



Anejo 2.13- Túneles



urbanismo, medio ambiente
y movilidad

MADRID



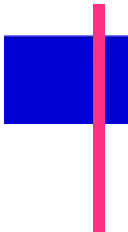
Control de documentación

Hoja de control

Realizado	Revisado	Aprobado
JBL	CCD	BON

Control de modificaciones

Versión	Fecha	Control de Modificaciones	Autor
1.0	27/10/2023	Primera entrega completa para Supervisión del Ayuntamiento	BON
2.0	12/04/2024	Entrega 1ª Revisión	BON



Anejo 2.13. Túneles

1.	Introducción y objetivos	1
1.1.	Objetivos	1
1.2.	Bibliografía y documentación de referencia	1
2.	Descripción de las alternativas	1
3.	Consideraciones sobre las incertidumbres del presente estudio	1
4.	Contexto geológico y geotécnico.....	2
4.1.	Marco geológico.....	2
4.2.	Descripción de los materiales.....	2
4.3.	Parámetros	2
4.4.	Riesgos.....	4
5.	Solución propuesta	4
5.1.	Condicionantes	4
5.2.	Sección adoptada	4
5.3.	Cruce de túneles	4
6.	Procedimiento constructivo	5
6.1.	Análisis del método de ejecución	5
6.2.	Método Alemán	6
6.3.	Análisis de la viabilidad de la excavación en mina en tramos de bajo recubrimiento 6	
6.3.1.	Clasificación de Oteo.....	6
6.3.2.	Estabilidad del frente	8
7.	Revestimiento.....	8
8.	Tratamientos del terreno.....	8
8.1.	Jet-grouting	9
8.2.	Inyecciones de mejora con tubo manguito	9
8.3.	Inyecciones de compensación	9
8.4.	Paraguas de micropilotes.....	10
9.	Proyectos similares.....	10
9.1.	Túneles de Marqués de Viana.....	10
9.2.	Línea 10 bajo el “Túnel de la risa”	11
9.3.	Cruce M-30 bajo Línea 10 de Metro	12

10.	Análisis preliminar.....	12
10.1.	Sin medidas adicionales.....	14
10.2.	Con medidas adicionales	14
10.3.	Conclusiones del análisis	15
11.	Galerías de emergencia.....	15
12.	Instrumentación y control.....	17
13.	Presupuesto.....	17
14.	Resumen y conclusiones.....	18

Índice de Imágenes

Figura 1 – Sección útil del túnel en mina, con zonas en verde disponibles para la instalación de equipos.	4
Figura 2 – Riesgo de inestabilidad al pasar un túnel nuevo bajo otro existente (Oteo, 2008).....	5
Figura 3 – Fases esquemáticas de ejecución de la caverna de la Estación de Guzmán el Bueno.	6
Figura 4 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_1 (adaptado de Oteo, 2015).....	7
Figura 5 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_2 (adaptado de Oteo, 2015).....	7
Figura 6 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_3 (adaptado de Oteo, 2015).....	7
Figura 7 – Criterio de estabilidad del frente de Oteo (2015).....	8
Figura 8 – Esquema de las fases de ejecución de tratamiento de columnas de jet-grouting.	9
Figura 9 – Inyecciones con tubos manguitos desde pozo de tratamiento.....	9
Figura 10 – Compensación bajo la línea 3 del metro en el túnel de Santa María de la Cabeza (Castro y otros, 2003).....	10
Figura 11 – Paraguas triple de micropilotes bajo la Línea 10 con cruce con Calle 30.	10
Figura 12 - Sección de túneles bajo Estación Tetuán Línea 1.....	11
Figura 13 - Longitudinal de túneles bajo Estación Tetuán Línea 1.	11
Figura 14 - Instalación del paraguas de micropilotes bajo Línea 1.....	11
Figura 15 - Galerías hastiales por Método Alemán.	11
Figura 16 – Inyecciones de compensación desde pozos (2) entre el “Túnel de la risa” y el nuevo túnel (Trabada, 1997).....	12
Figura 17 – Zona reforzada con jet-grouting bajo túnel de L-10, paraguas de micropilotes y pantallas frontales (M-30).	12
Figura 18 – Módulos de deformación conseguidos en el entorno de un túnel y bajo edificios (Amagliani y Balossi, 1991)	13
Figura 19 – Movimientos totales en la última fase del modelo, después de construir la contrabóveda.	14
Figura 20 – Movimientos totales después de hormigonar la clave del túnel, con los hastiales también hormigonados.	14
Figura 21 - Movimientos totales después de hormigonar la clave del túnel, con los hastiales también hormigonados.	14

Figura 22 - Movimientos totales en la última fase del modelo, después de construir la contrabóveda.	15
Figura 23 – Posibles asientos inducidos en la solera de un túnel existente al construir por debajo uno nuevo (Oteo, 2015) con la posición de los valores obtenidos en los análisis realizados en Plaxis.	15
Figura 24 – Posibles zonas identificadas para la localización de los pozos de salida de emergencia en los tramos de túnele en mina, galerías en mina conectarán el túnel con el pozo de salida.	16
Figura 25 – Sección propuesta para galería de emergencia con colector	17
Figura 26 – Esquema de posible conexión entre el túnel en mina carretero y pozo de salida de emergencia, espacio bajo pavimento de la galería disponible para colector (600mm).	17
Figura 27 – Tipos de tratamientos del terreno para el cruce de un túnel bajo otro existente en función de la distancia entre ellos (Oteo, 2015)	18

Índice de Tablas

Tabla 1 – Parámetros adoptados para la realización del presente documento. (*) Rangos de parámetros de los suelos de Madrid. (Oteo Mazo, C; Rodriguez Ortiz, JM; Mendaña Saavedra, F, 2003).	3
Tabla 2 - Clasificación de túneles desde el punto de vista de estabilidad (Oteo, 2015).....	6
Tabla 3 - Cálculo del parámetro Π_T	7
Tabla 4 - Localización de las salidas de emergencias propuestas para la alternativa corta.....	16
Tabla 5 - Localización de las salidas de emergencias propuestas para la alternativa más larga .	16
Tabla 6 – Valoración alternativas para túnel en mina.....	17



Planos

Plano 1 - Sección Túnel en Mina

Plano 2 – Secuencia Constructiva Propuesta

Plano 3 – Planta - Perfil Longitudinal. Alternativa 1

Plano 4 - Planta - Perfil Longitudinal. Alternativa 2

Plano 5 – Propuesta Instrumentación y AuscultaciónPlano

6 – Propuesta Galería de Emergencia

Apéndices

Apéndice 1: Presupuesto

[1] Introducción y objetivos

El presente documento aporta la información necesaria para la definición de los túneles en mina situados dentro del Anteproyecto de Remodelación del Nudo de Fuencarral, Provincia de Madrid.

[1.1] Objetivos

El objetivo primordial de este documento es establecer el trazado del túnel en mina que permita cumplir los objetivos del proyecto. Se analizarán las diferentes metodologías constructivas disponibles para la excavación de los túneles de forma segura, minimizando la afectación de los servicios y estructuras existentes, para establecer un método constructivo para este tramo del proyecto.

Finalmente, a fin de poder ir aportando más detalles en las siguientes fases del proyecto y poder definir los elementos estructurales y las mejoras del terreno, se identificarán las principales tareas pendientes y la información que falta para poder continuar con el proceso de diseño.

[1.2] Bibliografía y documentación de referencia

Para la elaboración de este documento se ha recopilado toda la información disponible de los proyectos similares y de lecciones aprendidas en proyectos previos en el contexto geológico y la problemática considerada. En lo que sigue se indican los documentos temáticos publicados y/o consultables relacionados que han sido considerados para la elaboración del estudio.

- Cornejo, L. “Revestimientos en túneles construidos por métodos tradicionales mineros” (2016)
- Rodríguez Ortiz, J.Mª; (1992) “Túneles a cielo abierto”.. Cursos sobre “Túneles urbanos y suburbanos”. Tomo I. Capítulo 3. CEDEX, Madrid.
- De Melis, M.; Oteo, C. y Rodríguez Ortiz, J.Mª (2000) “Estrategia geotécnica aplicada a la Ampliación del Metro de Madrid 1995-99”. Capítulo del Libro Homenaje a J.A Jiménez Salas, editado por CEDEX y SEMSIG, Madrid.
- Rodríguez Ortiz, J.Mª (2000) “Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid”. R.O.P nº 3405, diciembre 2000
- Amagliani, U; Balossi, A. “Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo” Soil and Rock improvement in underground works Milano 18-20 Marzo 1991
- Castro, R; Oteo, C; otros “Nuevo túnel urbano madrileño. Santa María de la Cabeza” Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, nº121, pp 34-40 (2003)
- Oteo, C; Rodríguez Ortiz, J.Mª. y Mendaña Saavedra, F. “Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid”. R.O:P nº 3429, enero 2003.

- Oteo, C y otros “Crossing of the M-30 urban motorway under the Madrid Metro Tunnel Of Line 10” Simp. Int. Túneles, AETOS, Madrid, pp 344-53 (2007)
- Oteo, C. “Quince lecciones y un epílogo sobre geotecnia de obras subterráneas” (2015)
- Panet, M. “Le calcul des tunnels par la méthode des curves convergence–confinement.” Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France (1995)
- Trabada, J. “Conexión de las líneas 8 y 10 del Metro de Madrid: viajar entre líneas” Cauce 2000: Revista de la ingeniería civil, nº 110 pp 56-63 (1997)

[1.3] Descripción de las alternativas

Durante el presente Anteproyecto se han considerado varias alternativas para el trazado, que se ha descrito en detalle en la memoria y los anejos correspondientes. A continuación, se resumen las diferencias para el túnel en mina de las distintas alternativas. Sobre el eje 70, el Túnel en mina se contempla entre los tramos de ejecución de un Túnel entre pantallas:

- Alternativa 1: PP.KK. 0+540-0+780 (240 m de longitud)
- Alternativa 2: PP.KK. 0+540-0+970 (430 m de longitud)

Incluyendo los tramos de túnel entre pantallas que se sitúan en ambos extremos del túnel en mina, las dos alternativas presentan la siguiente longitud total de túnel:

- Alternativa 1: PP.KK. 0+264-0+994 (730 m de longitud)
- Alternativa 2: PP.KK. 0+264-1+144 (880 m de longitud)

[1.4] Consideraciones sobre las incertidumbres del presente estudio

Como se ha indicado antes, el objetivo de este estudio es establecer una solución que pueda ser desarrollada en la siguiente fase de trabajo. El presente estudio presenta una serie de incertidumbres que van a marcar el desarrollo final de la solución y que se pueden dividir en dos grupos:

- Incertidumbres derivadas de los distintos condicionantes existentes.
- Incertidumbres derivadas del nivel de detalle general en el que se plantea el presente estudio.

Dentro el primer grupo se encuentran algunos condicionantes que no están completamente fijos como la estructura del túnel ferroviario existente, del cual se desconocen los detalles. Se conoce el tipo de cimentación y su cota, el proceso constructivo, los detalles de la estructura o el material alrededor de la misma.

Dentro del segundo, encontraríamos la limitada campaña de investigación del terreno realizada hasta la fecha, se han utilizado valores principalmente recomendados en la literatura. De la misma manera, los detalles del sostenimiento y tratamientos necesarios para poder realizar de forma segura la excavación del túnel en mina, queda fuera del nivel de detalle a estas alturas del proyecto y se han estimado en base a proyectos similares ya completados.

Para hacer frente a estos problemas e incertidumbres se ha incluido ejemplos de proyectos realizados en condiciones similares, que muestran que una solución como la proyectada es posible, aunque los detalles propios deban desarrollarse en las siguientes fases.

[1.5] Contexto geológico y geotécnico

En el Anejo de Geotecnia incluido en el presente Anteproyecto se ha realizado una exposición detallada del entorno geológico y de los condicionantes geotécnicos existentes en el ámbito de las obras. Asimismo, se recogen los distintos ensayos realizados durante el presente estudio. Así, en este Anejo se recoge una síntesis de los principales aspectos que pueden influir en los túneles.

[1.6] Marco geológico

Los terrenos existentes en el área de Madrid son fundamentalmente suelos terciarios de origen semiendorreico que forman parte de la fosa tectónica del río Tajo, donde a lo largo del Mioceno se depositaron sucesivos abanicos sedimentarios compuestos por los materiales erosionados de las sierras. Sobre los mismos se disponen depósitos fluviales de naturaleza detrítica y de edad comprendida entre el Plioceno y el Pleistoceno. Ambos episodios sedimentarios se dividen a su vez en diferentes series. Sin embargo, en el ámbito de las obras se han identificado exclusivamente las siguientes facies ordenadas de más moderna a más antigua:

Como se ha indicado en el Anejo correspondiente, los materiales afectados corresponden al substrato mioceno constituidos por las facies Madrid que corresponden principalmente a las arenas de miga (AM) y en menor medida a las arenas tosquizas (AT). De forma localizada se afectará a los materiales tosco arenosos (TA).

[1.7] Descripción de los materiales

A continuación, se recogen las principales características geológicas representativas de los materiales afectados por el túnel en mina.

- Arenas de Miga - corresponden a arenas cuarzofeldespáticas, en general, de grano medio a grueso, y con cierta proporción de arcillas y limos habitualmente inferior al 25%. Presentan color marrón amarillento. En la zona de estudio se han reconocido a techo del substrato mioceno.
- Arenas Tosquizas – Se trata de suelos de transición a las arenas de miga, correspondientes a cambios laterales o verticales en la sedimentación en una fase en que aumentaron los aportes de finos respecto a los de las arenas de miga. Presentan color característico marrón

claro- anaranjado a marrón- verdoso claro. En la zona de estudio se aparecen interdigitados con la arena de miga

- Tosco Arenoso – Se trata de suelos de transición entre las facies arenosas y las arcillo limosas (tosco). En general se corresponden con cambios laterales o verticales. Estas formaciones pueden presentar potentes espesores y en la zona de estudio se han reconocido a las mayores profundidades.
- Rellenos antrópicos - Esta unidad está constituida por materiales de aportación artificial como consecuencia de actividades constructivas, la actividad industrial y biológica-urbana. Las características geotécnicas de esta unidad resultan difícilmente resumibles, dada la gran heterogeneidad que estos materiales suelen presentar en cuanto a origen, compacidad, etc.

[1.8] Parámetros

Los parámetros considerados en el presente anteproyecto para las distintas unidades que se ven afectadas por los tramos de túnel en mina para las distintas alternativas consideradas, se resumen en la siguiente tabla (Tabla 1)

Unidad	Identificación			Estado		Resistencia (*)		Mod. Deformación (*)	Coef. Balasto (*)
	%Finos	LL	IP	W(%)	$\gamma_{ap}(kN/m^3)$	$c' (kPa)$	$\varphi' (^\circ)$	E (MPa)	Kh (t/m ³)
Rc	<35	-	-	-	20	10	31	15	-
Rx y Rv	-	-	-	-	18	0	28	8	2000
Arena Miga (AM)	<25	NP	NP	<12%	19,2	5	35	55	15000-20000
Arena Tosquiza (AT)	25-40	31	16	12%	19,4	10	33	80	15000-20000
Tosco arenoso (TA)	40-60	33	14	-	20,8	20	32,5	130	25000- 35000

Tabla 1 – Parámetros adoptados para la realización del presente documento. (*) Rangos de parámetros de los suelos de Madrid. (Oteo Mazo, C; Rodriguez Ortiz, JM; Mendaña Saavedra, F, 2003).

[1.9] Riesgos

Los principales riesgos geológicos y geotécnicos asociados a los materiales presente en el ámbito de estudio son los siguientes:

- Intercalación de estratos de diferente competencia, con baja cohesión.
- Presencia y posición de agua freática, principalmente de nivel colgados.

Adicionalmente, el principal riesgo para el proyecto se encuentra en la afectación de las infraestructuras cercanas, principalmente a las líneas ferroviarias situadas inmediatamente por encima del futuro túnel y su operación durante los trabajos de excavación. El resto de estructuras, carreteras y servicios existente, se encuentran a una distancia mayor y su nivel de afectación será menor, aunque deberán tenerse en cuenta en las evaluaciones de riesgos realizadas en futuras fases del proyecto.

[2] Solución propuesta

[2.1] Condicionantes

La sección propuesta viene marcada por cumplir una serie de condicionantes de distinta índole que afectarán a la sección del túnel en mina. Los principales condicionantes se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Geológico-geotécnicos: las características geotécnicas de la zona determinan 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
- Geométricos y funcionales: la sección deberá proveer espacio para la circulación de los vehículos. Al mismo tiempo deberá disponer de espacio suficiente para las instalaciones de explotación y seguridad necesarias.
- Infraestructura existente: en el caso de estudio se cruza bajo las líneas de ferrocarril y los viales existentes (en una de las alternativas). El método de construcción debe permitir que se evite o minimice la afección a las infraestructuras próximas a la nueva excavación en estudio.

[2.2] Sección adoptada

El túnel en mina se ha definido como una plataforma que debe albergar dos carriles, manteniendo la sección disponible fuera de los túneles. El ramal que contiene al túnel se ha definido con una velocidad de proyecto de 50km/h y en su salida se adosa a una calzada que se ha considerado como carretera multicarril con una velocidad de proyecto de 60km/h. En estas circunstancias se ha considerado que el caso del túnel no se encuentra dentro de la Norma 3.1-IC de 2016 y que se trata de una excepción que marca la norma para calzadas separadas cuando tenemos dos carriles sin previsión de ampliación y, por tanto, se han adoptado arcenes de 0.50 y 1.50m para dar continuidad a los anchos del propio ramal. Añadiendo los dos carriles de 3.50m, las plataformas

quedan de 9m de anchura. Las aceras consideradas son de 600mm a ambos lados, con un gálibo vertical de 5m para toda la plataforma disponible a los vehículos.

