecución y evitan que se produzcan daños mayores de persistir con la inyección.

Un caso típico de sistema discontinuo es la topografía de precisión, pues debe ser capaz de detectar movimientos de varias décimas de mm (es habitual utilizar precisiones de 0,3 mm).



Figura 3.2. EQUIPO DE NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA.

Con estas lecturas se obtienen dos tipos de resultados:

- la medida puntual que nos indica el movimiento relativo respecto a la etapa anterior de inyección,
- el acumulado que se refleja en un gráfico tiempo (días) / movimientos (mm) para cada punto o sección de control y que indica los movimientos desde el primer día.

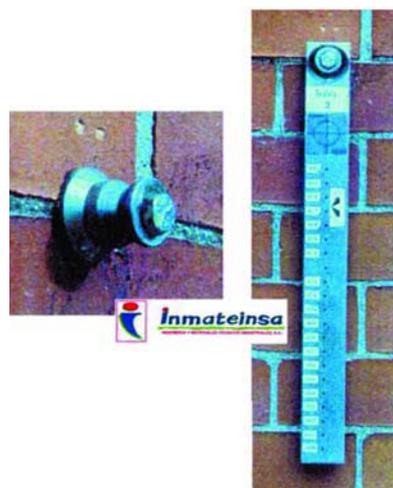


Figura 3.3. DIÁBOLO Y REGLETA PARA NIVELACIÓN DE FACHADAS.

Como sistema de respuesta rápida o de alarga, es normal al empleo de electroniveles que son capaces de detectar un movimiento brusco de varios milímetros durante la inyección.

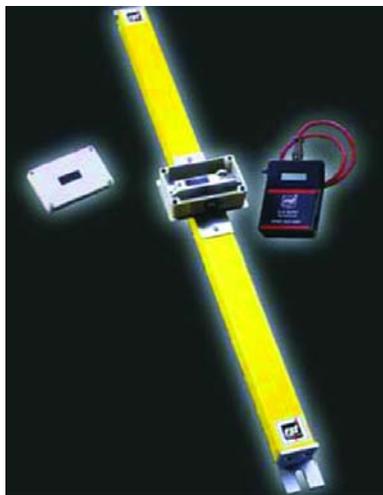


Figura 3.4. ELECTRONIVEL. PARA GRANDES LUCES SE PUEDEN UNIR VARIOS ELEMENTOS LONGITUDINALMENTE.

Los electroniveles no necesitan un seguimiento continuado, ya que sirven sólo para detectar de forma puntual anomalías durante la inyección que permita pararla, y evitar daños, ni tampoco de precisiones submilimétricas.



Figura 3.5. GRÁFICO TIEMPO/MOVIMIENTOS DE VARIOS PUNTOS DE CONTROL.

II) Sistema de control continuos:

En obras en las que la estructura a compensar sea de gran sensibilidad puede optarse por un sistema de registro continuo y en tiempo real de los movimientos detectados por los instrumentos de control.

Tiene la ventaja de aportar datos en períodos de tiempo muy pequeños y es capaz de detectar variaciones bruscas de los asientos, por lo que no es necesario colocar ningún sistema de alarma adicional para este fin.

Dentro de este tipo de sistemas destaca el denominado de nivelación hidrostática, que consiste en la colocación de transductores de presión en los puntos en los que se requiere la medición de movimientos, y se miden las diferencias de presión con referencia a un punto fijo.

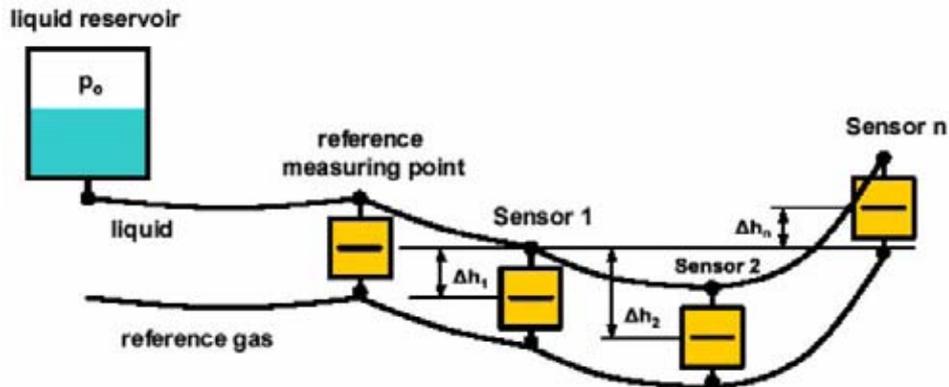


Figura 3.6. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE NIVELACIÓN HIDROSTÁTICO.

