

ANEJO Nº 11. TÚNELES

TÍTULO
ESTUDIO INFORMATIVO DE AMPLIACIÓN SUR DE LA LÍNEA 11 DEL METRO DE MADRID

DOCUMENTO
ANEJO Nº 11. TÚNELES

CONTROL DE EDICIONES		
VERSIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
1.0	10/09/2025	
2.0	17/10/2025	2ª Edición (Tras Supervisión)

ANEJO Nº 11. TÚNELES

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	SECCIÓN GEOMÉTRICA.....	2
3	PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	3
3.1	TUNELADORA.....	3
3.1.1	Introducción	3
3.1.2	Partes principales de la tuneladora	3
3.1.3	Funcionamiento de la tuneladora E.P.B.....	4
3.1.4	Modo de trabajo de la tuneladora EPB	5
3.1.5	Los terrenos de Madrid y el empleo de escudos E.P.B.	5
3.2	MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID.....	6
3.2.1	Introducción	6
3.2.2	Procedimiento constructivo	6
3.3	ENTRE PANTALLAS. CUT&COVER	8
3.3.1	Sistema constructivo	9
4	REVESTIMIENTO DEL TÚNEL EJECUTADO POR TUNELADORA	10
4.1	ANILLO DE DOVELAS	10
4.1.1	Juntas de Estanqueidad	10
5	OBRAS AUXILIARES	12
5.1	ZONA DE INSTALACIONES AUXILIARES	12
5.2	POZO DE INTRODUCCIÓN DE TUNELADORA.....	12
5.2.1	Alternativa 1.....	12
5.2.2	Alternativa 3.....	12

5.3	POZO DE EXTRACCIÓN DE TUNELADORA.....	13
5.3.1	<i>Alternativa 1</i>	13
5.3.2	<i>Alternativa 3</i>	13
5.4	ACCESOS A FRENTE DE ATAQUE DE MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID	13
6	ESTUDIO DE SUBSIDENCIAS.....	14
6.1	RESUMEN DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS DE LAS ALTERNATIVAS	14
6.1.1	<i>Alternativa 1</i>	14
6.1.2	<i>Alternativa 2</i>	14
6.1.3	<i>Alternativa 3</i>	14
6.1.4	<i>Conclusiones</i>	15
6.2	ESTIMACIÓN DE SUBSIDENCIAS POR MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS	15
6.2.1	<i>Ley de Asientos</i>	15
6.2.2	<i>Volumen de Asientos</i>	15
6.2.3	<i>Desplazamiento y Deformación Horizontal</i>	17
6.2.4	<i>Criterios de Daño</i>	17
7	TRATAMIENTOS DEL TERRENO	19
7.1	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DEL TERRENO EN LA ZONA DE ESTUDIO	19
7.2	TIPOS DE TRATAMIENTOS DEL TERRENO PROPUESTOS.....	20
7.3	TRATAMIENTOS DEL TERRENO PARA EDIFICACIONES	21
7.3.1	<i>Inyecciones de compensación</i>	21
7.4	TRATAMIENTOS DEL TERRENO PARA TUNELADORA O MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID.....	22
7.4.1	<i>Tratamiento en emboquilles de tuneladora</i>	22
7.4.2	<i>Inyecciones de impregnación o consolidación</i>	22

7.4.3	<i>Paraguas de micropilotes</i>	23
7.5	TRATAMIENTOS EN CRUCES CON METRO Y CERCANÍAS	24
7.5.1	<i>Tratamiento de jet-grouting</i>	24

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 - ESQUEMA TUNELADORA EPB. HERRENKNECHT	5
ILUSTRACIÓN 2 - RANGO OPERATIVO DE PRESIONES EN EL FRENTE (A COTA DE CLAVE) PARA TBM CON ESCUDO PRESURIZADO EN EL FRENTE (ZTV-ING, 2012)	5
ILUSTRACIÓN 3 - RANGOS DE APLICACIÓN DE EQUIPOS SEGÚN THEWES, ITA WTC PRAGA 2007	6
ILUSTRACIÓN 4 - ZONAS DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID	6
ILUSTRACIÓN 5 - FASES DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID	7
ILUSTRACIÓN 6 - ESQUEMA GENERAL DE EJECUCIÓN DE MUROS PANTALLA CON HIDROFRESA (FUENTE: SOLETANCHE BACHY)	9
ILUSTRACIÓN 7 - INTRODUCCIÓN DE JAULA DE ARMADURA EN PANEL DE MURO PANTALLA.....	9
ILUSTRACIÓN 8 - SOLUCIONES DE BANDA EPDM + CORDÓN HIDRO-EXPANSIVO.....	10
ILUSTRACIÓN 9 - CONFIGURACIONES POSIBLES BANDA EDM +CORDÓN HIDRO-EXPANSIVO.....	10
ILUSTRACIÓN 10 - POSICIONES DEL ANILLO DE DOVELAS ADOPTADO	11
ILUSTRACIÓN 11 - ALTERNATIVA 1. POZO DE INTRODUCCIÓN TUNELADORA Y ZIA.....	12
ILUSTRACIÓN 12 - ALTERNATIVA 3. POZO DE INTRODUCCIÓN TUNELADORA Y ZIA.....	13
ILUSTRACIÓN 13 - CRITERIO DE DAÑO BASADO EN DISTORSIÓN ANGULAR Y DEFORMACIÓN HORIZONTAL (BOSCARDING Y CORDING, 1989)	18
ILUSTRACIÓN 14 - ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO DE INYECCIONES DE COMPENSACIÓN.....	21
ILUSTRACIÓN 15 - EJEMPLO DE EJECUCIÓN DE UN PARAGUAS DE MICROPILOTES.....	23
ILUSTRACIÓN 16 - EJEMPLO DE AVANCE EN UN PARAGUAS DE MICROPILOTES	23

ILUSTRACIÓN 17 - ESQUEMA DE PROTECCIÓN EN EL CRUCE BAJO METRO O CERCANÍAS MEDIANTE JET-
GROUTING 25

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 - Máquinas E.P.B. empleadas en Metro de Madrid. Plan de Ampliación 2003-2007	3
TABLA 2 - Partes de tuneladora E.P.B. Imagen de Herrenknecht.....	4
TABLA 3 - Recomendaciones AETESS para pantallas (Sola Casado, 2006)	9
TABLA 4 - Clasificación de afecciones visibles con referencia a la facilidad de la reparación (Escala de Burland J.B. (1977) y adoptada por el BRE)	17
TABLA 5 - Relación entre el daño asociado y deformación de tracción y (Boscarding y Cording, 1989) .	18
TABLA 6 - Movimientos adicionales admisibles. Metro de Madrid.....	18
TABLA 7 - Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985)	20

APÉNDICES

APÉNDICE 1. ESTIMACIÓN DE SUBSIDENCIAS	27
----------------------------------------------	----

1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se recoge el estudio del túnel de línea de las tres alternativas del ESTUDIO INFORMATIVO DE AMPLIACIÓN SUR DE LA LÍNEA 11 DEL METRO DE MADRID.

En este anejo se analizan los sistemas constructivos, necesidades de sostenimiento/revestimiento y previsiones de afección por subsidencia y necesidad de tratamientos de las diferentes alternativas desarrolladas.

En total se analizan un total de tres alternativas de trazado que presentan diferentes sistemas constructivos del túnel de línea, por razón de sus trazados, los cuales imponen diferentes soluciones sobre todo a nivel de geometría y sistemas constructivos de estaciones.

El punto de inicio de las tres alternativas es el final del Fondo de Saco de Línea 11, y corresponde con el pozo de introducción de la tuneladora que fue construido antaño para ejecutar la Línea 11 de Metro de Madrid (entre las estaciones de La Fortuna y La Peseta).

Actualmente, del Fondo de Saco de Final de Línea 11 parte un ramal en vía doble en sentido Cocheras del Metro de Madrid.

Se diseña un ramal en vía única que comunica el ramal existente en vía doble con cada Alternativa. El Ramal discurre inicialmente sobre una losa de hormigón ya construida (paralelo a la vía Norte existente), hasta entroncar con el denominado Muñón (estructura existente bajasante). A partir del Muñón, y hasta conectar con el nuevo túnel de línea, el Ramal de Cocheras discurre entre pantallas en un tramo no construido.

Se describen los túneles de línea para cada una de las tres alternativas, señalando el método constructivo de cada una de ellas:

- El túnel de línea de la Alternativa 1 presenta varios métodos constructivos. El tramo desde el punto de conexión inicial (Fondo de Saco de Final de Línea 11) hasta el pozo de introducción de la tuneladora (inclusive), se prevé ejecutarlo mediante pantallas. A partir del pozo de introducción de la tuneladora, hasta la nueva Estación de Aviación Española (sin incluir la misma), se prevé ejecutar el túnel de línea mediante tuneladora (TBM). Finalmente, a partir de la nueva Estación de Aviación Española hasta final de trazado se prevé ejecutar el túnel mediante Método Tradicional de Madrid.

El pozo de introducción de la tuneladora se prevé ejecutarlo entre pantallas. Este pozo es el elemento común donde se conectan el propio túnel de dovelas diseñado, el nuevo Ramal de Cocheras y el tramo intermedio desde el punto de conexión inicial. Este tramo intermedio entre pantallas, conecta el antiguo pozo de introducción de la tuneladora (tramo La Fortuna-La Peseta) con el nuevo pozo de introducción.

La extracción de la tuneladora de la Alternativa 1, se prevé por la nueva Estación de Aviación Española.

La longitud del túnel ejecutado con tuneladora es de unos 2762 m.

La longitud del túnel ejecutado con Método Tradicional de Madrid es de unos 187 m.

La longitud del túnel ejecutado entre pantallas (incluyendo Ramal de Cocheras) es de unos 337 m.

- El túnel de línea de la Alternativa 2 se ejecutará, en toda su longitud, mediante Método Tradicional de Madrid.

La longitud del túnel ejecutado con Método Tradicional de Madrid es de unos 2142 m.

La longitud del túnel ejecutado entre pantallas (incluyendo Ramal de Cocheras) es de unos 247 m.

- El túnel de línea de la Alternativa 3 presenta varios métodos constructivos. El tramo desde el punto de conexión inicial (Fondo de Saco de Final de Línea 11) hasta el pozo de introducción de la tuneladora (inclusive), se prevé ejecutarlo mediante pantallas. Desde el pozo de introducción de la tuneladora hasta final de trazado, se prevé ejecutar el túnel de línea mediante tuneladora (TBM). Se aclara que en el tramo intermedio, correspondiente a la nueva estación de Cuatro Vientos, la tuneladora se trasladará a lo largo de la misma (sin disponer dovelas) mediante dragging o arrastre.

El pozo de introducción de la tuneladora se prevé ejecutarlo entre pantallas. Este pozo es el elemento común donde se conectan el propio túnel de dovelas diseñado, el nuevo Ramal de Cocheras y el tramo intermedio desde el punto de conexión inicial. Este tramo intermedio entre pantallas, conecta el antiguo pozo de introducción de la tuneladora (tramo La Fortuna-La Peseta) con el nuevo pozo de introducción.

El pozo de extracción de tuneladora se prevé ejecutarlo mediante pilotes secantes.

La longitud del túnel ejecutado con tuneladora es de unos 1841 m.

La longitud del túnel ejecutado entre pantallas (incluyendo Ramal de Cocheras) es de unos 330 m.

Se realizan también en mina las galerías de conexión para las Salidas de Emergencia, Pozos de Ventilación y Pozos de Bombeo.

2 SECCIÓN GEOMÉTRICA

De acuerdo a las necesidades de gálibo que impone Metro de Madrid y, en particular, el material rodante previsto para este tramo (Serie 8000), se ha definido la sección geométrica tipo para los diferentes sistemas constructivos previstos en el tramo:

- Túnel mediante tuneladora
 - Diámetro interior: 8,43 m.
 - Distancia eje de túnel – cota de carril: 2,01 m.
- Túnel mediante Método Tradicional de Madrid
 - Radio Bóveda: 2,50 y 4,50 m.
 - Ancho: 7,80 m.
 - Distancia eje de túnel – cota de carril: 1,87 m.
 - Altura de sección en eje: 5,49 m.
- Túnel entre pantallas vía única (Ramal de Cocheras)
 - Ancho: 5,40 m.
 - Altura cota de carril – dintel: variable (10 m mínimo).
- Túnel entre pantallas vía doble (Tramo inicial entre Pozos de Introducción)
 - Ancho: 8,79 m.
 - Altura cota de carril – dintel: variable (14 m mínimo).

3 PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

En este apartado se desarrollan los sistemas a emplear en la ejecución del túnel de línea

No obstante, se recoge en primer lugar un análisis comparativo de los posibles sistemas a emplear el ‘cuerpo principal’ del túnel de línea.

3.1 TUNELADORA

3.1.1 Introducción

El método propuesto para la ejecución del túnel de línea para la mayor parte del trazado de la Alternativa 1 (Desde Cocheras Línea 11 hasta entrada en Estación Aviación Española) y, para la totalidad del trazado de la Alternativa 3, será el de perforación mediante tuneladora escudada tipo E.P.B. (“Earth Pressure Balance”) en modo cerrado. Consecuentemente, el tipo de sostenimiento para el túnel de línea estará constituido por anillos de dovelas prefabricadas de hormigón armado.

