S-6

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas

ÁREA: ~~C2~~ C5

MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

COMPENSACIÓN. TRATAMIENTO NUMÉRICO.

PONENTES: Ezequiel Domínguez
Dr. I.C.C.P.
AYTO. MADRID

Día: 24/05/07
Hora: 19:15 A 20:15

COMPENSACIÓN DE MOVIMIENTOS DURANTE LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES. TRATAMIENTO NUMÉRICO.

Ezequiel Domínguez Lucena
Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ayto. de Madrid. D. General de Movilidad.

Palabras clave: Compensación, Inyecciones, Túneles, Subsidencias, Metro de Madrid.

RESUMEN: *En esta clase se describe el proceso de ejecución de las inyecciones de compensación, los sistemas de control más empleados y la simulación numérica de los tratamientos de compensación por medio de un modelo de elementos finitos que reproduce la interacción existente entre la construcción del túnel y la ejecución de las inyecciones. El control del movimiento de algunos puntos de la superficie durante el cálculo condiciona el inicio de las fases de inyección y el volumen inyectado. La relación de eficacia existente entre el volumen realmente inyectado y el volumen de asientos compensados por el tratamiento, se introduce mediante un modelo de pérdidas calibrado con medidas recopiladas durante los trabajos de ampliación del ferrocarril metropolitano de Madrid.*

1. INTRODUCCIÓN

En la última década se ha visto generalizado el empleo de los tratamientos del terreno mediante inyecciones de compensación, debido al éxito obtenido en la conservación de las estructuras sin apenas movimientos. Estos tratamientos comportan una interacción con el proceso de excavación del túnel y un detallado control de los movimientos en función de los cuales se diseña la actuación.

La ejecución de los tratamientos del terreno mediante inyecciones de compensación es altamente compleja por lo que su dirección automatizada permite ajustarse al máximo a las necesidades de inyección durante el desarrollo de los trabajos, lográndose así una óptima ejecución de las inyecciones y alcance de los objetivos. El diseño de estos tratamientos exige una fiel simulación tanto del proceso de excavación y de generación de subsidencias como el del control de su ejecución.

2. TRATAMIENTOS CON INYECCIONES

2.1. Clasificación de los Tratamientos de Inyección

En el contexto de los tratamientos del terreno mediante inyecciones, es preciso distinguir los principales procedimientos de inyección que se emplean actualmente, así como las distintas aplicaciones a las que se destinan.

Atendiendo al procedimiento de introducción del material en el terreno, se puede establecer una primera clasificación genérica de las inyecciones (Sola, 1999):

a) Inyecciones por presión: Se trata de la introducción del producto inyectado por medio de un tubo que lo difunde en el terreno.

b) Inyecciones por velocidad (Jet Grouting): Se basa en proyectar a gran velocidad y a alta presión un fluido por unas toberas, que remueve el terreno in situ mezclándolo simultáneamente con el producto cementante inyectado.

En las inyecciones "por presión" se pueden a su vez distinguir tres tipos (Mitchell, 1981):

A) Inyecciones de Impregnación o Relleno.
B) Inyecciones Compactación o Desplazamiento.
C) Inyecciones con fracturación.

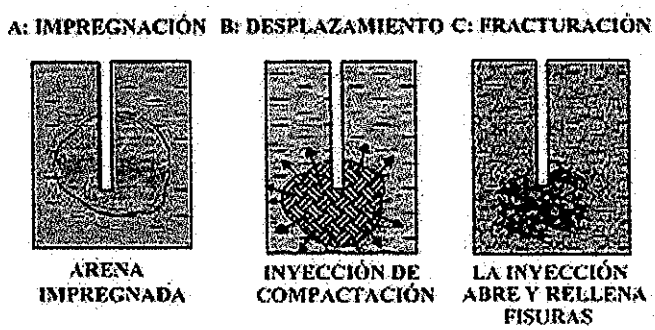


Figura 1 Tipos de inyección "por presión" (Mitchell, 1981).

2.2. Inyecciones de Compensación

La compensación de movimientos constituye un proceso dinámico que introduce material entre una estructura y un túnel para lograr la compensación inmediata de los movimientos que provoca el fenómeno de la subsidencia. Parece pues, inadecuado, aplicar la expresión "compensación de movimientos" cuando dicha medida no sea adoptada en consonancia con la generación de asientos que provocan los trabajos de tunelación. En tal caso sería apropiada la calificación de medida de protección estructural.

Para lograr su objetivo los tratamientos de compensación proporcionan mediante inyecciones el volumen de terreno perdido por la convergencia de las paredes de la sección excavada. Los movimientos impuestos al terreno pueden provenir de inyecciones de compactación o de fracturación. Actualmente se suelen emplear pozos de inyección próximos al área de tratamiento, interponiéndose un abanico horizontal de taladros y tubos de inyección entre la estructura afectada y la excavación. Un equipo perforador se ocupa de la ejecución de los taladros y la disposición de las tuberías de inyección.

2.3. Equipos de inyección

En el proceso general de inyección de una mezcla con base hidráulica en el terreno, se pueden resaltar una serie de operaciones básicas comunes a todo tipo de inyección. Los componentes de la inyección dosificados se combinan en un mezclador coloidal de alta velocidad (superior a 1500 rev/min), lo que dota a la mezcla de homogeneidad, estabilidad y durabilidad, aumentando además su penetración. La mezcla batida durante un tiempo que oscila entre 1 y 3 minutos, se acumula en un agitador que elimina las burbujas de aire y la mantiene en movimiento (a 100 rev/min y no más de 1 hora) hasta que una bomba de inyección la aspira y la impulsa mediante una línea de conductos hacia la boca de la perforación, donde por medio de un manómetro y un caudalímetro se controla el proceso de inyección.

Cuando la sustancia de inyección bombeada llega a la boca del taladro se precisa de una serie de dispositivos especiales para su correcto emplazamiento dentro de la perforación. El sistema de tubo-manguitos es el más extendido en todas las aplicaciones y es válido para todo tipo de inyección por presión (impregnación, compactación y fracturación). Se trata de un conducto de acero o P.V.C. con un diámetro entre 37,5 y 62,5 mm, que posee unas perforaciones circulares de 8 mm de diámetro regularmente espaciadas cada 0,3 a 1,5 m. Las perforaciones se encuentran recubiertas por la cara exterior del conducto por unos manguitos de goma.

