

ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA 5 DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE BILBAO



Anejo nº 4. TÚNELES

INDICE

1	OBJETO Y ALCANCE	6
2	DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TÚNELES	8
3	CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS PREVISTAS	10
4	PROCESO CONSTRUCTIVO. EXCAVACIÓN	15
5	DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES DE SOSTENIMIENTO	17
5.1	Clasificaciones geomecánicas	17
5.1.1	Método de Barton (Q)	17
5.1.2	Método de Bieniawsky (RMR).....	19
5.2	Sostenimientos adoptados	22
6	REVESTIMIENTO	23
7	APÉNDICES	24
7.1	TABLAS	25

FIGURAS

Figura 1:	Rasante Alternativa 1	6
Figura 2:	Rasante Alternativa 2	6
Figura 3:	Secciones en túnel.....	8
Figura 4:	Secciones en falso túnel.....	9
Figura 5:	Línea 5: Cruce Hospital-Usánsolo: Planta Geológica. Situación alternativas 1 y 2.....	10
Figura 6:	Línea 5: Cruce Hospital-Usánsolo: Perfil longitudinal Est. Informativo Galdakao-Usánsolo.....	10
Figura 7:	Zona de terraza junto al Ibaizabal. Tramo en túnel.....	11
Figura 8:	Perfiles transversales de la Alternativa 1: 0+430 y 0+530. Pérdida de tapada en la zona junto al Ibaizabal.....	11
Figura 9:	Perfil de geofísica (MASW-7) con sondeo SEI-9 (0+530)	11
Figura 10:	Zona de terraza junto al Ibaizabal. Zona de boquilla y falso túnel.	12
Figura 11:	Zona de confluencia con la plataforma actual	12
Figura 12:	Perfil transversal por la alternativa 2: Paso en túnel (0+660): investigación mediante perfiles geofísicos PS-04 y sondeo SEI-07.	12
Figura 13:	Zona de sondeo SEI2-16	13
Figura 14:	Perfil transversal por la alternativa 2: Paso en túnel (0+900) junto a la vaguada del Lekubaso.....	13
Figura 15:	Zona de sondeo SEI2-17: vaguada del Arroyo Lekubaso	13

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

Figura 16: Refuerzo en suelos coluviales en camino junto al área del SEI2-17. Zona sondeo previsto SEI-2-18 (no realizado por negativa de permisos)	14
Figura 17: Gráfico Q y rango de variación establecido.	18

TABLAS

Tabla 1: Propuesta de túneles.	8
Tabla 2: Factores de clasificación del sistema Q	18
Tabla 3: Clases de macizo y sostenimiento de acuerdo con el sistema Q	19
Tabla 4: Tabla de sostenimientos recomendada por Bieniawski en función del RMR89	19
Tabla 5: Longitudes de pase y secciones de excavación para las 10 subclases establecidas por Romana	20
Tabla 6: Sostenimientos con las 10 subclases establecidas por Romana.....	21
Tabla 7: sostenimientos propuestos para los distintos grupos geomecánicos en función de la Clasificación de Romana.	21
Tabla 8: Propuesta de tramificación de sostenimientos.	22
Tabla 9: Síntesis tramificación de sostenimientos.	22
Tabla 10: Resumen de sostenimientos y proceso de excavación	25
Tabla 11: Resumen de ensayos en muestras de roca	27
Tabla 12: Resumen de ensayos en muestras de suelo.....	29

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

1 OBJETO Y ALCANCE

El presente Anejo tiene como objeto la descripción y evaluación de los túneles considerados en las alternativas del Estudio Informativo de la conexión de la Línea 5 del Metro de Bilbao con la línea actual.

- Alternativa 1:** Se propone mediante un trazado sensiblemente paralelo al río Ibaizabal con unos 750 m en túnel, de los cuales unos 250 m se ejecutan como falso túnel al abrigo de pantallas o entibaciones temporales y el resto como túnel en mina excavado en roca. La alternativa sale a superficie mediante una trinchera muy cerca de la margen del río Ibaizabal y posteriormente pasa sobre el arroyo Lekubaso y en terraplén conecta con la plataforma existente.