A diferencia de las tuneladora para roca dura (llamadas topas), las tuneladoras de Escudos de Presión de Tierras (EPB) no se apoyan sobre el terreno. Las E.P.B se apoyan mediante unos cilindros hidráulicos sobre el revestimiento del túnel, que siempre está constituido por anillos de dovelas.

El anillo de dovelas ha de ser compatible con los gálipos del Material Rodante (Coches S 8000). La descripción de los elementos de las dovelas están definida en el Apartado 4.

Se considera un diámetro interior (\varnothing_{int}) de 8.430 mm con un espesor de dovela de 320 mm, lo que proporciona un diámetro exterior del túnel (\varnothing_{ext}) de 9.070 mm. Adicionalmente y, a efectos de las condiciones reales de perforación, se ha de contar con una sobreexcavación por la cabeza de corte que, de acuerdo a las últimas experiencias de Metro en Madrid, será del orden de 165 mm. Dado lo anterior, se define un diámetro total de excavación (\varnothing_{exc}) total de 9.400 mm.

De los casi 90 km de línea de Metro de Madrid que supuso la Ampliación de los años 2003-2007, 40,8 km fueron realizados por distintas tuneladoras tipo E.P.B. (escudos de presión de tierras).

TABLA 1 - MÁQUINAS E.P.B. EMPLEADAS EN METRO DE MADRID. PLAN DE AMPLIACIÓN 2003-2007

EPB	Fabricante	Diámetro Rueda (m)	Empuje (kN)	Par (kNm)	Presión Operativa (bar)	Extracción material	Obras	Obras Previas
Madriladora	HNK S-120	9.33	73200	17400	3	Vagones de 17 m ³	Metronorte 1B (4.6km)	Metrosur IV (3.3km) Línea 8 (3.4 km) Línea 7 (3.4 km)
Chotis	HNK S-295	9.36	73200	22617	4	Cinta de 1100 t/h	Metronorte 1C-2A (5.5 km)	-
Metromachine	HNK S-280	9.33	73200	22617	4	Vagones de 17 m ³	Metronorte 2B (5.5 km)	-
Verne	HNK S-274	8.92	70613	17197	3.5	Cinta de 1100 t/h	Conexión Líneas 1-4 (3.4 km)	Metro Oporto
Carpetana	S-165	9.33	86000	20236	3	Vagones de 17 m ³	Línea 1 (2.6 km) Línea 5 (2.1 km)	Metrosur V (6.5 km)
Rompearenas	LOVAT	7.35	30200	5590	-	Vagones de 14 m ³	Línea 7 tr 2 (2 x 2.1 km)	Cierre línea 10 (1.6 km) Línea 8 (2.1 km) Línea 10, tr 2 (6.1)
Mascastiza	HNK S-122	9.33	73200	16000	3	Vagones de 17 m ³	Línea 7 tr 3 (5.7 km)	Línea 9 (3.4 km) Metrosur I (7.4 km)
Adelantada	NFM	9.38	80080	16730	4	Vagones de 17 m ³	Línea 3 tr 2 (2.5 km) Línea 8 T4 (1.4 km) Línea 7 (3.2 km)	Línea 8 (3.6 km) Línea 10 tr 1 (2.7 km) Metrosur II (4.0 km)
Guster	HNK S-302	9.37	86000	22600	4	Vagones de 17 m ³	Línea 3 tr 1 (4.3 km)	-
Excavolina	NFM	9.38	80080	16730	4	Cinta de 1100 t/h	Línea 11 (2.1 km)	Línea 4 (3.6 km) Línea 8 (1.4 km) Metrosur VI (6.2 km)

Fuente: Trabada, J. Talavera, R. 2009.

El rendimiento de la tuneladora EPB, con la casuística de la zona de actuación, se estima en 300 m/mes.

3.1.2 Partes principales de la tuneladora

A continuación se describen las partes principales de la tuneladora:

- Disco de corte: consiste en cuchillas y rodillos cortadores que trabajan en el frente.
- Cámara de excavación: donde se halla la tierra excavada y el agua y se transfiere la presión al frente.

- Brazos mezcladores: las cuchillas mezcladoras de la rueda de corte y el frente de presión amasan la tierra excavada en la cámara de extracción hasta obtener la consistencia prescrita.
- Mamparo: Elemento que ejerce presión al suelo mediante la pared de presión.
- Revestimiento (dovela): pieza de hormigón armado que conforma el anillo.
- Transportador (tornillo sinfín): es un tornillo de Arquímedes que determina el volumen de descarga de la cámara de extracción y así se regula la presión del frente.
- Erector: se emplea para la manipulación de las dovelas.
- Recubrimiento de cola: Los cepillos de acero generan la estanqueidad entre el espacio de trabajo interior, y la presión externa (agua y terreno). Para que el recubrimiento inyectado no invada la zona de trabajo, se implanta la junta de grasa.
- Relleno: conformado de mortero bicomponente, se realiza de forma continua a medida que avanza la excavación. Rellena el hueco entre escudo y dovela, por la diferencia de diámetros.

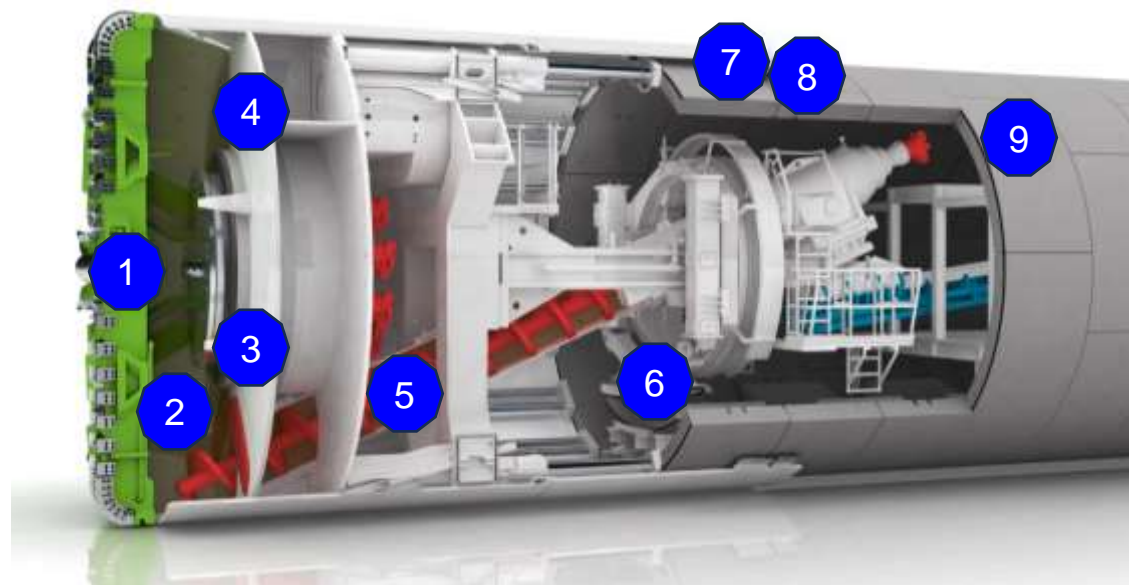


TABLA 2 - PARTES DE TUNELADORA E.P.B. IMAGEN DE HERRENKNECHT

1	Disco de corte	5	Transportador (tornillo sinfín)
2	Cámara de excavación	6	Erector
3	Brazos mezcladores	7	Recubrimiento de cola
4	Mamparo	8	Relleno
9	Revestimiento (dovela)		

3.1.3 Funcionamiento de la tuneladora E.P.B

La característica principal de las tuneladoras de Escudos de Presión de Tierras (EPB-Pressure Balanced), es el uso directo del suelo excavado como medio de soporte del frente. Este tipo de tuneladoras fueron diseñadas para resolver el problema de estabilidad que se crea en el frente de la excavación cuando los terrenos resultan inestables.

En los terrenos tipo suelo, que están localizados bajo el nivel freático se produce dicha inestabilidad, por tanto este tipo de tuneladoras desarrollan el trabajo adecuadamente en estos medios.

Las tres fases de trabajo son, excavación, carga y transporte de materiales y finalmente sostenimiento y revestimiento.

Durante el funcionamiento de una tuneladora tipo EPB, el frente del túnel es sostenido por el propio material de la excavación, que es acondicionado en la cámara de la máquina. Mediante el amasado de los terrenos excavados, y su empuje al frente, se logra así ejercer una presión suficiente para garantizar la estabilidad. Mediante el control del volumen de extracción a través del tornillo sinfín, se controla la presión en la cámara.

El anillo de dovelas se arma dentro del escudo, por lo que este último tiene un diámetro mayor que hace que se genere un espacio entre ambos elementos. A medida que el escudo avanza, este hueco (de unos 20 cm) debe ser rellenado con mortero bicomponente que es inyectado a presiones de hasta 10 kp/cm² con objeto de evitar subsidencias en la superficie del terreno. La inyección puede ser de mortero bicomponente.

Además, es posible efectuar inyecciones en la coraza del escudo para limitar aún más las posibles subsidencias generadas por este hueco (también llamado gap).

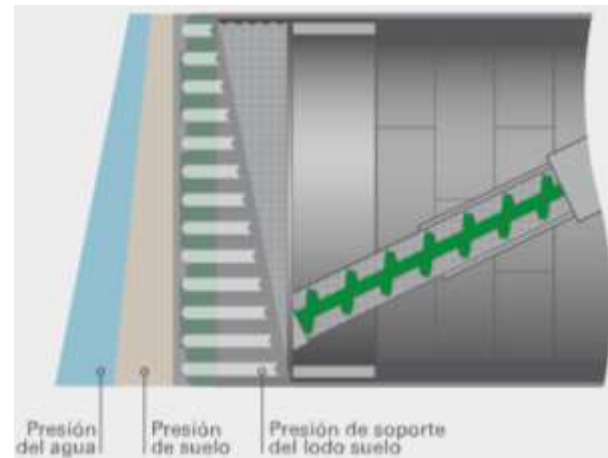


ILUSTRACIÓN 1 -ESQUEMA TUNELADORA EPB. HERRENKNECHT

Por otro lado, la granulometría del terreno y grado de humedad, influyen en la presión que hace el escudo al frente de tierra. Es posible acondicionar los terrenos mientras sucede el avance, añadiendo agentes espumantes, polímeros o suspensiones de arcillas.

Este tipo de tuneladoras cuentan con una grúa móvil en su interior, denominada erector, que permite manipular las dovelas del backup para conformar el anillo completo.

3.1.4 Modo de trabajo de la tuneladora EPB

El modo de trabajo de la tuneladora puede ser modo abierto o modo cerrado. La diferencia principalmente radica en la presencia de agua (bien del nivel freático y/o presencia de bolsas de agua), en tales casos se opta por modo cerrado para evitar la entrada de agua.

En el modo cerrado la cámara se encuentra cerrada y presuriza gracias a la presión ejercida por el material en su interior. El objeto principal es estabilizar el frente ante los empujes de tierras y de agua, así como minimizar asentamientos en superficie y afectaciones a edificaciones e infraestructuras. Debe quedar garantizada la ausencia de flujo en el interior de la máquina.

En la zona de actuación, se han detectado áreas que podrían estar relacionadas con niveles colgados, dentro de capas más granulares. También se ha detectado nivel freático a distintas profundidades en los distintos sondeos realizados en la campaña geotécnica. El modo de trabajo para las Alternativas 1 y 3 es modo cerrado.

Como se ha indicado anteriormente, los terrenos atravesados por las tres alternativas son, arena de Miga, arena tosquita y toscos arenosos. En fase de Proyecto de Construcción se dispondrán piezómetros a diferentes niveles en Campaña geotécnica de Campo, y en base a ello se tramificará el cálculo del túnel; justificando el empleo de leyes hidrostáticas (lineales o no lineales)

donde corresponda.

De acuerdo con las recomendaciones de la regulación alemana ZTV-ING (2012), se definen dos límites operativos para la presión en el frente, a cota de clave (se representan, de forma esquemática, en la figura adjunta):

- Límite inferior (scrown,min), definido por la presión mínima necesaria en la cámara para asegurar la estabilidad del frente debido al empuje del terreno y el agua.
- Límite superior (scrown,max), dado por la máxima presión que podría mantenerse en la cámara sin dar lugar a levantamientos del terreno en superficie (fenómenos de blow-out).

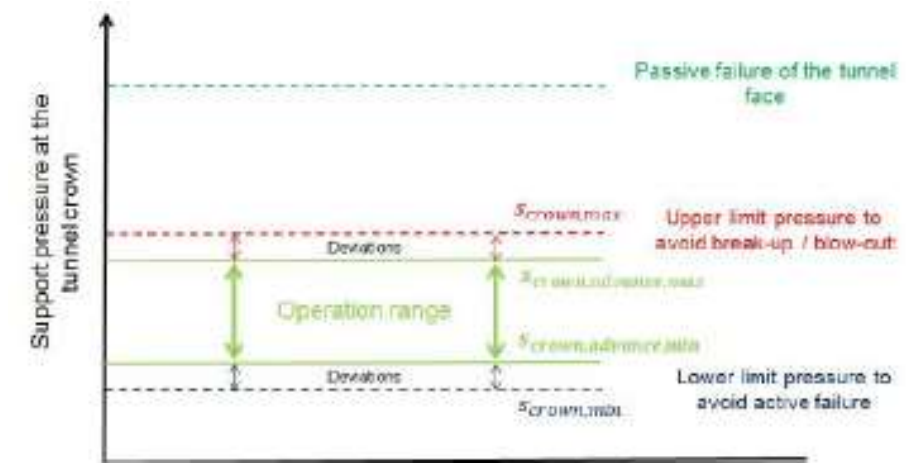


ILUSTRACIÓN 2 -RANGO OPERATIVO DE PRESIONES EN EL FRENTE (A COTA DE CLAVE) PARA TBM CON ESCUDO PRESURIZADO EN EL FRENTE (ZTV-ING, 2012)

Con carácter general, ambos límites son válidos para la EPB, y durante cualquier fase del proceso (excavación o paradas). Respecto a la tolerancia aplicada a estos límites, en el caso de una máquina EPB, en las que la incertidumbre asociada al control de la presión en la cámara es mayor, se aplica un valor de ± 30 kPa

Es importante remarcar que, para las dos situaciones de cálculo indicadas, se ha de verificar siempre que la presión en la cámara de la EPB es, al menos, la mínima necesaria para contrarrestar el empuje de agua.