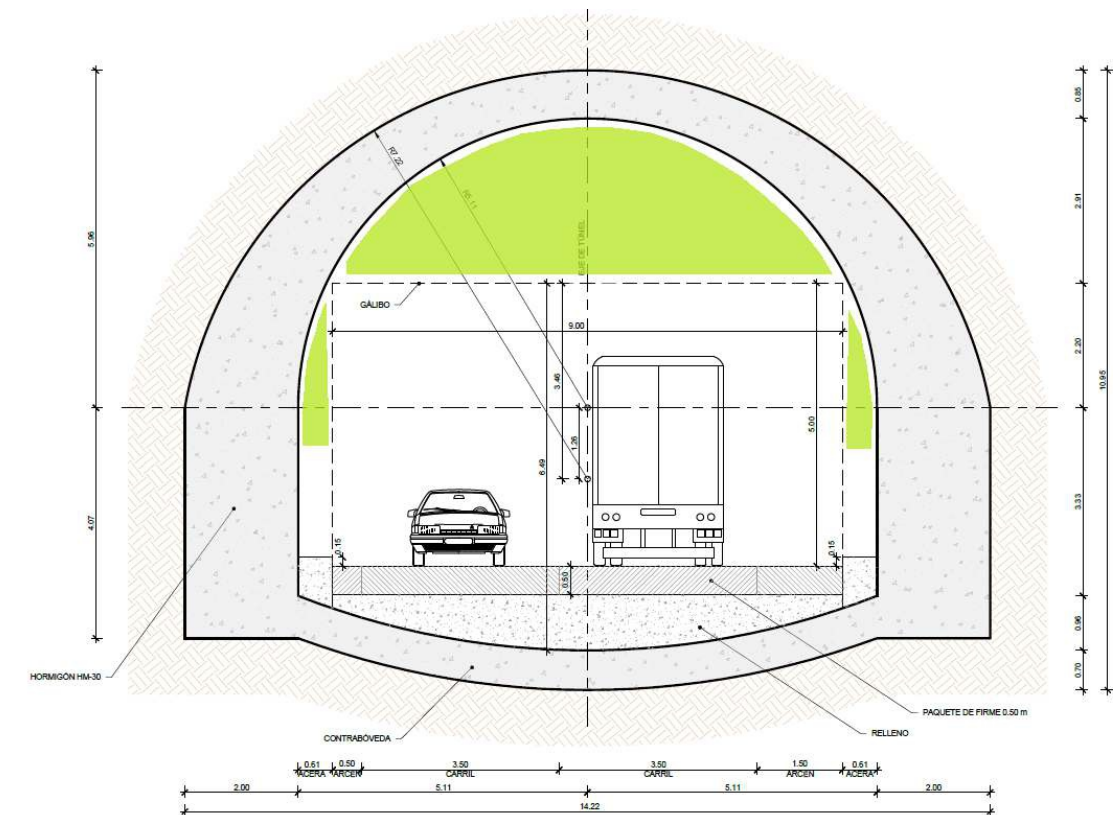


Figura 1 – Sección útil del túnel en mina, con zonas en verde disponibles para la instalación de equipos.

[2.3] Cruce de túneles

En ámbitos urbanos es habitual que se produzcan interacciones entre obras nuevas y obras subterráneas existentes. La obra nueva interacciona con la existente cambiando su estado de tensiones e induciendo deformaciones, lo que puede afectar a su funcionamiento, grado de seguridad, etc. En el caso que nos ocupa, en el que se proyecta construir un túnel nuevo bajo el túnel de ferrocarril existente ha de tenerse en cuenta:

- Los asientos que la nueva excavación puede originar en el existente.
- Asientos diferenciales entre los hastiales del túnel existente según vaya avanzando el túnel nuevo.
- Mejora del terreno existente entre el túnel existente y el proyectado para asegurar la estabilidad del frente de excavación o para asegurar el funcionamiento de la sección resistente existente.

- Correlación entre las dimensiones del túnel existente y el nuevo, distancia entre ellos y ángulo de cruce.
- Necesidad de reforzar el túnel existente.

La sección excavada viene en parte determinada por el método constructivo propuesto que está influenciado por la necesidad de minimizar posibles afecciones al túnel ferroviario que cruza de forma aproximadamente perpendicular en la zona más profunda del trazado propuesto. Este punto bajo viene impuesto por la necesidad de mantener una distancia mínima con la estructura existente, la distancia exacta se determinará cuando se conozcan los detalles del túnel ferroviario. En este momento hay que destacar que todavía existe mucho desconocimiento de la estructura existente y de su construcción, las cargas que actúan sobre ella o los requisitos en términos de movimientos admisibles. Una vez se disponga de esta información se podrá verificar el sostenimiento y revestimientos necesarios, así como los detalles de los tratamientos de mejora del terreno.

Como se puede observar en la Figura 2 el riesgo de inestabilidad en función de la distancia entre túneles aumenta al reducir la distancia entre los mismos, si existe una distancia del orden de 1-1.2 veces el riesgo es bajo, si la distancia disminuye por debajo de 0.25-0.30 veces el riesgo es alto. El caso proyectado a falta de los detalles que confirmen la distancia exacta, se puede situar en la zona de transición entre riesgo medio y alto.

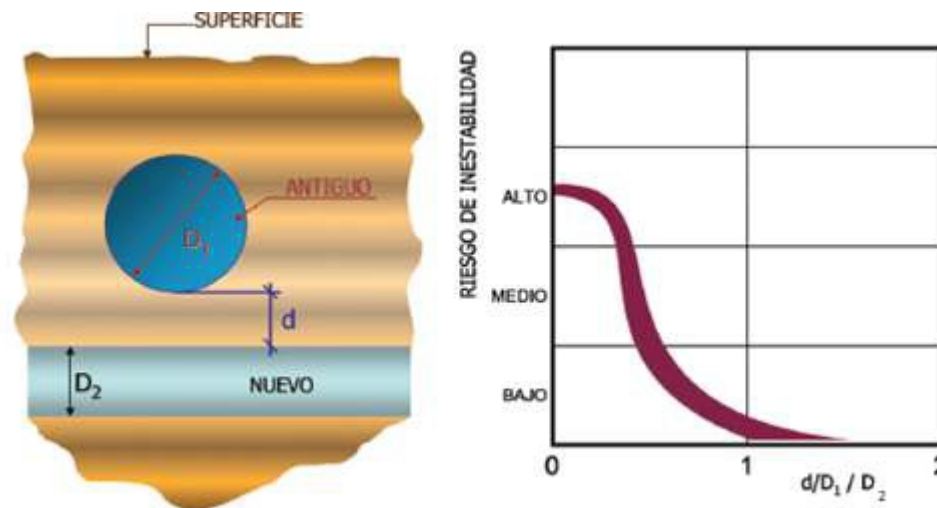


Figura 2 – Riesgo de inestabilidad al pasar un túnel nuevo bajo otro existente (Oteo, 2008)

[3] Procedimiento constructivo

El diseño geométrico y estructural de una obra subterránea está condicionado en gran medida por el método constructivo empleado. De este modo, la selección del procedimiento constituye uno de los primeros pasos en el estudio de los túneles.

[3.1] Análisis del método de ejecución

Los métodos de construcción de túneles que han sido empleados en la ciudad de Madrid con condiciones geotécnicas análogas o similares a las descritas en el apartado anterior para el tramo objeto del presente estudio son, en líneas generales, son los siguientes:

- Excavación a cielo abierto entre pantallas continuas, o sistema cut and cover.
- Máquinas integrales de excavación de túneles o tuneladoras (TBM), como el escudo de presión de tierras (EPB).
- Método Tradicional de Madrid (o Método Belga).
- Método Alemán.
- Nuevo Método Austriaco (NATM).
- Método del precorte mecánico.

Los métodos de excavación a cielo abierto serán utilizados en las zonas en las que la superficie se encuentra disponible pero no resultan adecuados para los sectores en los que se produce un cruce con las otras estructuras existentes. Para esos tramos se tendrá que realizar la excavación de forma subterránea, y son precisamente estos tramos bajo tierra los que se incluyen en el presente documento.

La amplia experiencia acumulada en las numerosas obras subterráneas ejecutadas en la ciudad, buena parte de las cuales corresponden a la red de Metro de Madrid, ha permitido evaluar las ventajas e inconvenientes de los procedimientos listados anteriormente. Una de las conclusiones principales es que el empleo de métodos de frente abierto en los terrenos pliocenos (con intercalaciones arenosas y posible presencia de bolsas de agua) entraña un riesgo significativo de inestabilidades que repercutirían gravemente sobre la seguridad de los trabajadores en el interior del túnel y sobre los elementos situados en superficie. Este hecho ha dado lugar a que la aplicación del NATM o del método del precorte mecánico haya resultado poco frecuente. Con base en estos motivos, no se consideran, por tanto, estos dos métodos de frente abierto adecuados para los trabajos que nos ocupan.

Por otra parte, el empleo de máquinas de excavación integral (TBM) ha demostrado resultar una alternativa segura y eficiente para la construcción de túneles en Madrid, con numerosos casos de éxito llevados a cabo durante las ampliaciones de la red de Metro que tuvieron lugar en los periodos 1995-1999 y 2003-2007. Sin embargo, su utilización está fuertemente condicionada por criterios de inversión y plazo de fabricación y montaje de la máquina. En consecuencia, se transforma en un método reservado para túneles de mayor longitud —usualmente se consideran más adecuados para túneles de más de 2 km—, donde la gran inversión económica y el extenso plazo de fabricación y montaje se ven compensados por los elevados rendimientos de excavación. Puesto que las alternativas estudiadas presentan longitudes de túnel claramente inferiores, se opta por descartar este procedimiento constructivo.

En relación con los métodos clásicos de construcción de túneles, tanto el Método Tradicional de Madrid como el Método Alemán se han empleado sistemáticamente y con buenos resultados en la construcción de estructuras subterráneas. De manera general, el Método Tradicional de Madrid se

ha utilizado mayoritariamente para los túneles de las diferentes líneas de Metro y galerías de menor sección, y el Método Alemán, con mayor cantidad de fases de excavación, se ha utilizado fundamentalmente en cavernas y estaciones de grandes dimensiones o en zonas en las que haya que controlar de manera más estricta los movimientos generados durante las fases de excavación. Por tanto, daba la escasa cobertera existente para el túnel en mina respecto a la vía férrea se ha decidido que el método alemán es más adecuado para la realización del proyecto, a fin de salvaguardar la estructura existente.

[3.2] Método Alemán

El Método Alemán es conceptualmente parecido al método Tradicional de Madrid, pero cambiando el orden de las fases de ejecución y de la propia ejecución de la bóveda. Típicamente el procedimiento se inicia con la excavación de dos galerías de avance en los hastiales por tramos que pueden ser de 25 a 30m pero que si el túnel no es muy largo (menos de 200m) puede realizarse de una vez. Los hastiales se construyen en general en dos fases, mitad superior e inferior. Seguidamente se hormigonan los hastiales excavados antes de proceder con la excavación de la zona de la bóveda. Estas galerías pueden resultar muy útiles a finde facilitar el drenaje del frente. Además, se consigue que la bóveda no se apoye sobre el terreno, sino sobre los estribos ya hormigonados. La bóveda se ejecuta por costillas, construidas de forma alterna. Es decir, se construye la galería central superior y cada semicostilla se ataca desde la parte superior del hastial antes de verter hormigón. Se hormigona la bóveda una vez excavada a través de la galería superior. Este procedimiento permite la construcción de grandes secciones de túnel sin que el frente abierto supere los 3-5 m². Una vez completado el hormigonado de la bóveda, se procede al vaciado de la sección (típicamente con un desfase de unos 5 o 6 anillos) y la construcción de la solera o contrabóveda. Existen variantes en los que se produce un avance frontal en bóveda, similar al método belga, en vez de por costillas, este sistema podría considerar como un Método Alemán Modificado y, en la fase actual, es el que se propone para la realización de este proyecto, deberá validarse durante las siguientes fases del mismo, para asegurarse que el avance frontal en bóveda puede realizarse de forma segura como en el Método Tradicional de Madrid, en vez de avanzar por semicostillas. Este sistema se ha utilizado para construir estaciones de Metro en Madrid, utilizando un avance frontal en bóveda y por costillas, en París, Caracas, etc y en túneles urbanos en Madrid como el de Cuatro Caminos, Guzmán el Bueno (Figura 3) y parcialmente el de María de Molina.

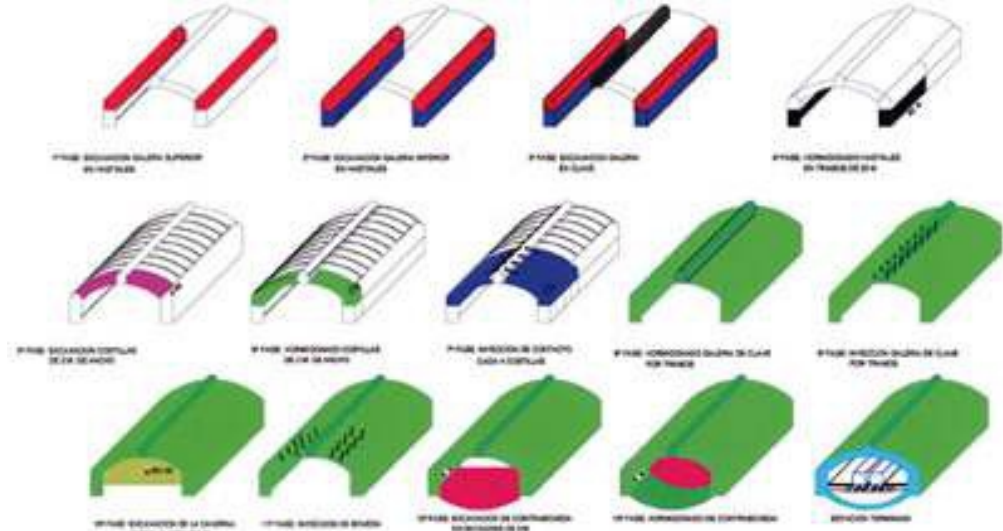


Figura 3 – Fases esquemáticas de ejecución de la caverna de la Estación de Guzmán el Bueno.

[3.3] Análisis de la viabilidad de la excavación en mina en tramos de bajo recubrimiento

Se considera que dada la presencia de estructuras existentes y de la poca distancia entre la excavación y éstas, se realizarán mejoras del terreno por medio de inyecciones y paraguas pesados que permitan minimizar los efectos sobre las vías de ferrocarril. Los posibles tratamientos se describen en otra sección ([5]) del documento.

En esta sección y con objeto de discriminar el ámbito de aplicación de los procedimientos constructivos considerados para el presente estudio, se plantean algunos estudios preliminares basados en experiencias previas en Madrid que permitan obtener unos primeros órdenes de magnitud, se han considerado los parámetros del terreno natural para los estudios que se plantean a continuación.

[3.3.1] Clasificación de Oteo

En primer lugar, se ha empleado la siguiente clasificación elaborada por Oteo (2015) a partir de numerosas observaciones y medidas mediante la cual se puede clasificar un túnel excavado por métodos tradicionales en los suelos de Madrid desde el punto de vista de su estabilidad.

En la clasificación se determinan tres índices I_1 , I_2 e I_3 relacionados con la granulometría, profundidad, recubrimiento, resistencia del terreno y presencia de agua. La suma de estos tres índices es el parámetro Π_T que se interpreta de la siguiente manera:

Π_T	I_3	Problemas
3 – 5	-	Sin problemas
5 – 9	-	Problemas de grado medio
9 - 12	-	Problemas muy importantes
-	≥ 4	Problemas de grado medio o muy importantes

Tabla 2 - Clasificación de túneles desde el punto de vista de estabilidad (Oteo, 2015)

Tal y como se ha expuesto, la mayor parte del sustrato terciario reconocido en el tramo se compone de arena de miga, arena tosquiza y tosco arenoso. Las propiedades geotécnicas de referencia consideradas a este nivel de estudio son las propuestas en el Anejo de Geotecnia.

- Arena de Miga:
 - Contenido de finos: <25%.
 - Resistencia a compresión simple (q_u): 2-4 kg/cm².
- Arena tosquiza:
 - Contenido de finos: 25%.
 - Resistencia a compresión simple (q_u): 1-5 kg/cm².
- Tosco Arenoso
 - Contenido de finos: 40-60%
 - Resistencia a compresión simple (q_u): >4 kg/cm²

Así, en las siguientes figuras se aplica la clasificación de Oteo para un recubrimiento mínimo de 10.5 m y un diámetro equivalente del túnel en mina de 12.7 m, considerando el caso más probable pésimo en el que todo el terreno de recubrimiento se compone de arenas de miga. Los resultados se recogen en la tabla 3.

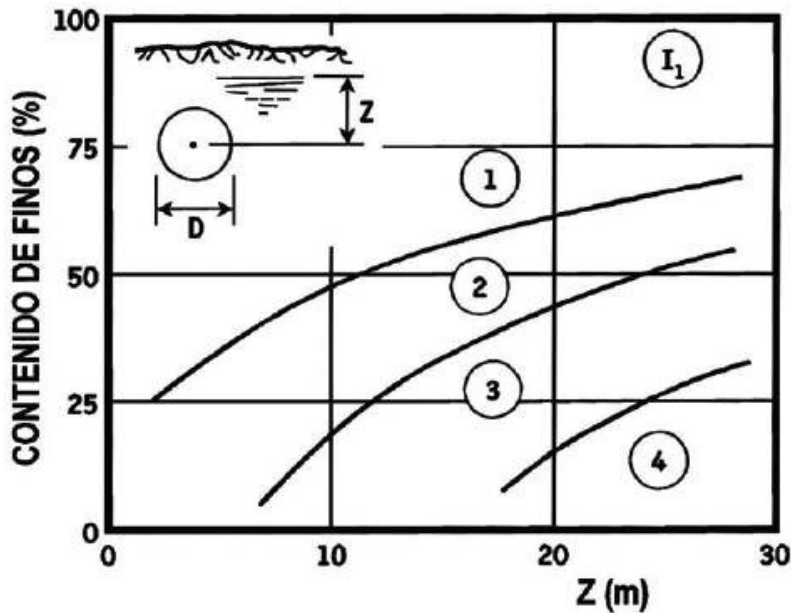


Figura 4 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_1 (adaptado de Oteo, 2015)

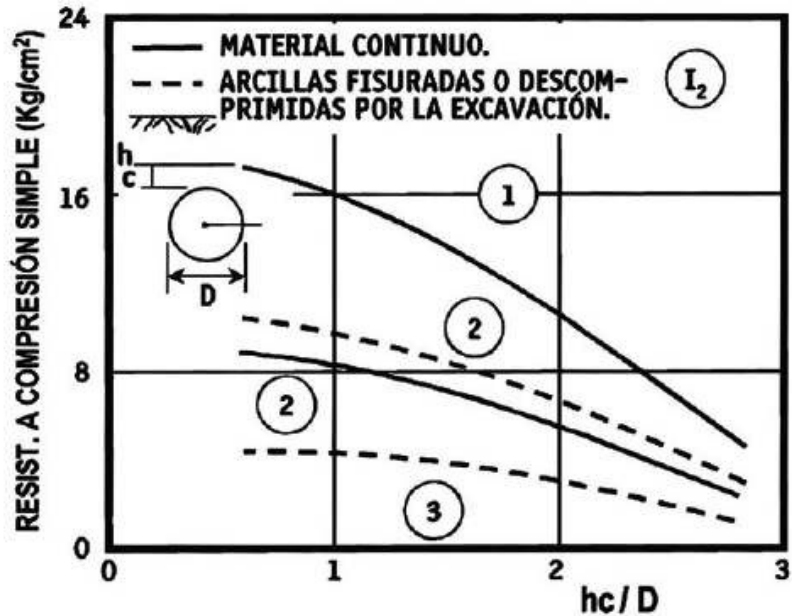


Figura 5 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_2 (adaptado de Oteo, 2015)

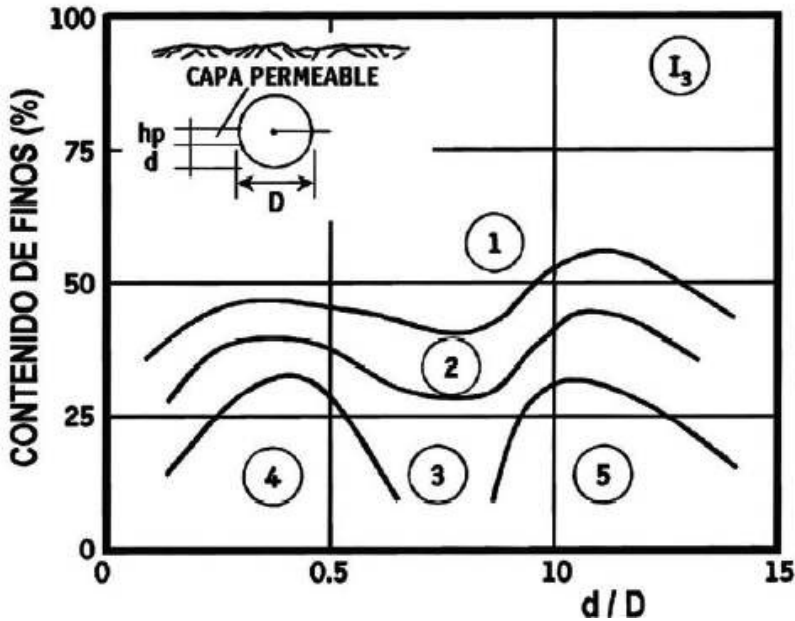


Figura 6 - Gráfico 1: Cálculo del índice I_3 (adaptado de Oteo, 2015)

Unidad geotécnica	I_1	I_2	I_3	Π_T
Arena de Miga	2	3	3	8

Tabla 3 - Cálculo del parámetro Π_T

De este modo, los valores obtenidos para considerando que este recubrimiento estuviese formado íntegramente por arenas de miga serían previsibles problemas de grado medio.

