

ANEJO Nº 9. TÚNELES

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....1

2. SECCIÓN DEL TÚNEL2

2.1. CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS Y CONSTRUCTIVOS.....2

2.2. CONDICIONANTES FUNCIONALES Y GEOMÉTRICOS3

2.3. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA3

3. MÉTODO CONSTRUCTIVO5

3.1. ANÁLISIS DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO.....5

3.2. TÚNEL CONSTRUIDO MEDIANTE EL MÉTODO BELGA.....6

3.2.1. Introducción.....6

3.2.2. Rendimientos10

3.2.3. Otras consideraciones.....10

4. TRATAMIENTOS DEL TERRENO11

4.1. INYECCIONES DE COMPENSACIÓN13

4.2. INYECCIONES DE IMPREGNACIÓN13

4.3. BARRERAS DE PROTECCIÓN14

4.4. COLUMNAS DE JET-GROUTING14

4.5. ACTUACIONES RECOMENDADAS.....14

1. INTRODUCCIÓN

El tramo de túnel en mina previsto en el presente Estudio Informativo se sitúa entre el P.K. 88+394 y el P.K. 88+950, lo que supone una longitud total de 556 m.

Con el trazado definido, la cobertera máxima sobre rasante es de aproximadamente 25 m con recubrimientos mínimos en la zona de boquillas entorno a los 15 m, lo que supone coberteras sobre clave de túnel de entre 17 y 7 m.

2. SECCIÓN DEL TÚNEL

Los túneles son obras de elevado coste por lo que en fase de proyecto deberá estudiarse en detalle la optimización de su funcionalidad para tratar de minimizar los costes de la inversión. Será necesario realizar una definición geométrica de la sección tipo que permita al túnel desempeñar la función para la que es proyectado tanto a corto como a largo plazo.

En la definición de las secciones tipo de los túneles ferroviarios se deben considerar los siguientes aspectos:

- Condicionantes aerodinámicos: en el caso que nos atañe, debido a la baja velocidad de circulación en esta zona, no es necesario realizar un estudio de la sección por factores aerodinámicos.
- Condicionantes geotécnicos y constructivos: la geotecnia de la zona determina fundamentalmente el método constructivo a utilizar, y en ocasiones la forma de la sección, sobre todo cuando existen tensiones residuales importantes en el terreno. A su vez, el método constructivo puede condicionar el tamaño, y sobre todo la forma de la sección, así como los espesores necesarios de sostenimiento y revestimiento.
- Condicionantes funcionales y geométricos: la sección tipo deberá proveer espacio para la circulación de los trenes. Así mismo, deberá haber espacio para disponer las instalaciones de explotación y seguridad necesarias.

A continuación se exponen de forma sintética el modo en el que los factores mencionados influyen en la definición de la sección tipo, y se realiza una propuesta de la misma a nivel de Estudio Informativo.

2.1. CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS Y CONSTRUCTIVOS

La elección del método constructivo, que depende a su vez de los condicionantes geotécnicos, determina en buena medida la geometría de la sección tipo del túnel.

Esto ocurre especialmente en el caso de utilizar máquinas tuneladoras, donde la sección será circular de radio único. En estos casos, si la sección de túnel debe ser de vía doble, se producen excavaciones muy importantes por debajo de cota de rasante que no son útiles y deben rellenarse posteriormente con hormigones en masa.

En túneles ejecutados con métodos convencionales suele tenderse a una definición con bóveda curva de radio único que suele prolongarse hasta cota de carril, definiendo así una sección completamente circular a excepción de la zona baja, en la que se define una solera con contrabóveda (en terrenos de mala calidad) o plana (en rocas sanas, generalmente con un índice RMR mayor de 50). En ocasiones, y dependiendo del método concreto de ejecución, los hastiales en lugar de ser curvos son verticales.

En general, se tiende a una definición lo más circular posible de la sección tipo de un túnel, recurriéndose a otras geometrías únicamente cuando el terreno presenta tensiones residuales muy importantes. Así, cuando las tensiones horizontales en el terreno son considerablemente mayores que las verticales, se suele recurrir a secciones achatadas, con una luz mayor que la altura de la sección.

Según se verá en apartados posteriores, se ha optado por la utilización del Método Tradicional Belga, del que se tienen experiencias muy favorables en terrenos similares especialmente en ausencia de agua, como es el caso que nos ocupa.

2.2. CONDICIONANTES FUNCIONALES Y GEOMÉTRICOS

En el túnel definido la plataforma ferroviaria debe permitir albergar dos vías y aceras en ambos hastiales. Las necesidades verticales de altura vienen condicionadas por los siguientes elementos: altura de plataforma, vía y traviesas para armamento de vía, gálibo cinemático y de obstáculos, catenaria, y espacio para instalaciones de seguridad y explotación.

La distancia entre ejes de vía es de 3,82 m permaneciendo constante en toda la longitud del túnel. Las aceras se han situado a una distancia de los ejes de 1,85 m, salvando en todo caso el gálibo cinemático RENFE en recta, y con cierta holgura para permitir el gálibo límite de obstáculos en curva (que será objeto de definición en el Proyecto Constructivo).

La altura de las aceras se ha fijado en 35 cm. sobre cota de carril, con objeto de dar cumplimiento a la normativa de seguridad (que indica una situación a cota superior o igual a la cota de carril), estableciéndose un gálibo de evacuación de 0,75 m de ancho por 2,25 m de alto, aunque la anchura disponible de acera es de 1,05 m.

La sección definida tiene una superficie libre de $62,354 \text{ m}^2$ (medida por encima de cota de carril), ligeramente superior al mínimo establecido por las instrucciones de RENFE para túneles de nueva construcción que es de 62 m^2 .

La sección así definida proporciona suficiente espacio para disponer las instalaciones de explotación y seguridad necesarias.