3.1.5 Los terrenos de Madrid y el empleo de escudos E.P.B.

Los terrenos atravesados por el frente túnel del línea de cada alternativa, según campaña geotécnica realizada, han resultado arena de miga, arenas tosquitas y toscos arenosos.

En la siguiente figura se muestra el rango de aplicación de los equipos, en función de la

necesidad de acondicionamiento del frente. Sobre este gráfico se superpondrán los husos granulométricos típicos de las facies de Madrid.

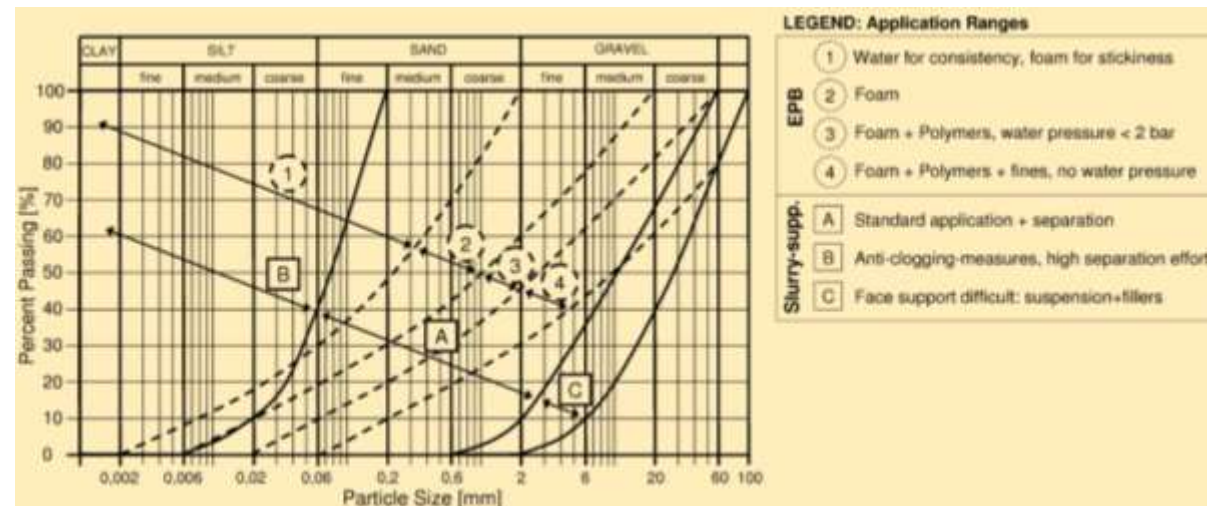


ILUSTRACIÓN 3 - RANGOS DE APLICACIÓN DE EQUIPOS SEGÚN THEWES, ITA WTC PRAGA 2007

3.2 MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

3.2.1 Introducción

Este Método está previsto para el tramo final de la Alternativa 1, desde final de Estación Aviación Española y el fin del trazado. También está prevista para la Alternativa 2 en toda la longitud. Las estaciones se realizan con sistema entre pantallas.

El Método Tradicional de Madrid (a veces denominado Método Belga) se basa en la excavación y sostenimiento simultáneos de secciones de pequeño tamaño (unos 3 m²); con objeto de que el terreno se relaje lo menos posible. Se entiende por relajación la disminución de las presiones radiales de confinamiento y el incremento de los desplazamientos radiales hacia el centro del túnel, de acuerdo con las curvas Convergencia-Confinamiento definidas en el Nuevo Método Austríaco.

Cuando se hallan suelos carentes de cohesión y, siempre para evitar una relajación excesiva del terreno, se divide la sección total del túnel en varios sectores de trabajo de forma que se aplica el sostenimiento a áreas de excavación pequeña, antes de afrontar la excavación de las áreas contiguas. Un ejemplo de esta división se refleja en la figura adjunta.

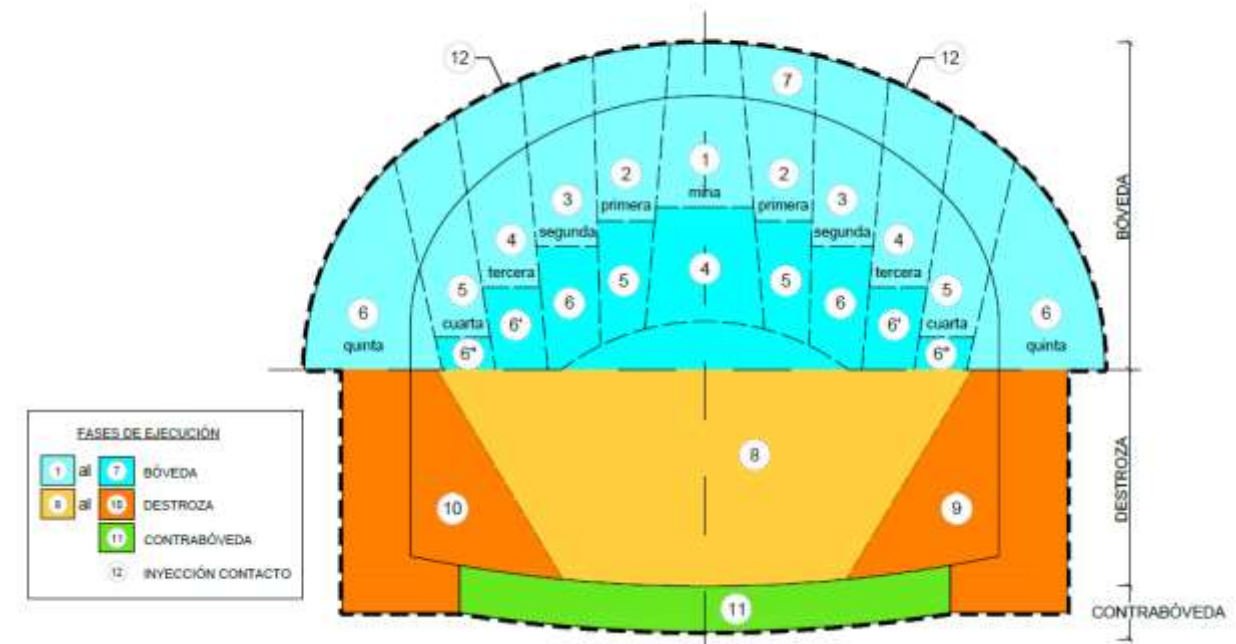


ILUSTRACIÓN 4 - ZONAS DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

Se plantea una línea horizontal de división entre Avance y Destroza, a partir del arranque de la bóveda. Dentro de las áreas de Avance y Destroza se empieza la excavación a partir de un sector definido por el eje vertical de simetría de la sección, se procura aplicar excavación y sostenimiento hacia ambos extremos de la sección, de forma gradual y lo más simétrica posible.

En algunos casos y, por condiciones del terreno (presencia de arcillas blandas o de limos) se precisa formar una contra-bóveda inferior para cerra la sección.

La excavación se lleva a cabo manualmente mediante martillo hidráulico y la entibación provisional es de madera de álamo negro. El revestimiento definitivo es de hormigón en masa.

3.2.2 Procedimiento constructivo

La excavación se inicia con la ejecución de una mina o galería de pequeñas dimensiones (aproximadamente 1,0 m de anchura y 1,8 m de altura) situada en la clave de la sección y coincidiendo con el eje del túnel, denominada galería de avance.

A medida que se avanza en la excavación de dicha galería se coloca una entibación de madera cuajada en la parte superior con las tablas encajadas en el propio terreno.

Una vez alcanzada la longitud prevista para el anillo, y mientras se continúa excavando para

ampliar la mina hacia abajo, se apuntala la entibación por los bordes laterales de la galería. Para ello se emplean puntales cilíndricos de madera. Sobre los puntales se apoyan sendos perfiles metálicos de tipo TH denominados longarinas cerchas TH-21 o TH-29). Entre las longarinas se colocan estampidores horizontales de madera denominados transillones.

Concluida la mina, da comienzo el ensanche lateral de la misma. Para ello se sigue un procedimiento prácticamente idéntico al descrito, abriendo pases hacia los laterales de poca altura inicial.

Las tablas de entibación se introducen por la hendidura existente entre una tabla longitudinal llamada falsa y la entibación de la mina hasta alcanzar el frente, donde se encajan en el terreno igual que en la galería de avance. Siguiendo este proceso se llega a tener toda la bóveda excavada y sostenida con una entibación de madera cuajada.

A continuación, se procede al encofrado de la bóveda mediante paneles apoyados en cerchas metálicas apuntaladas como cimbra y a la colocación de los tapes para el hormigonado. El montaje del encofrado en su posición exige la retirada de parte de los puntales de la entibación, de modo que en ese momento las longarinas quedan apoyadas en las del pase anterior e hincadas en el terreno y apuntaladas en su parte posterior. El aseguramiento de este apoyo es el motivo por el cual las longarinas deben tener una longitud sensiblemente superior al máximo avance longitudinal. Al mismo tiempo que se ejecutan estas operaciones se excava la mina del siguiente anillo.

Una secuencia de las fases mencionada, típica para este Método, se refleja en la siguiente figura:

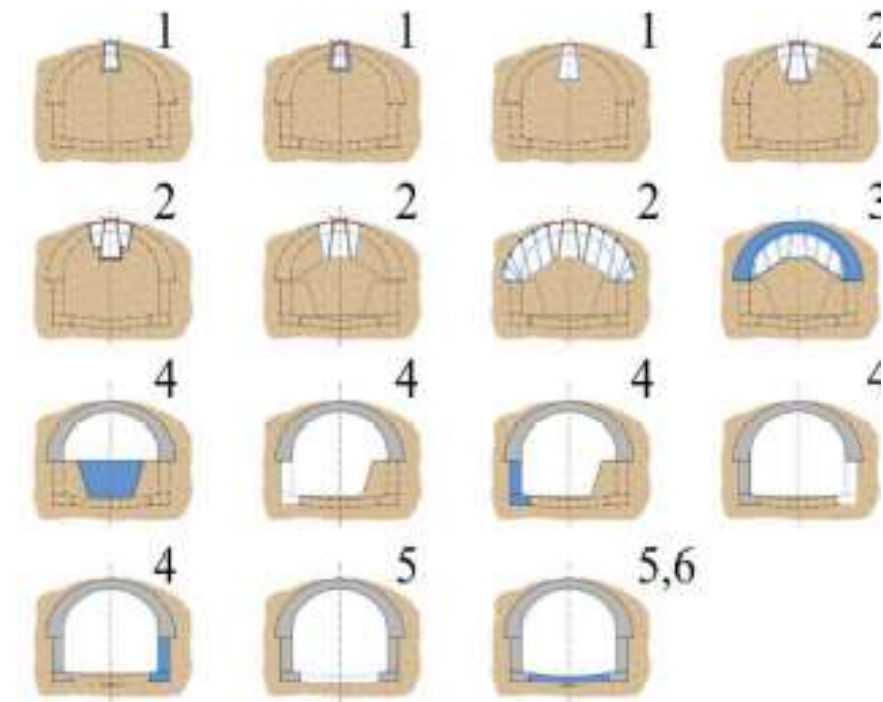


ILUSTRACIÓN 5 - FASES DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

El hormigonado se efectúa mediante bomba y de forma simétrica con respecto al eje del túnel para equilibrar la carga debida al peso propio del hormigón fresco sobre la cimbra. El control del proceso se efectúa desde la mina del anillo siguiente. El descimbrado tiene lugar a una edad de dos días.

Con un decalaje de cinco o seis anillos, se excava el pasillo o destroza central manteniendo el apoyo de la bóveda con un resguardo en coronación de entre 1,0 m y 1,5 m. Seguidamente se comienza la excavación y hormigonado de los hastiales por bataches no enfrentados. Para no descalzar la bóveda completamente, la junta entre bataches consecutivos debe quedar en el punto medio del anillo de la bóveda.

Finalizada la excavación y hormigonado de la sección completa, es fundamental llevar a cabo inyecciones de contacto sistemáticas en el trasdós de la bóveda con los siguientes objetivos:

- Relleno de eventuales huecos que hubiesen podido quedar entre el terreno y la entibación de madera perdida.
- Embebido de la entibación de madera que minimice los asentamientos posteriores debidos a

su pudrición.

- Impermeabilización y sellado de las juntas entre anillos.

Así, se efectúan una serie de perforaciones a través de la bóveda hasta alcanzar el terreno excavado, y se inyectan con lechada de cemento hasta una presión máxima de 2 bares.