[3.3.2] Estabilidad del frente

Se ha comentado anteriormente que una de las ventajas del Método Alemán es la mínima superficie de frente abierto sin sostenimiento, compuesta exclusivamente por la mina o galería de avance. Al atravesar zonas con escaso recubrimiento de terreno competente, compuesto en el caso de Madrid por los suelos terciarios, la problemática asociada a los métodos de frente abierto se acentúa. En este apartado se emplean métodos analíticos para evaluar la estabilidad del frente en distintas hipótesis de excavación, a saber:

- Excavación en avance frontal en la bóveda, con un diámetro equivalente de 7.1 m.
- Mina o galería de avance, con un diámetro equivalente de 2.5 m.

El siguiente ábaco es un criterio de estabilidad del frente (Oteo, 2015) definido para la excavación con EPB de los suelos de Madrid. No obstante, puede dar una idea de la estabilidad para el caso de la excavación en mina considerando diferentes diámetros y contenidos de finos. En el gráfico se aprecia que reduciendo el diámetro de frente abierto (7.1 m) a un diámetro correspondiente al avance (3.5 m) la estabilidad mejora notablemente para el rango de materiales previsto. Si además se considera la mina de avance (2.5 m) se asegura la estabilidad para materiales con un mínimo de cohesión real o aparente:

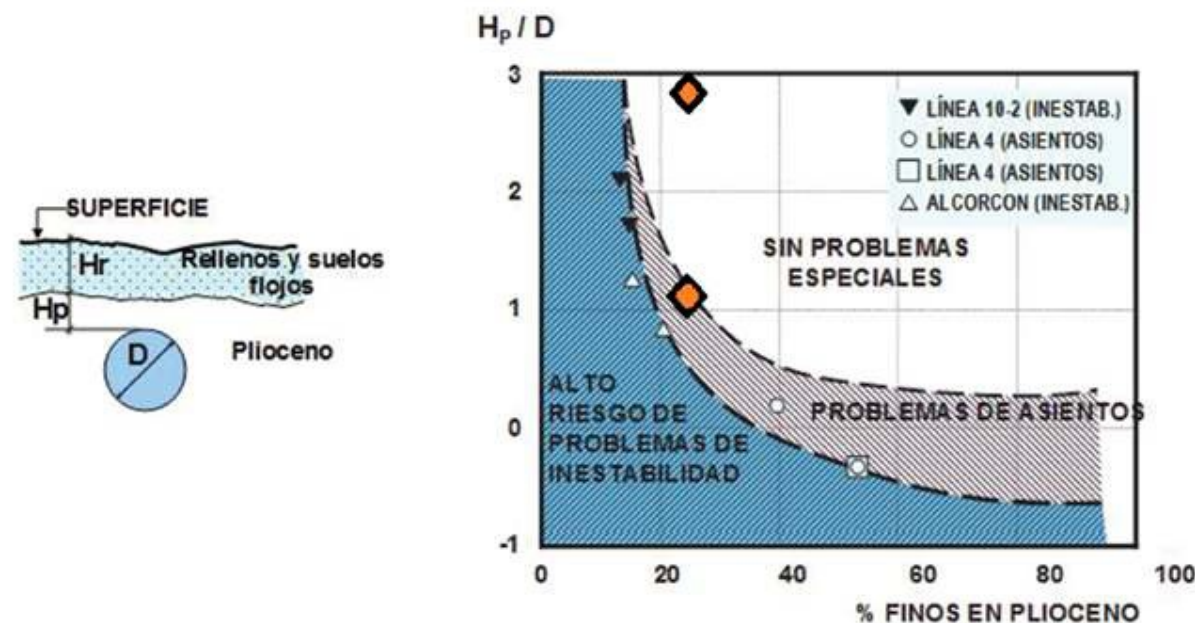


Figura 7 – Criterio de estabilidad del frente de Oteo (2015)

De este modo, se considera que la excavación de los túneles en mina mediante el Método Alemán sin emplear tratamientos del terreno no debería llevar aparejados problemas apreciables con recubrimientos de suelos terciarios iguales o superiores a un diámetro equivalente del área de excavación abierta (para los hastiales el diámetro equivalente varía entre 2.4-3.5m y para un avance de la bóveda parecida al método belga 7.1m).

Hay que destacar que el contenido de finos es un parámetro fundamental, con un límite inferior situado en un 15%, por debajo de ese valor existe un alto riesgo de inestabilidades, independientemente del recubrimiento y del tamaño del frente expuesto. En principio, los valores considerados nos sitúan por encima de ese límite, aunque podría ser posible que se encontraran zonas en el contenido de finos cayera por debajo de ese valor, siendo zonas en las que podrían producirse inestabilidades.

[4] Revestimiento

Con el Método Alemán el espesor del revestimiento se calcula en función de la carga del terreno y de las sobrecargas que tenga que soportar. Se emplea hormigón en masa bombeado in situ. Para el revestimiento se tiene en cuenta el ensayo de agresividad en agua realizado que la clasifica como de agresividad media en sulfatos (1078 mg/l) por lo que el cemento deberá poseer la característica adicional de resistencia a sulfatos. Este nivel indica una clase de exposición XA2 y acorde a la tabla 43.2.1b del Código Estructural la resistencia característica mínima recomendada para el hormigón en masa será de 30N/mm².

Este método conlleva un gran número de juntas, correspondientes a las distintas fases de hormigonado y que son la contraprestación al control de los asentamientos del terreno. El método constructivo, en los que se hormigona directamente contra el terreno, imposibilita la colocación de una lámina de impermeabilización, por lo que se deben adoptar medidas alternativas para evitar filtraciones. Existen varias posibilidades como los perfiles hidrofílicos hinchables, a priori se considera que se utilizarán inyecciones de contacto para rellenar todos los huecos que puedan quedar entre el terreno y el revestimiento. Se dejarán tubos embebidos para evitar tener que realizar taladros. En caso de problemas localizados se deberán realizar inyecciones a posteriori adicionales.

[5] Tratamientos del terreno

Como se ha visto en proyectos similares (que se presentan en la sección [6]) ha sido necesario el uso de tratamientos del terreno para realizar la excavación de forma segura permitiendo una afección limitada de las infraestructuras cercanas.

Para poder definir las características y extensión de los tratamientos es necesario conocer las características de las estructuras, su geometría, el terreno a su alrededor y el nivel de movimientos aceptable. A continuación, se presentan de forma breve las posibles alternativas de protección que se contemplan durante esta fase inicial:

- Mejora con Jet-grouting
- Inyecciones de mejora con tubo manguito
- Inyecciones de compensación
- Paragua de micropilotes

[5.1] Jet-grouting

El jet-grouting es un proceso que consiste en la desagregación del suelo, mezclándolo con cemento (normalmente). La desagregación del suelo se consigue utilizando un fluido con alta energía, formando columnas de suelo-cemento, la geometría y propiedades mecánicas dependen tanto del terreno tratado como de los parámetros del propio tratamiento. Es un método adecuado para tratar terrenos que van desde arcillas a cantos y dependiendo del sistema de inyección se puede clasificar en sistemas de fluido único, de doble fluido con aire, doble fluido con agua o sistema de triple fluido. Tanto los parámetros del tratamiento como los resultados del mismo suelen fijarse por medios experimentales. Las columnas pueden realizarse tanto de manera vertical desde superficie como inclinada y si se realizan de manera correcta permiten una mejora muy significativa de los parámetros del terreno.

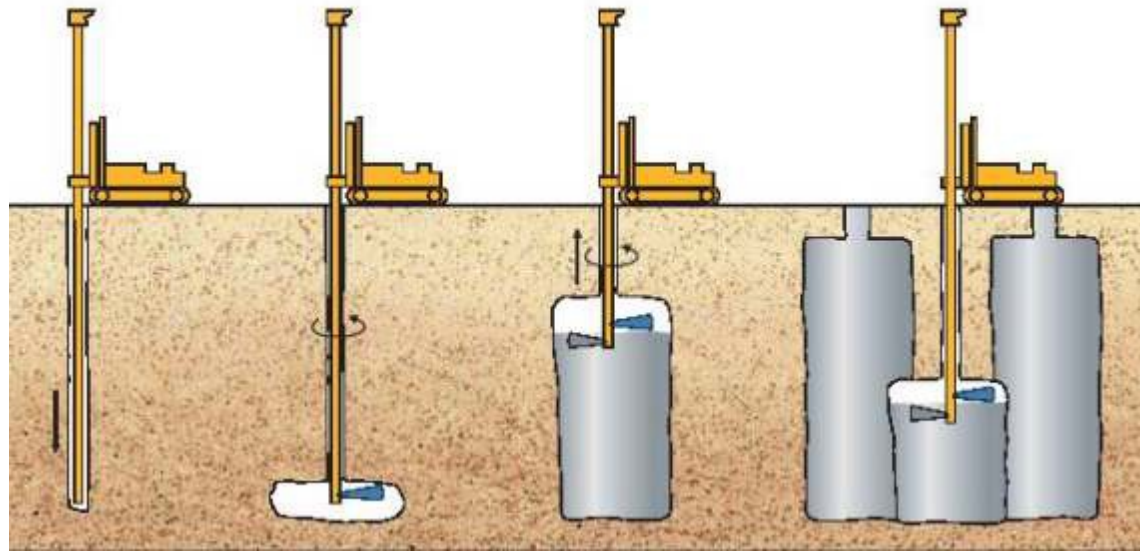


Figura 8 – Esquema de las fases de ejecución de tratamiento de columnas de jet-grouting.

Un riesgo asociado a un posible tratamiento con jet-grouting en este proyecto es la cercanía de las estructuras y servicios existentes. Esta técnica que permite una mejora muy significativa del terreno lleva asociada procesos de alta energía para desagregar el suelo y que pueden llegar a afectar a estructuras cercanas. Será necesario, una vez confirmada la posición y tipo de estructura del túnel existente, adaptar las características del tratamiento a la realidad del proyecto, a fin de no dañar las estructuras cercanas.

[5.2] Inyecciones de mejora con tubo manguito

Esta técnica consiste en inyectar el terreno en múltiples posiciones (espaciadas entre 0.33-0.50m) a través de un tubo de acero o plástico en repetidas ocasiones, hasta conseguir tratar el terreno que se desea. El tratamiento puede realizarse de manera vertical desde superficie, en horizontal o abanico desde pozos de tratamiento o desde la propia excavación. Estos sistemas permiten controlar la presión y volumen de tratamiento en zonas concretas y la reinyección en caso

necesario. El proceso se repite hasta completar el tratamiento de forma satisfactoria, que se deberá evaluar por medio de ensayos in situ.



Figura 9 – Inyecciones con tubos manguitos desde pozo de tratamiento.

[5.3] Inyecciones de compensación

Las inyecciones de compensación sirven para provocar movimientos controlados que compensan los producidos por otras causas (típicamente asientos debidos a la excavación). El proceso consiste en introducir material entre una estructura y el nuevo túnel para lograr la compensación inmediata de los movimientos que provoca el fenómeno de subsidencia. Normalmente se utilizan pozos de inyección próximos al área de tratamiento, instalando un abanico horizontal de taladros y tubos de inyección entre la estructura afectada y la excavación.

Junto con los sistemas de medición y control, permite a través de las inyecciones, compensar los movimientos causados por la excavación, afrontando los efectos de la subsidencia de forma activa, reaccionando a los movimientos observados. En el proceso de ejecución de inyecciones de compensación se distinguen dos etapas consecutivas: acondicionamiento y compensación. En la primera fase se busca preparar el material situado sobre la capa de inyección mediante su puesta en carga. Durante esta etapa se logra conocer en detalle cómo se comporta el terreno y cómo se transmite el desplazamiento impuesto por la inyección. Durante esta etapa se suele limitar el levantamiento alcanzado en las estructuras existentes a 3-5mm, para evitar dañarlas. Durante la segunda fase se producen las inyecciones necesarias para compensar el proceso de descenso que se va sufriendo, se puede distinguir una fase de inyecciones mientras el frente de excavación está cercano y otra en la que éste ya se ha alejado y se producen inyecciones para recuperar un estado de deformaciones admisible.

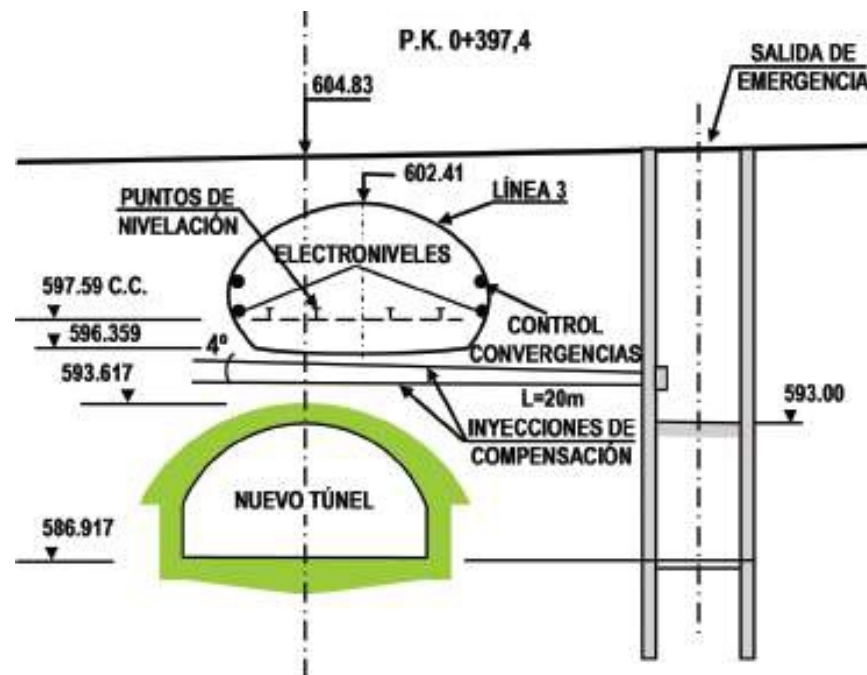


Figura 10 – Compensación bajo la línea 3 del metro en el túnel de Santa María de la Cabeza (Castro y otros, 2003)

En principio, es probable que este método no sea el más adecuado en el caso que nos ocupa en el presente proyecto, dada la poca distancia que se estima entre la estructura ferroviaria existente y el nuevo túnel. Aunque deberá ser evaluado una vez se disponga de la información pertinente.

[5.4] Paraguas de micropilotes

Un paraguas de micropilotes es un conjunto de elemento subhorizontales perforados en el terreno armados e inyectados, de tal forma que se obtiene una prebóveda resistente que envuelve la zona a excavar, de esta forma se consigue sostener el terreno existente por encima y se minimizan las deformaciones para evitar daños en las infraestructuras existentes, se limitan los desplazamientos del terreno situado inmediatamente por encima de la zona excavada, evitando que estos afecten al terreno y las estructuras situadas por encima de la misma.

Existen diferentes tipologías de paraguas, en el presente proyecto al tratarse de un terreno arenoso en los que podrían producirse desprendimientos entre micropilotes adyacentes al excavar el túnel, la armadura deberá estar equipada con válvulas de inyección IRS, a fin de lograr solapar las inyecciones para formar una superficie resistente continua. De manera longitudinal, sucesivos paraguas se pueden ir solapando hasta conseguir cubrir la distancia del trazado necesaria.

La forma de trabajo de estos elementos es principalmente a flexión y cortante, en el caso de un túnel en el que se utilizando cerchas como medio de sostenimiento, el modelo de cálculo es el de una viga continua con múltiples apoyos (cerchas). El proceso de ejecución de un paraguas de micropilotes se divide en las siguientes fases: replanteo, perforación, instalación de la armadura e inyección.