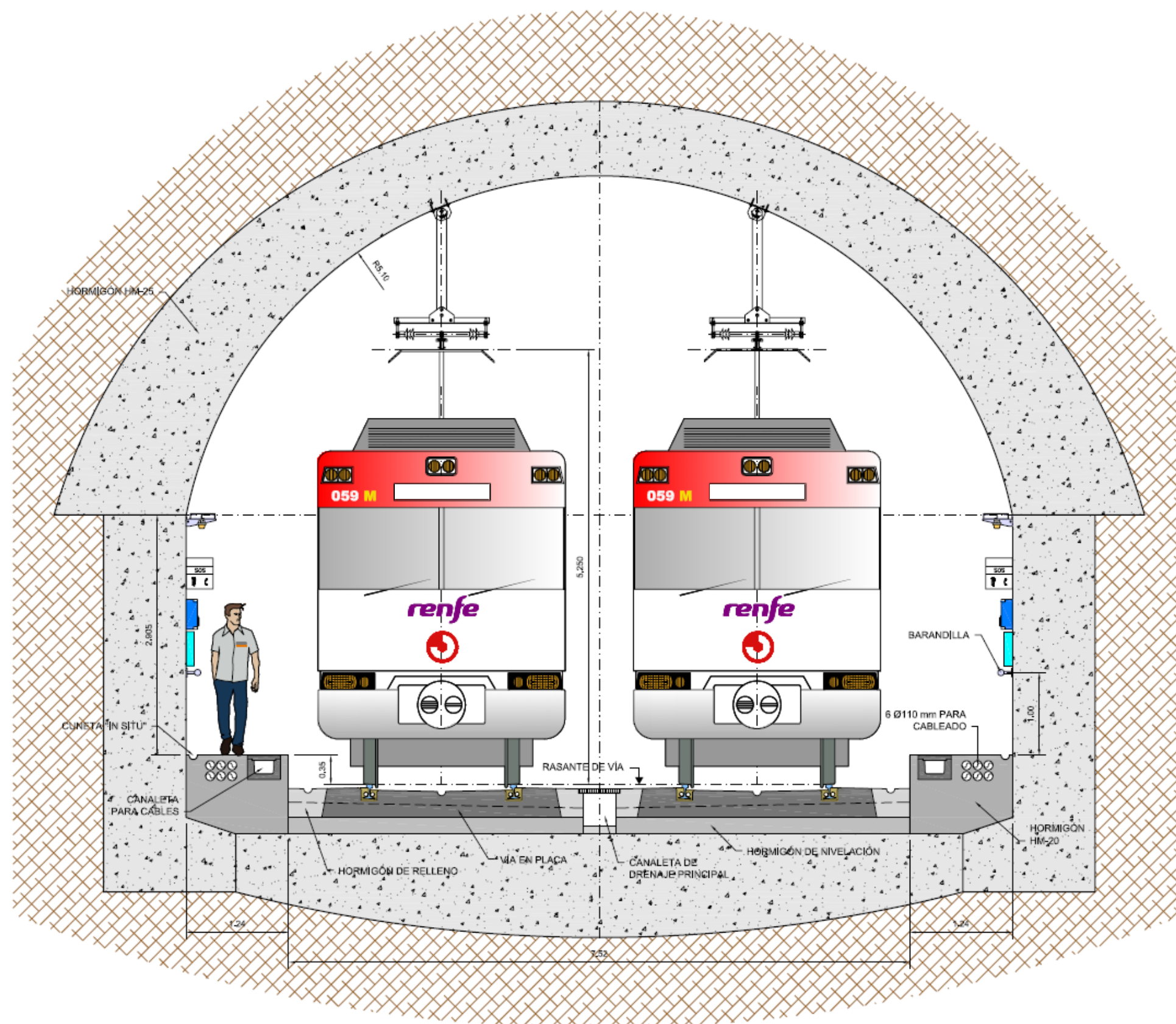
2.3. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

Para la adopción de la sección óptima (a nivel de predimensionamiento, y en función de la experiencia en este tipo de obras), se han tenido en cuenta las condiciones de recubrimiento y las propiedades geológico-geotécnicas del terreno, así como las dimensiones del túnel. Así mismo, el gálibo libre en el centro de la sección es de 7,35 m (superando el valor recomendado por RENFE para líneas de cercanías de 6,5 m), y en eje está próximo a los 7 m.

La sección elegida posee hastiales rectos de 1,00 m de anchura que llegan hasta una altura de 3,255 m por encima de cota de carril. En solera se dispone de una contrabóveda de espesor variable, comprendido entre un mínimo de 0,70 m y un máximo de 1,25 m, y que presenta un radio de curvatura de 17,875 m.

La bóveda es de canto variable, con un espesor mínimo en clave de 0,90 m, y que va aumentando progresivamente hasta 1,60 m en la zona próxima a los hastiales, donde se dejan a ambos lados unas “patas de elefante” para favorecer su ejecución y no descalzar la bóveda durante la ejecución de la destroza. En el intrados la bóveda queda definida por un arco de radio 5,10 m, situándose la clave a una altura de 7,35 sobre cota de carril.

La geometría de la sección tipo es simétrica, de $62,35 \text{ m}^2$ de sección interior libre y de $106,54 \text{ m}^2$ de excavación.



3. MÉTODO CONSTRUCTIVO

3.1. ANÁLISIS DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO

Se definen a continuación los principales métodos convencionales de ejecución de túneles:

- Método Belga: Se trata de un método de ejecución a sección partida, avance y destroza, que se utiliza con gran tradición en la ejecución de túneles en suelos. Su aplicación óptima se consigue en terrenos cohesivos, formados principalmente por arcillas compactas, o arcillas con un cierto porcentaje de arenas. La excavación se realiza mediante el empleo de martillos picadores manuales. Requiere el empleo de mano de obra especializada.
- Método del precorte mecánico: Consiste en la ejecución de una prebóveda de sostenimiento previo en el perímetro de la sección del túnel, antes de proceder a la excavación del terreno correspondiente a cada avance.
- Nuevo Método Austriaco Modificado (NATM): El empleo del Nuevo Método Austriaco de ejecución de túneles implica el hecho de permitir una relajación del estado tensional del terreno situado en alrededor de la excavación, con un cierto desplazamiento del mismo, con el objetivo de poder emplear un sostenimiento relativamente ligero con el que se equilibra final empujes-deformaciones que sea aceptable, sin que lleguen a producirse inestabilidades.
- Método de ejecución con tuneladora: Esta metodología se concibió inicialmente con el objetivo de realizar la excavación del túnel al amparo de una estructura rígida y resistente que, introducida dentro del túnel en ejecución, proporciona un área estable y segura en la zona del frente de trabajo

Debido a la longitud del túnel resulta inviable el método de excavación con tuneladora, debido a la fuerte inversión necesaria y a las importantes instalaciones de obra que requiere.

La utilización del precorte, aunque viable, puede presentar numerosos problemas durante la ejecución de las obras, especialmente en aquellos tramos más arenosos y/o con presencia de agua, donde se puede generar inestabilidades en la excavación del precorte, y desprendimientos.