Figura 1: Rasante Alternativa 1

- Alternativa 2:** el trazado se aleja del río Ibaizabal tras cruzarlo manteniéndose en túnel en mina en casi la totalidad del proyecto (ello supone un túnel de unos 1300 m de longitud) para salir finalmente a superficie en el emboquille situado en zona de ladera ya en el municipio de Bedia y muy próximo a la conexión con la actual plataforma ferroviaria. Desde el punto de vista del alzado, el trazado se inicia en el túnel de la estación, para continuar con pendiente horizontal hasta pasar la bretel de la estación, donde el trazado se deprime y continúa deprimido hasta los últimos 300 m, permitiendo así el paso bajo el río Ibaizabal, el paso por el núcleo urbano de Usánsolo, el cruce bajo la línea actual y el paso por el pico.

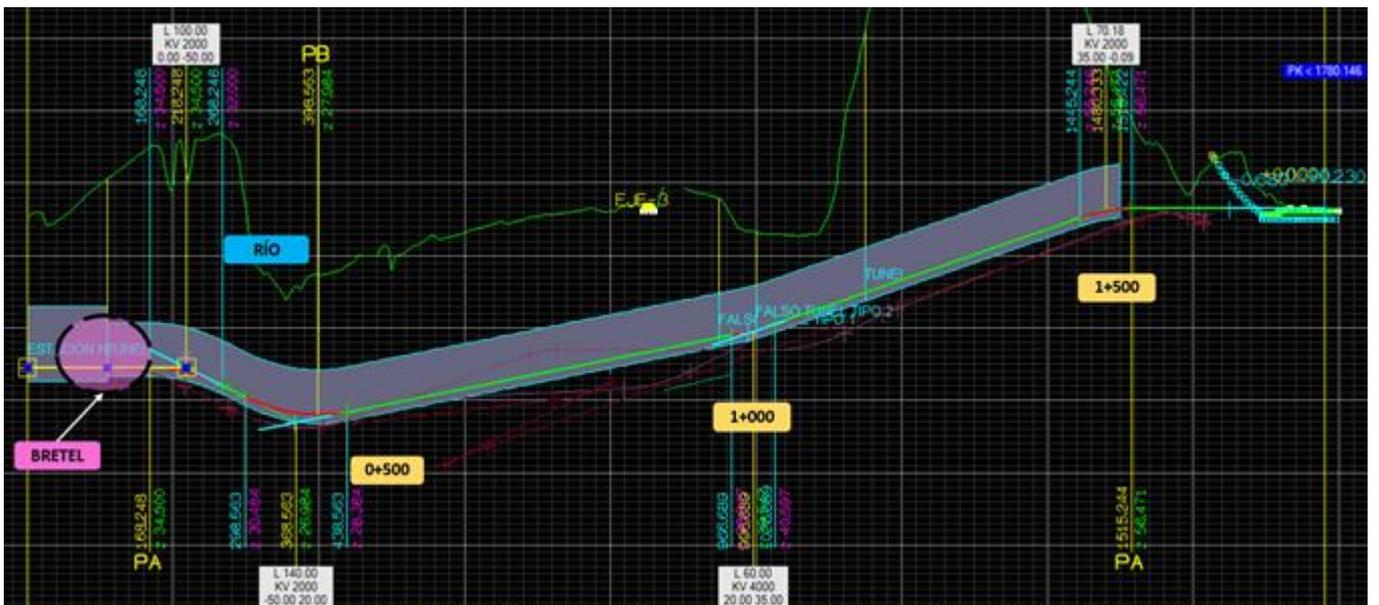


Figura 2: Rasante Alternativa 2

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

En el presente Anejo nº 4 se tratan los temas que se indican a continuación:

- Apartado 2: Definición geométrica de la sección geométrica útil de los túneles.
- Apartado 3: Condiciones geológico-geotécnicas.
- Apartado 4: Análisis del procedimiento constructivo más adecuado para los túneles el estudio.
- Apartado 5:
 - Estimación previa de las secciones tipo de sostenimiento basadas en las recomendaciones de Barton y Bieniawski en función de la clasificación geomecánica del macizo atravesado; y en función de la cobertera sana que exista sobre la clave del túnel.
 - Tramificación de las secciones tipo de sostenimiento definidas para las dos alternativas.
- Apartado 6: Revestimiento.