Por el interior del tubo citado se introduce una lanza de inyección flexible, de menor diámetro, que posee en su extremo final unos agujeros practicados entre las cabezas de un doble obturador. El doble obturador se sitúa de forma que queden enfrentados los agujeros de la lanza de inyección y un grupo de perforaciones del tubo-manguitos. El diámetro del taladro suele ser de 75 mm rellenándose la holgura que resta con el tubo-manguitos con una mezcla llamada "gaine" o inyección de sellado. No deberían emplearse lodos tixotrópicos para la estabilización de la perforación, dado que dificultarían posteriormente el proceso de inyección. La inyección de sellado tiene por misión fundamental el conseguir una obturación longitudinal y continua de la holgura entre el tubo-manguitos y la pared de la perforación. Sin embargo, deberá permitir la inyección localizada en cada manguito aunque impida su fuga por el taladro. Por último la inyección de sellado deberá poseer un tiempo de fraguado que no provoque retrasos en las etapas de inyección y tendrá que ser resistente a los posibles ataques químicos del terreno. Habitualmente se emplean como inyección de sellado suspensiones plásticas y estables de cemento y bentonita con poco cemento para evitar tapones en el punto de inyección.

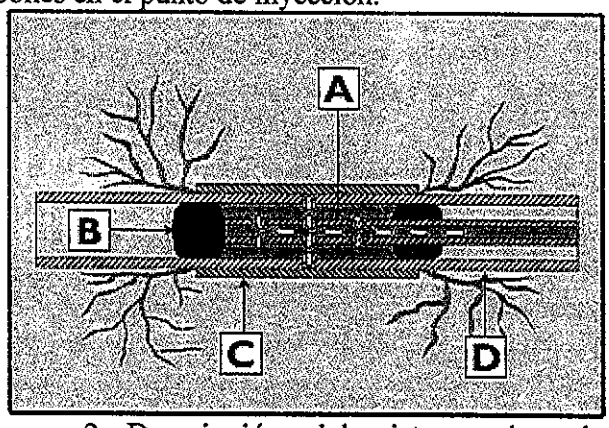


Figura 2 Descripción del sistema de tubo-manguitos (Keller, 2000).

El sistema de tubo-manguitos se acciona al impulsar la mezcla a presión por la lanza de inyección (Figura 2 (A)) hasta su extremo final de forma que, confinada por el doble obturador (Figura 2 (B)), levanta el manguito de goma (Figura 2 (C)) lo que permite a la inyección salir rompiendo el sellado de cemento-bentonita para penetrar en el terreno. El manguito de goma impide el retorno de la

mezcla al interior del sistema y el sellado de cemento-bentonita impide la fuga de la inyección a través de la holgura de la perforación hasta la superficie. Este procedimiento de localización de la inyección es el que logra definir tramos de inyección de la forma más fiable, permite la inyección selectiva de unidades discretas de perforación incluso con distintos materiales, y admite la reinyección de cualquier tramo.

De esta manera los sistemas de inyección actuales han permitido la localización del volumen inyectado en las zonas deseadas y la posibilidad de reinyectar las veces que la evolución de los asientos por subsidencia lo requiera. En la Figura 3 se representa un esquema de la evolución del asiento desarrollado en un punto a medida que avanza la excavación del túnel, se observa la progresión del asiento cuando no existe tratamiento de compensación y el efecto que se consigue cuando se aplica éste.

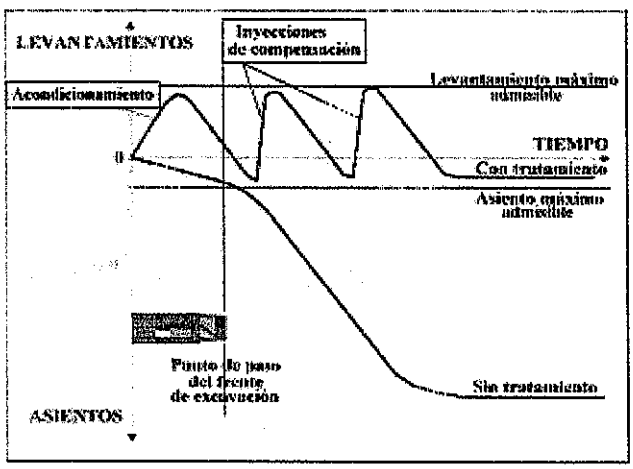


Figura 3. Evolución del asiento de un punto de la superficie (Domínguez, Oteo, De la Fuente, 2002).

2.4. *Etapas del tratamiento*

El proceso de ejecución de las inyecciones de compensación en el caso más general puede considerarse integrado por 2 etapas consecutivas, una de "Acondicionamiento" y otra de "Compensación".

Dentro de cada una de estas etapas algunos autores distinguen ciertas técnicas bajo diferentes denominaciones:

1) La primera etapa denominada "Acondicionamiento" se realiza antes de la llegada del frente de excavación. Con ella se pretende una preparación del terreno para mejorar la capacidad de transmisión del movimiento. Además constituye un ensayo de prelevantamiento (3-5 mm) que permite observar la reacción del terreno ante la inyección y la comprobación de todos los equipos instalados. Dentro de esta etapa pueden distinguirse:
   a) Preparación del terreno, Inyecciones previas: En ocasiones es necesario un tratamiento previo del área definida de compensación mediante inyecciones de impermeabilización y/o consolidación.
   b) Sobreelevación uniforme: Consiste en una sobreelevación uniforme del área de compensación previa a un asiento brusco de gran magnitud. Esta sobreelevación no debe superar los 10-15 mm para no dañar las estructuras de la superficie.
2) Se denomina etapa de "Compensación" a las inyecciones ejecutadas durante el proceso de descenso de la superficie. Estas inyecciones son repetitivas para mantener los asientos dentro de límites asumibles por las estructuras. Algunos autores distinguen entre las inyecciones durante el paso del frente de excavación bajo el área tratada, Compensación Concurrente, y aquella destinada a compensar los asientos diferidos, Compensación Observacional.

3. SISTEMAS INTEGRADOS DE CONTROL

3.1. *Introducción*

La ejecución de los trabajos de inyección ha supuesto tradicionalmente un proceso artesanal difícilmente controlable, tanto desde el punto de vista de la calidad de la mejora realizada, como para la realización de mediciones y valoraciones económicas.

Esta incertidumbre era fruto de la incapacidad de realizar inspecciones visuales de los trabajos durante el desarrollo de los mismos, con lo que el ajuste de los parámetros de inyección en función de los resultados obtenidos se hacía muy complejo. Las medidas de control establecidas a posteriori mediante ensayos a escala real, no permitían modificaciones de lo ya realizado tan sólo eran posibles acciones de refuerzo complementarias.

Con el desarrollo de nueva instrumentación electrónica se hizo posible el registro de numerosos parámetros que ayudarían al control de las operaciones de inyección, pero el manejo de los millones de datos generados en cualquier tratamiento de inyección hacían inviable su utilización. No obstante el tratamiento informático de este enorme flujo de registros mediante bases de datos y

programas de interpretación de los mismos, ha permitido una nueva era de los tratamientos del terreno por medio de inyecciones.

Las inyecciones de compensación constituyen una de las técnicas más desarrolladas para el control de subsidencias a partir de la implantación de los sistemas de control informatizados. Debido a la complejidad que ofrecen estos tratamientos su dirección automatizada permite ajustarse al máximo a las necesidades de inyección durante el desarrollo de los trabajos, lográndose así una óptima ejecución de las inyecciones y alcance de los objetivos.