Por lo tanto, los dos únicos métodos que pueden considerarse válidos para un túnel de esta longitud son el Nuevo Método Austriaco Modificado y el Método Belga.

De estos dos, debemos descartar el Nuevo Método Austriaco Modificado, ya que se aplica principalmente en roca, y precisa la colaboración del terreno en el sostenimiento de la excavación. Existen variantes de este método en las que se aplican sostenimientos muy rígidos con los cuales no se permite la deformación del terreno, pero generalmente su uso se suele limitar (al menos en España) a zonas no urbanas (que no sería el caso), y donde las posibles afecciones a superficie son nulas.

Por lo tanto, el método que se presenta más adecuado es el Método tradicional minero o Belga.

3.2. TÚNEL CONSTRUIDO MEDIANTE EL MÉTODO BELGA

3.2.1. Introducción

El Método Belga consiste en lugar de excavar de una vez toda la sección del túnel, lo que daría lugar a graves inestabilidades del frente del túnel y a colapsos del mismo, en ir abriendo una pequeña galería en clave del túnel, galería que se va ensanchando poco a poco hasta permitir hormigonar toda la bóveda. Con secciones pequeñas es posible solucionar cualquier problema de estabilidad que aparezca en el frente, mientras que con gran frente abierto no lo sería.

Este método se suele aplicar a los túneles de línea, con un ancho de unos 8 a 9 metros libres más 3 metros de ambos hastiales, es decir, unos 11 – 12 metros. En nuestro caso, la luz es mayor, alcanzándose los 13,2 m.

Habitualmente la ejecución se realiza en cuatro etapas consecutivas por el siguiente orden: 1. Bóveda, 2. Destroza, 3. Hastiales y 4. Contrabóveda.

Dichas etapas se muestran en la siguiente figura:

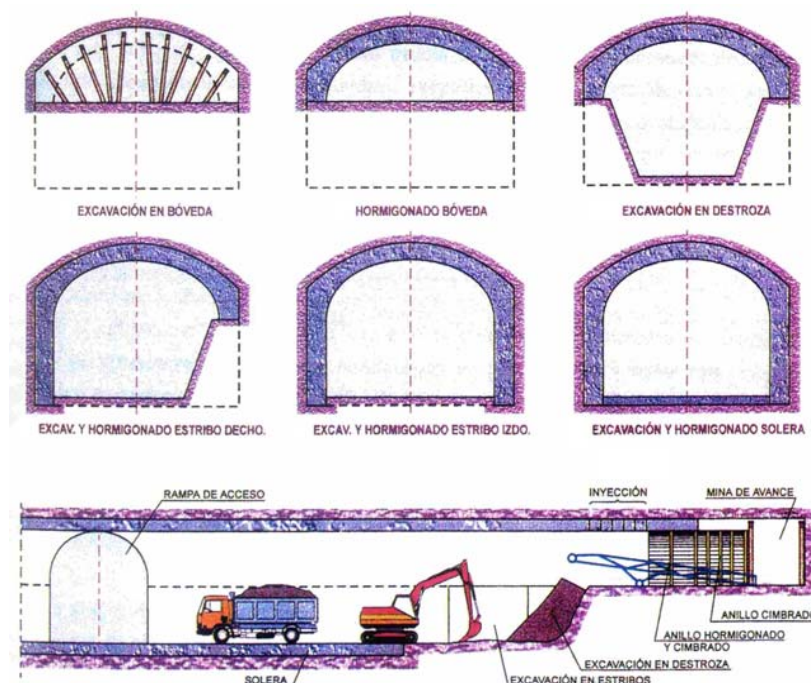


Figura 1.- Fases constructivas del túnel mediante el Método Belga

En este caso, se seguirán estas mismas cuatro etapas.

Bóveda

Esta es la etapa más importante y donde generalmente pueden surgir la mayor parte de los problemas. La excavación se realiza con entibación de madera cuajada. Por norma general, el túnel se ejecuta en rebanadas o anillos de 2,5 m de longitud, aunque ésta puede ser variable en función del tipo de terreno, reduciéndose a 2,0 m ó 1,25 m si se considera conveniente. En cualquier caso, en los primeros metros de túnel, será necesario reducir el avance hasta que se ajuste el método constructivo.

Se inicia la excavación con una mina de avance de apenas un metro de anchura, cuyo eje coincide con el del túnel.

Para la entibación se utiliza tabla, fundamentalmente de álamo negro por su mayor capacidad de deformación. Esta madera ha escaseado en distintas épocas, por lo que ha sido frecuente la utilización de madera de eucalipto, menos fiable por su mayor fragilidad, lo que produce su rotura ante pequeñas deformaciones. Dentro del argot de la entibación, es muy importante que la madera “cante”, lo que avisa que el terreno empuja, y que es necesario tomar precauciones especiales. Las dimensiones de las tablas suelen ser de 1,50 m (largo) × 0,15 m (ancho) × 0,025 m (espesor). Las tablas se van colocando a medida que avanza la excavación apoyadas en el propio terreno, forrando la parte superior de la mina, lo que supone una alteración mínima del terreno.

Una vez concluida la mina en toda su longitud, que es la longitud del avance (entre 2,0 y 3,0 m, según el terreno) se colocan las “longarinas” que son los perfiles metálicos TH (inicialmente se utilizaban rollizos de madera de álamo negro en lugar de los perfiles) que sirven de apoyo a las tablas y que se disponen longitudinalmente al túnel y separados un metro.



Figura 2.- Ejecución de la bóveda.

Entre las tablas y la longarina se coloca una tabla corrida haciendo de falso apoyo y separando éstas con calas para dejar espacio suficiente a las tablas de los “pases” laterales siguientes. El hueco por donde se mete esta tabla corrida se denomina “falso”.

Las longarinas tienen de 3,0 a 3,50 m. de longitud en función de la longitud del avance (y 0,25 m de diámetro cuando eran de madera) y se apoyan en pies derechos del rollizo de álamo negro, en sus extremos y en el centro. El rollizo de madera tiene, inicialmente, una altura de 1,50 m (puntal enano) y 2,50 m (puntal) una vez terminada la mina de avance. Entre las dos longarinas se pone estampidores o tresillones de madera.