Los cambios de presión se convierten en diferencias de altura que son las que determinan los movimientos en cada punto.

Al emplear presiones de fluidos, el tiempo de respuesta del sistema es muy rápido ante una variación de las alturas piezométricas (en torno a varios segundos).

Los rangos de medición son de hasta 200 mm y tienen una precisión inferior a 0,3 mm, en la que se incluye la modificación por influencia de temperaturas, si ésta fuese necesaria.

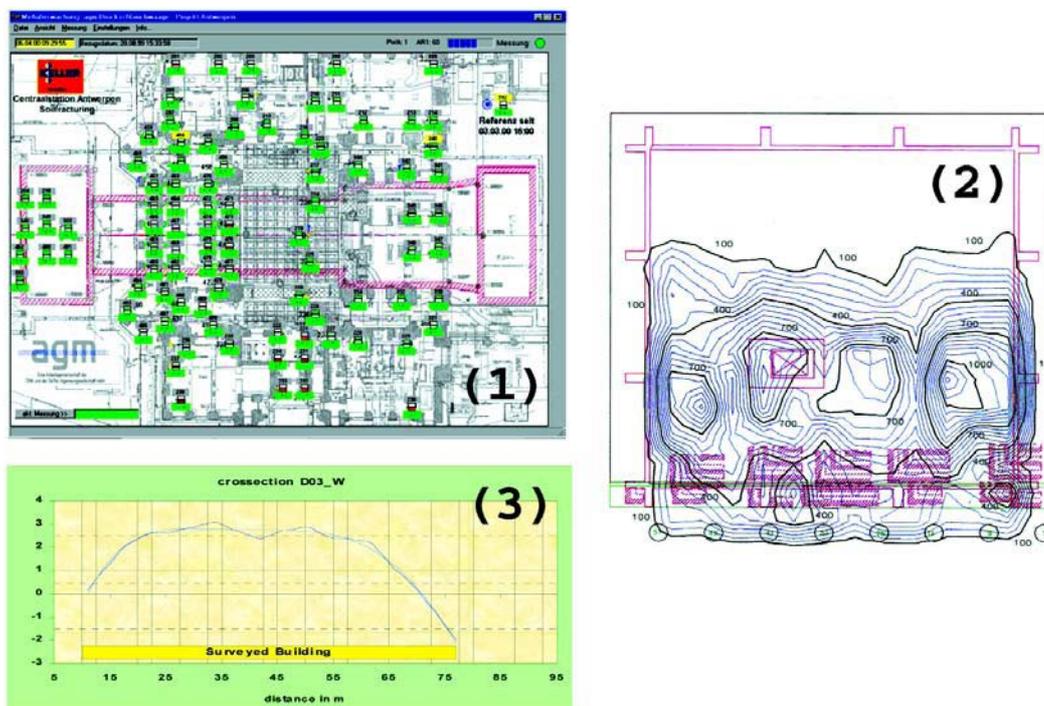


Figura 3.7. GRÁFICOS TIPO PARA EL SEGUIMIENTO DE LA COMPENSACIÓN:
Plano de situación de las válvulas con volúmenes inyectados (1). Gráfico de isolíneas (2).
Gráfico de movimientos de una sección transversal de la estructura a proteger (3).

Los datos recogidos por estos equipos se vuelcan en un ordenador que con el software adecuada da lugar a los informes necesarios para un seguimiento en continuo en la pantalla:

- seguimiento en planta de los puntos de inyección;
- plano con isolíneas (líneas de igual volumen inyectado o de igual movimiento vertical);
- gráficos tiempo (días) / movimientos (mm) para el seguimiento de la evolución de las deformaciones en cada punto o sección;
- gráficos de seguimiento de la deformación de la estructura en sección.

III) Otros sistemas de control:

Otra aplicación de las inyecciones de compensación es elevar una estructura que asienta de forma diferencial. En estos casos suele ser necesaria la utilización de más o de otros elementos de control que midan no sólo los posibles movimientos verticales que pueden producirse, sino también otras variables como giros, vuelcos, deformaciones dentro de la estructura, presiones intersticiales, carga transmitida al terreno, etc.