Existen diversos aparatos y programas que permiten el registro y control de los parámetros de una inyección, sin embargo en el campo de las inyecciones de compensación se está implantando progresivamente el empleo de algunas marcas comerciales concretas.

Este apartado realiza una descripción de los sistemas de control, según la componente del tratamiento que controlan, que han sido empleados con generalidad en trabajos de compensación llevados a cabo en Madrid, Londres, Francia etc.

3.2. Definición geométrica de las perforaciones

El diseño de la red de taladros necesarios para cubrir el área de tratamiento se encuentra limitado por múltiples condicionantes geométricos y geotécnicos. Entre ellos se pueden destacar las zonas desde las que es posible la realización de los taladros, los obstáculos subterráneos y superficiales, el tipo de terreno a perforar, el diámetro de la perforación etc.

Todos estos aspectos han de ser recogidos en un programa de diseño, a ser posible gráfico, que permita de una manera visual la definición manual detallada de los taladros, estableciendo la localización, longitud y ángulo en que deberán ser realizados.

A este género de programas pertenece *CASTAUR (Concepción asistida de las aureolas de inyección),* que posibilita el manejo de modelos gráficos tridimensionales y la definición de los taladros de inyección. Este programa muestra cada propuesta de ejecución para los taladros de manera inmediata, tanto en el modelo tridimensional como en cortes bidimensionales. Calcula las longitudes de los taladros y los ángulos que los definen, y es capaz de generar a partir de los puntos de ataque de cada radiación propuestas automáticas que no interfieran con los obstáculos ni con otros haces de taladros. Recientemente el programa ha sido reescrito en lenguaje C y consta de tres módulos:

a) Modelador 3DME: El primer paso consiste en la definición de la geometría del problema por medio de volúmenes discretos, generados a partir de figuras bidimensionales según una línea directriz. Cada volumen se engloba dentro de un tipo para el manejo de esta información en los demás módulos.

b) Posicionador automático de taladros: Esta unidad realiza secciones del modelo tridimensional habitualmente verticales y horizontales. Una vez definida la primera el resto se espacian una distancia que es función de los volúmenes de inyección previstos en esa zona y de las características del terreno. En cada una de las citadas secciones es posible situar una red de taladros.

c) Diseñador automático de taladros: Esta herramienta permite la producción rápida de redes de taladros en las secciones establecidas previamente. A partir del diseño de un primer taladro existe una rutina de generación de toda la red para cubrir la zona de inyección prevista. Esta generación puede realizarse con una estrategia de radiación a partir de un eje fijo, según un patrón predefinido de puntos de ataque etc. El establecimiento de una red de taladros implica su cálculo inmediato, en cuanto a su definición geométrica (longitud, punto de ataque, ángulo) y en cuanto al volumen que corresponderá a cada válvula de inyección siguiendo un criterio de proximidad. Este programa tiene salidas gráficas en *CAD* (Diseño asistido por ordenador), permitiendo la preparación de planos de guiado para obra, también es posible confeccionar bases de datos de salida para otros programas.

3.3. Definición de los criterios de control de la inyección

El conjunto de parámetros que definen la inyección, tanto los que resulten de la definición geométrica de los taladros como las especificaciones de diseño de la inyección (tipo de inyección, caudal, presión de inyección, volumen de inyección en l/m^2, el área a inyectar etc.) deben ser introducidos en un programa que defina detalladamente las instrucciones de inyección (Ver Figura 4).

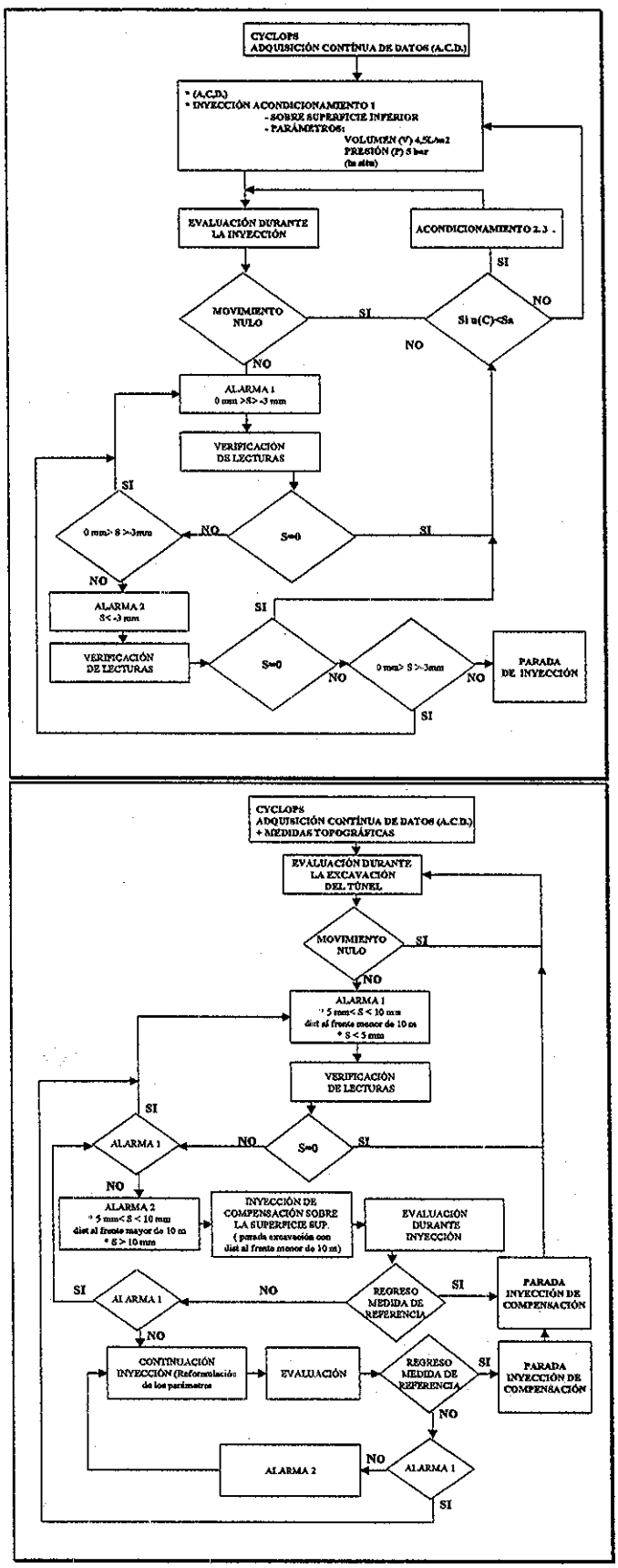


Figura 4 Diagrama de toma de decisiones para las fases de acondicionamiento y compensación (Domínguez, 2001).

El programa debe establecer para cada válvula de cada perforación, la secuencia de inyección, el caudal por fase y máximo, el volumen en esa fase, la presión recomendada o de limitación y la presión máxima o de corte.