Una vez finalizada la mina de avance, se comienza a abrir la excavación a ambos lados de ésta, ejecutando lo que se denominan “pases”. Éstos se denominan como 1ª fase, 2ª fase, 3ª fase,... según se van alejando de la mina de avance. La excavación de los pases se realiza de forma análoga, pasando las tablas de entibación acuñadas contra la longarina ya colocada. En el otro extremo las tablas apoyan en el terreno hasta que se finaliza la excavación del pase y se coloca la

longarina siguiente, que permitirá pasar a su vez las tablas del segundo pase y así sucesivamente.

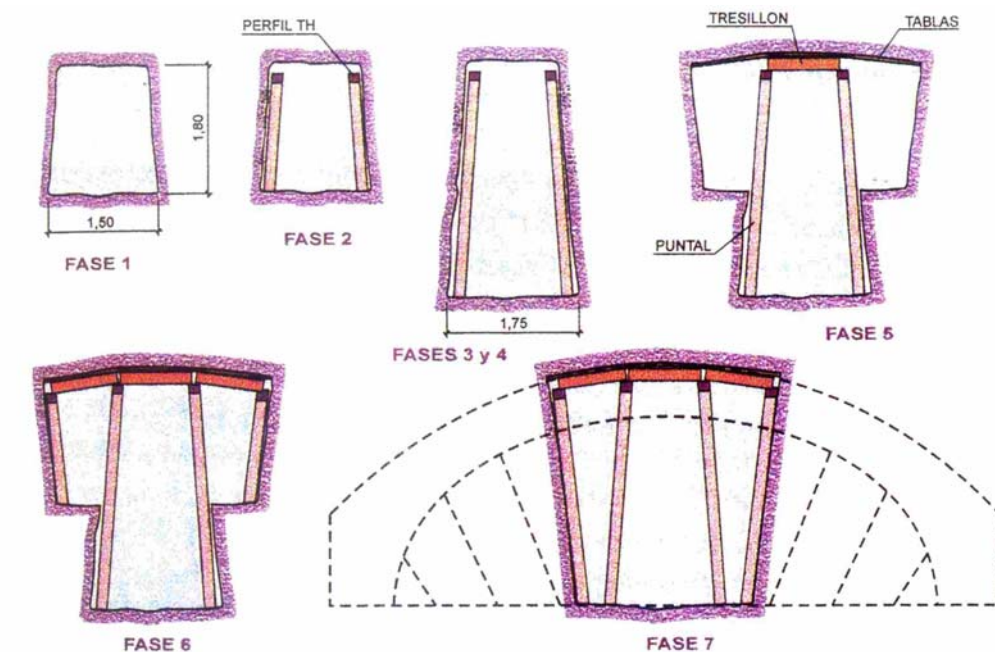


Figura 3.- Fases constructivas de la bóveda.

Con el fin de que los pies derechos no se claven en el terreno debido a la carga que se les transmite, se suele colocar una o varias calas de tablón como apoyo. Así mismo en cabeza se les zuncha una pieza de perfil TH para garantizar el apoyo de la longarina.

Una vez finalizada la excavación de toda la bóveda, se procede a encofrar, generalmente mediante tres cerchas, divididas en dos o tres piezas según la luz, que sirven posteriormente de apoyo a las chapas de encofrado. Si partimos de un anillo anterior ya hormigonado, éste habrá dejado embebido parte del apoyo de las longarinas del siguiente, por lo que se podrán quitar al encofrar los pies derechos correspondientes y los del otro extremo quedarán por delante del tape que se realice del encofrado, para lo que también se recuperan. Los apoyos intermedios se suelen relevar por otros más cortos que apoyan sobre la cercha intermedia del encofrado.

Una vez realizada esta operación se rellena el anillo de hormigón. El hormigonado se realiza por bombeo, a través de una ventana dispuesta en la clave de la bóveda. El hormigón, de consistencia blanda, se coloca sin vibrar, con el objeto de evitar desestabilizar la sección excavada.



Figura 4.- Entibación total realizada con madera.

Con el encofrado y el hormigonado de la sección de bóveda, se impide, en gran medida, la deformación del terreno, otorgando al sostenimiento la labor de contener la deformación instantánea del mismo. La entibación continua permite soportar las cargas que transmiten terrenos sueltos con potencia, de hasta 1,5 m impidiendo la deformación gradual de los suelos más estables que pudieran existir sobre ellos.

Como puede deducirse fácilmente, estas operaciones son totalmente artesanales, requiriendo del personal que las realiza gran habilidad, pericia y experiencia, pues en la mayor parte del proceso se corre el riesgo de desprendimientos imprevistos antes de apoyar las tablas sobre las longarinas.

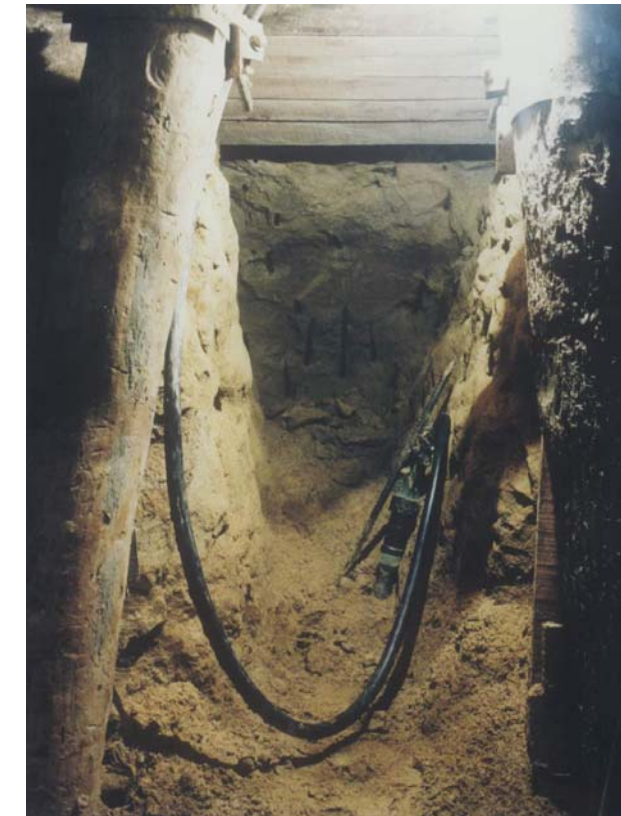


Figura 5.- Excavación del avance.

Este método aporta una gran versatilidad, ya que se pueden modificar los parámetros básicos:

- Ancho del pase.
- Longitud de avance.
- Densidad de la entibación y del apuntalamiento.