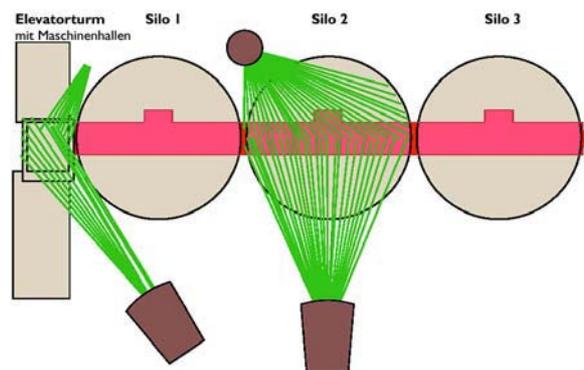


Figura 3.8. COMPENSACIÓN DEL SILO CENTRAL Y DE LA ZONA DE ACCESO, CON LA AUSCULTACIÓN NECESARIA.

Para ello se emplearán otros tipos de instrumentos adecuados a cada una de las variables que van a medirse y en tantas unidades como sean necesarias. Algunos tipos son: inclinómetros, extensómetros, medidores de presión intersticial; células de carga, etc.

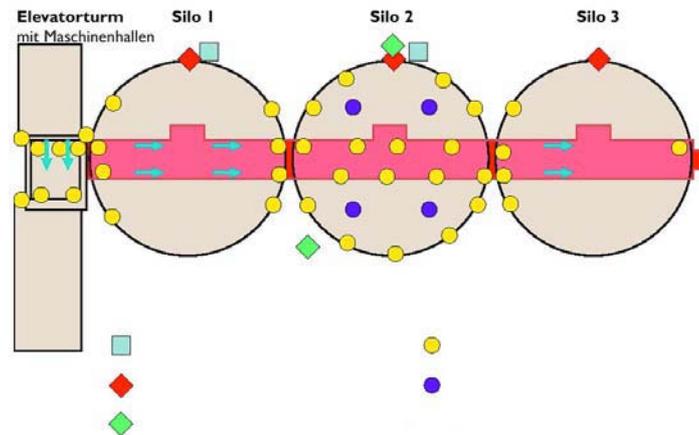


Figura 3.9. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA.

El control y seguimiento de los movimientos debe hacerse de forma análoga a los descritos anteriormente. Todas las lecturas de los instrumentos empleados se deben tomar a través de ordenador, y un software adecuado deberá permitir la visualización de los gráficos y tablas necesarios para su correcto seguimiento: volúmenes inyectados por válvulas, presiones, elevación, situación de válvulas, isolíneas, etc.

4. Mediciones y valoración económica

El carácter singular de las inyecciones de compensación de asientos, comporta a su vez unas diferencias importantes respecto a la experiencia previa en el campo de las inyecciones de otros tipos, que pudieran tener tanto los proyectistas como los contratistas de obras.

Como se ha venido diciendo a lo largo de este documento, las inyecciones de compensación son un proceso constructivo altamente dependiente de otras partes de las obras, siendo condicionadas en gran medida por ellas, pero a su vez precisando en muchas ocasiones la adaptación de las mismas a las necesidades de ejecución de las inyecciones.

Las inyecciones de compensación se componen de varias unidades de obra que es necesario medir y valorar desde la misma etapa de proyecto de las obras. El desglose típico de estas unidades, el cual servirá para describir los pormenores acerca de los criterios de medición y valoración de las inyecciones de compensación, es el siguiente:

- Partida alzada en concepto de movilización, implantación y desmovilización de equipos.
- m^2 de generación de área de compensación, comprendiendo perforación desde pozo o superficie, instalación de tubos manguito, e inyección de sellado, incluidos personal, maquinaria y materiales, así como ingeniería de diseño.
- m^3 de mezcla inyectada en fase de pretratamiento o acondicionamiento, incluyendo ingeniería para diseño de los planes de inyección, dirección y análisis de resultados, sin incluir materiales.
- m^3 de fabricación de mezcla para compensación incluidos materiales.
- Turno de equipo para inyección de compensación, incluido personal, maquinaria y consumos, sin incluir materiales, así como la ingeniería seguimiento de los planes de inyección, dirección y análisis de resultados.