Un programa de este tipo es *SPHINX*, que permite establecer los parámetros de inyección para cada válvula, sin embargo es más conocido el programa *CHAIRLOC (Computerised Help for Analysing the Injection Results and Localizing Optional Corrections)*. Este programa consiste en una base de datos relacional que recibe información de los parámetros de inyección y de la geometría de los taladros y del terreno (estos últimos directamente desde *CASTAUR*).

El programa produce unas pautas de guiado para la inyección de cada válvula de cada taladro. El control de la ejecución del tratamiento mediante inyecciones debe realizarse en correspondencia con los datos obtenidos del equipo de inyección y de los movimientos registrados en la superficie.

Esto se consigue estableciendo un modelo de toma de decisiones que se incluye en el programa (ver Figura 4)

3.4 Control del proceso de inyección

Es necesario que exista un equipo que controle la ejecución del bombeo de la inyección y capaz de actuar sobre él para cumplir el programa de inyecciones definido en el paso anterior. El control de la inyección puede realizarse por varios métodos: Limitación de Caudal, Limitación de Presión, Limitación de Volumen y Método *GIN (Grout Injection Number)*.

Existen varios equipos como el *EPICEA* capaces de controlar las bombas de inyección. El sistema más generalizado en los tratamientos de compensación se denomina *SINNUS3 (Système d'Injection Numérique Solétanche 3rd Generation)* Este equipo es capaz de guiar las operaciones de inyección de 12 bombas simultáneamente, indicando qué manguito hay que inyectar a cada momento y verificando que los valores registrados en las bombas, se encuentren dentro de los umbrales admisibles. La gestión de la marcha de cada bomba la lleva a cabo aplicando el método "*Grout Injection Number*" que refleja el producto de la presión de inyección y el volumen introducido ($GIN = P * V$). Este método permite controlar la presión de cada línea de inyección y cuando se sobrepasa la presión límite establecida, reducir el caudal inyectado para disminuir la presión manteniendo siempre el valor *GIN* constante. Por otro lado es posible fijar la presión máxima o de corte que provoca la detención

del bombeo si es alcanzada. Este sistema consta de las siguientes componentes:

a) Sensores de control de presión y caudal en cada bomba.

b) Sistema de adquisición, regulación y control de datos (*ARCSINNUS*). Se trata de unidades de adquisición de datos acopladas al equipo de bombeo con capacidad de comunicación con la unidad de proceso central *Sinnus3*. Su misión es la regulación directa de las bombas de inyección.

c) La unidad de proceso central de este sistema es la denominada *Sinnus3*. Esta unidad consiste en un potente ordenador PC que maneja un programa escrito en lenguaje Turbo Pascal que se ocupa del pilotaje de las operaciones de inyección definidas por *Chairloc* o *Sphinx*. Además de controlar los umbrales preprogramados en su memoria de manera continua, es capaz de generar informes con los datos registrados para transferirlos al módulo ocupado de la definición de las inyecciones. De esta forma las inyecciones subsiguientes se van adaptando a la respuesta ofrecida por el terreno en cada nueva operación.

Mediante el sistema *Sinnus3* un solo operario es capaz de manejar 12 líneas de inyección reduciéndose además los tiempos de espera entre etapas de inyección. Todo ello favorece la productividad durante la obra y el efecto del tratamiento producido al conseguirse una respuesta casi inmediata de las demandas de inyección.

3.5. Revisión gráfica de las inyecciones realizadas

El sistema de gestión de la inyección y el bombeo recarga las lecturas obtenidas durante el proceso de inyección en los módulos de definición de la inyección (*Chairloc, Sphinx* etc.), que a su vez los transmiten a un equipo de tratamiento gráfico de datos como *SCAN3D*. De esta forma es posible obtener informes diarios y gráficos de la evolución de cada jornada de trabajo. Las representaciones ofrecidas por *SCAN3D* pueden realizarse sobre planos en planta de la obra o sobre el modelo tridimensional definido en la etapa inicial por *Castaur*. El sistema de adquisición de datos del programa de representación, puede ser adaptado a otros formatos de entrada y otras fuentes de datos.

3.6. Registro de los movimientos de subsidencia

Para llevar a cabo un control integrado de los procesos de inyección y desplazamientos del terreno es preciso recurrir a la medida de los desplazamientos mediante la adecuada instrumentación. Habitualmente los tratamientos de compensación de movimientos constan de distintas fuentes de control de los movimientos para la autocomprobación de lecturas obtenidas. Algunos de los elementos utilizados son:

- Bases de nivelación.
- Clavos de nivelación.
- Hitos de nivelación.
- Regletas topográficas de nivelación.
- Extensómetros de varilla.
- Inclinómetros.
- *Trivec* (mide movimientos tridimensionales en la vertical).
- Electroniveles (miden asientos diferenciales y distorsiones en tiempo cuasi-real).
- *Cyclops* (estación total monitorizada de medición continua).

3.7. Control de los movimientos superficiales

La gestión de los datos ofrecidos por los instrumentos de medición topográfica se realiza mediante programas de gestión de bases de datos como son *GEOSCOPE o SAI*.

El programa *Geoscope* realiza una gestión de los datos recogidos por la instrumentación y previamente almacenados en la base de datos *SAAM*. Permite el establecimiento de umbrales de preaviso y alarma en las variables de asiento máximo, desplazamiento horizontal máximo admisible y distorsión angular admisible. La superación de los umbrales motiva una respuesta del sistema que produce una señal sonora y luminosa en la sala de bombas así como un mensaje pregrabado. Este programa ha sido desarrollado por la empresa especializada *Soldata*.

En cuanto al sistema de gestión de la instrumentación denominado *SAI (Sistema de Auscultación Integrado)*, fue desarrollado con motivo de la ampliación del ferrocarril metropolitano de Madrid para controlar de forma integrada los datos obtenidos de la instrumentación dado su gran volumen. Se trata de un potente gestor de bases de datos montado sobre un sistema topográfico *SIG (Sistema de información geográfica)*, que permite el manejo y representación de todos los datos recogidos en la obra sobre los planos de ejecución, controlándose en todo momento los umbrales máximos establecidos. Además su manejo amigable permite la consulta de datos gráfica y numéricamente indicando directamente sobre la pantalla el punto de interés.

3.8 Previsiones e inyección mediante nuevas estimaciones

Dentro del marco del proyecto europeo de investigación denominado *COSMUS*, se estableció el objetivo de completar el esquema de manejo de datos en los tratamientos de compensación de movimientos con inyecciones. Para cumplir dicho cometido la empresa francesa *Soletanche-Bachy* propuso la elaboración de un nuevo software informático, que recogiera los datos obtenidos de la instrumentación y los utilizara para retocar la estimación realizada en cuanto a las subsidencias y los volúmenes de inyección previstos.