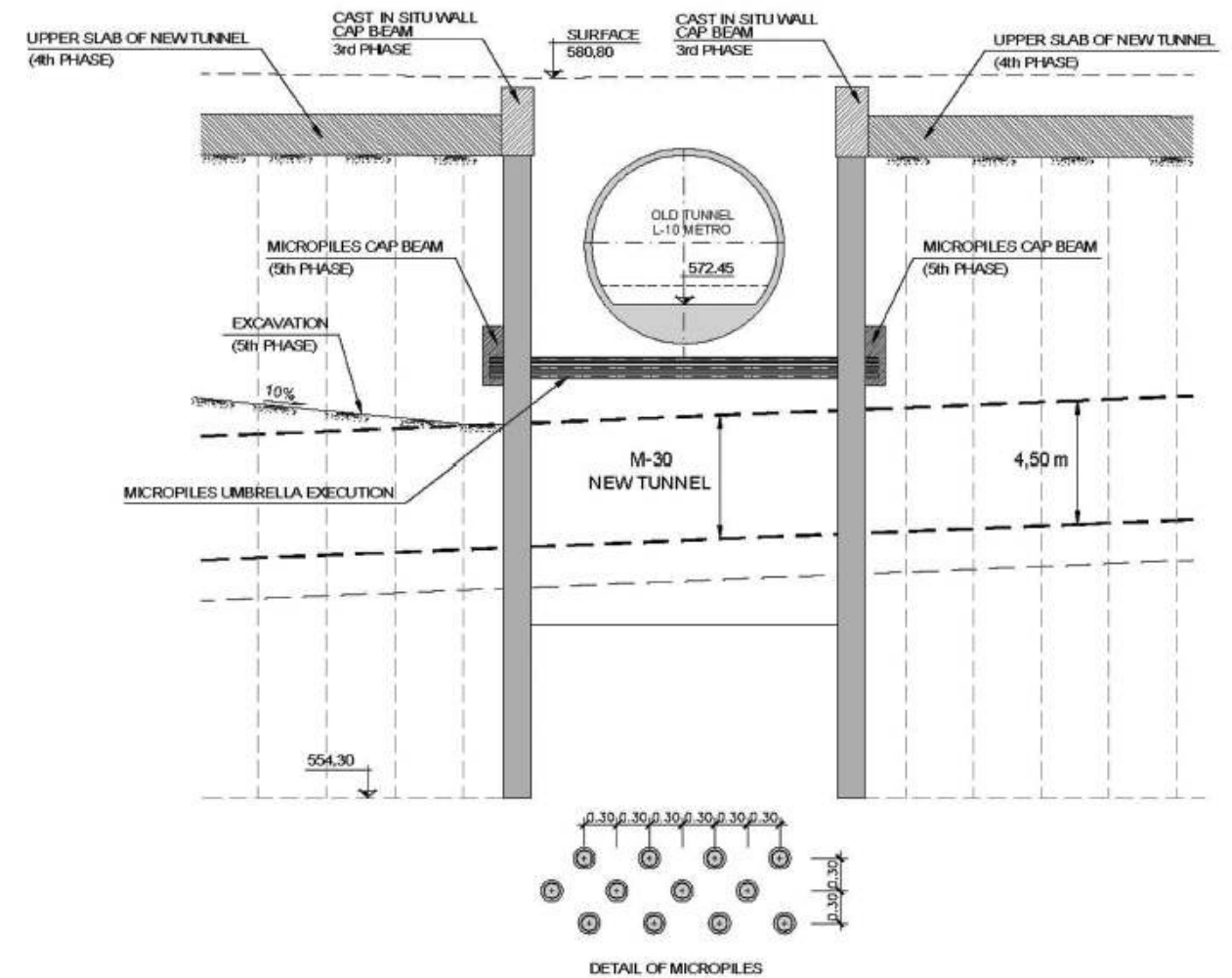


Figura 11 – Paraguas triple de micropilotes bajo la Línea 10 con cruce con Calle 30.

[6] Proyectos similares

En el presente epígrafe se presenta túneles realizados en similares condiciones a las descritas en este proyecto, con lo que se pretende demostrar la viabilidad del mismo en esta fase temprana del proyecto. Se han limitado los ejemplos a nuevos túneles excavados en mina bajo túneles existentes, descartando los que se hayan realizado por medio de tuneladoras ya que el método de excavación y sostenimiento es fundamentalmente diferente.

[6.1] Túneles de Marqués de Viana

Los túneles paralelos de Marqués de Viana comunican el Paseo de la Castellana con la M-30 y M-40 y se realizó utilizando varios métodos constructivos, entre ellos el Método Alemán Modificado para una sección en la zona de la calle Bravo Murillo que contaba con la presencia de la Línea 1 de Metro a 1m sobre la clave del nuevo túnel, en terrenos con arena de miga y arena tosquiza. El cruce con el metro tiene una longitud aproximada de 22m.

Se diseñaron una sección con túneles de techo plano, con paraguas de protección entre solera de la estación y los túneles debido a la falta de espacio. Previo a su excavación se ejecutó un paraguas doble de micropilotes subhorizontales a lo largo de toda la zona del cruce, primeramente, los que se localizan sobre los hastiales y en segundo lugar los que van sobre la bóveda. Posteriormente, se excavaron primero los hastiales, en dos fases (primero la mitad superior y luego la inferior). Una vez terminados, se procedió a la excavación y hormigonado de la bóveda en avances de 1.25m. Finalmente, se completó la excavación de la destroza y la construcción de la solera de los túneles.

La excavación se realizó con cuidado, controlando los movimientos de la vía de la Estación y llegando a cortar el tráfico durante algunas semanas por precaución, con unos asentamientos del orden de 45mm sobre la clave del segundo túnel.

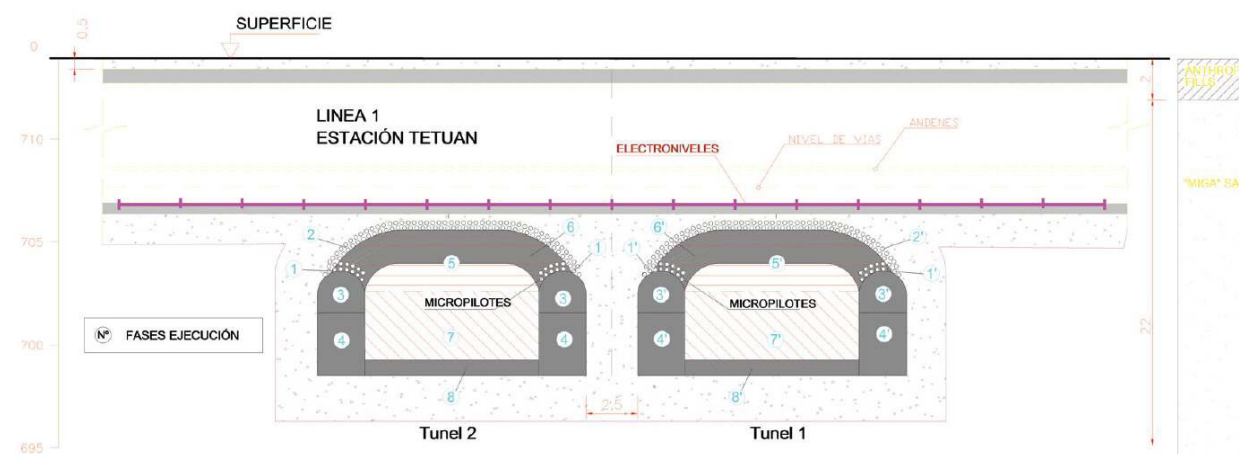


Figura 12 - Sección de túneles bajo Estación Tetuán Línea 1.

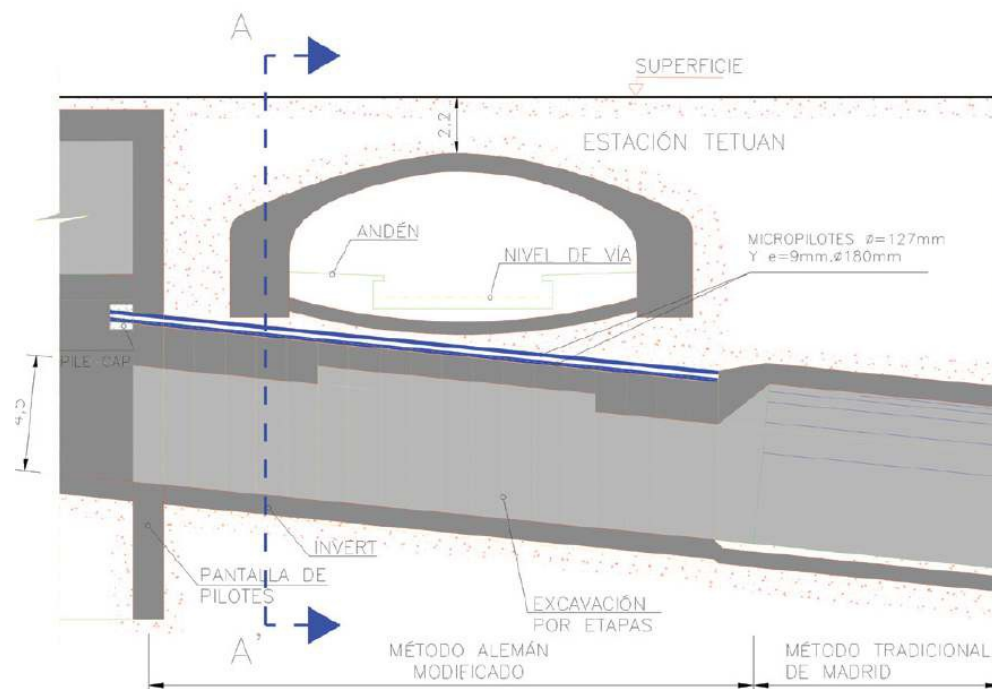


Figura 13 - Longitudinal de túneles bajo Estación Tetuán Línea 1.



Figura 14 - Instalación del paraguas de micropilotes bajo Línea 1.



Figura 15 - Galerías hastiales por Método Alemán.

[6.2] Línea 10 bajo el “Túnel de la risa”

El llamado “Túnel de la risa” de R.E.N.F.E. conecta las estaciones de Chamartín y Atocha siguiendo el Paseo de la Castellana. Se construyó originalmente a cielo abierto y después de varios retrasos, fue finalmente terminado poco después de la Guerra Civil. Más recientemente se construyó un nuevo túnel por el Método Tradicional de Madrid bajo el existente, a fin de unir las Líneas 8 y 10 de Metro.

El nuevo túnel era ligeramente mayor que el anterior y la distancia entre la solera existente y la nueva clave era de unos 2m en la zona más desfavorable. Inspecciones previas de la estructura existente permitieron detectar que tanto la solera del túnel antiguo como el terreno junto a los hastiales del mismo se encontraban en mal estado y con muchos huecos debido al lavado de materiales. Por ello se realizaron dos grandes actuaciones para mejorar la situación:

- Inyección con tubo manguito desde la calle de la zona de los hastiales para consolidar el terreno en la zona.
- Taladros para inyecciones de compensación para el terreno situado entre ambos túneles.

Además de este tratamiento, se controlaron los movimientos de la vía y los hastiales en el túnel existente para comprobar que no se inducían movimientos excesivos para el funcionamiento ferroviario. Los asentamientos controlados al pasar el nuevo túnel fueron de unos 3mm, gracias a la compensación que se iba haciendo progresivamente al paso del nuevo túnel y en función de los movimientos observados.

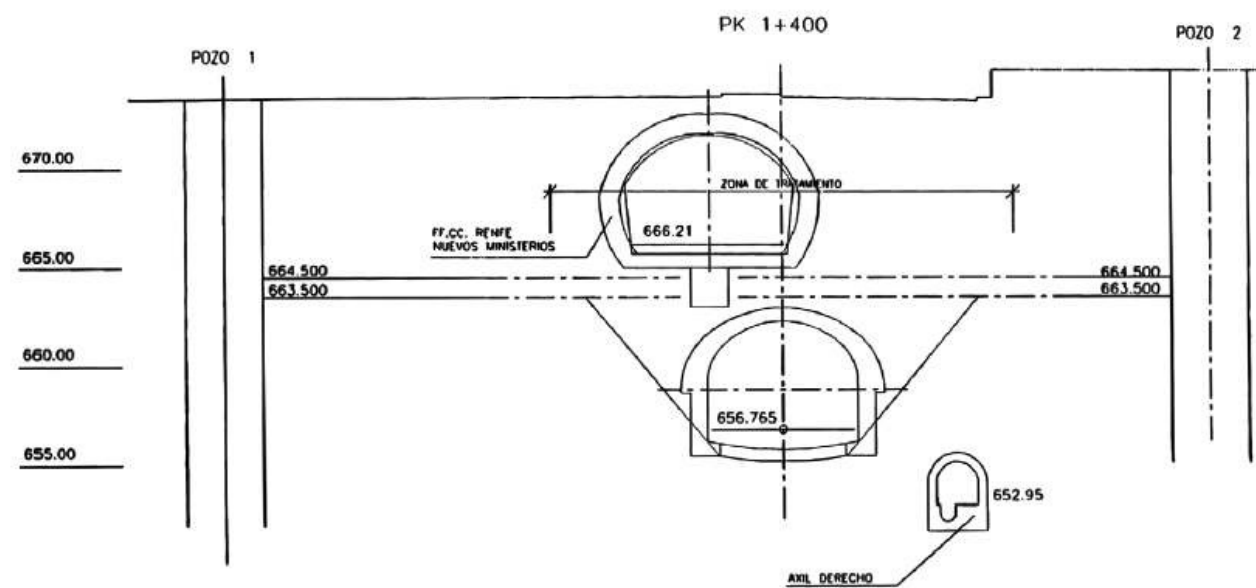


Figura 16 – Inyecciones de compensación desde pozos (2) entre el “Túnel de la risa” y el nuevo túnel (Trabada, 1997)

[6.3] Cruce M-30 bajo Línea 10 de Metro

En el tramo soterrado de la M-30 (Calle 30) junto al río Manzanares llevado a cabo por el Método de Milán (cut and cover) afecta a otras obras subterráneas ya existentes: Líneas 6 y 10 del Metro, colectores, etc. En concreto el nuevo túnel cruza directamente bajo la vía 2 de la Línea 10, túnel que se ejecutó entre 1995-1997 con TBM de frente cerrado. El nuevo túnel tiene una anchura de 20m y un gálibo de 5m y el terreno en el que se encuentra es el típico de la zona sudoeste de Madrid, con relleno antrópico, materiales aluviales, facies Madrid del Plioceno y en la zona más profunda la formación Peñuelas. El espacio entre los dos túneles es de apenas 2m y se realizó manteniendo el servicio en los túneles del Metro.

Para realizar el cruce se empezó avanzando el túnel de la M-30 por ambos lados de L-10 con excavación entre pantallas, construyendo además dos pantallas de cierre paralelas a la línea de

Metro. Posteriormente se realizó la ejecución de un paraguas de micropilotes a modo de prebóveda, conectada a las dos pantallas paralelas a la L-10. Finalmente se completó la instrumentación del túnel existente. Estas medidas fueron realizadas para rigidizar el sistema de manera horizontal y vertical, además de conseguir un control continuo de los movimientos en el túnel de la L-10. Para acabar de cerrar el recinto a excavar (los laterales del futuro túnel) se diseñó un tratamiento a base de columnas de jet-grouting para impedir problemas de desprendimientos del terreno y la entrada de agua que se ejecutaron mediante perforaciones inclinadas a ambos lados del túnel de Metro. Finalmente se realizó la excavación de manera secuencial, primeramente, la mitad superior de la sección, previa demolición parcial de la pantalla frontal, con avances de 1m, instalando perfiles HEM-450 cada metro hasta completar la longitud del cruce. Posteriormente se excavó el zanjón central en toda su longitud y los hastiales por bataches contrapeados, prolongando el pórtico metálico hasta la solera. Finalmente, se hormigonaba la solera del nuevo túnel y gunitado de la zona lateral y superior. Los movimientos registrados en términos de asentamientos fueron de 1-3mm durante la ejecución de los micropilotes (levantamiento) y 7mm (asientos) durante la excavación.

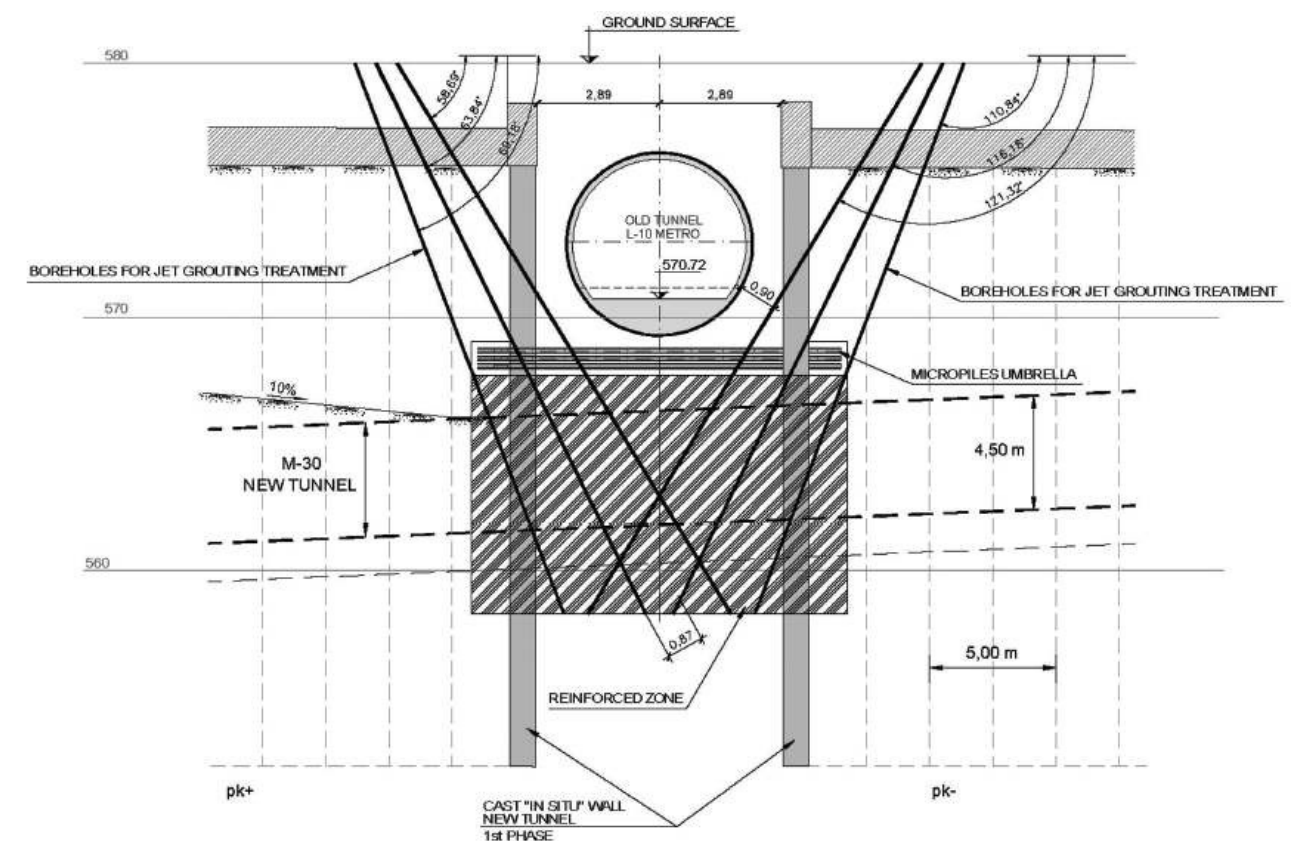


Figura 17 – Zona reforzada con jet-grouting bajo túnel de L-10, paraguas de micropilotes y pantallas frontales (M-30).