- Día de parada de equipo para inyección de compensación, incluido personal y maquinaria.
- Día de disposición en obra de maquinaria para inyección de compensación por parada programada, sin incluir personal.

A continuación se describirá cada uno de los conceptos anteriores junto a los criterios de medición y valoración que se aplican generalmente a cada uno de ellos.

4.1. CONFORMACIÓN DEL ÁREA DE COMPENSACIÓN

La partida alzada en concepto de movilización, implantación y desmovilización de equipos no precisa de mayor explicación que su propia definición. Únicamente hay que apuntar que este precio será variable en función de las diferentes áreas de compensación que haya que tratar y por tanto del número total de equipos que haya que desplazar a obra. Otro factor que puede influir en el precio total de esta partida alzada es la duración de la fase de inyecciones en función del plan general de las obras. Un caso claro es aquel en el que en una misma zona confluyen dos o más túneles. En este caso es posible que sea necesario movilizar equipos de inyección en varias etapas diferentes de la obra muy distantes en el tiempo, de forma que sea antieconómico mantener parados los equipos de inyección dentro de la obra. En este caso, es recomendable separar en dos conceptos diferentes las partidas alzadas de movilización de los equipos de perforación y de inyección, de esta forma se pueden discriminar los desplazamientos de los distintos equipos, que generalmente serán mayores en el caso de la maquinaria de inyección que en el de la de perforación.

El segundo concepto, de m² de generación de área de compensación, comprendiendo perforación desde pozo o superficie, instalación de tubos manguito, e inyección de sellado, incluidos personal, maquinaria y materiales, así como ingeniería de diseño, es más complejo en cuanto a su medición y valoración, sobre todo en cuanto a esta última. La medición se realiza calculando la superficie ocupada en planta por los tubos-manguito destinados a la ejecución de las inyecciones. Esta superficie será variable en función de tres factores, que son la anchura de la cubeta de subsidencia producida por la excavación de los túneles, la situación de los edificios, estructuras o servicios afectados y el nivel de compensación seleccionado, como ya ha sido explicado durante el apartado dedicado a la fase de diseño.

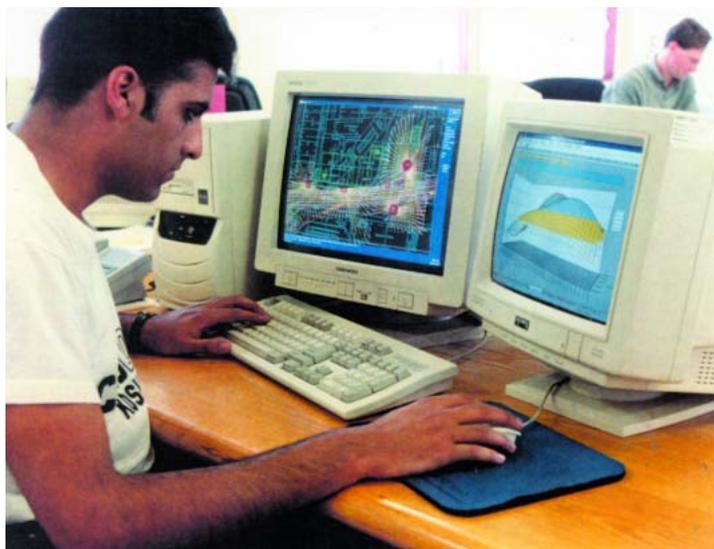


Figura 4.1. SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA EL DISEÑO DE INYECCIONES DE COMPENSACIÓN.

En cuanto a la valoración, esta depende de varios aspectos. El primero es, como en el caso de la medición, la posición del nivel de compensación. La distancia del mismo a los elementos a proteger, es decir, a la cota de cimentación de las estructuras afectadas o de los servicios urbanos influenciados por las subsidencias, es el parámetro determinante en este caso.

Otro aspecto a considerar es la distancia del punto de ataque de la perforación a las estructuras a proteger. Cuanto más distante sea este, mayor será la perforación estéril a realizar y, por tanto, el coste de este concepto. Otra cuestión es, como ya se ha mencionado, es la ejecución de los taladros de inyección desde superficie. En este caso la longitud de perforación es mucho mayor, la dificultad de replanteo de los taladros crece y los equipos de perforación alcanzan rendimientos menores que desde pozos, por lo que el coste aumenta considerablemente.