El "feed back" en la nueva estimación puede realizarse mediante los métodos de estimación clásicos, o mediante un modelo de elementos finitos tridimensional que es retocado cada vez que se completa el ciclo de control (Buchet, 1999). Este programa, denominado *COGNAC*, cierra el ciclo de control de las inyecciones de compensación al que denominaron *CONTACTS (Control of the active Tunnel Settlements)*.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO

4.1 Introducción

La reproducción de un proceso geotécnico complicado exige siempre numerosas simplificaciones, pero la mayor dificultad que se debe superar en la simulación numérica de las inyecciones de compensación reside en la simultaneidad de fenómenos. Por un lado es preciso englobar en un único modelo numérico dos fenómenos de escalas muy dispares; mientras que los procesos de inyección producen plastificaciones que se desarrollan en pocos milímetros (10-100 mm), el proceso de compensación de los movimientos superficiales generados requiere modelos de un orden de magnitud mucho mayor.

Por otro lado hay que incluir en la simulación la simultaneidad temporal que existe entre el avance de la excavación y las sucesivas etapas de inyección.

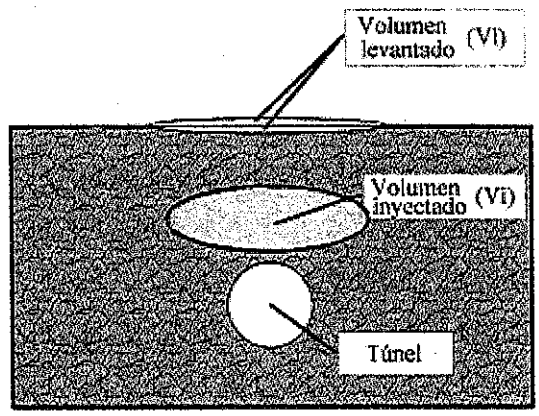
Además, se ha observado empíricamente como el desplazamiento logrado por un cierto volumen de material inyectado resulta menor en función de la distancia al punto de inyección. Este efecto provoca que los levantamientos en la superficie no tengan el mismo valor que los impuestos al nivel de la inyección. En los tratamientos mediante inyecciones de compensación este hecho se traduce en una pérdida de eficacia del volumen inyectado. Esta relación de eficacia depende de numerosos factores, entre los que se puede destacar:

- Pérdidas de volumen debidas a la compresibilidad del terreno situado bajo la inyección.
- Pérdidas por deformación del terreno compresible situado sobre el nivel inyectado.
- Deformación lateral de la inyección que provoca movimientos horizontales.
- Deformación propia del material inyectado sometido a presión.
- Pérdidas debidas a la consolidación diferida del terreno circundante.
- Fugas de material inyectado a la superficie o a cavidades próximas.

En vista de la multitud de factores que gobiernan la eficacia de las inyecciones de compensación y de la variabilidad de situaciones que caracteriza cualquier excavación subterránea, se deduce que la estimación teórica de este parámetro resulta en gran medida inabordable. Actualmente sólo se puede obtener a priori la eficacia de la inyección a partir de ensayos a escala real y resultados extraídos de las etapas de pretratamiento y acondicionamiento de la compensación.

Para expresar cuantitativamente el grado de influencia que sobre los levantamientos producidos posee el volumen inyectado es preciso definir un "Coeficiente de Eficacia".

En la simulación realizada se ha utilizado la medida introducida por Oteo en 1999 durante la ampliación del metro de Madrid como un coeficiente que relaciona el volumen de inyección introducido y el volumen de levantamientos generados en la superficie (ver Figura 5).



$$\text{Coeficiente de eficacia} = \frac{Vi}{Vl}$$

Figura 5 Definición del coeficiente de eficacia $\xi = Vi/Vl$.

4.2 Modelo geomecánico adoptado.

El terreno en el que se centra este análisis numérico es un suelo duro preconsolidado como el de la zona del centro de España, en concreto la zona de Madrid. Basándonos en la descripción de las principales unidades geotécnicas del subsuelo de Madrid se han distinguido 3 niveles estratigráficos en función de la deformabilidad del terreno. Dado que se pretende simular la generación de subsidencias y su reducción por medio de la compensación de movimientos, parece adecuada la distinción de los terrenos tipo a tenor de su módulo de deformación (ver Figura 3):

Terreno tipo Relleno: Se incluyen dentro de esta categoría los suelos cuyo módulo de deformabilidad está comprendido entre los 2 y los 20 Mpa. En general encontraremos dentro de esta tipología de suelos los rellenos blandos de naturaleza antrópica, los suelos de origen aluvial y las peñuelas reblandecidas.

Terreno tipo Terciario 1: Se agrupan bajo esta denominación los suelos cuya deformabilidad se encuentre entre los 20MPa y los 80MPa. Habitualmente las formaciones geotécnicas características de Madrid que poseen esta deformabilidad son las arenas de miga, los depósitos arenosos de rampa y las arenas micáceas del mioceno.

Terreno tipo Terciario 2: La deformabilidad de estos materiales supera los 80MPa. Principalmente las unidades geotécnicas que presentan módulos de deformabilidad tan elevados son las arenas tosquizas, el tosco arenoso, el tosco, las peñuelas con o sin yesos, los yesos y las intercalaciones de sepiolita.

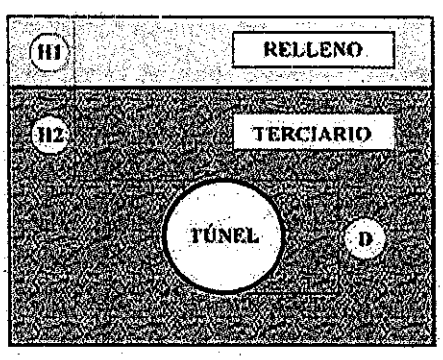


Figura 1. Esquema de la estratigrafía tipo para el análisis de la compensación.

Las características adoptadas en la simulación numérica para estos terrenos tipo se resumen en la Tabla 1. El esquema constitutivo Elástico y Lineal reproduce adecuadamente el comportamiento deformacional de los suelos preconsolidados de Madrid. Con este modelo de comportamiento se han llevado a cabo las estimaciones numéricas de asientos durante las ampliaciones de metro de Madrid (Medina, 2000). El gradiente que afecta a los terrenos denominados Terciario 1 y 2 se corresponde a un aumento del módulo de deformación con la profundidad a partir del techo del estrato según la expresión: :

$$E(z) = E_0 + z \cdot grad \qquad (1)$$

donde z representa la profundidad del terreno expresada en metros y E el módulo de deformación en MPa. El gradiente de aumento con la profundidad ha sido fijado teniendo en cuenta el rango de deformaciones que se van a producir y las recomendaciones realizadas por De la Fuente en 1986.