Los perfiles y plantas geológicas además de una descripción detallada de la campaña geotécnica se encuentran en el anejo nº 3 de Geología y geotecnia.

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

2 DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TÚNELES

El presente Estudio Informativo de la Línea 5 y su integración en la línea ferroviaria Durango-Bilbao-Txorierrri, contempla dos alternativas que suponen la construcción túneles de doble vía, con una longitud de excavación en mina de unos 530 metros en la alternativa 1 y de unos 1390 metros en la alternativa 2.

En la siguiente tabla se identifican los túneles finalmente proyectados:

	Túnel	P.k. inicio	P.k. final
Alternativa 1	Túnel en mina	0+000	0+530
	Falso Túnel 1	0+530	0+650
	Falso Túnel 2	0+650	0+770
Alternativa 2	Túnel en mina	0+000	1+391
	Galería evacuación y ventilación	0+000	0+173

Tabla 1: Propuesta de túneles.

A continuación, se muestran las secciones propuestas de túnel y falso túnel a utilizar en función del trazado planteado.

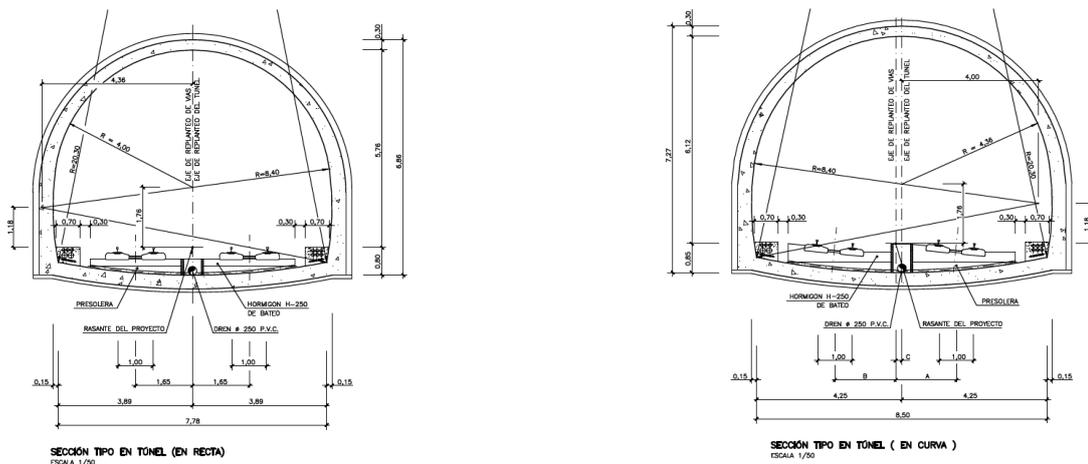


Figura 3: Secciones en túnel

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

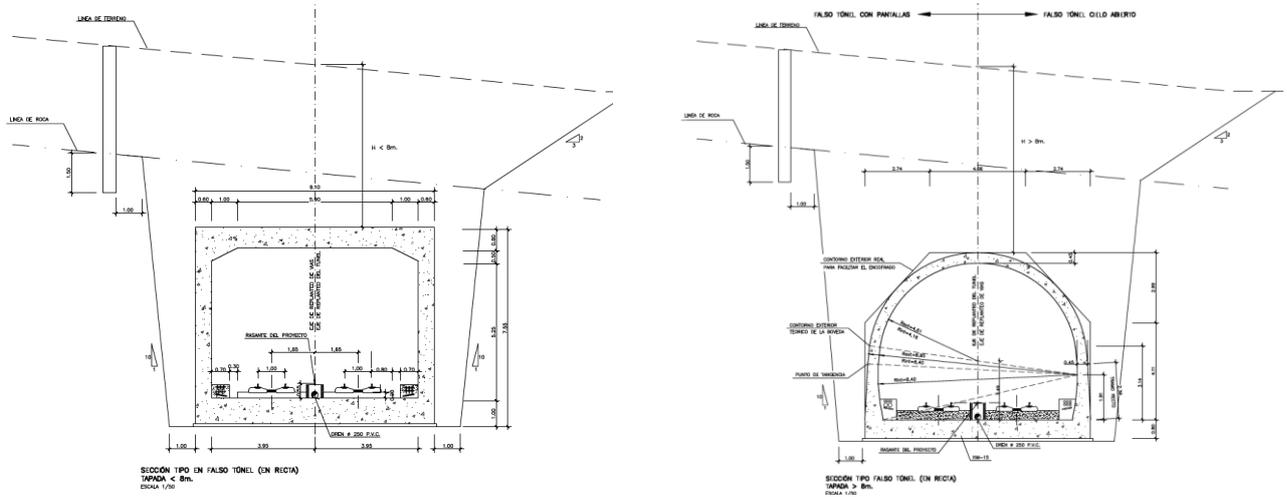


Figura 4: Secciones en falso túnel

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

3 CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS PREVISTAS