[7] Análisis preliminar

Para considerar la viabilidad de construir la sección propuesta para el túnel en mina en la localización propuesta de manera similar a las observadas en casos similares y en base a experiencias previas, se ha realizado un análisis preliminar en Plaxis 2D, considerando primero una solución en la que se proyecta la excavación sin medidas adicionales de tratamiento del terreno y, seguidamente, un segundo modelo en el que se mejora el terreno por medio de jet-grouting y se

considera la instalación de un paraguas de micropilotes previo a la excavación. La geometría, dimensiones y propiedades de estos elementos adicionales son, en esta fase inicial, simplemente estimaciones iniciales que se irán ajustando y detallando en las siguientes fases del proyecto. Se ha considerado la sección bajo el cruce con las vías existentes, ya que se considera el elemento crítico. Aunque en este momento se desconocen la mayoría de los detalles de esta estructura.

Por eso, se ha decidido que no se iba a representar explícitamente en el modelo, por no tener todavía información sobre la propia estructura. Se ha utilizado el perfil del terreno representado en el Anejo de Geología para la zona del cruce. El nivel freático se ha encontrado en el sondeo realizado en la cota de excavación del túnel (aproximadamente en la zona de su eje), por tanto, será necesario su rebaja durante la fase de ejecución. Por el momento se ha considerado que el nivel freático se localizará por debajo de la capa de arena de Miga en la solera del túnel.

Los parámetros utilizados se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para esta fase de viabilidad se han considerado los existentes en la abundante bibliografía sobre los suelos de Madrid. Para el segundo modelo, en el que se han considerados medidas adicionales (paraguas y mejora del terreno), el paraguas se ha representado según el modelo equivalente de Hoek (2001), que aunque no sirve para diseñar el paraguas propiamente dicho, sirve para comprobar la reducción de asientos y convergencia de la excavación, que es lo que se quería comprobar con el modelo en esta fase inicial del proyecto. En este modelo se representa una zona “mejorada” en la zona en la que se propone el tratamiento, que tiene unos parámetros equivalentes, en los que se distribuye de manera proporcional al área que ocupa las propiedades de rigidez y peso específico correspondientes entre suelo, acero y lechada para conseguir unas propiedades equivalentes. Inicialmente, la zona tratada se ha considerado de un espesor de 0.6m.

Para el tratamiento del terreno se ha adoptado de forma conservadora que las inyecciones mejorarán el valor del módulo de deformación y de la cohesión mostradas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 1.5 veces, en base a experiencias previas de la bibliografía (Amagliani y Balossi, 1991).

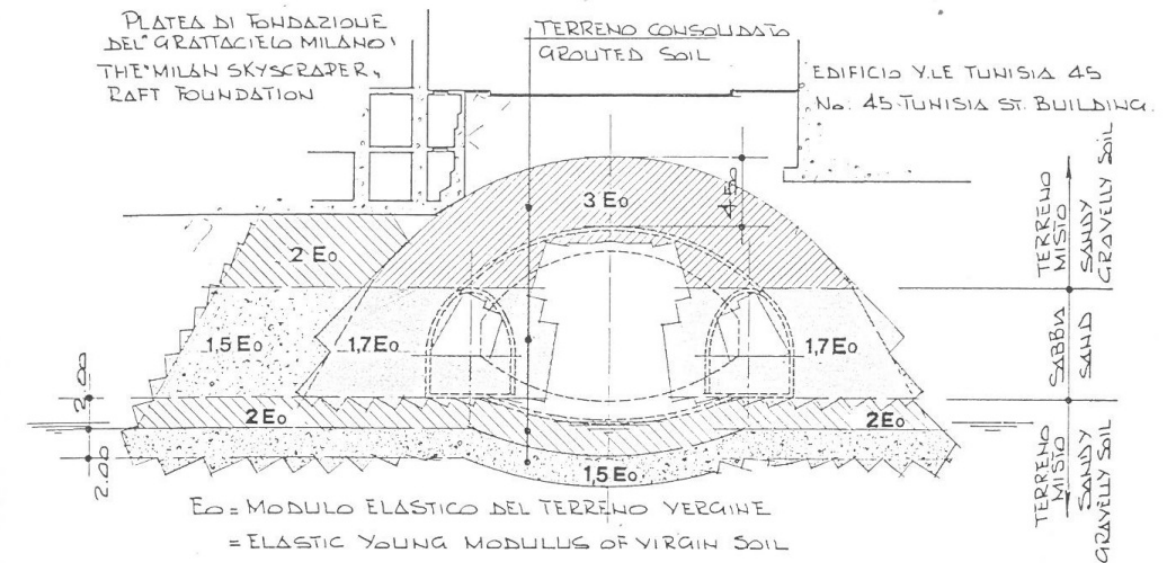


Figura 18 – Módulos de deformación conseguidos en el entorno de un túnel y bajo edificios (Amagliani y Balossi, 1991)

En esta fase del proyecto se ha simplificado el problema para representar la situación en 2D, aunque es posible que el cruce con el ferrocarril deba acabar considerándose en 3D pasar estudiar la interacción entre la excavación y el resto de las estructuras existentes. Al considerar la excavación en un modelo simplificado en dos dimensiones hay que tener en cuenta el efecto frente que ayuda a estabilizar la excavación, para hacerlo hay que estimar esta presión radial ficticia que disminuye a medida que aumenta la distancia entre la sección considerada y el frente, se ha considerado tanto la solución propuesta por Panet (1995) como la excavación de un túnel de sección equivalente en un modelo axisimétrico para poder calibrar el modelo de deformación plana en 2D. Considerando una longitud de excavación de 1.5m se ha estimado el efecto de esta presión ficticia para reflejar un comportamiento realista de la excavación.

Las principales fases consideradas en el modelo son las siguientes:

- Estado inicial
- Tratamientos de mejora del terreno y ejecución del paraguas de micropilotes.
- Excavación superior de los hastiales (con efecto frente) y sin sostenimiento.
- Excavación inferior de los hastiales (con efecto frente) y sin sostenimiento. Sostenimiento en la mitad superior.
- Hormigonado de la mitad inferior del hastial
- Hormigonado de la mitad superior del hastial, excavación de la clave (con efecto frente) y sin sostenimiento.
- Hormigonado de la clave

- Excavación destroza
- Excavación solera
- Hormigonado solera

[7.1] Sin medidas adicionales

Los resultados se muestran en término de movimientos del terreno debido a la excavación del túnel siguiendo la secuencia propuesta en su fase final (Figura 19) y justo después de completar el hormigonado de la bóveda del túnel (Figura 20Figura 20). Como se puede observar los movimientos ya se han producido en esta primera fase, previo a completar la mayoría de la excavación, considerando longitudes de pase reducidas. Por otro lado, también puede verse que con la calidad del terreno considerada y cobertera existente, prácticamente no hay atenuación entre los movimientos calculados en el trasdós del sostenimiento y a la cota de las vías o la superficie del terreno. Es por esta razón y porque los elevados movimientos obtenidos, que es muy probable que éstos sean inaceptables, por ello se va a considerar un segundo caso en el que se realizan las actuaciones antes comentadas de cara a disminuir los movimientos del terreno debidos a la excavación.

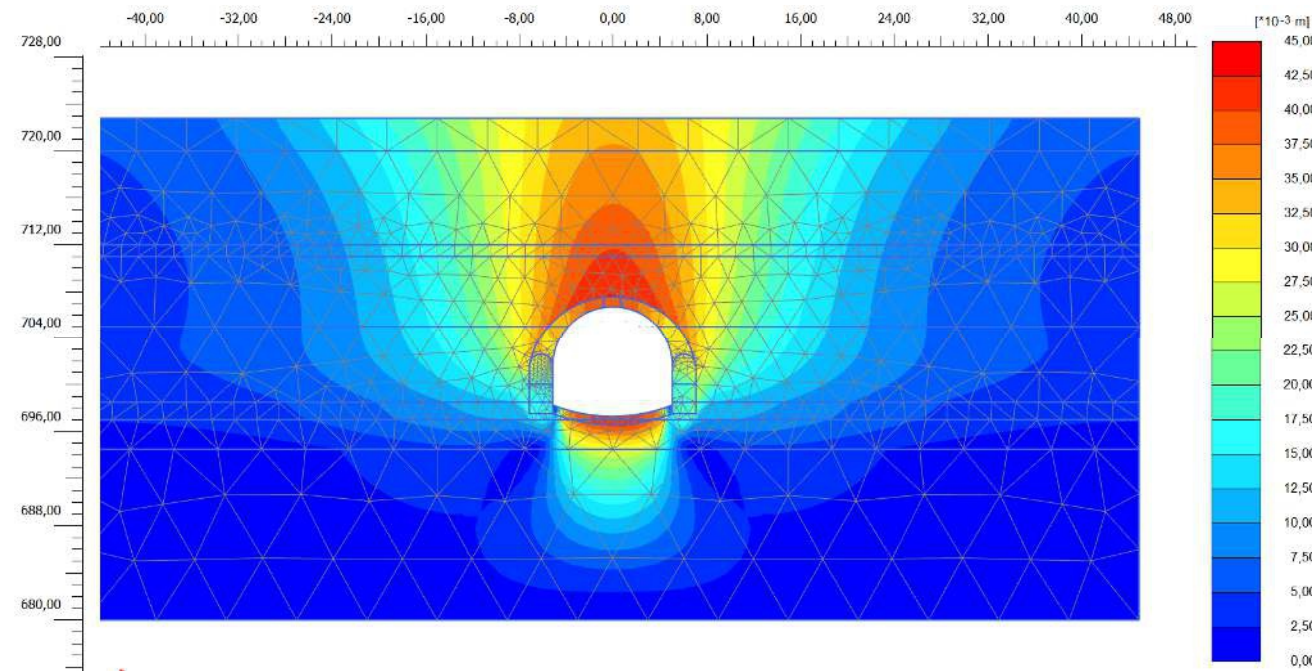


Figura 19 – Movimientos totales en la última fase del modelo, después de construir la contrabóveda.

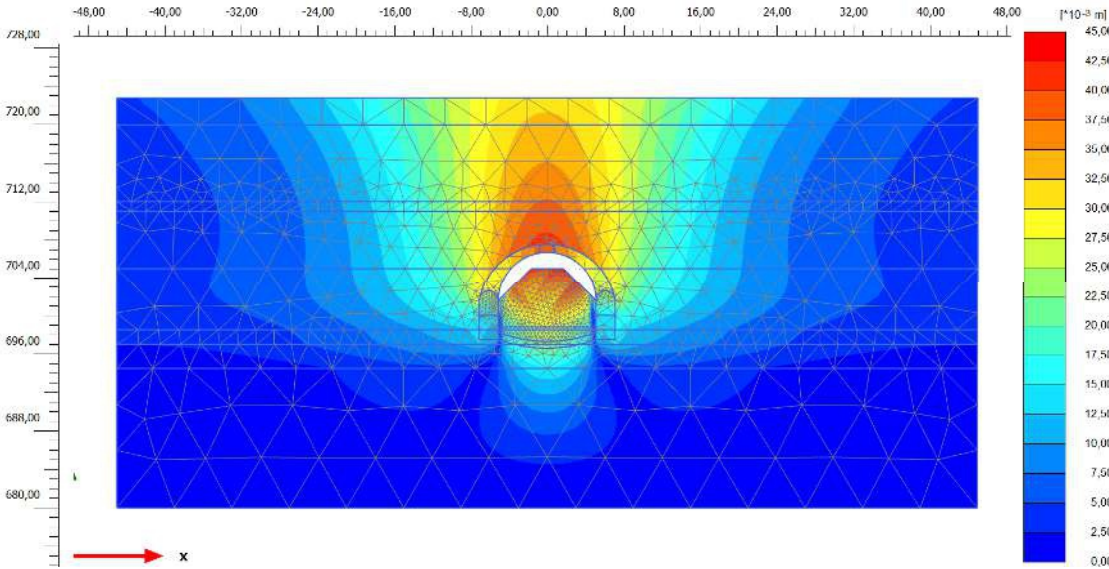


Figura 20 – Movimientos totales después de hormigonar la clave del túnel, con los hastiales también hormigonados.

[7.2] Con medidas adicionales

El terreno mejorado se ha limitado durante esta fase inicial a un radio de distancia lateralmente al extradós de la excavación propuesta, hasta el contacto con Tosco Arenoso por debajo del túnel y todo el terreno entre la futura excavación y la cota de las vías del tren (a falta de información más detallada al respecto). Además, se ha instalado un paraguas de micropilotes por el método de las propiedades equivalentes. Se pretende mostrar la mejora que se produce con estos cambios, notando que se pueden reducir los movimientos esperados de forma significativa, para ello se ha dejado la misma escala de colores en todas las imágenes mostradas en el apartado anterior, para que se aprecie mejor la diferencia entre ellas.

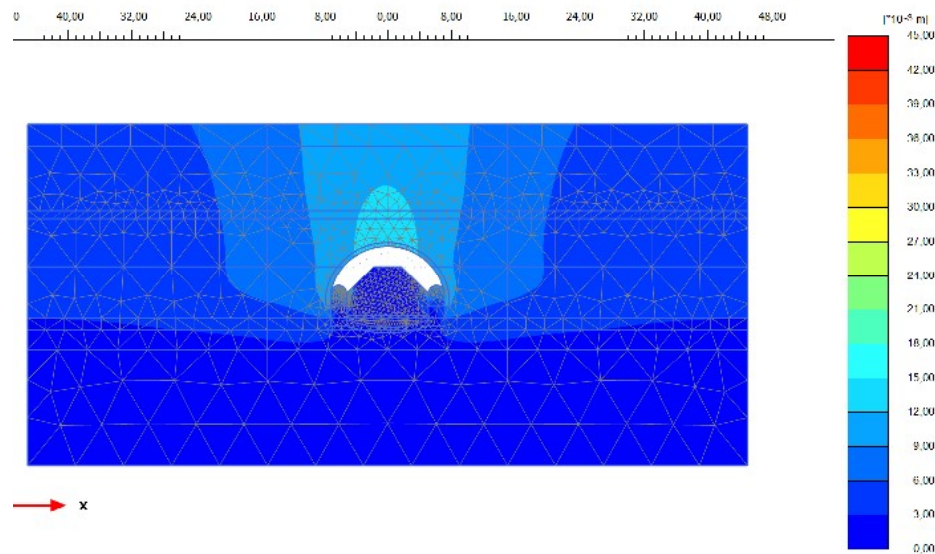


Figura 21 - Movimientos totales después de hormigonar la clave del túnel, con los hastiales también hormigonados.

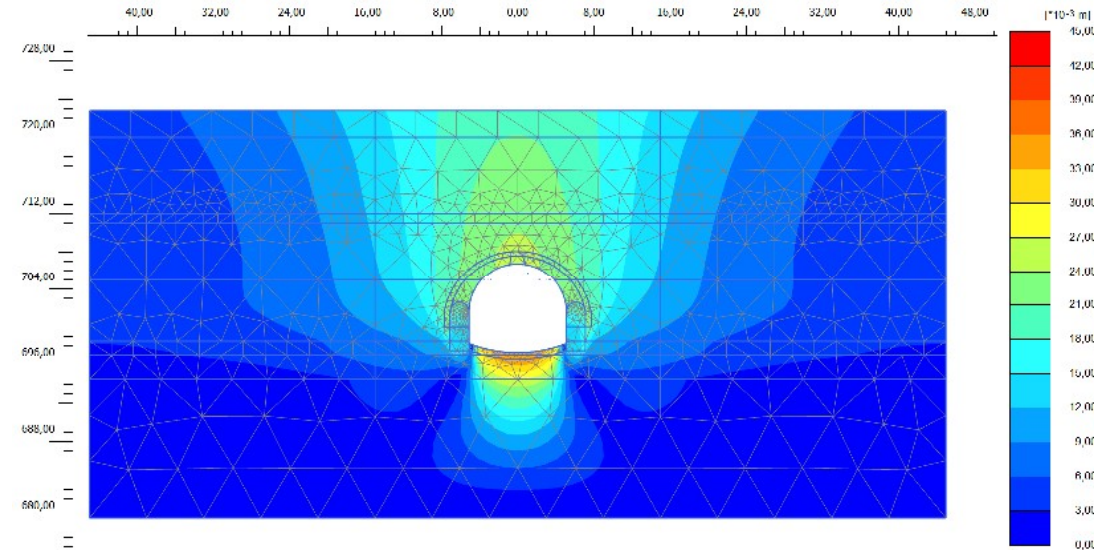


Figura 22 - Movimientos totales en la última fase del modelo, después de construir la contrabóveda.

Dada la falta de información sobre la estructura existente sobre el nuevo túnel, en esta fase inicial no tiene gran importancia intentar llegar a un valor concreto de movimientos en la zona de vías, ya que la estructura y cargas no están modelada explícitamente, se desconoce su cimentación o los valores admisibles. Por otro lado, se han mostrado ejemplos en los que se ha excavado túneles en condiciones similares de forma segura.

[7.3] Conclusiones del análisis

Los análisis han demostrado que se puede disminuir los efectos derivados de la ejecución del nuevo túnel considerando tratamientos adicionales en el terreno, los tratamientos del terreno son similares a los utilizados en otros proyectos cercanos y han logrado reducir los movimientos en el nivel de la estructura existente de 40mm a 24mm. Estos análisis se han realizado sin información fiable sobre la estructura existente y deberían considerarse meramente como comprobación numérica de las observaciones realizadas en proyectos similares y como una primera aproximación.

Los resultados obtenidos concuerdan con los análisis de proyectos similares realizados en Madrid (Figura 23) en los que se aprecia que los tratamientos pueden reducir los movimientos estimados inicialmente (sin tratamiento) a un tercio o incluso un quinto o sexto (en los casos de utilizar inyecciones de compensación). Según este gráfico las mejoras del terreno consideradas en los modelos serían conservadoras, la intención durante esta fase inicial en la que existen todavía demasiadas incertidumbres siempre ha sido la de realizar un primer análisis que permita demostrar que el proyecto es viable con los medios adecuados, pero si profundizar demasiado dada la falta de información en algunos casos.