Una ventaja del Método Tradicional de Madrid radica en su versatilidad durante la construcción, pues en función de las características geotécnicas del terreno a excavar y de la posible presencia localizada de agua pueden ajustarse varios parámetros:

- Longitud de avance: comprendida entre 2,5 y 1,0 m, con valores típicos de 2,50 m y de 1,25 m bajo condiciones geotécnicas desfavorables o en presencia de elementos sensibles en superficie.
- Longitud de pase lateral: comprendida entre 1,0 m y 1,5 m.
- Densidad del apuntalamiento y de la propia entibación, si bien esta última es completamente cuajada en la mayoría de los casos.

El rendimiento del Método Tradicional de Madrid, con la casuística de la zona de actuación, se estima en 40 m/mes.

3.3 ENTRE PANTALLAS. CUT&COVER

Se emplea el sistema entre pantallas tipo Cut&Cover en las siguientes actuaciones:

- Se emplea el sistema entre pantallas tipo Cut&Cover en el Ramal de Cocheras en vía única, desde el Muñón existente, y hasta conectar con el nuevo túnel de línea.

En Alternativa 1 y Alternativa 3, el tramo entre pantallas conecta finalmente con el nuevo pozo de introducción de tuneladora.

En Alternativa 2 el tramo entre pantallas conecta finalmente con el propio túnel en mina.

- Se emplea el sistema entre pantallas tipo Cut&Cover en el tramo inicial intermedio entre el pozo de introducción existente (Final de Fondo de Saco de Línea 11) y el nuevo pozo de introducción.

- Se emplea el sistema entre pantallas tipo Cut&Cover en las cajas de las Estaciones y en los distintos pozos (Pozos de ventilación, pozos de bombeo y salidas de emergencia).

Dado lo anterior, hay actuaciones consideradas entre pantallas que se conectan con estructuras existentes, como es el Muñón de Cocheras y el pozo de introducción existente (que coincide con el Fondo de Saco de Final de Línea 11). Por ello hay que prever obras de refuerzo sobre estructuras existentes (Ocupación temporal de terrenos en Cocheras del Metro de Madrid), las cuales consistirán en implementar marcos rectangulares metálicos en el perímetro de la conexión. Una vez instalado el refuerzo, se procederá a la demolición del área interior del marco. En el paramento existente, se realizan perforaciones (taladros) donde se instalan anclajes metálicos, que son rellenados con resina e-poxi. Los anclajes son el punto de unión con los nuevos tramos entre pantallas. El detalle de las obras de refuerzo se definirá en Fase 2 de Proyecto de Construcción.

El método entre pantallas tipo Cut&Cover es un método entre pantallas cuya característica principal es que se ejecuta la losa de cubierta (dintel), previamente a realizar el vaciado interior interestructuras. Una vez ejecutada la losa de cubierta se puede proceder a restaurar la superficie del terreno (minimizando interferencias y afecciones viarias), y permite trabajar en la obra civil en simultáneo. Durante el proceso de ejecución, en función de la profundidad del sector, pueden ser necesarios apuntalamientos intermedios, finalizando la sección con la losa de fondo (contrabóveda).

Las pantallas se pueden ejecutar mediante bataches y pantallas continuas (empleando cuchara bivalva) o mediante pilotes (aislados, tangentes o secantes), o incluso hidrofresa. El método constructivo queda en función de las necesidades estructurales, geología y geotecnia, profundidad diseñada e hidrogeología. En función del terreno se la definirá excavación empleando lodos bentoníticos.



ILUSTRACIÓN 6 - ESQUEMA GENERAL DE EJECUCIÓN DE MUROS PANTALLA CON HIDROFRESA (FUENTE: SOLETANCHE BACHY)



ILUSTRACIÓN 7 - INTRODUCCIÓN DE JAULA DE ARMADURA EN PANEL DE MURO PANTALLA

TABLA 3 - RECOMENDACIONES AETESS PARA PANTALLAS (SOLA CASADO, 2006)

RESISTENCIA MEDIA kg/cm ²	SIN NIVEL FREÁTICO	CON NIVEL FREÁTICO
$q_c < 20$	Pilotes aislados Cuchara bivalva	Cuchara bivalva
$20 < q_c < 70$	Pilotes aislados	Cuchara/Preforos Pilotes secantes
$70 < q_c < 250$	Pilotes aislados Hidrofresa	Cuchara/Preforos/Trépano (intercalaciones rocosas) Hidrofresa (Rocas masivas)
$q_c > 250$	Pilotes aislados Hidrofresa	Hidrofresa

Los Pozos y Estaciones no son túneles de línea, por lo que no se desarrollan en este Anejo.

3.3.1 Sistema constructivo

El sistema constructivo de estos elementos (pantalla continua), también denominado Cut&Cover, se enuncia a continuación en orden cronológico de ejecución:

- 1.- Desvíos del tráfico.
- 2.- Preparación inicial de la plataforma de trabajo.
- 3.- Excavación con cuchara bivalva de paneles, ejecución de las pantallas (armado y hormigonado) y viga perimetral de coronación. Auscultación y control de integridad.
- 4.- Ejecución de losa de cubierta sobre el terreno y conexión con viga perimetral de coronación.
- 5.- Excavación del terreno comprendido entre muros pantalla y losa de cubierta (en mina).
- 6.- Ejecución de arriostramientos intermedios según necesidades.
- 7.- Excavación del terreno hasta el nivel de la losa de fondo.
- 8.- Ejecución de contrabóveda o losa de fondo.
- 9.- Refuerzo estructural en el pozo de introducción existente (final de Fondo de Saco de Final de Línea 11) para conectar el tramo inicial de túnel de línea, y refuerzo estructural en el Muñón existente para conectar con el Ramal de Cocheras.
- 10.- Conexiones del Ramal de Cocheras y del tramo inicial de túnel de línea a las estructuras existentes.
- 11.- Acabados finales de estructuras.

4 REVESTIMIENTO DEL TÚNEL EJECUTADO POR TUNELADORA

4.1 ANILLO DE DOVELAS

Estos anillos están constituidos por un total de 7 dovelas, de las cuales 6 de ellas tienen el mismo desarrollo perimetral y hay una adicional que conforma el cierre. La dovela de cierre es la que hace el papel de llave, y tiene un desarrollo de la mitad que las otras. Por esta razón la dovela de clave puede ocupar $(2n-1)=13$ posiciones diferentes lo que da lugar a otras tantas geometrías distintas del anillo, que pueden ser utilizadas para inscribir los anillos en curvas de radios muy diferentes.

A efectos de que la longitud de dovela pueda adaptarse a los diferentes parámetros del trazado, en Planta y Perfil Longitudinal, se define un valor de avance de 1.700 mm, que garantiza la consecución de esta propiedad, es decir la conicidad.

Para para ayudar a la alineación de la dovela, se incluirán biconos centradores.

4.1.1 Juntas de Estanqueidad

El número de dovelas y la longitud de avance generan respectivamente juntas transversales y longitudinales. Estas juntas se han de tratar a efectos de estanqueidad. Para ello se implementan los siguientes elementos:

- Una banda elastomérica tipo EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene), que una caucho de etileno propileno dieno. Es, por lo tanto, una banda fabricada con este elastómero sintético, caracterizado por su gran resistencia al ozono, la intemperie, los productos químicos y las temperaturas extremas, lo que la hace muy duradera y flexible.
- Se dispone adicionalmente de un cordón sellante hidroexpansivo, alojado en acanaladura específica, o dentro de la propia banda EPDM.

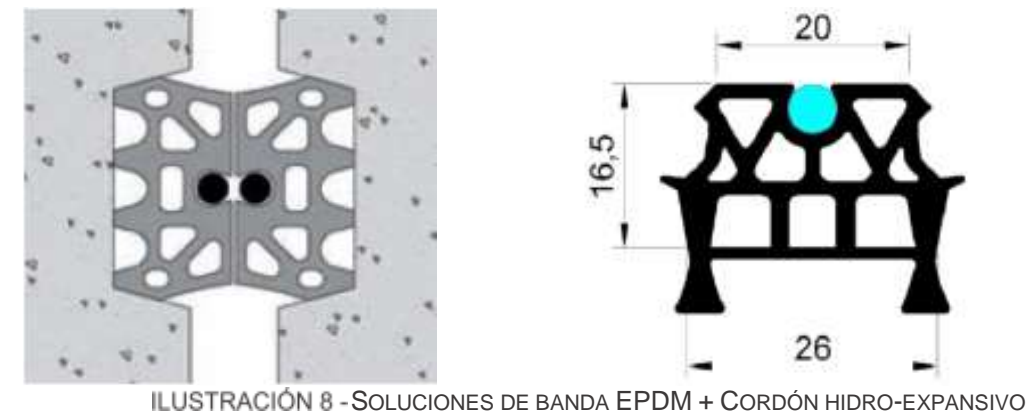


ILUSTRACIÓN 8 - SOLUCIONES DE BANDA EPDM + CORDÓN HIDRO-EXPANSIVO

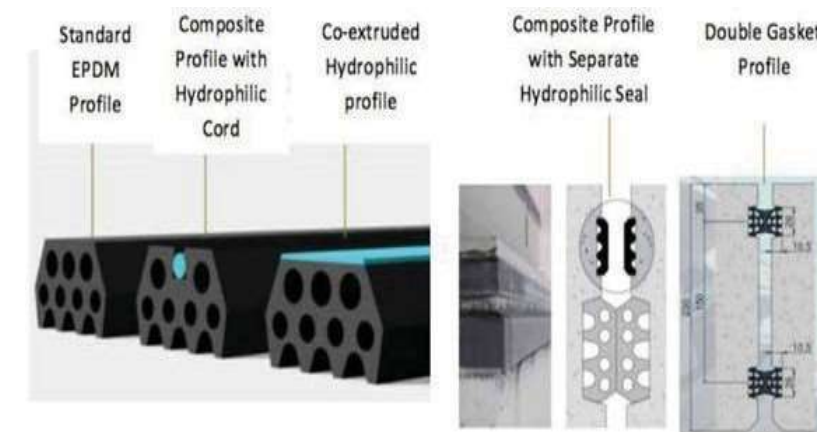
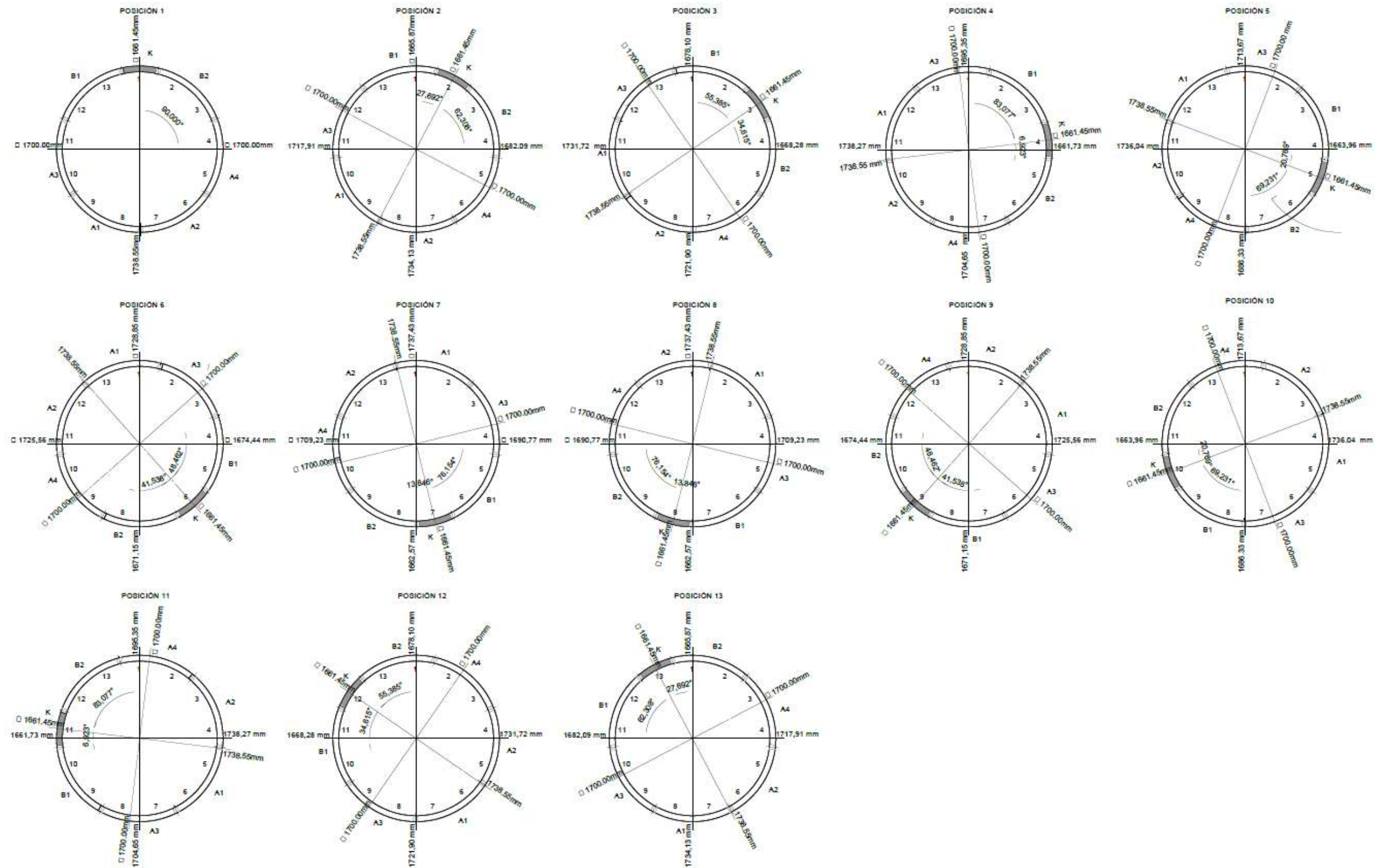


ILUSTRACIÓN 9 - CONFIGURACIONES POSIBLES BANDA EDM + CORDÓN HIDRO-EXPANSIVO



POSICIONES DEL ANILLO (VISTA EN DIRECCIÓN DEL AVANCE)

NOTAS:

1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILÍMETROS Y GRADOS SEXAGESIMALES.