Terreno Tipo	Propiedades	
RELLENO	Densidad natural, γ (g/cm3)	1.85
	Coeficiente de Poisson, ν	0.3
	Módulo de deformación, E (MPa)	12.5
TERCIARIO 1	Densidad natural, γ (g/cm3)	2.1
	Coeficiente de Poisson, ν	0.3
	Módulo deformación inicial, Eo (MPa)	12.5
	Gradiente, grad (MPa/m)	7.5
TERCIARIO 2	Densidad natural, γ (g/cm3)	2.1
	Coeficiente de Poisson, ν	0.3
	Módulo deformación inicial, Eo (MPa)	80
	Gradiente, grad (MPa/m)	7.5

Tabla 1. Parámetros de cálculo de los terrenos tipo.

4.3. Tratamiento mediante inyecciones.

La simulación numérica del abanico de inyecciones requiere por un lado la introducción del material de inyección, y por otro lado su localización geométrica en el modelo. Para simular las inyecciones algunos autores han introducido en el modelo numérico unas presiones ficticias que reproducen su efecto. Estas presiones pueden intercalarse entre los elementos de la malla produciéndose un hueco en la misma. Esta técnica no permite eliminar dichas presiones puesto que la cavidad se cerraría. Este procedimiento fue empleado por Kovacevic en 1996.

Otro procedimiento consiste en introducir las presiones ficticias de forma que se produzca la extensión de ciertos elementos, de esta manera es

posible eliminar la presión convirtiendo los elementos del interior de la cavidad en incompresibles. Esta técnica fue empleada por Soga en 1999.

Finalmente es posible producir expansiones en el volumen de los elementos que representan la inyección, bien por medio de leyes internas del material o bien mediante la sensibilidad del modelo a variaciones de temperatura. Esta técnica fue empleada por Schweiger en 1998 y ha sido la introducida en este análisis.

La aplicación de las inyecciones a presión produce la rotura del terreno en la dirección de las tensiones principales del suelo. En el caso de terrenos sobreconsolidados como es el suelo duro de Madrid se produce un efecto de "gato plano" que transmite el desplazamiento según la vertical. En el modelo numérico se adopta sensibilidad térmica vertical en los elementos de la inyección, resultando una relación lineal entre las variaciones de temperatura y el volumen inyectado.

4.4. Distribución selectiva del material de inyección. Zonificación dinámica.

Los trabajos de inyección para la compensación de movimientos habitualmente se realizan a partir de un conjunto de perforaciones en forma de abanico en planta que tratan de cubrir la proyección horizontal de las estructuras. Esto se basa en la necesidad de concentrar los movimientos provocados por la inyección bajo la estructura que, afectada por la excavación del túnel, se encuentra en proceso de descenso.

La técnica de inyección por tubo-manguitos no sólo permite la reinyección repetitiva de pequeños volúmenes de material, algo fundamental en la compensación controlada de asientos, sino que además permite la localización selectiva de las inyecciones en la zona donde se producen mayores movimientos. De esta forma se logra distribuir mejor la inyección y se consigue compensar de manera uniforme la distribución de asientos que, en forma de campana de Gauss, se producen en la superficie.

Para distribuir dentro del área de inyección el material se ha establecido un procedimiento de localización de las admisiones en función de varios puntos de control situados en la superficie (Puntos **A, B y C**). La técnica se basa en distinguir en la capa de inyección varias zonas independientes en las que el control de la admisión se realiza durante el desarrollo de la simulación. Las longitudes abarcadas por estas zonas son función de la longitud de la capa de inyección, que tiene un semiancho variable según la profundidad de la excavación para cubrir la superficie teórica de subsidencias. Esto queda definido según la expresión:

$$L = R + \frac{Dist}{tg(\theta)}$$

Donde R es el radio del túnel, "Dist" representa la mínima distancia entre la inyección y el eje del túnel y θ es el ángulo de extensión de la cubeta de subsidencias (normalmente θ=45°). La longitud total de la inyección es 2L. De esta forma las longitudes de cada zona serán: 2L/3 para la zona A, 2L/6 para la zona B y 2L/6 para la zona C.

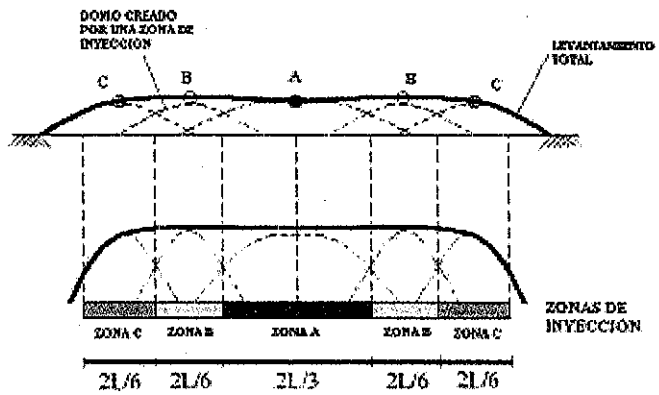


Figura 6 Levantamiento producido como suma de zonas de inyección independientes (Domínguez, Oteo, De la Fuente, 2002)

La localización de admisiones se basa en una serie de puntos de control situados en la superficie sobre la proyección del centro de cada zona de inyección. Los movimientos de cada punto se controlan de manera independiente, al igual que los volúmenes inyectados en cada zona. Así, una vez comenzado un ciclo de inyección, la metodología de simulación activa el incremento de volumen en cada zona hasta lograr que todos los controles de la superficie superen un cierto umbral de levantamiento. Cuando esto ocurre en un punto de control la zona correspondiente deja de incrementar su volumen (ver Figura 6). El resultado del levantamiento es una deformada continua generada a partir de la adición de pequeños domos de deformación semejantes a curvas de Gauss invertidas.

4.5 Simulación coordinada del control de movimientos y las operaciones de inyección.

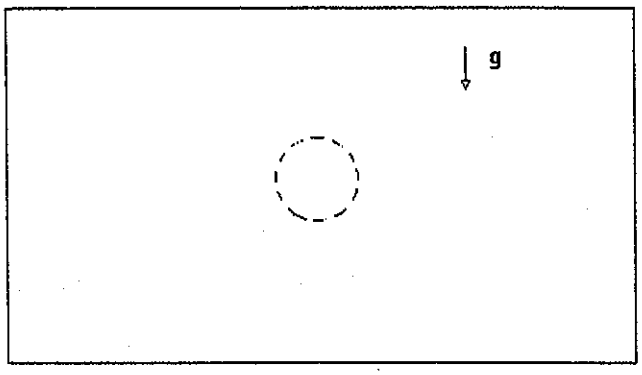
La compensación de movimientos se basa en un

proceso iterativo de inyecciones que busca mantener en la superficie del terreno los movimientos limitados dentro de un umbral máximo. Durante las últimas actuaciones efectuadas en el metro de Londres y Madrid se han desarrollado programas de control de los movimientos y de la inyección interactivos, que permiten un tratamiento del terreno simultáneo con el avance de la excavación. La simulación completa y realista del proceso de compensación de movimientos mediante inyecciones exige poner en común en un modelo numérico la simulación local de la inyección, su simulación global y el proceso de avance del frente de excavación. Para poder coordinar los procesos de inyección y las fases de ejecución de la excavación es preciso desarrollar una metodología de simulación que controle los eventos acontecidos durante el cálculo y responda adecuadamente a los mismos. Este cometido puede abordarse desde la lógica de la programación consiguiéndose, al igual que en la aplicación real, una simulación activa que realiza el control de la inyección y el registro de los movimientos superficiales por medio de un esquema lógico y predefinido de toma de decisiones.