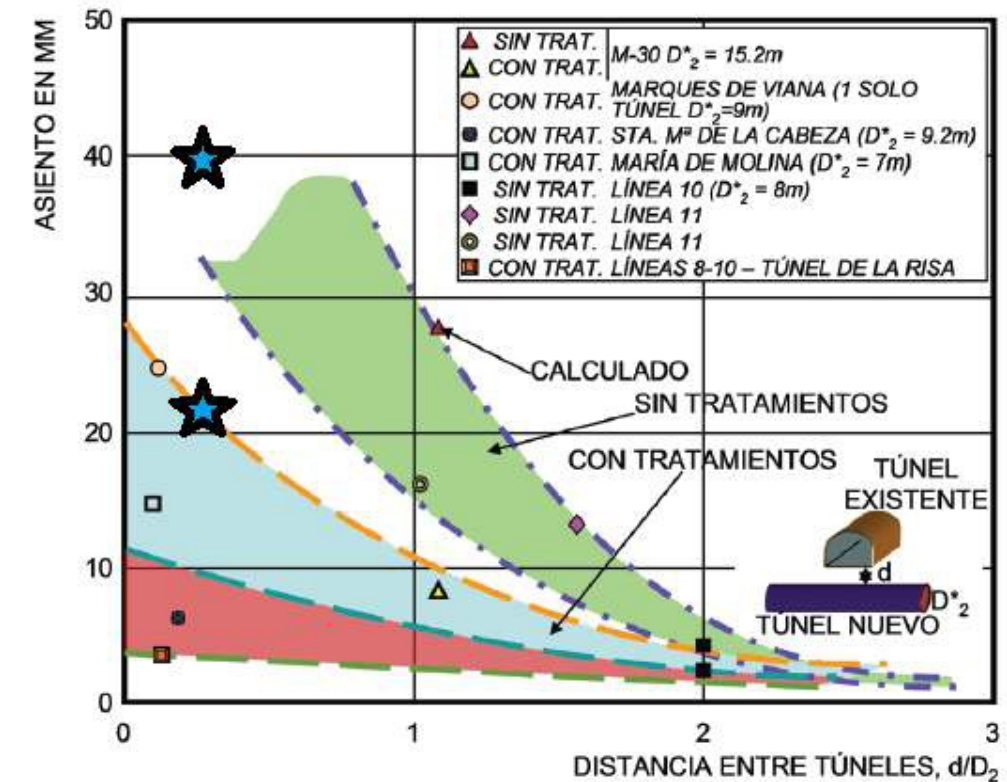


Figura 23 – Posibles asientos inducidos en la solera de un túnel existente al construir por debajo uno nuevo (Oteo, 2015) con la posición de los valores obtenidos en los análisis realizados en Plaxis.

[8] Galerías de emergencia

Siguiendo experiencias previas en Calle-30, las salidas de emergencia del túnel se situarán a una distancia máxima de 200m entre ellas. Hay que recordar que la longitud de túnel viene definida en R.D. 635/2006, la longitud del carril más largo de circulación, medido en la parte totalmente cubierta del túnel, es decir, en este proyecto, hay que tener en cuenta la longitud del túnel en mina y la zona entre pantalla (C&C), que se define en una Anejo diferente.

Para la alternativa con un túnel en mina corto, se necesitará una salida de emergencia y, en la más larga, dos. A diferencia del sector entre pantallas, la salida de emergencia deberá situarse en un pozo a cierta distancia del túnel excavado, por el momento se ha asumido una distancia de 45m para la elaboración del presupuesto. Al tratarse de una sección de excavación menor se ha considerado que podrá ejecutarse por medio del Método Tradicional de Madrid, sin necesidad de recurrir al Método Alemán. Esta galería conectará a su vez con un pozo por el que se podrá alcanzar el exterior.

Una de las salidas de emergencia se situará en el punto bajo del trazado, situado en el cruce con la línea de ferrocarril existente, deberá además incluir una tubería para poder evacuar las aguas recogidas. Ese es el punto que se ha fijado para situar el resto de las salidas de emergencia. Además del criterio de 200m entre salidas, se ha considerado el uso de la superficie, localizándolas en zonas despejadas. La Tabla 4 y la Tabla 5 muestran las posiciones propuestas para las salidas de emergencia para cada propuesta:

Túnel corto	
Túnel entre pantallas	PK.0+473*
Túnel en mina	PK.0+673
Túnel entre pantallas	PK.0+873

Tabla 4 - Localización de las salidas de emergencias propuestas para la alternativa corta.

Túnel largo	
Túnel entre pantallas	PK.0+473*
Túnel en mina	PK.0+673
Túnel en mina	PK.0+850
Túnel entre pantallas	PK.1+050

Tabla 5 - Localización de las salidas de emergencias propuestas para la alternativa más larga

Para la alternativa corta, la distancias entre salidas de emergencia del túnel, considerando las bocas del mismo, serían 210/200/200/200m, con la salida en el p.k.0+473, con lo que se superaría las distancia de 200m. Se ha considerado que 10m adicionales pueden resultar aceptables, debido al espacio disponible en superficie (se encuentra muy congestionado) y el coste de realizar otra salida adicional. También sería posible localizar la salida de emergencia de tal forma que las distancias entre ellas fuera 205/205/200/200m (con la primera salida en el p.k. 0+468), con lo que la distancia máxima entre ellas sería 5m superior a los 200m.

Para la alternativa más larga, la distancia entre salidas de emergencia del túnel mostradas en la tabla, considerando las bocas del mismo, serían 210/200/177/200/35, con la salida en el p.k.0+473, con lo que se superaría las distancia de 200m. Se puede realizar la misma operación comentada para el túnel corto y tener 205m entre salida por el lado norte. En el extremo sur, actualmente existe una salida muy cerca de la salida del túnel, pero es debido a la presencia de estructuras en superficie y al hecho, que en esta fase se han intentado localizar las salidas en zonas que se encuentren actualmente libres. En la siguiente fase del proyecto, podría considerarse la identificación de zonas más adecuadas y ver si se puede localizar esta salida entre los p.k.s 0+900 y 1+000, entre la M-607 y la M-603.

En ambos casos para las salidas en los tramos del túnel en mina, se han considerado una distancia en galería suficiente hasta alcanzar una zona despejada en al que pueda realizarse una excavación entre pantallas para situar el pozo de emergencia. Las posibles posiciones de los pozos de emergencia (Figura 24) se han identificado en base a la cercanía al túnel propuesto y la disponibilidad de espacio en la superficie, durante las siguientes fases del proyecto deberán confirmarse estas localizaciones y ajustándose a las realidades impuestas por otros condicionantes.

El tamaño de los pozos y de las galerías de emergencia se ha dimensionado de forma preliminar y conservadora, en base a los equipos necesarios y proyectos similares. Para el pozo que se va a realizar para solamente salida de emergencia, se ha considerado 9x9m de espacio interno. Para el que debe incluir las instalaciones de bombeo (0+673) de 14x9m, se trata de dimensiones que se consideran conservadoras y que deberán ajustarse durante las siguientes fases del proyecto, pero

en las dos zonas que se han identificado existe espacio suficiente para la localización de las estructuras de almenos ese tamaño.

La galería de conexión entre el sector de túnel en mina carretero y el pozo de emergencia se realizará también con un túnel en mina, que se prevé realizar siguiendo el método de Madrid, debido a su sección más reducida (en comparación con el túnel carretero). En el caso del pozo central que también actuará como pozo de bombeo, la galería deberá contar con un colector que recogerá los dos colectores del túnel, se ha dimensionado con un tamaño 600mm de diámetro. Deberán realizarse tratamientos para la segura ejecución del túnel minero, aunque no se han detallado, en el presupuesto se ha considerado un valor de forma orientativa en base a experiencias similares.



Figura 24 – Posibles zonas identificadas para la localización de los pozos de salida de emergencia en los tramos de túnele en mina, galerías en mina conectarán el túnel con el pozo de salida.

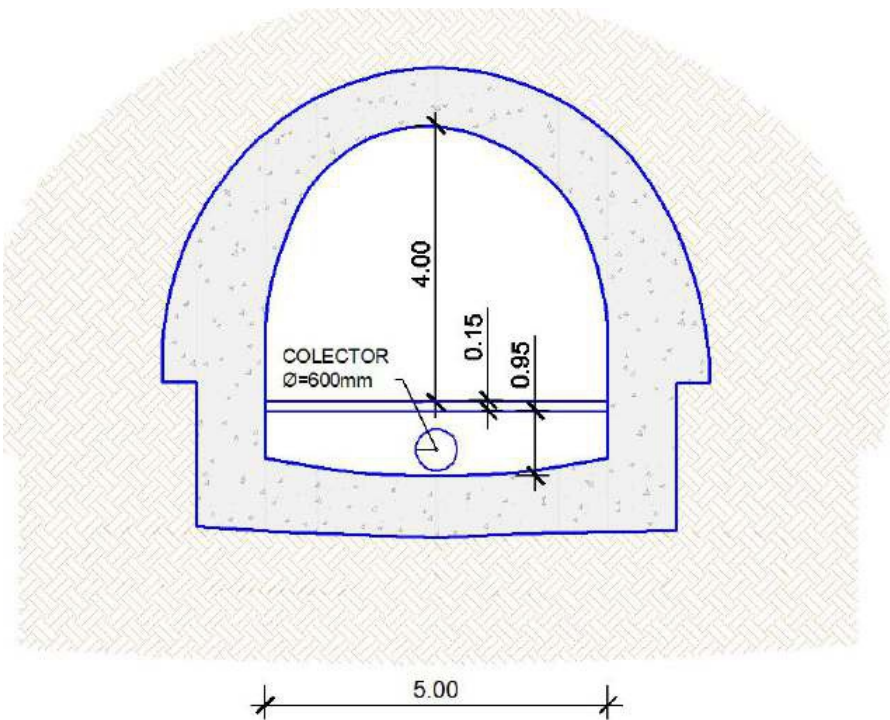


Figura 25 – Sección propuesta para galería de emergencia con colector

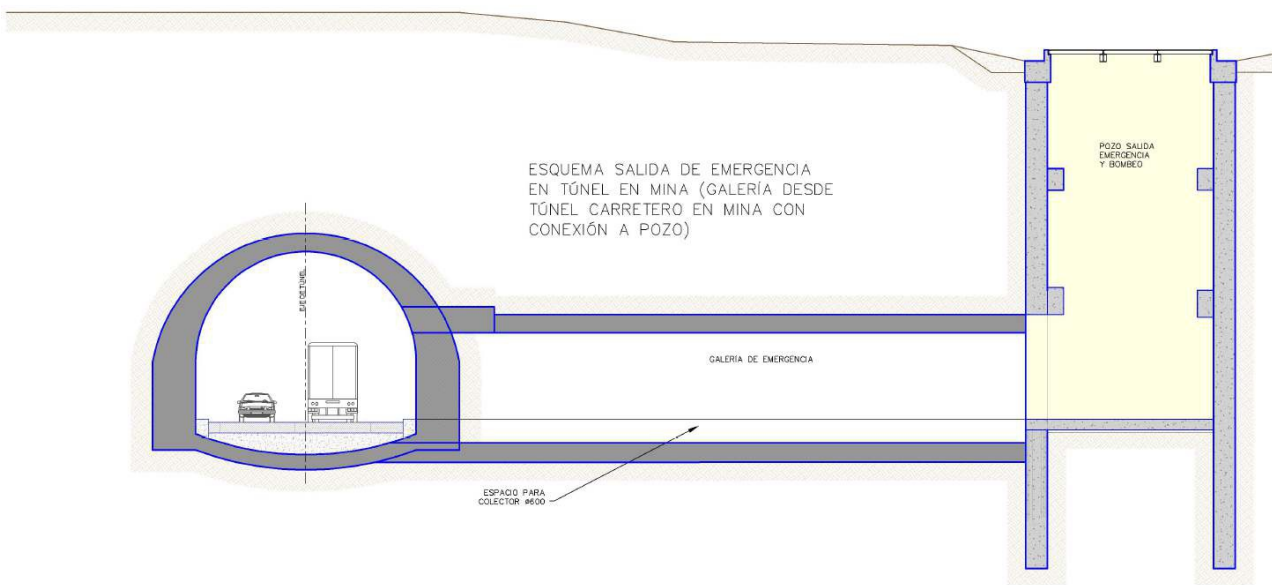


Figura 26 – Esquema de posible conexión entre el túnel en mina carretero y pozo de salida de emergencia, espacio bajo pavimento de la galería disponible para colector (600mm).

[9] Instrumentación y control

Tal y como se ha mostrado en las experiencias de proyectos similares, la instrumentación y monitoreo de las estructuras existentes será fundamental para lograr concluir la excavación del túnel en mina de manera exitosa. Igualmente, será importante controlar los movimientos dentro del

interior del nuevo túnel y en el terreno cercano, a fin de validar las suposiciones y el diseño realizado.

Los principales elementos que se prevén utilizar en la obra de estudio con relación al túnel minero son:

- Hitos de nivelación o dianas, para controlar la subsidencia de los viales en superficie, así como otras estructuras cercanas al túnel.
- Piezómetros para controlar los niveles de agua
- Medidas de convergencia en el túnel existente y en el túnel nuevo.
- Control de los movimientos verticales de la clave del nuevo túnel.
- Electroniveles en los railes del túnel en servicio.
- Inclínómetros y extensómetros en el terreno para controlar los movimientos en profundidad.

De todas maneras, en las siguientes fases de diseño, conforme se conozcan más detalles de la estructura existente y los análisis realizados sean más detallados, se tendrá que determinar el área y nivel de afección, así como los movimientos esperados en superficie, que servirán para determinar las posiciones de los instrumentos.

[10] Presupuesto

Se ha incluido un presupuesto en el apéndice, para poder comparar ambas alternativas, hay que destacar que existen bastantes incertidumbres respecto al cruce con las vías ferroviarias y a las medidas de mitigación que serán necesarias para poder ejecutar la excavación de forma segura, se ha asumido que el volumen tratado con jet-grouting serán 1.5 veces el volumen excavado, pero es una partida muy elevada y cambios en la zona a tratar pueden tener un efecto importante en la valoración. A modo de resumen se muestra el cuadro final a continuación:

VALORACIÓN ALTERNATIVAS				
Alternativa I				21.649.651,59 €
Longitud túnel en mina	240 m			6.256.639,49 €
Tratamientos (1,5 volumen tratado-excavado)				14.816.709,36 €
No de salidas de emergencia en el tramo en mina	1			
Longitud galerías de emergencia en mina	45 m			576.302,75 €
Alternativa II				38.905.935,18 €
Longitud túnel en mina	430 m			11.209.812,41 €
Tratamientos (1,5 volumen tratado-excavado)				26.546.604,27 €
No de salidas de emergencia en el tramo en mina	2			
Longitud galerías de emergencia en mina	45 m			1.149.518,50 €

Tabla 6 – Valoración alternativas para túnel en mina.

[11] Resumen y conclusiones

En el presente anejo se ha llevado a cabo el análisis preliminar del túnel en mina objeto del *Anteproyecto Remodelación del Nudo de Fuencarral* de la Comunidad de Madrid con objeto de valorar las distintas alternativas planteadas y para seleccionar el tipo de construcción más apropiado para el túnel. Además, se han identificado áreas en las que es necesario conocer más detalles para poder progresar con el desarrollo del proyecto, principalmente la información referida a la estructura del túnel ferroviario existente y su proceso constructivo.

Se han recopilado y sintetizado los condicionantes geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos con posible influencia en el diseño del túnel. Se prevé que el túnel afecte a los materiales más arenosos de la facies Madrid.

A continuación, se han discutido los diferentes procedimientos constructivos a considerar para el diseño del túnel en mina. Se ha justificado la propuesta de utilizar el Método Alemán Modificado para la excavación en mina. Se han presentado posibles soluciones en materia de tratamiento del terreno, destacando los que se han considerado más convenientes a nivel de este Anteproyecto, a saber, jet-grouting y paraguas de micropilotes. La información sobre la estructura existente y el proceso constructivo es esencial para determinar los detalles para asegurar una correcta y segura ejecución del futuro túnel. El método constructivo, los materiales y otros detalles de la estructura existente condicionarán la solución final a diseñar, la distancia entre túneles condicionará el tipo de refuerzo posible (Figura 27). Se prevé realizar salidas de emergencia cada 200m de túnel, dependiendo de la alternativa seleccionada, el número de salidas en el tramo de túnel en mina variará. En cualquier caso, se ejecutarán siguiendo el Método Tradicional de Madrid, que se considera adecuado para la sección necesaria. La salida localizada bajo el punto bajo las líneas ferroviarias tendrá que albergar también una tubería adecuada que permita evacuar las aguas recogidas en este punto.