ILUSTRACIÓN 10 - POSICIONES DEL ANILLO DE DOVELAS ADOPTADO

5 OBRAS AUXILIARES

Se detallan en este epígrafe las medidas adoptadas para atender a las necesidades logísticas requeridas por los distintos métodos constructivos de los túneles de línea.

5.1 ZONA DE INSTALACIONES AUXILIARES

La Zona de Instalaciones Auxiliares (ZIA) es común a las tres Alternativas, y se localiza en una parcela agraria que está próxima a los terrenos de Cocheras de Metro de Madrid de Línea 11 (denominado también Depósito Cuatro Vientos).

En terrenos de Cocheras se encuentra el punto de inicio de trazado, y el nuevo Ramal de Cocheras (diseñado en vía única). Adicionalmente para la Alternativa 1 Alternativa 3, en estos terrenos se implanta el nuevo pozo de introducción de la tuneladora.

La ocupación temporal de la parcela agraria designada como ZIA es completa, siendo este área de 20.221,52 m². El acceso a la ZIA es mediante el Camino de la Canaleja, que es un vial existente y asfaltado, que discurre entre los terrenos de Cocheras de Metro de Madrid y la parcela de ZIA. Adicionalmente, en la ZIA se diseñan nuevos viales que comunican los distintos emplazamientos interiores, siendo estos últimos:

- Zona Casetas
- Laboratorio
- Parking
- Acopio de Suministros
- Centro Seccionamiento
- Grúa Torre
- Planta Bicomponente (prescindible en Alternativa 2)
- Planta Depuradora (prescindible en Alternativa 2)
- Cuadro General de Baja Tensión
- Centro de Transformación
- Nave Taller/Almacén
- Sistema Refrigeración TBM (prescindible en Alternativa 2)
- Acopio de Tierras

A estos emplazamientos se podrían sumar otros, como acopios para lodos bentoníticos, y los correspondientes elementos para su tratamiento y separación.

5.2 POZO DE INTRODUCCIÓN DE TUNELADORA

5.2.1 Alternativa 1

Se implanta el pozo de introducción en terrenos de Cocheras del Metro de Madrid de Línea 11, junto al pozo de introducción existente y empleado antaño para la construcción del tramo de línea La Fortuna – La Peseta. Junto al nuevo de pozo de introducción se acopiarán las dovelas y se instalará la grúa pórtico. El resto de instalaciones auxiliares se ubicarán en otra parcela, que está próxima a los terrenos de Cocheras.

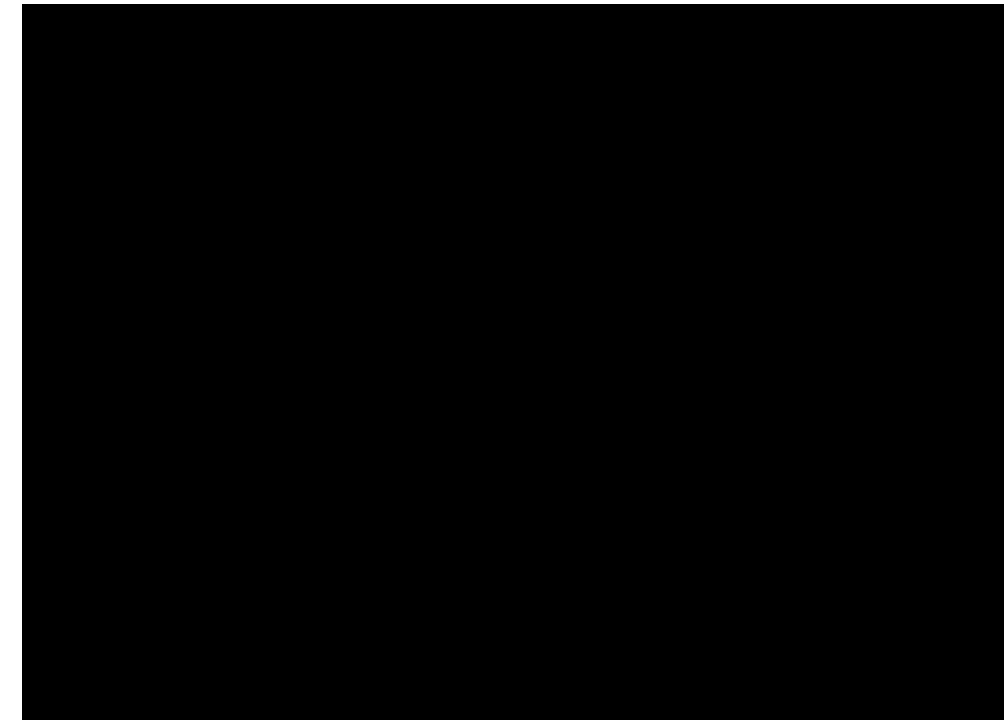


ILUSTRACIÓN 11 - ALTERNATIVA 1. POZO DE INTRODUCCIÓN TUNELADORA Y ZIA

El Pozo de Introducción o de ataque se construye como recinto entre pantallas de dimensiones interiores en Planta 100,00x23,40 m. El espesor de las pantallas se estima a priori de 1,00 m de espesor. El pozo de ataque incluye, asimismo, una estructura de reacción para el empuje de los primeros anillos de dovelas. La disposición en planta permite huecos necesarios para la introducción de todas las piezas de montaje de tuneladora.

5.2.2 Alternativa 3

Se implanta el pozo de introducción en terrenos de Cocheras del Metro de Madrid de Línea 11, junto al pozo de introducción existente y empleado antaño para la construcción del tramo de línea La Fortuna – La Peseta. Junto al nuevo de pozo de introducción se acopiarán las dovelas y se instalará la grúa pórtico. El resto de instalaciones auxiliares se ubicarán en otra parcela, que está

próxima a los terrenos de Cocheras.

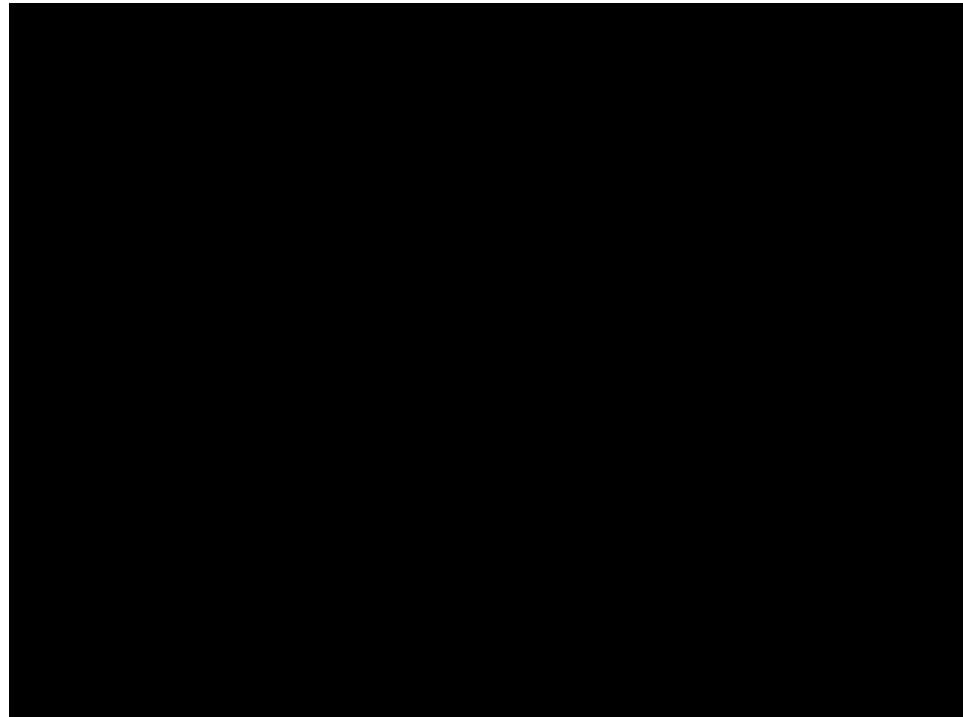


ILUSTRACIÓN 12 - ALTERNATIVA 3. POZO DE INTRODUCCIÓN TUNELADORA Y ZIA

El Pozo de Introducción o de ataque se construye como recinto entre pantallas de dimensiones interiores en Planta 100,00x23,40 m. El espesor de las pantallas se estima a priori de 1,00 m de espesor. El pozo de ataque incluye, asimismo, una estructura de reacción para el empuje de los primeros anillos de dovelas. La disposición en planta permite huecos necesarios para la introducción de todas las piezas de montaje de tuneladora.

5.3 POZO DE EXTRACCIÓN DE TUNELADORA

5.3.1 Alternativa 1

Para extraer la tuneladora en esta Alternativa se empleará la estructura de la nueva Estación de Aviación Española, por lo que se prescinde de pozo de extracción.

5.3.2 Alternativa 3

La tuneladora se trasladará (dragging) a lo largo de la Nueva Estación de Cuatro Vientos.

La extracción de la tuneladora en la Alternativa 3 se realiza a través de un pozo ubicado al final del trazado, que a su vez será un pozo de ventilación. [REDACTED]

[REDACTED]

Se ejecutará, en principio, a través de pilotes secantes (Pilotes estructurales de Hormigón armado que incluyen pilotes intermedios de mortero con funciones de impermeabilización).

Las dimensiones en planta del pozo son de unos 17x17 m, aproximadamente.

5.4 ACCESOS A FRENTES DE ATAQUE DE MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

Para el túnel de línea se han establecido 3 accesos, para generar un máximo de 6 frentes de ataque. Los accesos y extracción de tierras se realizan mediante pozo vertical (extracción vertical). Por tanto, hay un acceso que se realiza por la propia Estación de Cuatro Vientos a construir, mientras que los otros dos corresponden a las salidas de emergencia [REDACTED]

[REDACTED]

Dado que se diseñan viales para salidas de emergencia, estos serán también empleados durante la duración de las obras

6 ESTUDIO DE SUBSIDENCIAS

6.1 RESUMEN DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS DE LAS ALTERNATIVAS

6.1.1 Alternativa 1

[Redacted text block for Alternativa 1]

6.1.2 Alternativa 2

[Redacted text block for Alternativa 2]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

6.1.3 Alternativa 3

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

6.1.4 Conclusiones

[Redacted text]

6.2 ESTIMACIÓN DE SUBSIDENCIAS POR MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS

La construcción de obras subterráneas puede generar movimientos en el terreno, los cuales pueden generar afecciones sobre edificaciones, infraestructuras o servicios existentes que discurren enterrados. Estos movimientos se traducen en riesgos a terceros, y estos se deben analizar en fase de Proyecto para minimizar los mismos.

6.2.1 Ley de Asientos

La curva de asientos del terreno viene expresada por la función de Gauss. Según la ley de asientos desarrollada por Peck (1969), en cada caso, los parámetros que definen geométricamente esta curva se obtienen con la hipótesis de que el área encerrada por la campana de Gauss es igual a la variación de sección experimentada por la excavación, denominada pérdida de suelo (V_s), que se define como la superficie encerrada por la curva por unidad de longitud.

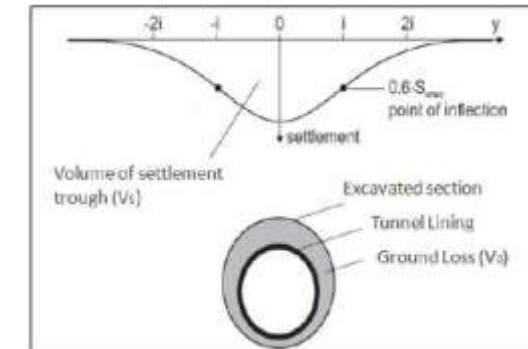
De este modo, la curva de asientos quedaría definida mediante la siguiente expresión:

$$S_v = S_{\max} e^{-\frac{y^2}{2i^2}}$$

Donde se desprende lo siguiente:

- S_v = Asiento en la abscisa y .
- S_{\max} = Asiento máximo en superficie, coincidente con la vertical de la clave del túnel.

- i = Abscisa del punto de inflexión de la curva de Gauss (distancia del punto de inflexión de la cubeta de asientos al eje del túnel).
- y = Abscisa medida desde la vertical de la clave del túnel.



La curva de asiento quedaría completamente definida una vez que se conozca el volumen de asientos (V_s) y la posición del punto de inflexión (i), mediante el cálculo del asiento máximo con la expresión:

$$\delta_{\max} = \frac{V_s}{2,5 \cdot i}$$

6.2.2 Volumen de Asientos

Desarrollado por el Método tradicional Madrid donde H/D es la relación entre altura materiales terciarios sobre clave y D el diámetro del túnel.