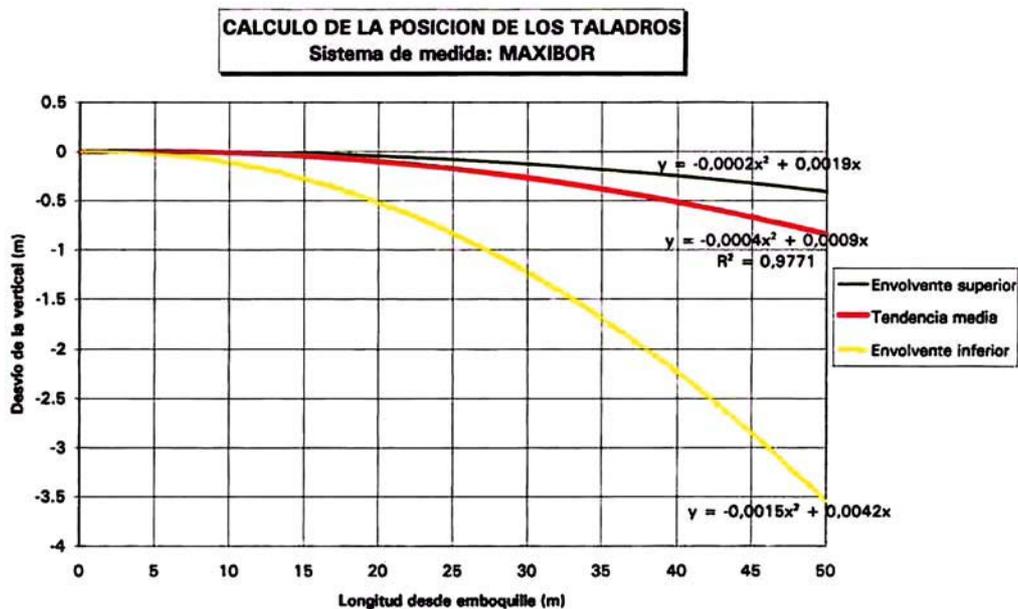


Figura 4.2. DESVÍO DE TALADROS EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD.

También hay que considerar en la valoración la longitud total de los taladros. Estos tienen una longitud óptima de unos treinta metros, pudiéndose alcanzar en terrenos adecuados hasta cuarenta metros sin sufrir desviaciones de gran importancia. Por encima de estas longitudes, la desviación de los tubos-manguito puede ser muy grande, del mismo orden de magnitud que el espaciamiento máximo entre taladros necesario. La solución consiste en estrechar la malla de taladros en estas zonas muy alejadas de los pozos de perforación, con lo que el número de taladros por metro cuadrado aumenta y, parejo a ello, el precio.

Por último hay que señalar que en este precio se incluye la ingeniería necesaria para el diseño de la malla de taladros, que dependiendo de la superficie a tratar puede llegar a tener un coste de aproximadamente el diez por ciento del coste total, siendo los porcentajes mayores para área de tratamiento reducidas.

4.2. INYECCIÓN DE ACONDICIONAMIENTO O PRETRATAMIENTO

El precio del m^3 de mezcla inyectada en fase de acondicionamiento depende, en cuanto a su medición, fundamentalmente de la naturaleza del terreno en el que está enclavado el nivel de compensación. Básicamente dependerá de la granulometría, compacidad y consolidación de los terrenos.

Terrenos con un alto índice de huecos y con golpes bajos en ensayos de penetración necesitarán un mayor volumen de inyección en la fase de pretratamiento. El rango de volúmenes a emplear en distintos tipos de terreno es muy variable, basta señalar que puede comprender desde 20 ó 30 litros por metro cuadrado en suelos terciarios de alta compacidad hasta 125 litros por metro cuadrado en suelos cuaternarios con golpes del penetrómetro dinámico tipo Borros inferiores a 10.