En el tramo de túnel (túnel de Labeaga Est. Inf. Galdakao-Usánsolo) el cruce bajo el río Ibaizabal se produciría en la unidad de flysch negro (Cs-5) que corresponde a una alternancia de areniscas silíceas y lutitas en disposición subvertical ($65^\circ/190^\circ$) bajo los suelos aluviales (Q_{AL}). Los materiales del flysch negro aparecen descritos como una alternancia de lutitas, limolitas y areniscas de resistencia baja a media ($Q_u=42-478 / 142-607 \text{ kp/cm}^2$) con un índice schimazek de 0.02 a 3.479 kN/m y Cerchar de 0 a 2.2.

La zona presentaría una cobertura de suelos de unos 5 a 10 metros de espesor y es previsible un nivel freático somero.



Figura 5: Línea 5: Cruce Hospital-Usánsolo: Planta Geológica. Situación alternativas 1 y 2

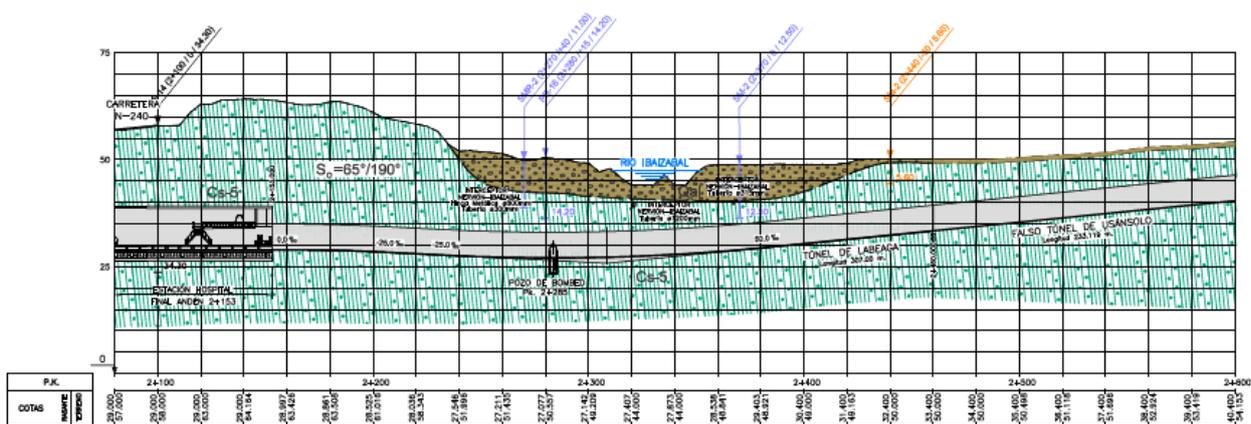


Figura 6: Línea 5: Cruce Hospital-Usánsolo: Perfil longitudinal Est. Informativo Galdakao-Usánsolo.

En las dos alternativas de trazado que se han analizado se han establecido las siguientes condiciones:

1) Alternativa 1:

- Tramo 1-1: (0+000 a 0+180) excavación desde la caverna de Hospital hasta zona del río Ibaizabal. En este tramo la tapada alcanza unos 20 metros de sustrato de tipo limolitas y areniscas (Complejo Supraurgoniano) no se consideran problemas reseñables, aunque es probable la afección a fallas que localmente pueden requerir un refuerzo del sostenimiento.