- Para $H/D < 1,89$: $V_s(\%) = -0,4296 \ln(H/D) + 0,3432$
- Para $H/D > 1,89$: $V_s(\%) = 0,07 \pm 0,046$

- 1.- El análisis efectuado se basa fundamentalmente en la experiencia en casos y terrenos similares en otros Proyectos y obras en Madrid, lo que ha permitido el desarrollo del llamado "Modelo de Madrid" usando datos procedentes de análisis de elementos finitos tridimensionales para el estudio de las cubetas de asientos de Attewell, el método de Sagaseta y Oteo (1974) y correcciones empíricas basadas en mediciones de campo. En este modelo se asume que el perfil estratigráfico tipo es el definido en la figura siguiente:
- 2.- Nivel 1: rellenos y cuaternarios flojos. Estos materiales pueden tener un módulo de deformación en decompresión de 5 a 10 MPa.

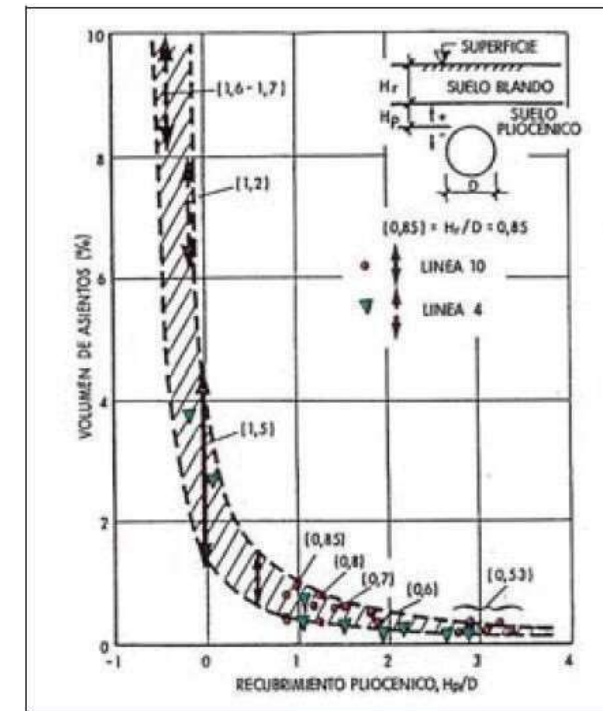
3.- Nivel 2: constituido por los niveles más rígidos que constituyen Nivel 2 en el terciario (Mioceno y Plioceno). El módulo de deformación en decompresión oscila entre unos 50 MPa (arenas de miga) a 225 MPa (toscos duros). El agrupar todos estos materiales en un sólo nivel de cálculo queda justificado, en muchas ocasiones, por la alternancia de las capas terciarias, por la gran diferencia de sus módulos de deformación con los del Nivel 1, etc.



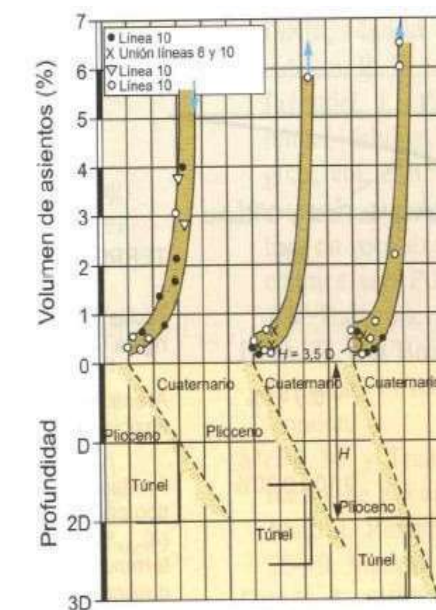
El volumen de asientos se calcula mediante la expresión:

$$VS(m^3/m) = A (m^2) \cdot VL(\%) / 100$$

Siendo VL% la pérdida de volumen (volumen de asientos en porcentaje de la sección excavada), y A el área de excavación.



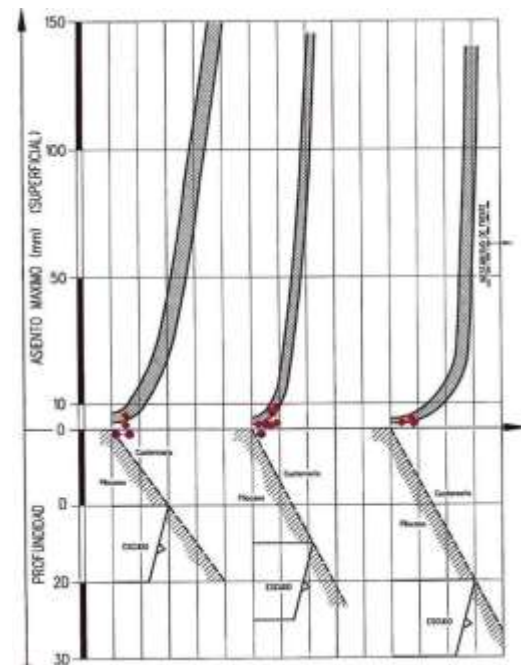
El Modelo Madrid de estimación de subsidencias permite la obtención del volumen de asientos mediante la aplicación del siguiente ábaco, en función de la profundidad y del recubrimiento terciario o plioceno (H_p):



De acuerdo con el trabajo de investigación de Oteo (2001) dicho volumen de asientos debe ser corregido en caso de trabajar con tuneladoras EPB. Dicho coeficiente adopta los siguientes valores:

- 0,50 Con $H_p > 0,75 (H_p + H_r)$ y $H_p/D > 1,5$
- 0,70 Con $0,50 (H_p + H_r) < H_p < 0,75 (H_p + H_r)$ y $H_p/D > 0,50$
- 1,00 Con $0,25 (H_p + H_r) < H_p < 0,50 (H_p + H_r)$ y $H_p/D < 0,50$

De forma alternativa, estos valores de VL% pueden obtenerse a partir de la ley propuesta por Fernando Díez en su tesis doctoral del año 2010, para la variación del volumen de asientos en función de H_p/D :



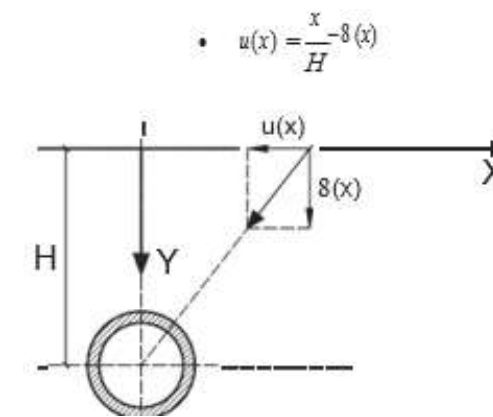
Para $H_p/D < 1.9$: $V_s\% = -0.4296 \ln(H_p/D) + 0.3432$

6.2.3 Desplazamiento y Deformación Horizontal

La ley de desplazamientos horizontales se formula a partir de la ley de asientos, asumiendo la hipótesis de que, a partir de una cierta distancia de la excavación, el

desplazamiento total inducido tiene, como dirección principal, una trayectoria que pasaría sensiblemente por el eje del túnel.

De esta forma, el asiento en cada punto y el desplazamiento horizontal serían proyecciones del desplazamiento total, de modo que ambas componentes del movimiento estarían, geoméricamente relacionadas, mediante la siguiente expresión:



6.2.4 Criterios de Daño

Las excavaciones subterráneas como el túnel de línea pueden generar subsidencias en edificaciones e infraestructuras existentes, y por lo tanto generar un daño.

Estos daños sufridos fueron recogidos por el BRE británico (Building Research Establishment) y clasificados en función de la facilidad de reparación.

TABLA 4 - CLASIFICACIÓN DE AFECCIONES VISIBLES CON REFERENCIA A LA FACILIDAD DE LA REPARACIÓN
(ESCALA DE BURLAND J.B. (1977) Y ADOPTADA POR EL BRE)

CATEGORÍA DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO TÍPICO	ANCHURA APROXIMADA DE LAS GRIETAS O FISURAS
Insignificante (0)	Grietas capilares internas	<0,1mm
Muy leve (1)	Los daños muy leves incluyen grietas visibles que puedan ser tratadas fácilmente durante la decoración ; quizás una fractura leve y aislada en un edificio y grietas en los trabajos externos de ladrillo que resulten visibles en una inspección nevada a cabo de cerca.	1mm
Leve (2)	Los daños leves Incluyen grietas que puedan ser fácilmente rellenadas o redecoradas. algunas fracturas leves que pudieran aparecer y que dejaran ver el interior del edificio. también las grietas que se puedan ver externamente y que puedan requerir rejuntamiento o en el caso de ventanas o puertas que necesiten ser clavadas o sujetas.	5 mm
Moderado (3)	Los danos moderados incluyen grietas que requieran ser abiertas y que puedan ser enmascaradas por un obrero. también a las grietas que puedan ser enmascaradas por medio de apropiados revestimientos interiores, rejuntamiento de trabajos externos de ladrillos y que posiblemente una pequeña cantidad de reemplazamiento de los trabajos de ladrillo, las puertas y ventanas que requieran ser clavadas, tuberías de servido fracturadas y reducción en la estanqueidad del agua.	De 5 mm a 15 mm o un número de grietas o fisuras > 3 mm
Grave (4)	Los danos graves incluyen grietas grandes que requieran trabajos importantes de reparación y que conlleven fractura y	De 15 mm a 25 mm pero también en función del número de fisuras

CATEGORÍA DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO TÍPICO	ANCHURA APROXIMADA DE LAS GRIETAS O FISURAS
	posterior sustitución de secciones de pared (especialmente puertas y ventanas), puertas y marcos de ventana deformados, pisos inclinados visiblemente, paredes en estado precario. pérdidas de punto de apoyo en vigas. rotura de tuberías de servicio.	
Muy grave (5)	Los danos muy graves por lo general son aquellos que requieren un trabajo de reparación de gran calibre que suponga reconstrucción total o parcial, pérdida de los puntos de apoyo ele las vigas, pared~ en estado pésimo que requieran apuntalamiento o soporte, rotura de ventanas con distorsión y peligro de inestabilidad de estructuras.	Normalmente, > 25 mm pero también depende del número de fisuras.

La tabla anterior es referida a daños visibles en obras de ladrillo, bloque o mampostería.

Por otra parte, Boscarding y Cording (1989) asociaron daños en edificaciones afectadas por subsidencia a los valores de deformación horizontal de tracción (deformación límite de tracción). Se recogen en la siguiente tabla:

TABLA 5 - RELACIÓN ENTRE EL DAÑO ASOCIADO Y DEFORMACIÓN DE TRACCIÓN Y (BOSCARDING Y CORDING, 1989)

CATEGORÍA DEL DAÑO	DEFORMACIÓN LIBRE DE TRACCIÓN (%)
0 – DESPRECIABLE	0,00 a 0,05
1 – MUY LIGERO	0,05 a 0,075
2 – LIGERO	0,075 a 0,15
3 – MODERADO	0,15 a 0,30
4 a 5 – SEVERO A MUY SEVERO	>0,30

Posteriormente, Boscarding y Cording propusieron el gráfico de nivel de daños que relaciona la deformación horizontal con la distorsión angular

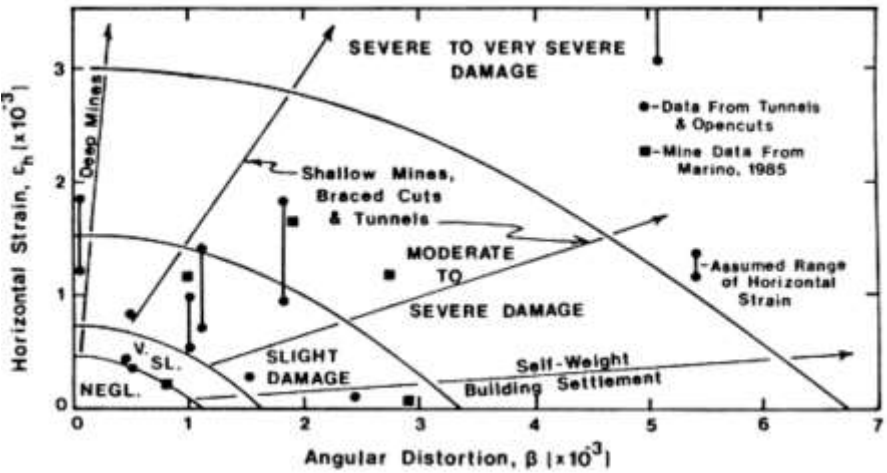


ILUSTRACIÓN 13 - CRITERIO DE DAÑO BASADO EN DISTORSIÓN ANGULAR Y DEFORMACIÓN HORIZONTAL (BOSCARDING Y CORDING, 1989)

Así pues, de acuerdo con los umbrales establecidos para límites de movimientos admisibles en Metro de Madrid, se dispone la siguiente tabla:

TABLA 6 - MOVIMIENTOS ADICIONALES ADMISIBLES. METRO DE MADRID

UMBRAL DE CONTROL	ASIENTO ADMISIBLE (mm).			DISTORSIÓN ANGULAR			DEFORMACIÓN HORIZONTAL UNITARIA (%)		
	VERDE	ÁMBAR	ROJO	VERDE	ÁMBAR	ROJO	VERDE	ÁMBAR	ROJO
-Zonas sin edificaciones	< 50	50 a 100	> 100	<1/100	1/100 a 1/50	> 1/50	< 1,5	1,5 a 2,0	> 2,0
-Edificios cimentados profundos o con losa, en buen estado. -Conducciones no de gas	< 20	20 a 30	> 30	< 1/1000	1/1000 a 1/500	> 1/500	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
-Estructura subterránea o túneles existentes	< 15	15 a 25	> 25	<1/2000	1/2000 a 1/1000	> 1/1000	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
-Edificios cimentados superficialmente sin daños aparentes	< 10	10 a 15	> 15	< 1/2000	1/2000 a 1/1000	> 1/1000	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
-Edificios cimentados superficialmente con daños -Edificios monumentales - Edificios con más	< 5	5 a 10	> 10	< 1/3000	1/3000 a 1/2000	> 1/2000	< 0,05	0,05 a 0,10	> 0,10

UMBRAL DE CONTROL	ASIENTO ADMISIBLE (mm).			DISTORSIÓN ANGULAR			DEFORMACIÓN HORIZONTAL UNITARIA (%)		
	VERDE	ÁMBAR	ROJO	VERDE	ÁMBAR	ROJO	VERDE	ÁMBAR	ROJO
de 10 alturas -Tuberías de gas									

7 TRATAMIENTOS DEL TERRENO

La construcción de túneles urbanos presenta un nivel de dificultad adicional debido a la existencia de edificios, servicios u otras infraestructuras próximas al trazado que podrían verse afectadas por los movimientos inducidos durante las excavaciones. Para mitigar estos efectos se disponen medidas especiales destinadas a controlar los movimientos generados.