DENSIDAD DE LAS INYECCIONES TOTALES (litros/m²)

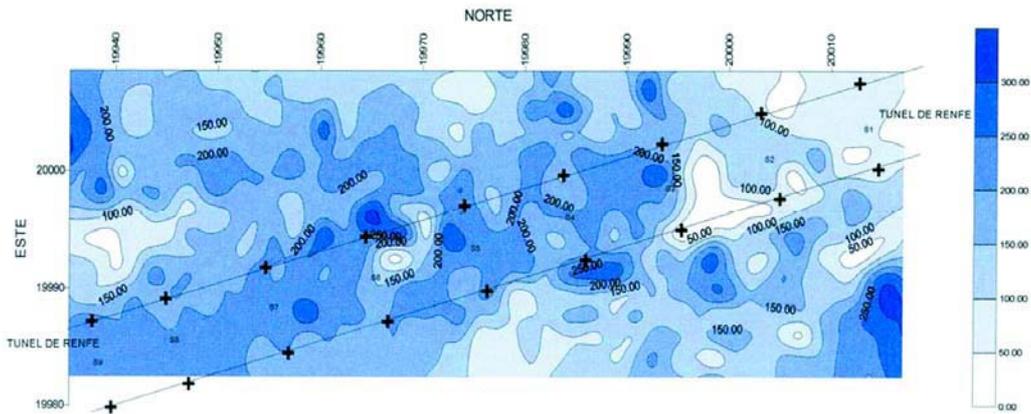


Figura 4.3. DISTRIBUCIÓN DE VOLÚMENES EN UNAS INYECCIONES DE PRETRATAMIENTO.

La valoración de este concepto es más sencilla que su medición y se calculará en función del rendimiento que se obtenga por turno de trabajo. Lógicamente este rendimiento será mayor en el caso de episodios de inyección con volúmenes más altos. Además, en este precio se debe incluir la ingeniería para la evaluación de los resultados de las distintas pasadas de inyección, así como los informes de resultados que deben ser emitidos con cada una de las mismas.

4.3. INYECCIÓN DE COMPENSACIÓN

El concepto m³ de fabricación de mezcla para compensación incluidos materiales comprende simplemente los materiales que componen la mezcla de inyección, la maquinaria precisa para su fabricación y el personal encargado de la misma. Para su medición en fase de proyecto se ha de calcular de acuerdo a la previsión del volumen de la subsidencia que producirá la excavación, multiplicado por el factor de eficiencia de la inyección que se haya determinado para el tipo de terreno en el que se vaya a realizar la inyección, y que suele estar comprendido entre tres y cinco veces el volumen de la subsidencia, aunque puede ser incluso superior.

Los turnos de equipo para inyección de compensación comprenden el personal y la maquinaria necesaria para la ejecución de las inyecciones, así como la ingeniería necesaria para el análisis de resultados y la toma de decisiones a la vista de los mismos. El motivo de utilizarse este precio por turnos de trabajo de los equipos es la enorme dependencia de las inyecciones de compensación del ritmo de los trabajos de excavación de los túneles, por lo que no pueden estimarse unos rendimientos determinados, como sucede en la fase de acondicionamiento.

Por este motivo, los turnos de trabajo necesarios en cada caso se han de prever en función de la velocidad de avance de la excavación, dividiendo la longitud de túnel que atraviesa la superficie a proteger por aquélla. De este cálculo resultarán los turnos de trabajo necesarios durante la fase concurrente de las inyecciones. Esto en lo que respecta a esta fase, pero será necesario reservar un número determinado de turnos para realizar inyecciones durante la fase observacional una

vez que el túnel ha sobrepasado la zona de tratamiento. Esta medición es tremendamente difícil de determinar *a priori*, pues el objetivo de la fase concurrente es necesariamente evitar la necesidad de realizar ninguna inyección observacional, aunque muchas veces esto no es posible. De todas formas, un valor muy habitual para esta medición, en el caso de áreas de tamaño comprendido entre 1.000 y 2.000 metros cuadrados, es de cinco turnos, es decir, una semana de turnos diurnos en días laborables.