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

- Tramo 1-2: (0+180 a 0+220) paso bajo el río Ibaizabal. En este tramo la tapada probable en roca puede ser de unos 5 a 10 metros, considerando que el techo del sustrato sano pueda estar a la cota +43 (valor mínimo detectado en el estudio) se aproximaría más a unos 8 metros.



Figura 7: Zona de terraza junto al Ibaizabal. Tramo en túnel.

- Tramo 1-3: (0+220 a 0+430) paso bajo la zona de terraza del Ibaizabal en la zona de Usánsolo. En este tramo la tapada probable en roca puede variar de unos 10 a 8 metros a medida que el trazado va avanzando y aproximándose al margen del río.

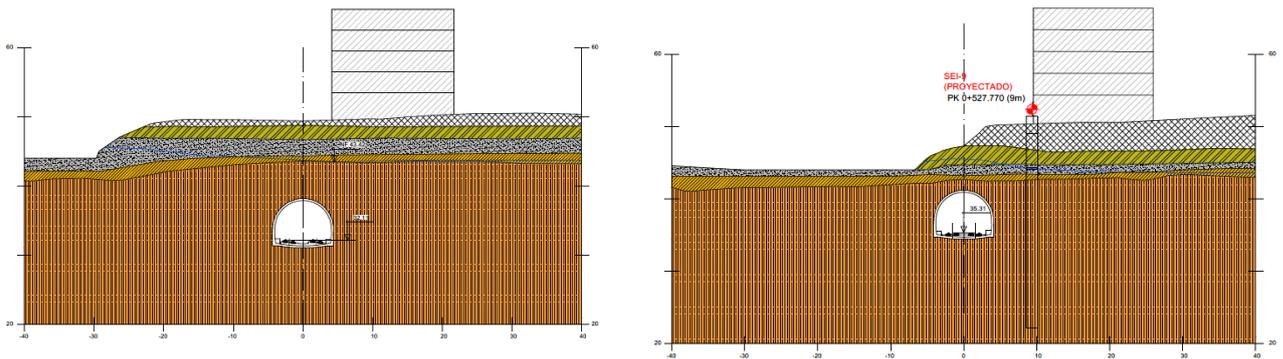


Figura 8: Perfiles transversales de la Alternativa 1: 0+430 y 0+530. Pérdida de tapada en la zona junto al Ibaizabal

- Tramo 1-4: (0+430 a 0+770) paso bajo la zona de terraza del Ibaizabal en la zona de Usánsolo pero en este tramo se aproxima a zona edificada. En este tramo la tapada probable en roca es irregular y se reduce por el trazado en rampa por lo que se proyecta un tramo en falso túnel (0+530 a 0+650 y 0+650 a 0+770).

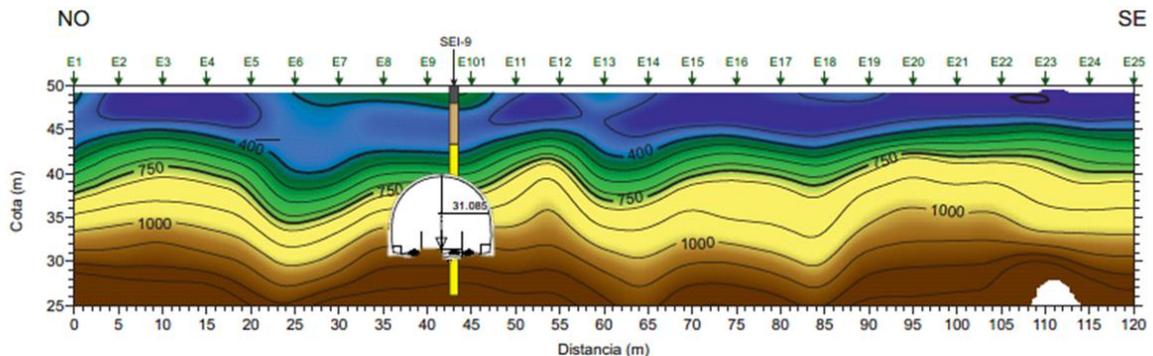


Figura 9: Perfil de geofísica (MASW-7) con sondeo SEI-9 (0+530)

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles



Figura 10: Zona de terraza junto al Ibaizabal. Zona de boquilla y falso túnel.