Una vez ya definidas las zonas de posible afección sobre las edificaciones y estructuras de mayor relevancia, deben definirse y cuantificarse los tratamientos que se llevarían a cabo en caso de ser considerados necesarios para mejora del terreno o protección de cimentaciones frente a posibles asientos.

Para el desarrollo de este análisis se parte de la campaña geológico-geotécnica efectuada en este Estudio Informativo, así como de los datos relativos a campañas efectuadas anteriormente en la zona de implantación del proyecto. Asimismo, se consultan referencias bibliográficas sobre los suelos de Madrid y de la experiencia acumulada durante las excavaciones subterráneas realizadas en Madrid en contextos similares.

Entre ellas pueden citarse: la tesis doctoral “Nuevo modelo Madrid para la estimación de asientos producidos en túneles con tuneladoras EPB de gran diámetro” de Fernando Díez Rubio (2010). Dicha tesis recoge nuevas aportaciones partiendo del “Modelo Madrid” de Oteo et al (1999), modelo semiempírico ampliamente contrastado con medidas reales.

El documento de criterios básicos de diseño utilizado ha sido “Recomendaciones generales. Evaluación de riesgos. Zonificación del trazado por riesgos. Diseño de los planes de instrumentación y auscultación para las obras de ampliación de la red de Metro de Madrid (2003 – 2007)”.

7.1 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DEL TERRENO EN LA ZONA DE ESTUDIO

En la zona aparecen materiales cuaternarios, representados principalmente por rellenos antrópicos, bien vertidos, bien rellenos estructurales de vías de comunicación, pero que presentan espesores muy bajos, y se encuentran siempre tapizando la superficie del terreno.

Bajo éstos, aparecen los materiales del Terciario identificados en el área de Madrid y su alfoz, que constituyen las facies Madrid, donde se diferencian varias unidades litoestratigráficas con

sentido geotécnico. El criterio para diferenciarlas es su contenido en finos, concretamente el porcentaje de material pasante por el tamiz # 0,08 mm, que incluye arenas y limos (según la nomenclatura más utilizada de V. Escario, P. de la Fuente, etc.). Estos son:

TABLA 7 - LITOTIPOS DE LA FACIES MADRID (ESCARIO, 1985)

% PASA TAMIZ Nº 200	DENOMINACIÓN
$T_{200} < 25$	Arenas de miga
$25 < T_{200} < 40$	Arenas tosquizas
$40 < T_{200} < 60$	Tosco arenoso
$T_{200} > 60$	Tosco

En la mayor parte del trazado del túnel y situación de las nuevas estaciones, aparecen arenas de miga, un material muy arenoso, con un contenido en finos inferior al 25%, es decir, con un comportamiento eminentemente granular, sin prácticamente cohesión efectiva. Se trata de unas arenas muy densas.

Se intercalan arenas tosquizas, a modo de lentejones, caracterizados por su escasa continuidad lateral y potencia, sin poder definirse para un mismo banco una cota fija de muro y techo. Se trata de arenas con un contenido en finos entre el 25 y el 40%, por lo que presenta una mínima cohesión efectiva, si bien, debido a que parte de ese contenido en finos son limos, su comportamiento geotécnico se define igualmente como granular. También se trata de un material con unas características de resistencia muy densas.

Puntualmente aparecen bancos de toscos arenosos, que ya presentan cierta consistencia debido a que presentan contenidos en finos superiores al 40% y hasta el 60%.

7.2 TIPOS DE TRATAMIENTOS DEL TERRENO PROPUESTOS

A efectos de este Estudio Informativo, se han seleccionado una serie de tratamientos de protección o mejora del terreno frente a posibles subsidencias, con objeto de hacer una previsión de intervenciones de las potenciales afecciones detectadas a lo largo de los trazados de las diferentes alternativas. Los criterios de aplicación de estas medidas que se han tratado, se ha intentado que sean lo más homogéneos posible a efectos de su aplicación en las alternativas.

Así, a efectos de efectuar unas previsiones de posibles actuaciones, a delimitar con precisión en fase de Proyecto de Construcción, se han considerado 3 tipos de tratamientos diferenciados en función de las condiciones relativas geométricas existentes entre el túnel de línea y las edificaciones o infraestructuras:

- **Inyecciones de compensación:** se considera la ejecución de inyecciones que permitan

controlar los asientos producidos, las mismas se ejecutarían a través de perforaciones equipadas mediante tubo-manguito implantadas en toda la superficie de potencial afección. Tras una fase de pretratamiento, el sector quedaría preparado para la inyección del terreno posterior, ante el avance de la tuneladora o sistema de excavación del túnel, buscando compensar con las mismas los movimientos inducidos por la excavación. Cuando las edificaciones o infraestructuras se ubican directamente sobre la sombra de los trazados, este tipo de tratamiento resulta prácticamente el único viable.

- **Refuerzo de emboquilles para tuneladora:** Mediante una malla de pilotes de mortero al tresbolillo en el trasdós de la pantalla a atravesar, ya sea pozo o estación, así como un anillo de sellado para garantizar la estanqueidad de la estructura.
- **Paraguas de micropilotes:** Se emplean como sistema de sostenimiento preventivo actuando como un techo temporal rígido estabilizando en terreno mientras avanza la excavación del túnel, especialmente en los emboquilles de inicios de excavación con Método Tradicional de Madrid. Su función es formar una especie de bóveda protectora por delante del frente de excavación colocando una serie de micropilotes, de manera que esta bóveda refuerce el terreno débil o inestable, evitando desprendimientos y reduciendo los asientos en superficie, con objeto de permitir excavar el túnel de manera más segura, especialmente en suelos blandos.
- **Inyecciones de consolidación:** Se buscaría con ellas una mejora del terreno de la sección del túnel con anterioridad a la excavación del túnel. Alternativamente pueden ejecutar macizados con Jet Grouting en la bóveda de la sección, etc... A efectos de este estudio informativo, se han considerado este tipo de actuaciones cuando no existe suficiente espacio disponible para la ejecución de pantalla de micropilotes, pero resulte posible la intervención desde superficie mediante perforaciones inclinadas. Igualmente, se ha considerado esta opción cuando se ha visto posible el acceso, por ejemplo, a niveles inferiores de parkings o sótanos desde los que efectuar el tratamiento.

En todo momento se han seguido criterios conservadores dado que se perforará a través de materiales competentes mediante tuneladora escudada capaz de minimizar los asientos.

7.3 TRATAMIENTOS DEL TERRENO PARA EDIFICACIONES

7.3.1 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 principio de las inyecciones de compensación consiste en evitar la descompresión del suelo debida a la excavación, inyectando dosis muy precisas de lechada entre el túnel y los edificios que han de protegerse. Los factores clave son:

- Medición precisa de las cantidades a inyectar.
- Sincronización entre la inyección y las excavaciones: la inyección debe anticiparse al surgimiento de asentamientos.
- Control preciso y en tiempo real de la aplicación de la lechada y de las deformaciones del suelo y de las estructuras.

El proceso de ejecución del método de inyección se basa en los principios de fracturación hidráulica del terreno mediante la inyección de lechada de cemento.

Para ello, se ejecuta un pozo de ataque hasta la profundidad definida de tratamiento con las inyecciones. En la base del pozo se sitúa la maquinaria y equipo precisos.

Se incorporan tubos manguitos en los cuales se introducen los obturadores y se inyecta un volumen definido a través de las válvulas individuales. Esta secuencia se repite en varias fases de inyección para obtener la compensación del asiento de forma controlada.

Se trata de inyecciones múltiples de pequeños volúmenes de lechada que provocan mejoras de los parámetros del suelo en relación con su capacidad de deformación. Consiste en la instalación de tubos manguitos, mediante los cuales se realizan inyecciones en puntos definidos en el terreno controlando parámetros tales como: la geometría, caudal, volumen de inyección, viscosidad, relación agua-cemento, etc.

En la siguiente imagen se puede observar el pozo de tratamiento y la zona de inyección para el tratamiento mediante inyecciones de compensación:

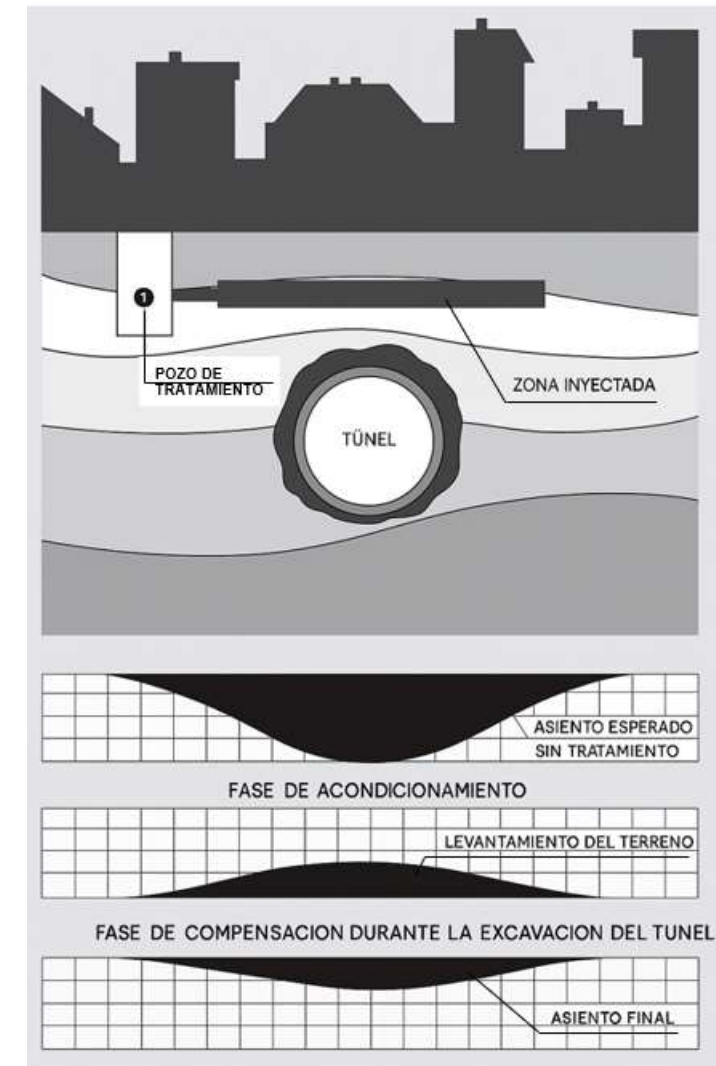


ILUSTRACIÓN 14 - ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO DE INYECCIONES DE COMPENSACIÓN

En principio, se prevé realizar inyecciones de compensación en las siguientes zonas de cada alternativa:

- Alternativa 1: [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

- Alternativa 2: E [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
- Alternativa 3: [REDACTED]
[REDACTED]

Para la ejecución del pozo de tratamiento para la ejecución de las inyecciones de compensación, se precisará de la excavación al amparo de una pantalla perimetral de pilotes.

7.4 TRATAMIENTOS DEL TERRENO PARA TUNELADORA O MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

Para la ejecución de pozos de ataque de la tuneladora, ya sea para inicio de entrada y salida de algún tramo, como entrada y salida de zonas de estación, tanto ejecutado mediante tuneladora o Método Tradicional de Madrid, se realizarán tratamientos del terreno según los apartados siguientes.

7.4.1 Tratamiento en emboquilles de tuneladora

En el caso de túneles construidos con TBM con arenas limpias (finos < 15%), la experiencia en la construcción (principalmente en el Metro de Madrid) ha mostrado que la inestabilidad en estos materiales se produce en forma de “cúpulas” que se desarrollan en la parte de terreno ya excavado en la zona de la clave. Estos desprendimientos de arena producen, por tanto, grandes oquedades, en ocasiones de dimensiones métricas, que, por movimientos de colapso del terreno, pueden llegar a manifestarse en superficie en forma de socavones. Para evitar estas situaciones, se plantea el tratamiento del terreno en los emboquilles de la tuneladora.

Se incluyen en este apartado los emboquilles para inicio de excavación con tuneladora desde el pozo de ataque, así como emboquilles de estación o pozo de extracción para la tuneladora.