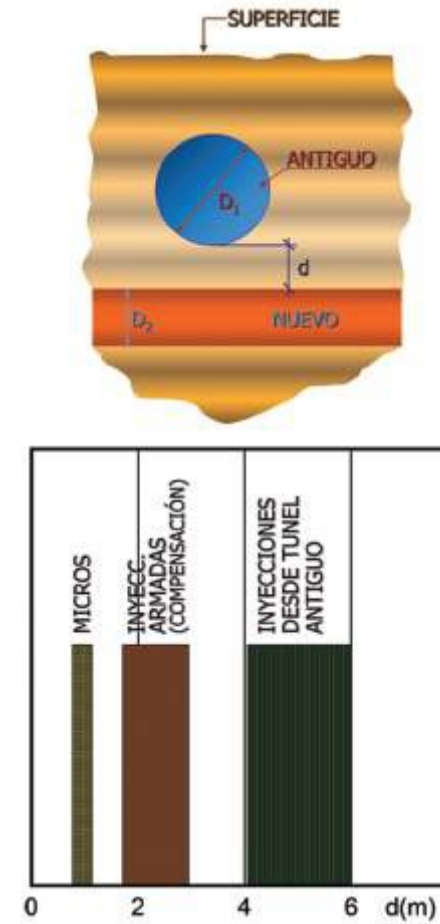
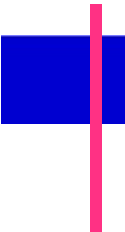


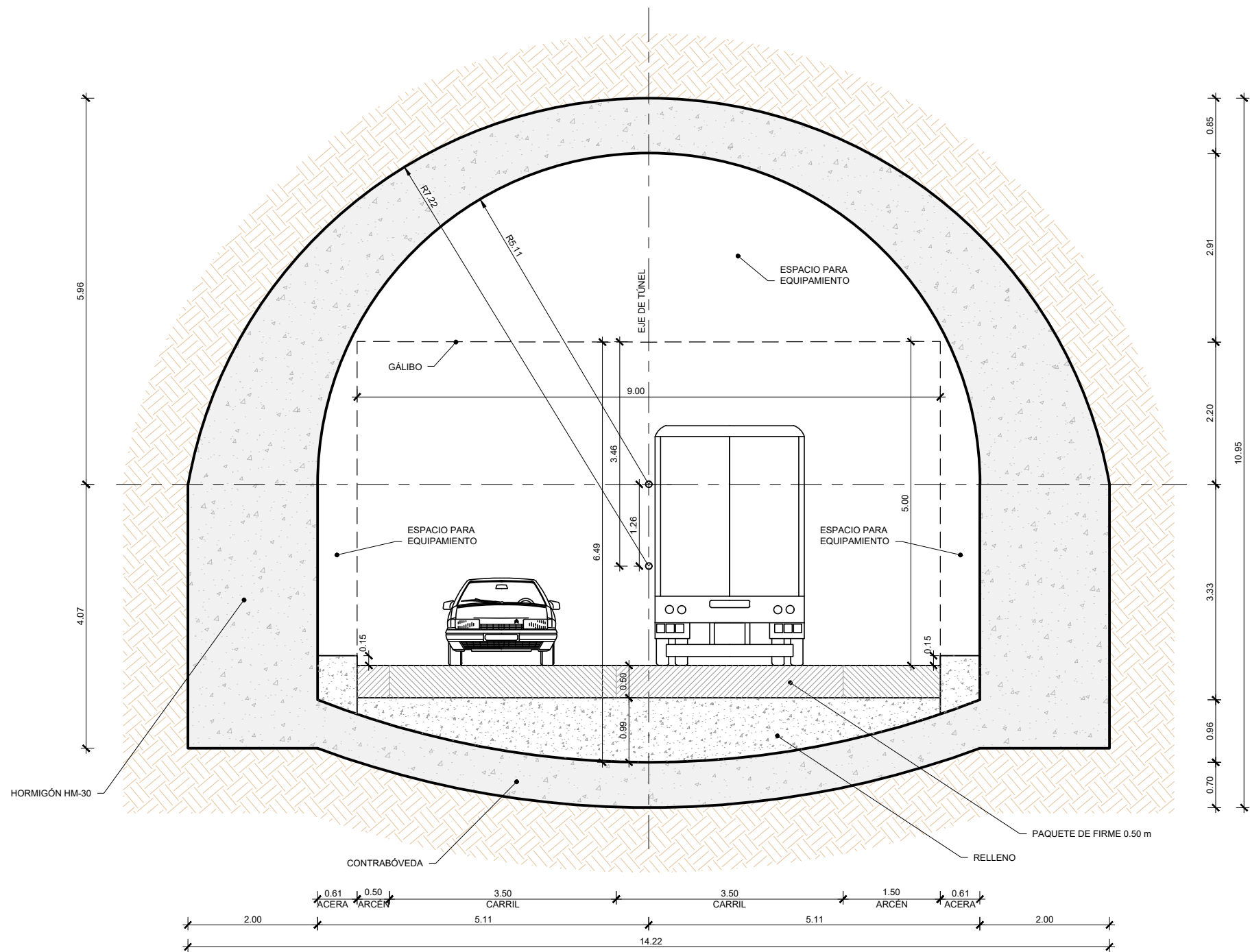
Figura 27 – Tipos de tratamientos del terreno para el cruce de un túnel bajo otro existente en función de la distancia entre ellos (Oteo, 2015)

Igualmente, se han presentado tres casos de túneles realizados en condiciones similares, es decir, nuevos túneles en mina realizados bajo túneles existentes con poca distancia entre ellos en Madrid. La solución adoptada en esta fase es similar a la adoptada en esos casos, que se ha utilizado para demostrar la viabilidad de la propuesta. En base a ésta se ha realizado un análisis preliminar simplificado por métodos numéricos para tener una idea de la viabilidad del proceso constructivo y la posible afección a la línea del ferrocarril, de la misma manera se ha considerado una primera aproximación a la mejora del terreno necesaria para valorar su efecto. Los resultados mostrados son coherentes en base a experiencias similares.

Finalmente, se ha descrito de manera general y preliminar el tipo de instrumentación que se prevé que pueda ser necesario para asegurar la seguridad de la ejecución y para validar el diseño que se haya realizado. De la misma manera y de forma preliminar se ha presentado un presupuesto que permita evaluar desde un punto de vista económico las diferentes alternativas consideradas durante esta fase de anteproyecto.



PLANOS

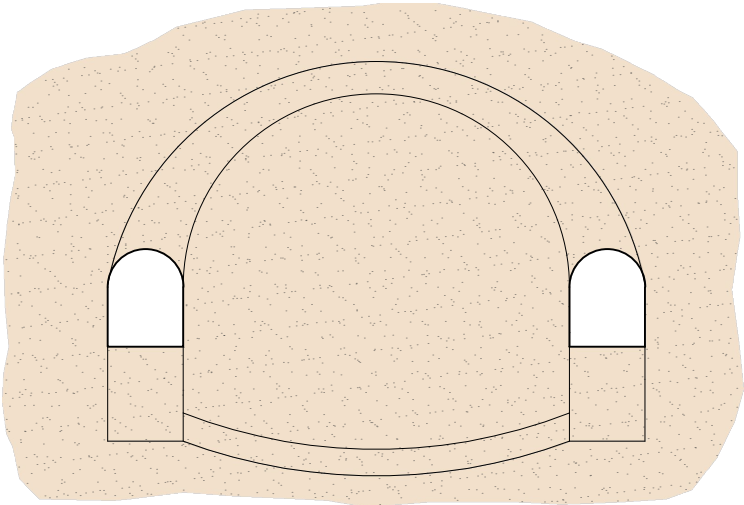


SECCIÓN TIPO TÚNEL MINERO
ESCALA 1:40

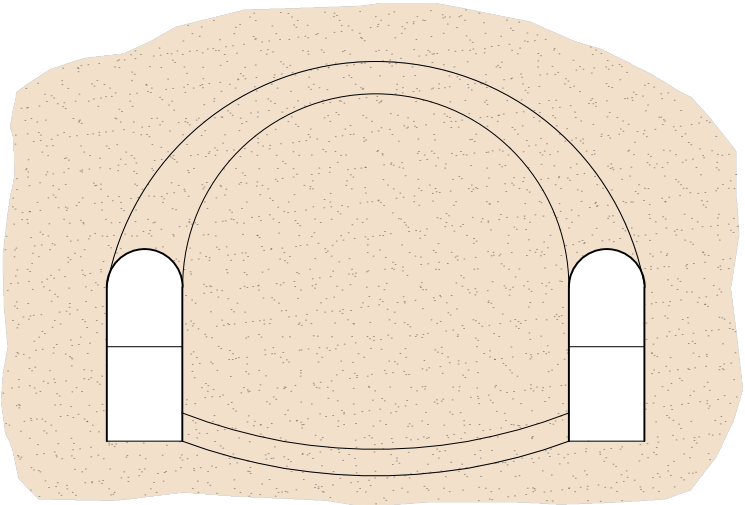
PROCESO CONSTRUCTIVO PROPUESTO
PARA EL TRAMO DEL TÚNEL MINERO POR
EL MÉTODO ALEMÁN MODIFICADO.

FASE 00 PREVIO AL COMIENZO DE LA EXCAVACIÓN, SE
COMPLETARÁN LOS TRATAMIENTOS DEL TERRENO Y LA
INSTALACIÓN DEL PARAGUAS DE MICROPILOTES.

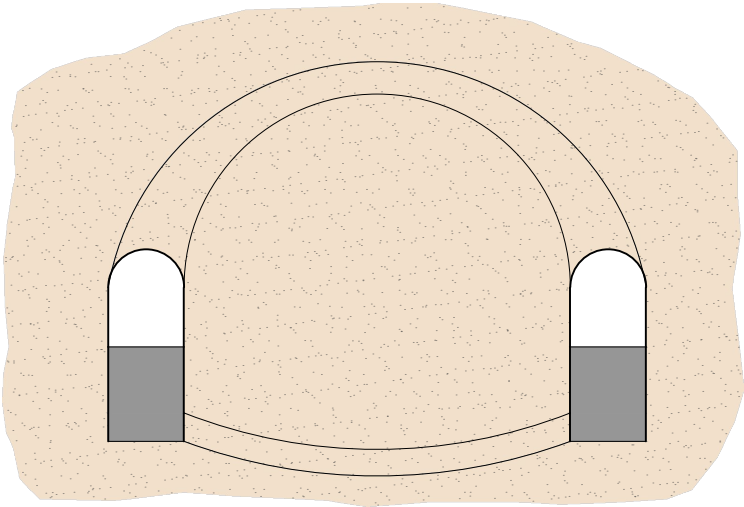
LAS FASES MOSTRADAS SON INDICATIVAS. NO SE MUESTRAN
LOS TRATAMIENTOS DE MEJORA DEL TERRENO NI
INFRAESTRUCTURAS CERCANAS.



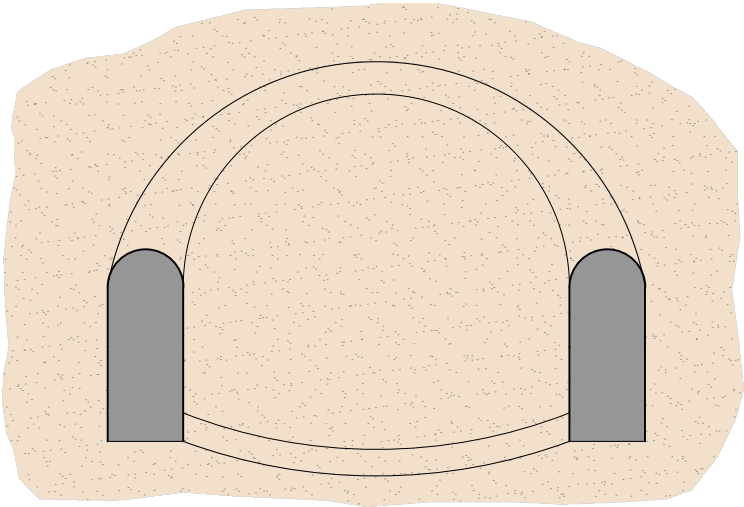
FASE 01 EXCAVACIÓN MITAD SUPERIOR DEL HASTIAL, INSTALANDO
EL SOSTENIMIENTO CORRESPONDIENTE (CERCHAS).



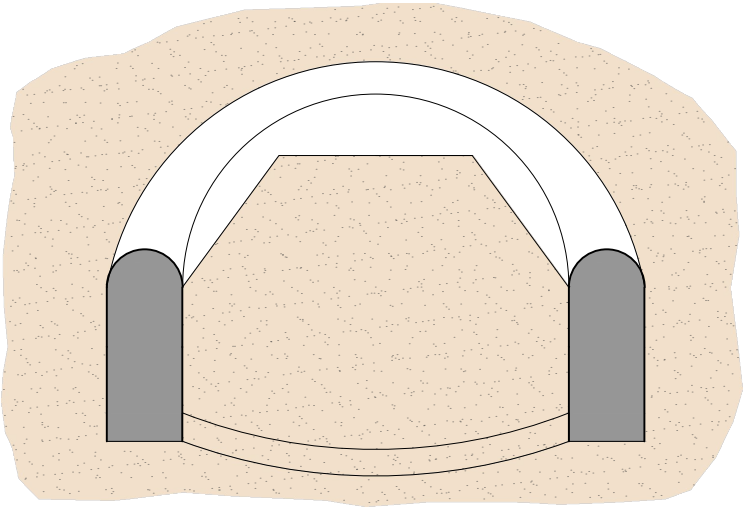
FASE 02 EXCAVACIÓN MITAD INFERIOR DEL HASTIAL.



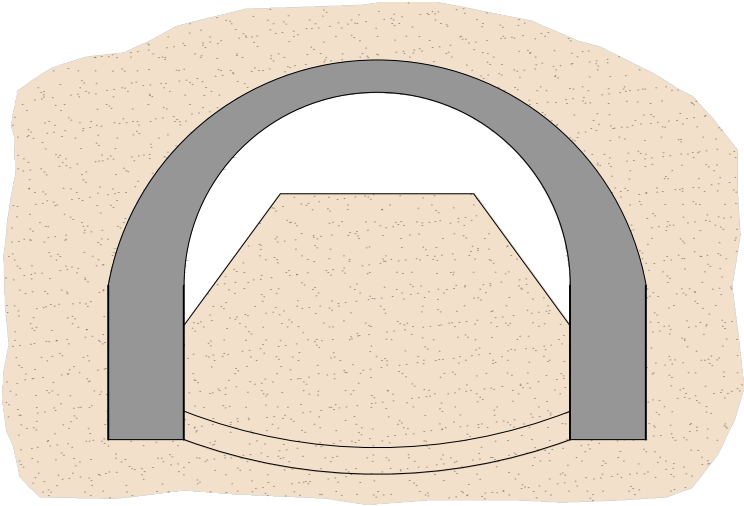
FASE 03 HORMIGONADO MITAD INFERIOR DEL HASTIAL.



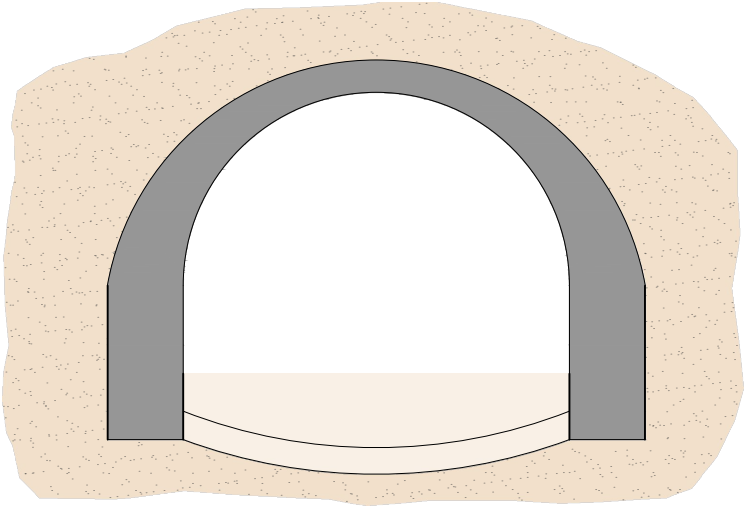
FASE 04 HORMIGONADO MITAD SUPERIOR DEL HASTIAL.



FASE 05 EXCAVACIÓN CLAVE CON INSTALACIÓN DE SOSTENIMIENTO.

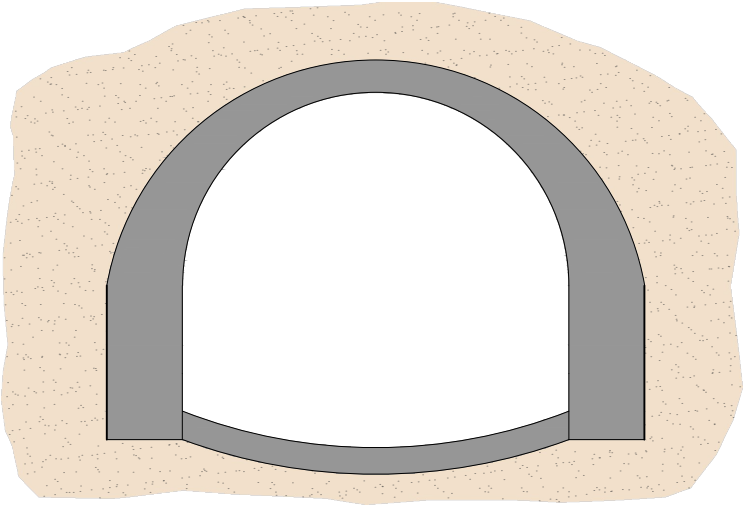


FASE 06 HORMIGONADO DE LA BÓVEDA.

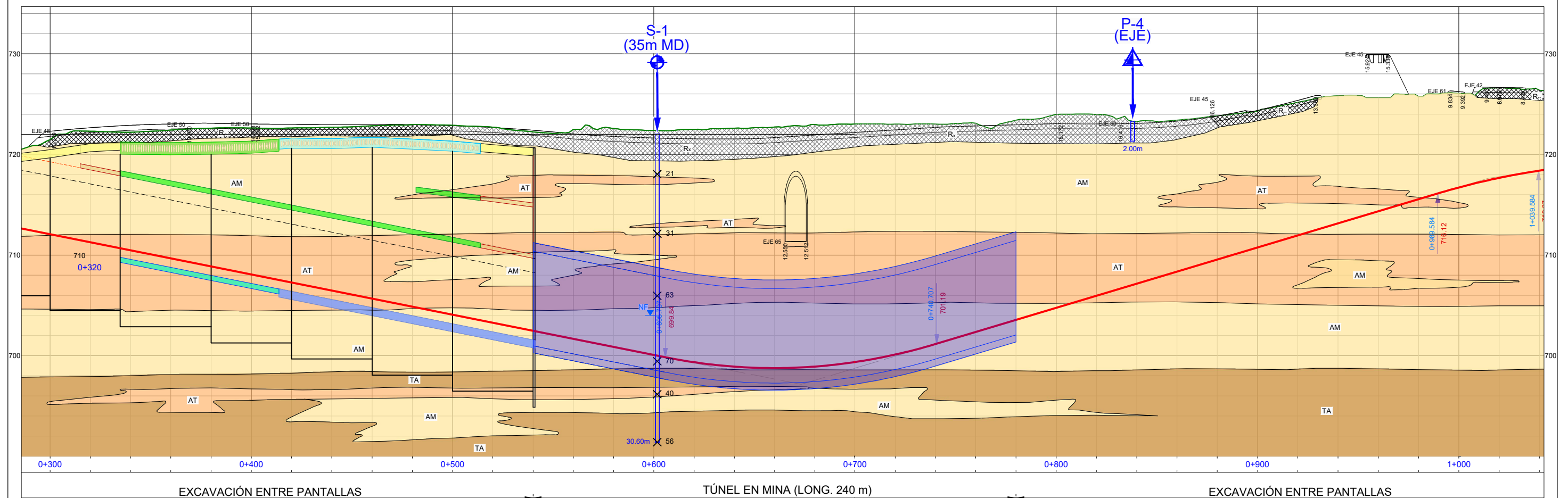
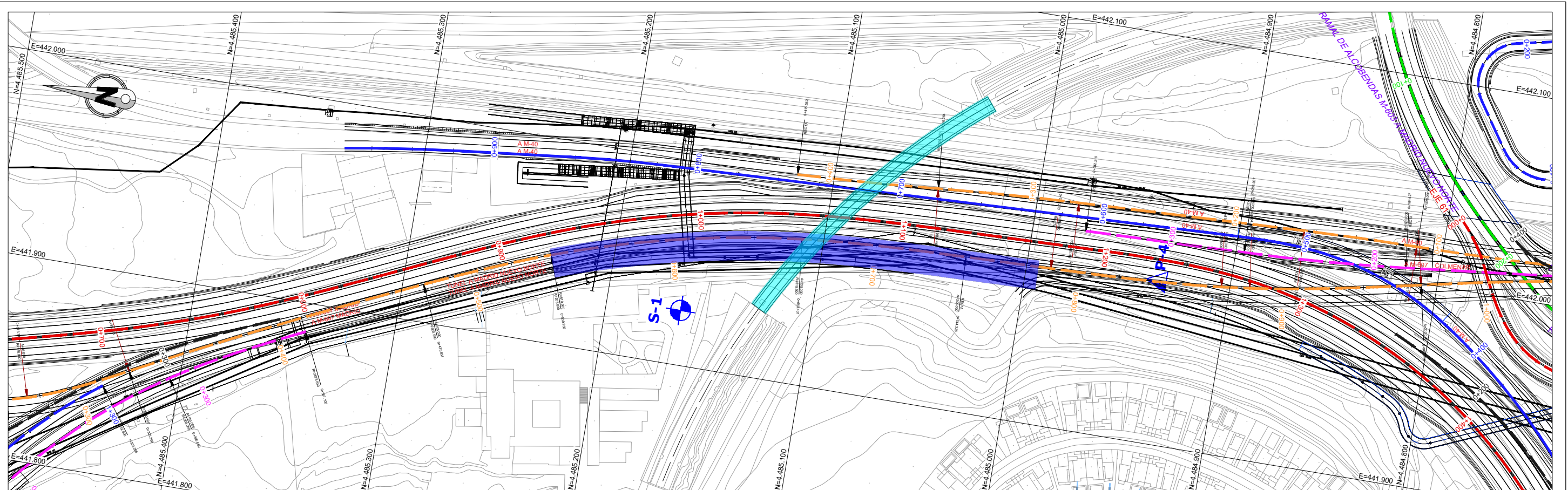