Antiguamente el terreno se excavaba con pico, por lo que se suele llamar “piquetas” a los especialistas que realizan esta función. Actualmente la excavación se hace con martillos neumáticos de poco peso y fácil manejabilidad, siendo ésta, junto con la cinta transportadora en sustitución de las carretillas, unas de las pocas variaciones introducidas desde 1963.

Destroza

Una vez hormigonada la bóveda y con un desfase de unos 5 ó 6 anillos, se comienza la destroza, consistente en excavar una caja central dejando un resguardo del orden de 1,0 a 1,5 m en los hastiales, para que los empujes que la bóveda transmite al terreno no den origen al asentamiento o rotura de la misma.

Esta operación se realiza con máquina excavadora y, además, en ella se retiran las tierras procedentes de la excavación de la bóveda que vierten en la destroza a través de una o varias cintas transportadoras.

Hastiales

Finalizada la destroza, se ejecutan los hastiales por bataches al tresbolillo. Su excavación se realiza con la misma máquina que la destroza y se refina posteriormente a mano. La entibación suele ser ligera y poco cuajada. En ocasiones, y si la estabilidad lateral no supone ningún problema, no se entiba.

La entibación suele ser ligera y poco cuajada. En ocasiones, y si la estabilidad lateral no supone ningún problema, no se entiba.

Se excavan módulos de 2,5 m, al igual que los anillos, con las dos precauciones siguientes: la junta de los anillos debe caer aproximadamente en el centro del batache con el fin de no descalzar la bóveda completamente y, en segundo lugar, nunca se excavan dos bataches enfrentados al mismo tiempo por razones semejantes. Para encofrar se utilizan módulos metálicos.



Figura 6.- Entibación de batache.

Esta operación que parece tener poca importancia, cuando el terreno es relativamente bueno, se puede complicar y llegar a ser una de las fases más comprometidas cuando existe abundancia de agua y el terreno tiene poca cohesión.

El problema es que de una u otra forma hay que descalzar parte de la bóveda y si el terreno cede se produce el agrietamiento y rotura de la misma.

Cuando en el hastial aparecen arenas con filtraciones de agua, además de la entibación, se hormigona el pie del hastial inmediatamente tras su desencofrado, de modo que se pueda contar la reserva de seguridad del empuje pasivo del tacón hasta cerrar la sección con el hormigón de la contrabóveda.

Contrabóveda

Se realiza la excavación correspondiente con máquina, en una longitud de 10 a 15 m. (unos cinco anillos) para aprovechar los fines de semana, hormigonando posteriormente con plantillas para conseguir la forma que indique la sección tipo del túnel. Se puede hacer en toda la luz, simultáneamente, y en módulos que varían entre 2,5 y 5,0 m, o bien, por mitades.

Cuando el terreno es arenoso y con abundancia de agua se suele producir un barrizal y las máquinas se atascan con frecuencia. Es estos casos se recurre a zanjas o pozas drenantes, pero en este caso no se prevé que esto suceda, dada la ausencia de agua en el terreno.

Inyecciones de contacto

Tras la ejecución de la contrabóveda, se inyecta el trasdós de la bóveda a través de taladros pasantes. Con este proceso se persigue rellenar los huecos que hayan podido quedar en el trasdós de la bóveda, entre el hormigón, la estibación de madera y el perfil de excavación, e impermeabilizar las juntas de contacto entre anillos.

La presión de inyección debe ser limitada para evitar la aparición de cargas excesivas sobre el revestimiento, limitándose habitualmente a 2 bar.

3.2.2. Rendimientos

Se considerará un rendimiento medio de 2 pases día (sin considerar tratamientos especiales), siempre utilizando 3 turnos y considerando 5 días de trabajo a la semana. En cualquier caso, los rendimientos pueden ser muy variables y dependerán fundamentalmente de los tratamientos a realizar en el terreno.

Cada uno de los turnos de trabajo se compone habitualmente de 9 personas (exclusivamente para la ejecución de la obra subterránea), distribuidos de la siguiente manera:

- dos obreros en el avance central (uno con el martillo y otro con la pala)
- dos a cada lado del ensanche (mismo esquema que en el avance)
- dos obreros de apoyo, encargados del transporte de materiales al frente, y que ejecutan los hastiales
- un obrero manejando la pala retroexcavadora

3.2.3. Otras consideraciones

El Método Belga es utilizable siempre que el terreno sea lo suficientemente bueno como para soportar el descalce de parte de la bóveda para ejecutar los hastiales. El principal factor excluyente para este método constructivo es la abundancia de agua en terrenos arenosos. En este caso hay ausencia de agua a la cota del túnel, por lo que no se prevén problemas por esa causa.

Una ventaja de este método a tener en cuenta, es que permite atacar el túnel por varios frentes sin grandes inversiones.

Por otra parte, si bien en sus inicios se consideraba este Método Belga un sistema barato para tramos cortos, hoy día la escasez de mano de obra ha encarecido sensiblemente el precio del metro lineal. En efecto, el tipo de entibación descrito conlleva una gran incidencia de la mano de obra, con los problemas propios que acarrea una obra de artesanía; Sin embargo garantiza la vigilancia personal y continua con una flexibilidad de actuación frente a imprevistos.

Es muy importante el trabajo continuado en turnos de 8 horas para que el terreno, utilizando el argot profesional, “no se entere”.

4. TRATAMIENTOS DEL TERRENO

Debido al bajo recubrimiento que presenta el túnel, y a las características de los terrenos atravesados, es previsible que sea preciso realizar tratamientos en distintas zonas del tramo afectado por el túnel.

A lo largo del trazado pueden aparecer diversos problemas geotécnicos que hacen necesaria la aplicación de distintas medidas de tratamiento o mejora del terreno. Dichos problemas pueden ser los siguientes:

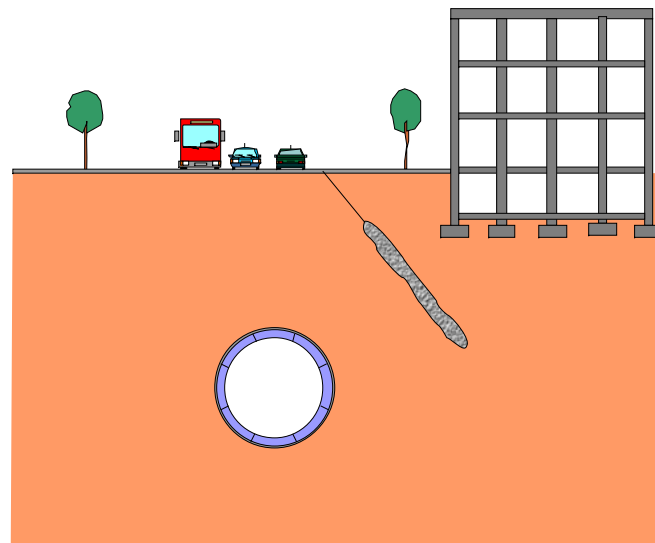
- Asientos, deformaciones horizontales y distorsiones angulares debidas al fenómeno de subsidencia producido por la excavación del túnel.
- Cruce del túnel proyectado con otras estructuras.
- Existencia, en la clave del túnel, de capas de arena con contenidos muy bajos de finos y, en ocasiones, con niveles colgados de agua. Al excavar el túnel existe el riesgo de grandes inestabilidades del terreno en la clave, que pueden originar grandes asientos en superficie e, incluso, chimeneas.