La interactividad necesaria entre la preparación de las futuras etapas del proceso de cálculo y los resultados obtenidos en las fases realizadas, ha sido posible por medio de la simulación en pasos sucesivos de todo el fenómeno. Por un lado, la división en múltiples etapas sucesivas del proceso ha permito el control sistemático de los movimientos en la superficie, que pasan a actuar como variable dato para la toma de decisiones. Por otro lado, se consigue escalonar las fases constructivas lo suficiente como para hacer efectivas las inyecciones en el momento exacto en el que se realizarían durante la ejecución real.

La modelación de la excavación del túnel debe tener en cuenta durante el cálculo las no-linealidades geométricas que implican las grandes deformaciones. Para contemplar estas grandes deformaciones cada etapa de cálculo está compuesta a su vez de una serie de iteraciones que logran la convergencia del cálculo no lineal. En la metodología propuesta es preciso resolver cada fase del proceso basándose en los resultados de la fase anterior, no siendo posible obtener los resultados hasta que no se ha concluido su cálculo. Este hecho obliga a reproducir los procesos de excavación e inyección en múltiples etapas para poder analizar los resultados en los sucesivos pasos de la ejecución. El control de la inyección se logra aplicándola en pequeños incrementos, cada uno de ellos constituye una fase de cálculo independiente lo que permite un seguimiento continuo de su efecto y la puesta en marcha de un criterio de parada de la inyección.

Inicialmente es preciso realizar un estado previo de peso propio para obtener las fuerzas nodales del contorno de la excavación futura.

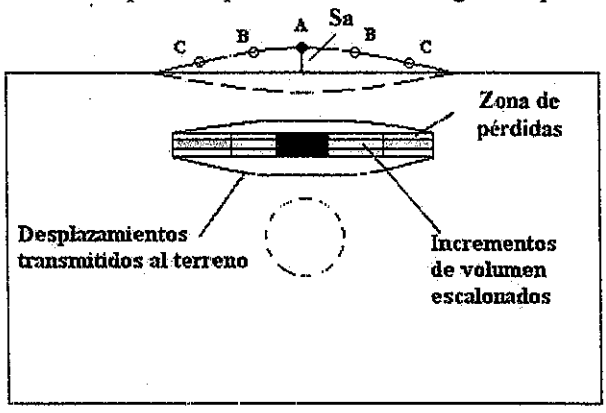


ESTADO PREVIO: CÁLCULO DE FUERZAS NODALES

ESTADO PREVIO

- Se eliminan los elementos del revestimiento y la inyección
- Se resuelve con peso propio
- Se extraen las fuezas nodales del contorno de la excavación futura.

A continuación se describen las fases de simulación que componen la metodología adoptada



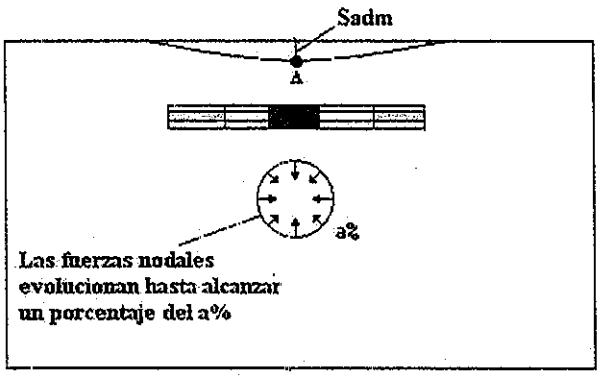
ACONDICIONAMIENTO

ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO

- Se inyecta en sucesivas iteraciones incrementando el volumen mediante aumentos de temperatura.
- En cada iteración se calcula el volumen inyectado y se observa el coeficiente de pérdidas que debe aplicarse mediante un decremento de temperatura impuesto alrededor de la inyección.
- Se registra en cada incremento el movimiento de la superficie en varios puntos de control situados sobre las zonas de inyección.
- Se detiene la inyección en cada zona cuando la superficie se eleve "Sa". Además se calcula el

volumen inyectado durante el acondicionamiento y el área de levantamientos producido, con el fin de calcular el coeficiente de eficacia.

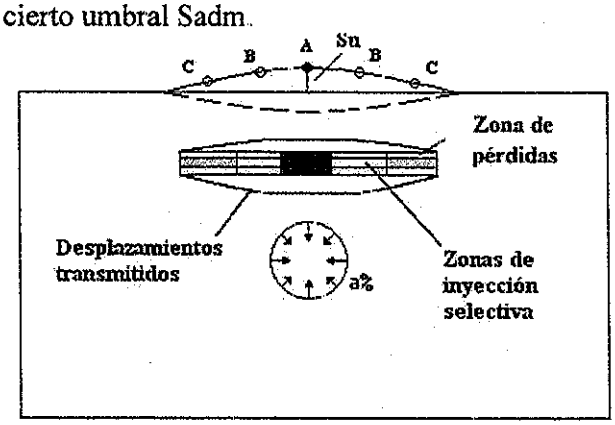
$$\xi = \frac{V_i}{V_l}$$



RELAJACIÓN

ETAPA DE ASIENTOS DURANTE LA EXCAVACIÓN

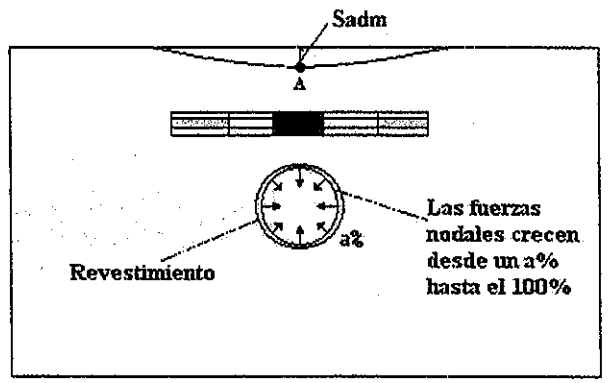
- El nivel de temperatura alcanzado se mantiene constante para evitar pérdidas de volumen de los elementos por deformación propia.
- Se excava la sección completa.
- Se colocan gradualmente en pasos sucesivos incrementos de fuerzas nodales en el contorno de la excavación hasta permitir una relajación del terreno del a %.
- Se registra el asiento superficial a cada incremento y se dispara la inyección alcanzado cierto umbral Sadm.