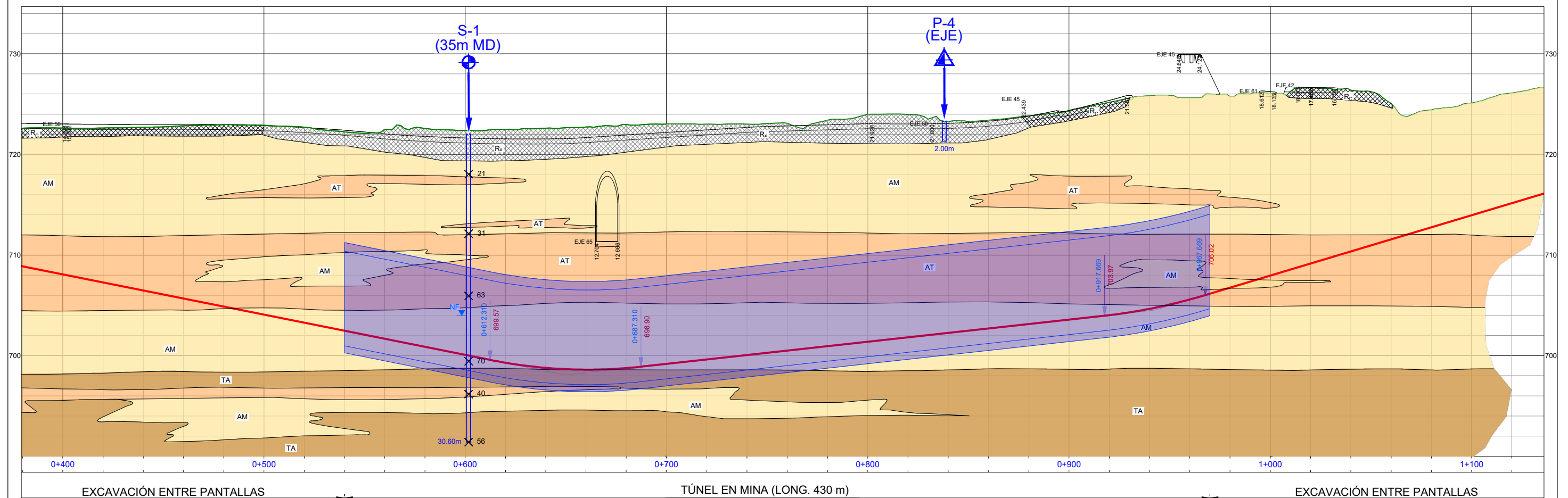
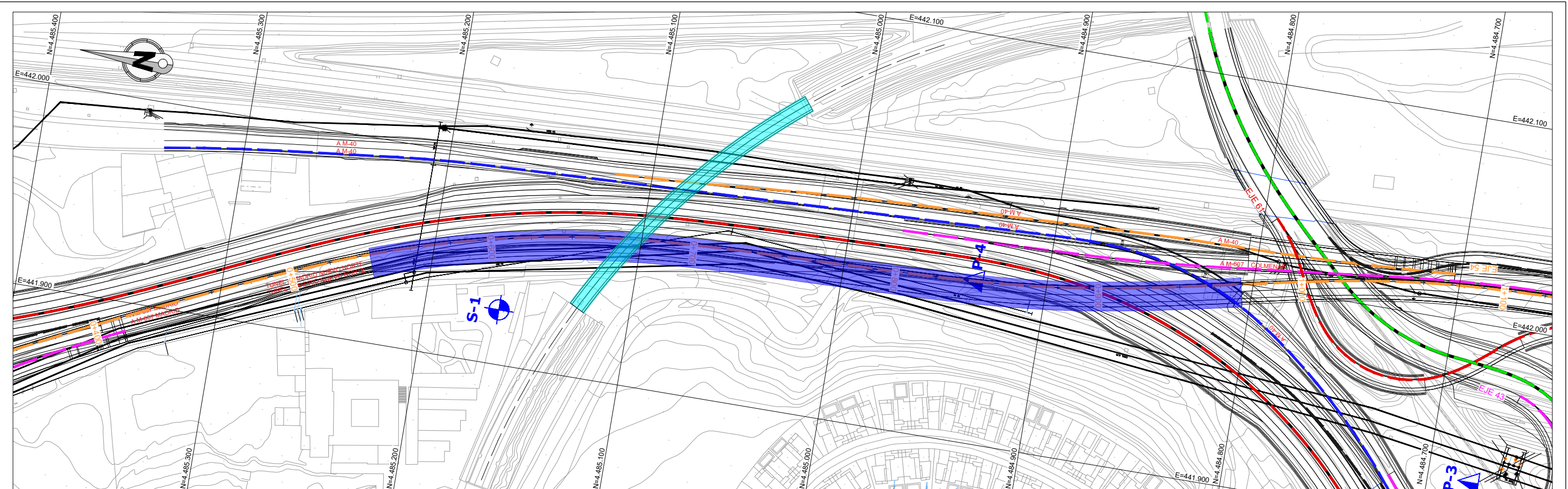
FASE 07 EXCAVACIÓN DESTROZA.

FASE 08 EXCAVACIÓN CONTRABÓVEDA.



FASE 09 HORMIGONADO CONTRABÓVEDA.







LEYENDA

SECCIONES DE CONTROL EN SUPERFICIE
CADA 50 m.

SECCIONES DE CONTROL DEL NUEVO
TÚNEL CADA 20 m.

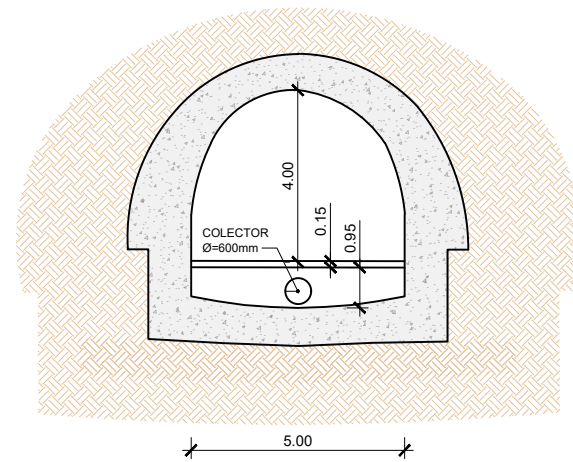
SECCIONES DE CONTROL CONVERGENCIA
EN TÚNEL EXISTENTE, DESDE PORTAL
CADA 20 m.

ELECTRONIVELES SOBRE RAILES
EXISTENTES

NOTA:

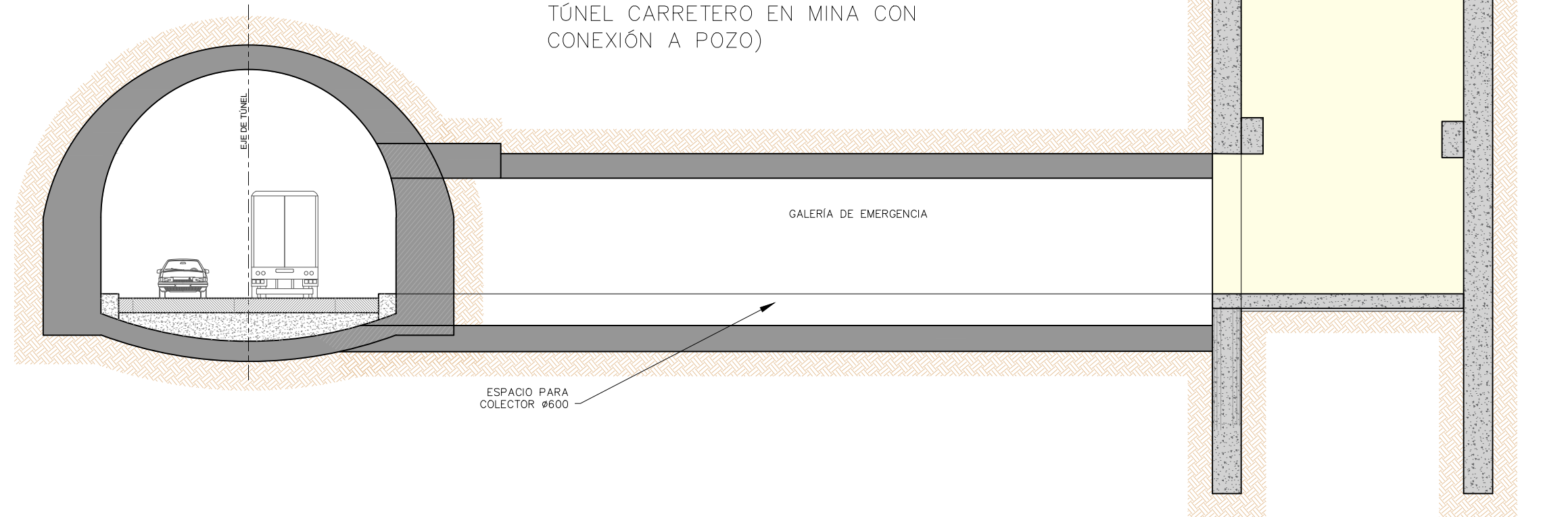
PROPUESTA INICIAL AUSCULTACIÓN ZONA DEL TÚNEL EN MINA
EN EL CRUCE CON ESTRUCTURA FERROVIARIA EXISTENTE. LOS
DETALLES DEBERÁN DESARROLLARSE EN LAS SIGUIENTES
FASES EN BASE A LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO
ESPERADOS Y LA AFECTACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS.

	Dirección General de Planificación e Infraestructuras de Movilidad	EMPRESA CONSULTORA: 	DIRECTORA DEL PROYECTO:	AUTOR DEL PROYECTO:	TÍTULO: ANTEPROYECTO DE REMODELACIÓN DEL NUDO DE FUENCARRAL (MADRID)	ESCALA: 1:1000	PLANO: 5	DESIGNACIÓN: PROPUESTA INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN TÚNEL MINERO	FECHA: JUNIO 2023
FORMATO ORIGINAL UNE A-1						HOJA: 1 DE: 1	NOMBRE DEL FICHERO DIGITAL: P5-PROPUESTA INSTRUMENTACIÓN AUSCULTACIÓN.dwg		

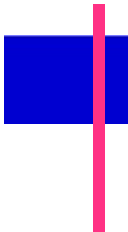


ESQUEMA GALERÍA DE EMERGENCIA
CON ESPACIO PARA COLECTOR BAJO
LA CALZADA

NOTAS:
ESQUEMA PARA REPRESENTAR PROPUESTA EN FASE DE ANTEPROYECTO
DIMENSIONAMIENTO DEFINITIVO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES A REALIZAR EN FASES MÁS AVANZADAS
DIMENSIONES POZO Y NIVELES DE APOYOS INDICATIVOS PARA MOSTRAR PROPUESTA SOLAMENTE
POZO FORMADO POR MURO DE PILOTES
DISTANCIA ENTRE POZO Y TÚNEL A DESARROLLAR EN SIGUIENTES FASES DEL PROYECTO
GALERÍA NECESITARÁ LA PENDIENTE MÍNIMA PARA EVACUAR CUALQUIER VERTIDO (NO SE MUESTRA)
TRATAMIENTOS DEL TERRENO NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESTOS ELEMENTOS NO MOSTRADOS



ESQUEMA SALIDA DE EMERGENCIA
EN TÚNEL EN MINA (GALERÍA DESDE
TÚNEL CARRETERO EN MINA CON
CONEXIÓN A POZO)



APÉNDICES

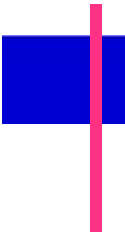
Apéndice 1 – Presupuesto



		Coste unitario		Medición		Importe	
TÚNEL							
EXCAVACIONES						18.806,23	€/m.l.
m³	m3 EXCAVACIÓN EN AVANCE DE TÚNEL POR MÉTODO ALEMÁN MIXTO MEDIANTE GALERÍAS EN AVANCE DE TÚNEL POR MÉTODO ALEMÁN EN HASTIALES Y EXCAVACIÓN SECUENCIAL CON ENTIBACIÓN CUAJADA EN BÓVEDA, INCLUIDO SOSTENIMIENTO DE GALERÍAS, ENTIBACIÓN DE BÓVEDA, PORTEO DE MADERA Y LONGARINAS METÁLICAS, INCLUSO PERFORACIONES DE DRENAJE EN EL FRENTE Y TRATAMIENTO DEL MISMO.	248,82	€/m³	53,37	m³/m.l.	13.279,52	€/m.l.
m³	m3 EXCAVACIÓN DE VACIADO EN TÚNEL POR MÉTODO ALEMÁN MIXTO INCLUSO CON EXCAVACIÓN DE CONTRABÓVEDA	74,03	€/m³	74,66	m³/m.l.	5.526,71	€/m.l.
REVESTIMIENTO						7.211,06	€/m.l.
m³	m3 HORMIGÓN BOMBEADO HM-30 EN REVESTIMIENTO DE TÚNEL EXCAVADO POR MÉTODO ALEMÁN MIXTO EN BÓVEDA, HASTIALES Y CONTRABÓVEDA, INCLUYENDO ENCOFRADO.	155,48	€/m³	46,38	m³/m.l.	7.211,06	€/m.l.
Subtotal						26.017,29	€/m.l.
Impermeabilización y drenaje		3%				7,81	€/m.l.
Auscultación		2%				5,20	€/m.l.
Imprevistos		15%				39,03	€/m.l.
TOTAL EJECUCION MATERIAL OBRA CIVIL						26.069,33	€/m

TRATAMIENTOS (por m.l.)						61.736,29 €	
m	MICROPILOTE IN SITU DE 225 mm DE DIÁMETRO CON CUALQUIER ÁNGULO i/ ENSAYOS PREVIOS Y EN EJECUCIÓN	110,54	€/m	30	m	3.316,20 €	/m
m³	JET GROUTING	304,20	€/m³	192,045	m³	58.420,09 €	/m

GALERÍA EVACUACIÓN + BOMBEO (longitud 25m)							
m³	DEMOLICIÓN EN TÚNEL DE OBRA NUEVA						
	Demolición entronque con galería del Pozo	50,00	€/m²	30,87	m²	1.543,50	
m³	EXCAVACIÓN EN AVANCE DE TÚNEL POR MÉTODO BELGA, CON ENTIBACIÓN CUAJADA, PORTEO DE MADERA Y LONGARINAS METÁLICAS, INCLUSO PERFORACIÓN DE DRENAJE EN EL FRENTE Y TRATAMIENTO DEL MISMO	248,82	€/m³	22,68	m³/m.l.	5.643,24	€/m.l.
m³	EXCAVACIÓN EN DESTROZA DE TÚNEL POR MÉTODO BELGA, INCLUSO CON EXCAVACIÓN DE HASTIALES POR BATACHES CONTRAPEADOS Y DE CONTRABÓVEDA	145,19	€/m³	15,12	m³/m.l.	2.195,27	€/m.l.
REVESTIMIENTO						3.233,98	€/m.l.
m³	m3 HORMIGÓN BOMBEADO HM-30 EN REVESTIMIENTO DE TÚNEL EXCAVADO POR MÉTODO BELGA BÓVEDA, HASTIALES Y CONTRABÓVEDA, INCLUYENDO ENCOFRADO.	155,48	€/m³	20,8	m³/m.l.	3.233,98	€/m.l.
Subtotal						11.072,49	€/m.l.
Impermeabilización y drenaje		3%				3,32	€/m.l.
Auscultación		2%				2,21	€/m.l.



Imprevistos		10%			11,07		€/m.l.
TOTAL EJECUCION MATERIAL OBRA CIVIL					11.089,09		€/m
TRATAMIENTOS (por galería)					75.750,00 €		
m	MICROPILOTE IN SITU DE 225 mm DE DIÁMETRO CON CUALQUIER ÁNGULO i/ ENSAYOS PREVIOS Y EN EJECUCIÓN	110,54	€/m	300	m	33.162,00 €	
m³	JET GROUTING	304,20	€/m³	140	m³	42.588,00 €	

VALORACIÓN ALTERNATIVAS			
Alternativa I			21.427.869,71 €
Longitud túnel en mina	240	m	6.256.639,49 €
Tratamientos (1,5 volumen tratado-excavado)			14.816.709,36 €
No de salidas de emergencia en el tramo en mina	1		
Longitud galerías de emergencia en mina	45	m	576.302,75 €
Alternativa II			38.462.371,40 €
Longitud túnel en mina	430	m	11.209.812,41 €
Tratamientos (1,5 volumen tratado-excavado)			26.546.604,27 €
No de salidas de emergencia en el tramo en mina	2		
Longitud galerías de emergencia en mina	45	m	1.149.518,50 €