Entre los sistemas de protección posibles se pueden considerar, entre otros, los siguientes:

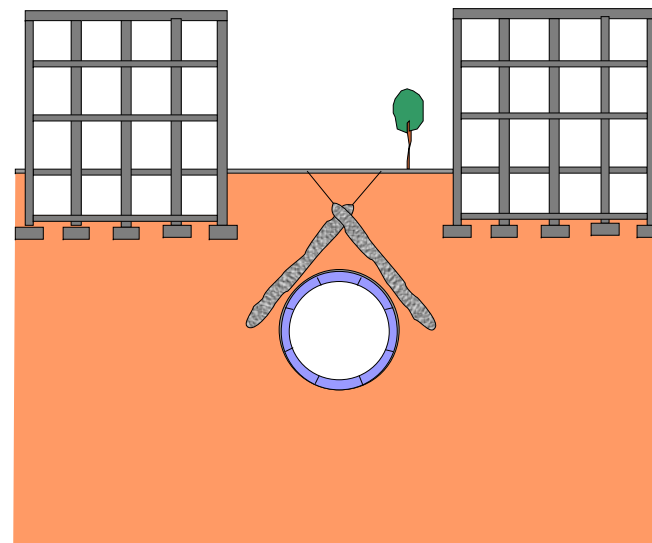
- Refuerzo mediante micropilotes interpuestos sobre el nuevo túnel y bajo estructuras de especial sensibilidad frente a subsidencias, como puede ser el caso de túneles o infraestructuras subterráneas bajo las que se efectúa la excavación.
- Barreras de protección lateral, que impiden o limitan los asientos, distorsiones y desplazamientos horizontales. Entre ellas hay que destacar:
- Barreras rígidas mediante pantalla de pilotes
- Barreras semirrígidas mediante tratamiento de jet-grouting o micropilotes
- Inyecciones de compensación de asientos

- Inyecciones de impregnación, cuyo objetivo es reducir las inestabilidades y la permeabilidad del terreno.

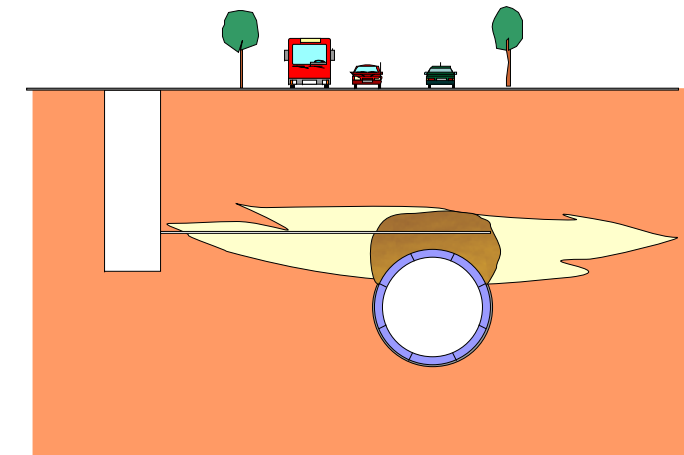
A continuación se muestran diversos esquemas que ilustran estos tipos de tratamientos.



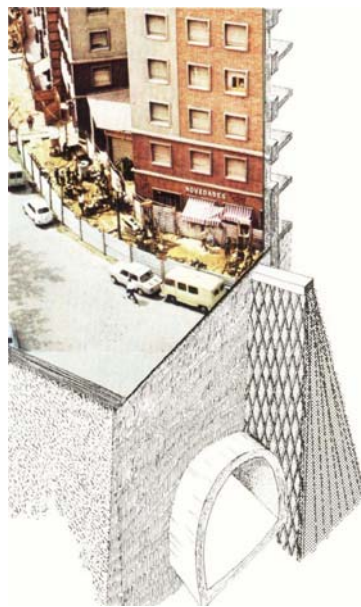
Esquema de protección mediante pantalla lateral de jet-grouting.



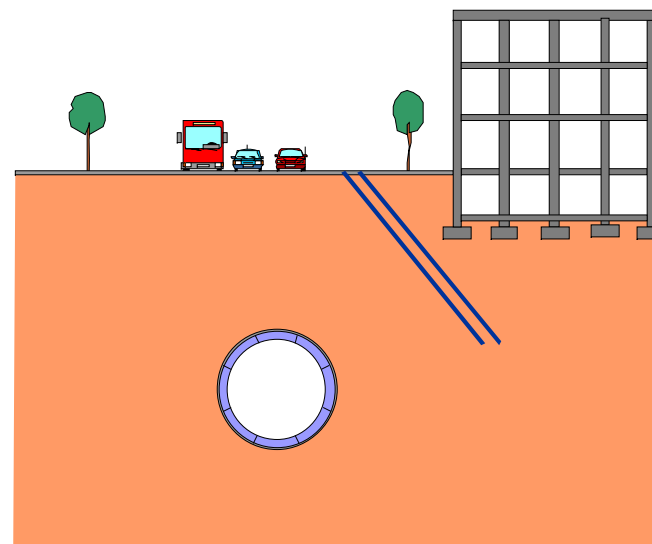
Esquema de protección mediante disposición en "tienda de campaña" de jet-grouting.