COMPENSACIÓN SIN REVESTIMIENTO

ETAPA DE COMPENSACIÓN 1

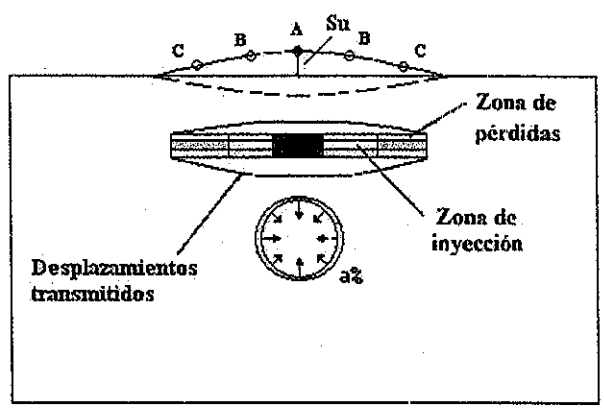
- Si en la etapa anterior se alcanzó el Sadm se inyecta en sucesivas iteraciones incrementando el volumen mediante incrementos de temperatura que se añaden al nivel de temperatura alcanzado en fases anteriores.
- Se calcula automáticamente en cada iteración el volumen inyectado acumulado y el coeficiente de pérdidas a adoptar según la ley preestablecida. Se aplica el decremento de temperatura correspondiente en los elementos de alrededor de la inyección.
- Se registra en cada incremento el movimiento de la superficie en los puntos de control dispuestos sobre las zonas de inyección.
- Se detiene la inyección al regresar al umbral Su y se mide el volumen inyectado y el área de levantamientos producido, con el fin de calcular el coeficiente de eficacia



ASIENTO CON REVESTIMIENTO

ETAPA DE ASIENTOS AL INTRODUCIR EL REVESTIMIENTO

- Se coloca el revestimiento.
- Se introduce gradualmente partiendo del a % hasta a=100% las fuerzas nodales.
- Se registra el asiento superficial a cada incremento y se dispara la inyección cuando se alcanza cierto umbral Sadm.



COMPENSACIÓN CON REVESTIMIENTO

ETAPA DE COMPENSACIÓN 2

- Si en el paso anterior se superó el umbral admisible, se produce una nueva inyección en varias iteraciones mediante incrementos de temperatura.
- Nuevamente se calcula en cada etapa el volumen de inyección acumulado y el coeficiente de pérdidas a aplicar en el decremento de temperatura impuesto en el contorno de la inyección.

- Se registra en cada incremento el movimiento de la superficie en los puntos de control situados sobre cada zona de inyección.
- Se detiene la inyección en cada zona de inyección al regresar al levantamiento de Su en el punto de control correspondiente. Se calcula el volumen inyectado en esta fase y el área de levantamientos producido, con el fin de calcular el coeficiente de eficacia.

$$\xi = \frac{V_i}{V_l}$$

4. APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para un análisis pormenorizado de los resultados obtenidos al explotar el modelo numérico descrito en este artículo se remite a la lectura del texto "*Análisis de la compensación de movimientos originados por la excavación de túneles*" (Domínguez, 2001).

A continuación se describe la relación hallada entre el volumen de inyección y la deformabilidad media del terreno situado en la montera de la excavación.

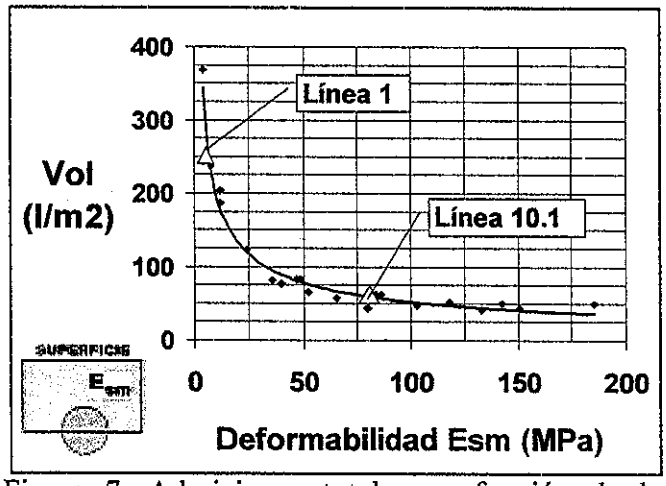


Figura 7. Admisiones totales en función de la deformabilidad media del terreno. (Domínguez, 2001)

La deformabilidad del terreno influye en el volumen de inyección total que es preciso introducir para completar la compensación de los movimientos generados por la excavación del túnel. En la Figura 7 se muestran los volúmenes por metro cuadrado finales necesarios en los casos estudiados, frente al módulo de deformabilidad medio del terreno situado sobre el eje del túnel. Se observa que conforme aumenta la rigidez del terreno, los volúmenes por metro cuadrado requeridos por el tratamiento disminuyen, al igual que son precisas menos etapas de inyección. El rango de variación recogido en los casos planteados se ha desplazado entre los 370 l/m^2 y 40 l/m^2.

Los valores de la admisión final registrados durante la ampliación de la línea 1 del metropolitano de Madrid hasta Villa de Vallecas, y durante la compensación llevada a cabo bajo un edificio situado en la calle Sanchidrián en el enlace de la línea 10 con Metrosur, han sido también incluidos en la Figura. La correlación existente entre las variables representadas en dicha figura ha permitido establecer la interpolación de una curva que relaciona ambas variables según la expresión:

$$Admisión = 780 \cdot E_{sm}^{-0.6}$$

donde la admisión de material viene expresada en litros de lechada por metro cuadrado de área de tratamiento, y el módulo medio de deformación (E_{sm}) en MPa.

REFERENCIAS

Domínguez, E. (2001) "Análisis de la compensación de movimientos originados por la excavación de túneles". *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid (2001).

Domínguez, E., Oteo, C., De la Fuente, P. (2002) "Tratamientos del terreno mediante inyecciones de compensación. Análisis numérico". *Métodos Numéricos en Ingeniería V*. Madrid, Junio 2002.

Guillaud, M. y Hamelin, J. P. (1994). "Computerised grouting design and control". *Grouting in the Ground*. Thomas Telford , London, 1994.

Arnáiz, M.; Oteo, C. S. y Rojo, J. L. "Tratamiento del terreno en túneles de la línea 1 de Metro de Madrid". *III Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas*. México D.F., noviembre 1999.

Mair, R. J.; Rankin, W. J. y Essler, R. D. (1995). "Compensation Grouting". *Proceedings of the institution of Civil Engineers*. Geotechnical Engineering. Jan., 1995. N°113. pp 55-57.

Medina, L. y Melis, M. "El modelo numérico de predicción de asientos para la ampliación del Metro de Madrid". *El Metro de Madrid. Un nuevo reto. Revista de Obras Públicas n°3405. Año 147. Número extraordinario*. Diciembre, 2000.

Oteo, C. S. (2000) "Actuaciones en el terreno en ámbito urbano". Simposio sobre *Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte*. Barcelona, Septiembre 2000. pp 673-686.