- Tramo 1-5: (0+770 a 1+220) trazado en trinchera y terraplén sobre los depósitos de terraza del Ibaizabal incluyendo obra de paso sobre el arroyo Lekubaso. Se trata de desmontes y terraplenes de altura moderada apoyados sobre terrenos de aluvial, en parte compresibles (limos-arcillosos superficiales con una potencia de unos 3 metros (SEI-12)).



Figura 11: Zona de confluencia con la plataforma actual

2) **Alternativa 2:**

- Tramo 2-1: (0+000 a 0+150) excavación desde la caverna de Hospital hasta zona del río Ibaizabal. En este tramo la tapada alcanza unos 20 metros de sustrato de tipo limolitas y areniscas (Complejo Supraurgoniano) no se consideran problemas reseñables, aunque es probable la afección a fallas que localmente pueden requerir un refuerzo del sostenimiento.
- Tramo 2-2: (0+150 a 0+210) paso bajo el río Ibaizabal. En este tramo la tapada probable en roca puede ser de unos 5 a 10 metros, considerando que el techo del sustrato sano pueda estar a la cota +43 (valor mínimo detectado en el estudio) se aproximaría más a unos 8 metros.
- Tramo 2-3: (0+210 a 0+500) paso bajo la zona de terraza del Ibaizabal en la zona de Usansolo con paso local bajo edificaciones. La tapada de roca sana es irregular, pero se estima en unos 8 a más de 10 metros (sondeos SEI-14 (cota de roca sana +43) y SEI-5 (+50.5)).
- Tramo 2-4: (0+500 a 0+700) En esta zona se ha detectado una depresión del techo de roca y zona de falla por lo que el paso en túnel puede llegar a tener una tapada mínima (SEI-7) de unos 6.5 metros en una zona de baja calidad de roca.

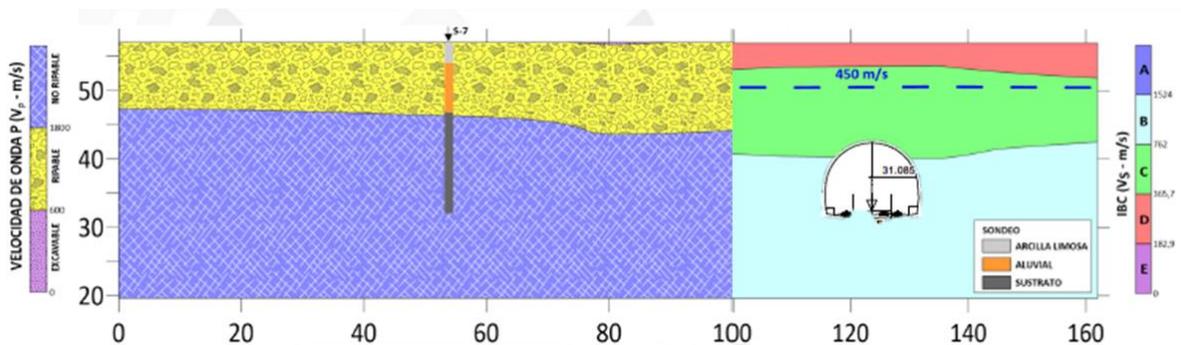


Figura 12: Perfil transversal por la alternativa 2: Paso en túnel (0+660): investigación mediante perfiles geofísicos PS-04 y sondeo SEI-07.

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles



Figura 13: Zona de sondeo SEI2-16

- Tramo 2-5: (0+700 a 0+800) En esta zona se considera un resalto del sustrato que supone que pese al ascenso de la traza la tapada en roca se estima puede estar en torno a los 10 metros.
- Tramo 2-6: (0+800 a 0+940) En esta zona el túnel pasa bajo la vaguada lateral del arroyo Lekubaso, la cota de roca detectada en el sondeo SEI2-17 es la +49.8 por lo que la tapada mínima en la zona puede estar en torno a los 5 metros de roca.