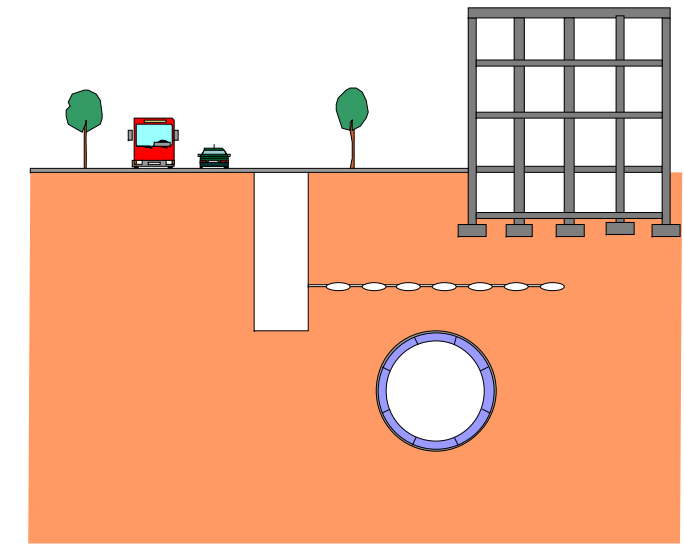
Esquema de inyecciones de impregnación ejecutadas desde pozo.



Protección de edificios con micropilotes (Metro de Barcelona)



Esquema de protección mediante pantalla lateral doble de micropilotes.



Esquema de inyecciones de compensación ejecutadas desde pozo.

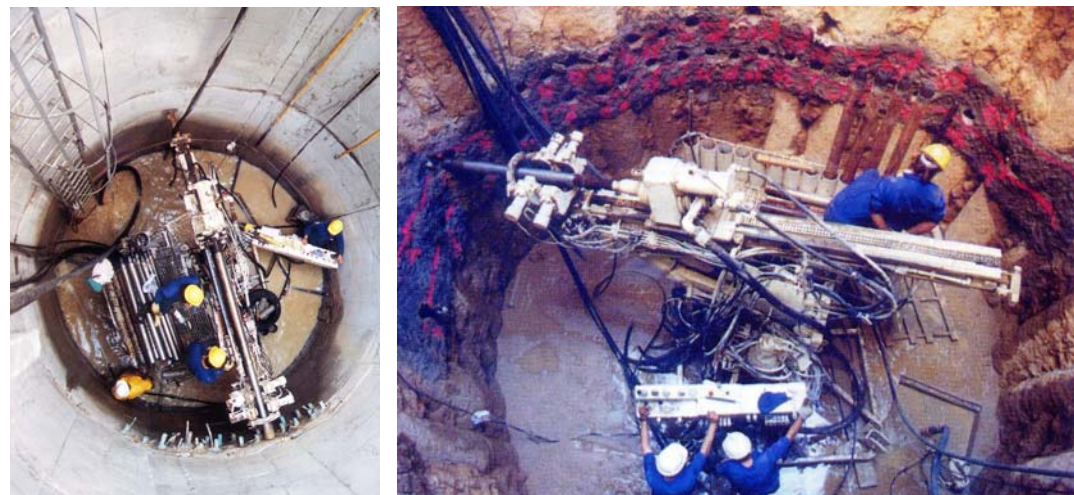
4.1. INYECCIONES DE COMPENSACIÓN

El principal objetivo de las inyecciones de compensación es la eliminación, o al menos, la reducción, de la subsidencia originada por la ejecución del túnel, hasta niveles aceptables por su entorno.

Las inyecciones de compensación constituyen el único tratamiento del terreno que afronta los efectos de la subsidencia de manera activa, lo cual permite reaccionar de forma eficaz ante cualquier diferencia respecto a los resultados esperados.

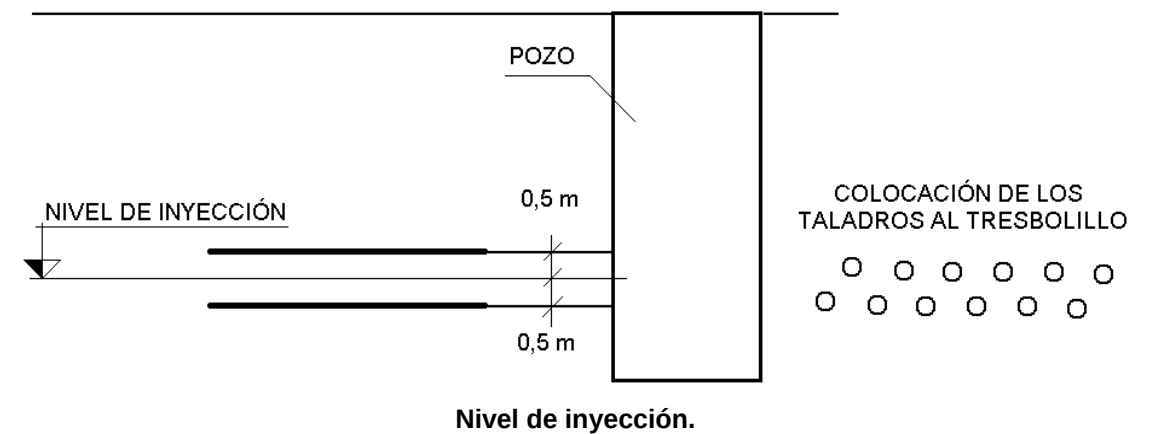
El procedimiento consiste en la ejecución de un nivel de inyecciones desde el cual se reinyecta el terreno en fases sucesivas provocando un aumento de volumen que compensa la subsidencias generadas por la ejecución de un túnel.

Los taladros necesarios para crear el nivel de inyecciones pueden tener una longitud máxima del orden de 50 - 60 m, por la imposibilidad de guiar la perforación en longitudes mayores, aunque se pierde eficacia a partir de los 30 m. La separación máxima entre taladros suele ser de unos 3 – 4 m.



Ejemplos de inyecciones de compensación realizadas desde pozos.

Se define como “nivel de inyección” la cota teórica a la cual se formará la “losa” o plano horizontal de taladros y terreno inyectado. En ocasiones, puede realizarse una doble capa de perforaciones (separadas entorno a 1,0 m) dispuestas en torno al “nivel de inyección”.



Para la elección del “nivel de inyección” se suele situar dentro de la zona limitada por las siguientes condiciones:

- Distancia de la inyección a la cimentación de las estructuras a proteger $\geq 4,0$ m.
- Distancia de la inyección a la clave del túnel $\geq 3,0$ m.

4.2. INYECCIONES DE IMPREGNACIÓN

Se define como inyección de impregnación aquella que se realiza sin alterar la estructura original del terreno, introduciendo en las oquedades del mismo un material, que, una vez endurecido, le aporte unas determinadas características, tales como: disminución de permeabilidad, aumento de la capacidad resistente, cohesión,...