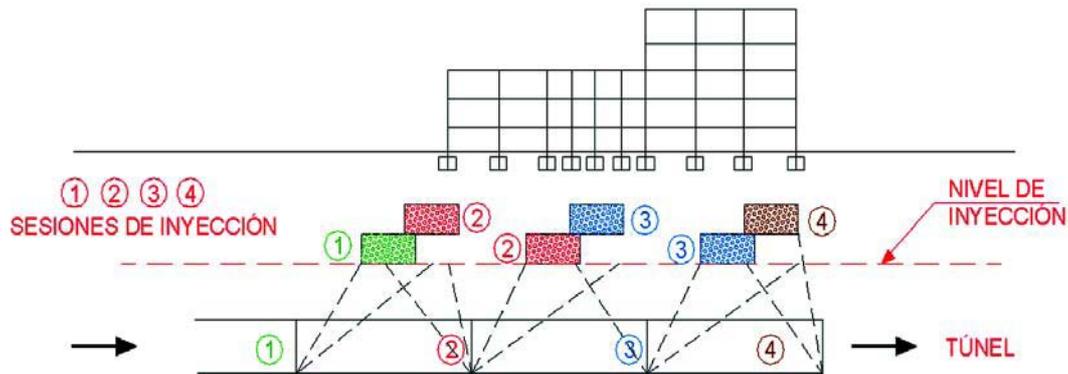


Figura 4.4. SECUENCIA DE INYECCIONES ADAPTADA AL AVANCE DE LA EXCAVACIÓN.

Por último es necesario explicar los dos últimos conceptos de valoración, el día de parada de equipo para inyección de compensación y el día de disposición en obra de maquinaria para inyección de compensación por parada programada. El primer precio se aplica a paradas no programadas o paradas programadas de duración inferior a la semana. Es de aplicación típica en las paradas por necesidades de ejecución de los túneles en los cuales el personal encargado de las inyecciones tiene que permanecer en obra a la espera de comenzar los trabajos en cualquier momento o en el periodo de decisión y cálculo entre las fases concurrente y observacional de las inyecciones. Aunque la medición es difícil de determinar, es usual la previsión de cinco turnos, dado que se suele tardar al menos este tiempo en decidir la necesidad de inyecciones observacionales tras observar la evolución de los movimientos del terreno una vez que ha pasado el túnel.

El segundo precio se aplica solo en paradas programadas de más de una semana de duración. Se suele emplear en el caso ya mencionado de que el equipo de inyección deba permanecer a la espera de la ejecución de otras excavaciones en la misma zona de manera programada, sin necesidad de que el personal deba permanecer en obra durante este tiempo. En este caso, la medición estimada se calculará en función del plan de obra general. En todo caso, es necesario evaluar si resulta económicamente más adecuado mantener en obra la maquinaria o agregar una partida alzada de movilización de equipos adicional.

4.4. INSTRUMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO

Como se ha explicado en anteriores epígrafes, las inyecciones de compensación precisan de un importante esfuerzo en el campo de la instrumentación y auscultación, dado que sus resultados sólo se pueden evaluar a partir de los datos suministrados por los equipos de control de movimientos. Sin embargo, también es cierto que este control está basado en aparatos más o menos sofisticados, pero que en cualquier caso son habituales en la instrumentación de obra civil y de edificación.

En cuanto al suministro e instalación de los instrumentos de medida, es difícil dar unas recomendaciones para su medición, pues es preciso realizar un estudio de los edificios y estructuras afectados por las inyecciones para, posteriormente, diseñar el sistema de instrumentación más

adecuado a cada caso. La valoración es más sencilla, puesto que no existe ningún motivo para que los precios sean en absoluto diferentes a los normales para este tipo de trabajos.

En cuanto al seguimiento por parte de los equipos de lectura de los instrumentos, la medición dependerá de dos factores: en primer lugar de la duración de las inyecciones y en segundo lugar del área cubierta por las inyecciones y la densidad de instrumentos en dicha área.

Es evidente que la duración de los trabajos de inyección determinará los días de trabajo de los equipos de seguimiento. Estos días no deben limitarse estrictamente a la duración de los trabajos de inyección, si no que deben prolongarse hasta la obtención de unas medidas estables que garanticen la no necesidad de ejecutar nuevas pasadas de inyección. Además es importante considerar si la excavación se va a producir en turnos de 24 horas (situación habitual en el caso de tuneladoras), puesto que en este caso habrá que disponer de equipos de lectura en horario nocturno.

El área cubierta y la densidad de instrumentos condicionará el número de equipos simultáneos necesarios para la realización de las lecturas. Hay que tener en cuenta que una vez ejecutada una pasada de inyecciones de compensación es necesario analizar los movimientos producidos por la misma antes de realizar la siguiente, por lo que en el caso de áreas de compensación muy grandes o un número muy elevado de instrumentos será necesario disponer de varios equipos de lectura para no retrasar los trabajos de inyección.

La valoración de estos equipos se hará también a precios habituales de mercado, teniendo en cuenta, como ya se ha mencionado, que generalmente es necesario fijar un precio para los trabajos realizados en horas nocturnas o en días no laborables.