En el pozo de ataque de la tuneladora de las alternativas 1 y 3, se construirá un recinto de pilotes de mortero, formado por una malla de pilotes de 0.80 m de diámetro al tresbolillo separados 2.40 m entre sí, en un área de 13x16 m, aproximadamente hasta una profundidad de unos 4 m por debajo de la cota de contrabóveda del túnel.

Solución similar se plantea en el caso de entrada de la tuneladora en la estación en la alternativa 1, así como para la entrada y salida en la alternativa 3, junto con la entrada en el pozo de extracción de la tuneladora.

En estos casos y de manera adicional, se realizará un anillo de sellado en el interior de los pozos o de la estación con objeto de disponer de un elemento adicional para garantizar la estanqueidad de las estructuras.

7.4.2 Inyecciones de impregnación o consolidación

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

Cuando hay que atravesar niveles de arena que pueden llegar a estar saturados 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 de Madrid, 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.

Las inyecciones de consolidación previstas se ejecutarían en las siguientes zonas:

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

7.4.3 Paraguas de micropilotes

En la bóveda de la sección ejecutada mediante Método Tradicional de Madrid se ejecutarán macizados con paraguas de micropilotes.

La ejecución de túneles en suelos de este tipo muy arenosos requiere el empleo de sistemas de presostenimiento que permitan asegurar la estabilidad del terreno mientras se produce la perforación en zonas críticas, como la emboquilladura, evitando desprendimientos.

Uno de los principales sistemas a tal efecto son los denominados “paraguas de micropilotes” que consisten en la yuxtaposición de micropilotes en la parte superior de la futura perforación hasta obtener superficies troncocónicas de semiángulo pequeño y de eje prácticamente paralelo al del túnel que, una vez ejecutado, y en combinación con la colocación de cerchas para apuntalamiento según se produce el avance y una posterior terminación con revestimiento de hormigón gunitado, permitirán ejecutar la perforación sin desprendimientos.

En la siguiente figura se puede ver la disposición de los micropilotes en la sección del túnel, así como un esquema de la ejecución de los micropilotes, obtenido de la Guía de ejecución de micropilotes en obras de carreteras:

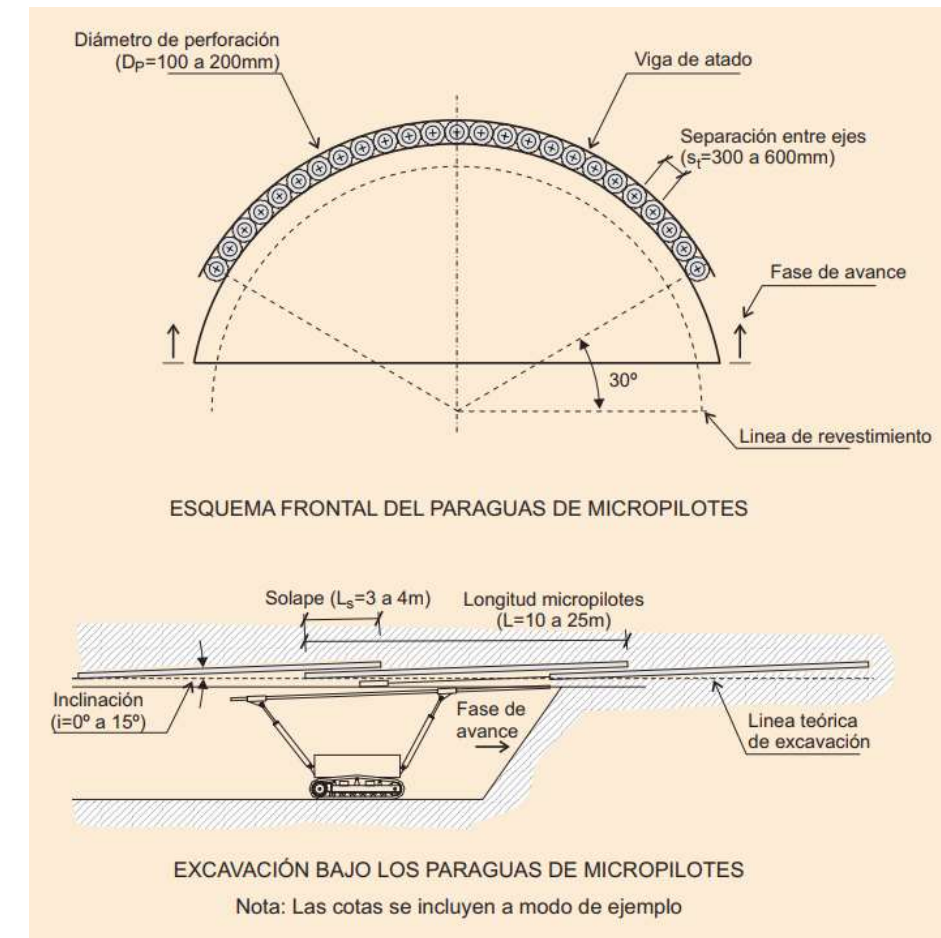


ILUSTRACIÓN 15 - EJEMPLO DE EJECUCIÓN DE UN PARAGUAS DE MICROPILOTES

Según la misma Guía, el modelo estructural es el de una viga continua apoyada por un lado en las cerchas de sostenimiento y empotrada por otro lado, en el terreno a perforar:

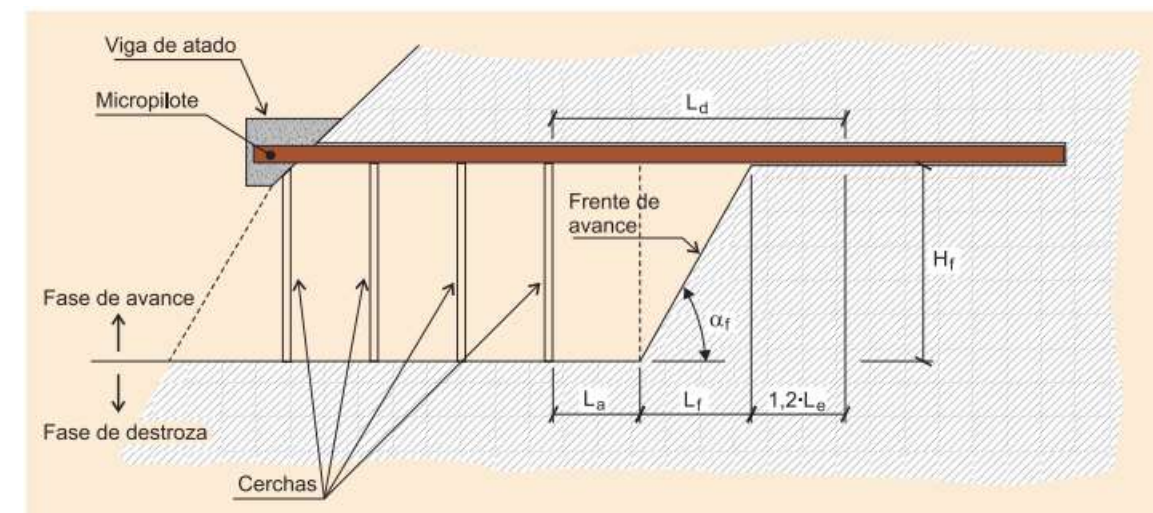


ILUSTRACIÓN 16 - EJEMPLO DE AVANCE EN UN PARAGUAS DE MICROPILOTES

Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- La longitud de los micropilotes, en general, no será superior a 25 m ($L < 25$ m), con inclinaciones respecto a la horizontal inferiores o iguales a 15° ($i \leq 15^\circ$). El solape entre los micropilotes de dos avances sucesivos será función de la longitud de avance, de las características del terreno y de la configuración geométrica del emplazamiento, si bien en todo caso deberá ser igual o superior a 3 m ($L_s \geq 3$ m).
- La separación entre micropilotes en una misma sección transversal deberá ser inferior a 60 cm entre ejes contiguos ($s_t < 60$ cm).
- La separación entre micropilotes de una misma sección transversal y la armadura tubular a disponer se puede calcular considerando los micropilotes como vigas sometidas al peso de las tierras que soportan y aplicándoles los principios de la resistencia de materiales, con las siguientes observaciones:
 - La longitud del cálculo de vigas L_d , es un valor ficticio que resulta de la agregación de tres magnitudes:

$$L_d = L_a + L_f + 1,2 \cdot L_e$$

donde:

L_d : Longitud de cálculo de cada micropilote, considerado como viga.

L_a : Longitud del avance de excavación, que se corresponderá, en general, con la separación entre las cerchas de sostenimiento del túnel, en su caso.

L_e : Longitud elástica del micropilote considerándolo empotrado en el terreno. Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$L_e = \left(\frac{3 E_p I_p}{E} \right)^{1/4}$$

donde:

E: Módulo de elasticidad del terreno

$E_p \cdot I_p$: Rigidez a flexión del micropilote

- En cuanto a la carga de terreno que gravita sobre cada micropilote puede determinarse, a modo de primera aproximación, mediante la siguiente expresión:

$$q = \gamma_{ap} \cdot h \cdot S$$

donde:

q: Carga de terreno en la zona de influencia de cada micropilote.

γ_{ap} : Peso específico aparente del terreno.

h: Altura del terreno que se considera que gravita a efectos de cálculo sobre el sostenimiento a corto plazo.

S: Separación entre ejes de micropilotes contiguos, en planta.

Se contemplan paraguas de micropilotes en los emboquilles para inicio de excavación con método tradicional desde las pantallas (típanos) de estaciones, y los emboquilles de túneles (ramales) ejecutados con Método Tradicional de Madrid.

7.5 TRATAMIENTOS EN CRUCES CON METRO Y CERCANÍAS

7.5.1 Tratamiento de jet-grouting

En el caso de los emboquilles, se contempla la ejecución de barreras semi-rígidas mediante tratamiento de jet-grouting.

El proceso llamado jet-grouting consiste en desestructurar un suelo a una determinada profundidad por medio de un chorro de fluidos, y mezclar el suelo erosionado con una lechada autoendurecible para formar en el terreno columnas y otros tipos de estructuras.

Gracias a una fuerza elevada de inyección, el chorro permite desestructurar el suelo, erosionándolo desde cierta distancia, con una fuerza adaptada a su naturaleza y compacidad. Parte de este suelo se reemplaza por la lechada de cemento que proporciona el chorro. Esta sustitución más o menos significativa del suelo del lugar depende de la técnica utilizada y del objetivo a alcanzar.

En la gran mayoría de los casos, el procedimiento consiste en rotar y volver a ensamblar las herramientas de modo que el elemento de suelo-cemento que reemplaza la porción de suelo

original tenga una forma más o menos cilíndrica (de columna).

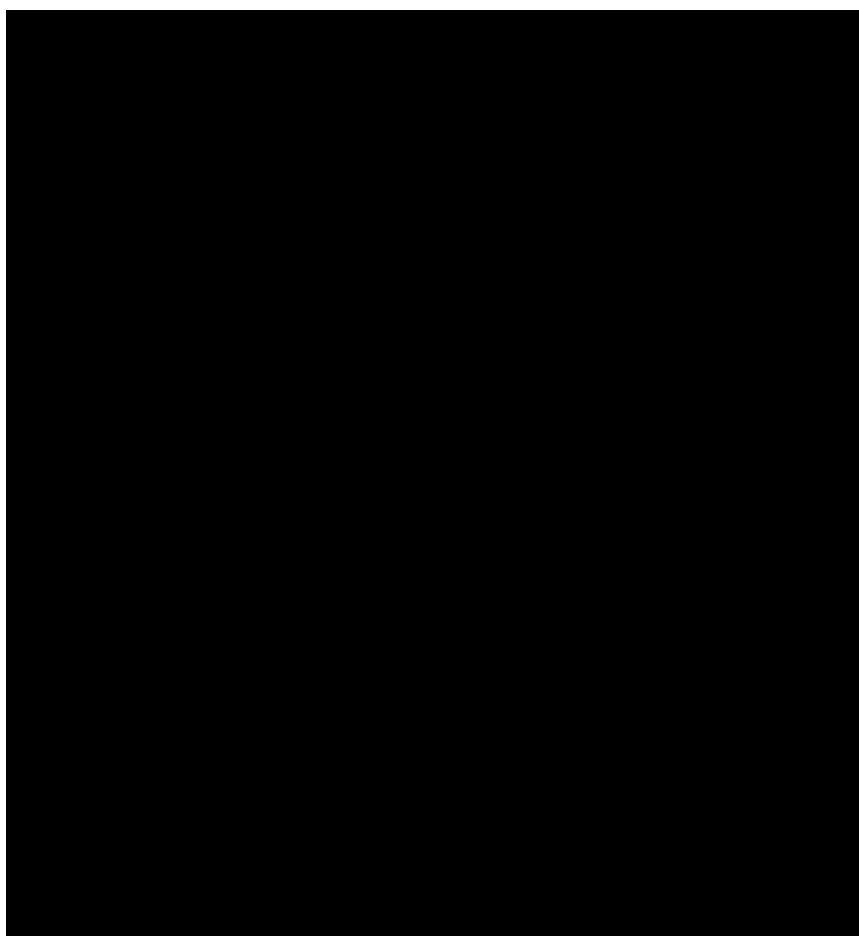


ILUSTRACIÓN 17 - ESQUEMA DE PROTECCIÓN EN EL CRUCE BAJO METRO O CERCANÍAS MEDIANTE JET-GROUTING

APÉNDICES

APÉNDICE 1. ESTIMACIÓN DE SUBSIDENCIAS