Dentro de las inyecciones de impregnación el caso que nos ocupa es el referente a terrenos granulares sueltos formados por materiales no cohesivos como son las gravas y las arenas.

Cuando hay que atravesar niveles de arena saturada de agua pueden presentarse grandes problemas de inestabilidad y contención, recurriéndose en esos casos a realizar un tratamiento previamente mediante el empleo de geles de sílice para posibilitar su excavación con seguridad y rapidez.

En el caso de túnel construido manualmente, como es el caso del Método Tradicional, la posible inestabilidad se desarrollaría hacia el frente de excavación, es decir hacia el terreno aún no excavado.

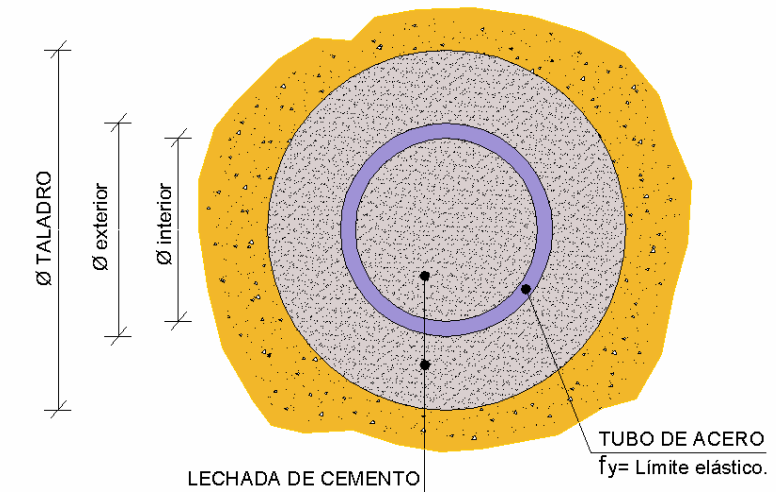
El objetivo de estos tratamientos es proporcionar al terreno formado por arenas limpias una cohesión tal que se reduzca el riesgo de formación de inestabilidades en la clave del túnel. Así mismo, se buscará reducir la permeabilidad de dichas arenas.

En cuanto al material a introducir en el terreno, hay un campo muy amplio dentro de las inyecciones de impregnación. Esta gama va desde los morteros inestables a los morteros y lechadas estables de cemento, lechadas de micro cemento, geles de sílice y resinas de diferentes tipos.

4.3. BARRERAS DE PROTECCIÓN

Consisten en un refuerzo del terreno mediante la introducción de unos elementos más o menos rígidos, generalmente micropilotes, aunque pueden utilizarse otros como: columnas de jet-grouting, pilotes, pantallas,... Estos elementos se interponen entre la estructura que debe ser protegida y el túnel, y evitan que la estructura se vea afectada por los movimientos del terreno ocasionados por la excavación del túnel.

Los micropilotes son pilotes de un diámetro comprendido entre 250 y 100 mm, realizados con maquinaria manejable (similar a una perforadora de sondeos) y que rellenan un taladro con lechada o mortero, después de introducir una armadura (tubos, y/o redondos). Se consigue así un elemento resistente en que predomina, claramente, la longitud (y por tanto el fuste) sobre el diámetro y que habitualmente se ejecuta para transmitir cargas axiales, pero que en este caso se utiliza como elemento resistente a flexión.



Sección de micropilote con tubos.

Los micropilotes se ejecutan normalmente desde superficie (inclinados) u horizontalmente desde pozos. Generalmente las perforaciones se realizan en dos niveles, situándose al tresbolillo.

4.4. COLUMNAS DE JET-GROUTING

El jet-grouting es una técnica de consolidación de suelos mezclado de sus partículas con una mezcla de cemento, con o sin productos de adición. En su aplicación se utiliza un equipo de bombeo de alta presión que impulsa la mezcla de inyección a través del varillaje de una sonda perforadora. Se trata de un procedimiento de inyección de alta energía en el que la progresión de la lechada o fluido a alta velocidad, más de 200 m/s, rompe y mezcla el terreno alrededor del taladro, formando columnas de suelo-cemento con geometría y propiedades mecánicas dependientes, tanto del terreno tratado, como del sistema y parámetros del propio tratamiento.

4.5. ACTUACIONES RECOMENDADAS

Durante la redacción del Estudio Informativo se ha efectuado una campaña geotécnica específica para la correcta definición de este tramo de túnel en mina, tal y como se describe en el Anejo de Geotecnia.

Los resultados obtenidos han permitido determinar la no afección al nivel freático, lo que facilita sumamente la ejecución del túnel.

De forma preliminar, y como una primera aproximación, se propone una serie de actuaciones de mejora y tratamiento del terreno que deberán ser afinadas en el posterior Proyecto Constructivo, en caso de que la alternativa 1 sea finalmente la seleccionada.

A priori se consideran necesarias la siguiente tipología de actuaciones:

- Inyecciones de impregnación en los tramos donde el túnel intercepte en sección de avance niveles de arenas con un contenido de finos inferior al 15%.
- Barreos de protección lateral (micropilotes, o columnas de jet-grouting) verticales o subverticales, situadas entre la sección de túnel y las edificaciones existentes que pudieran verse afectadas por las subsidencias generadas por el túnel, y cuyo objeto sería cortar los movimientos de terreno con objeto de que las subsidencias no alcancen a las edificaciones.
- Tratamientos de mejora del terreno con columnas de jet-grouting. Se ejecutarían en aquellos tramos donde el recubrimiento sobre clave de túnel fuese insuficiente para garantizar la estabilidad del terreno. A priori, únicamente sería necesario en las proximidades de los emboquilles.
- Refuerzo de cimentaciones que se sitúen sobre la clave del túnel o en sus proximidades.

No se estima necesario recurrir a la ejecución de inyecciones de compensación.

A efectos de una valoración económica, se han estimado los siguientes tratamientos del terreno:

- Tratamientos con columnas de jet-grouting en las proximidades de los emboquilles, considerando una malla de columnas de 1,0 x 1,0 m.
- Refuerzo de cimentación de pasarela, con columnas de jet-grouting.

- 2 tramos de barreras laterales ejecutadas con micropilotes, con objeto de confinar las subsidencias generadas por el túnel a su vertical, y limitar la afección a las edificaciones más próximas.

- Inyecciones de impregnación en niveles arenosos.