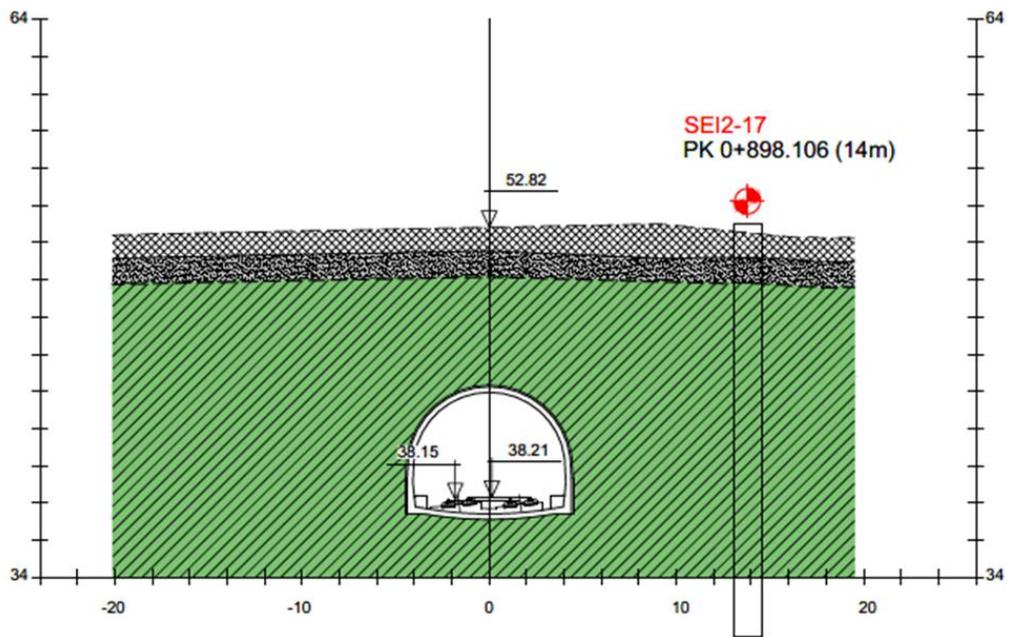


Figura 14: Perfil transversal por la alternativa 2: Paso en túnel (0+900) junto a la vaguada del Lekubaso

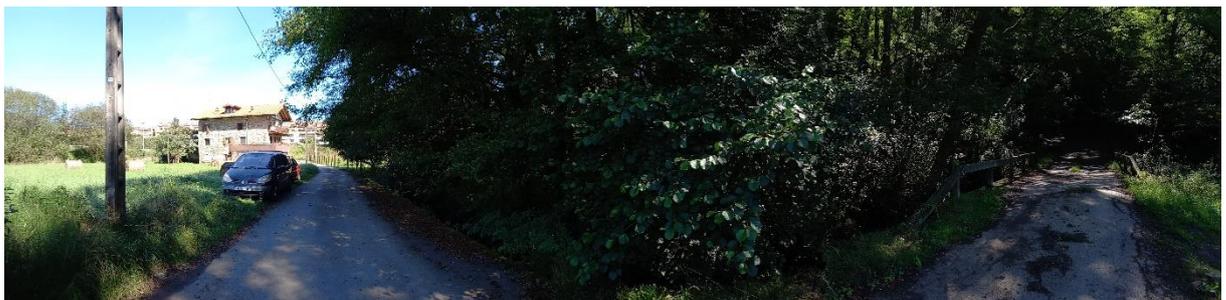


Figura 15: Zona de sondeo SEI2-17: vaguada del Arroyo Lekubaso

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

- Tramo 2-7: (0+940 a 1+370) En esta zona el túnel pasa bajo un relieve que alcanza una cota en torno a la +120 por lo que las tapadas pueden ser moderadas con unos 75 metros de roca.
- Tramo 2-8: (1+370 a 1+610) En esta zona se ejecutaría la boquilla de salida y la traza pasaría a ir en trinchera hasta confluir con la plataforma actual. En esta zona no se ha realizado investigación por la negativa de permisos.



Figura 16: Refuerzo en suelos coluviales en camino junto al área del SEI2-17. Zona sondeo previsto SEI-2-18 (no realizado por negativa de permisos)

4 PROCESO CONSTRUCTIVO. EXCAVACIÓN

El procedimiento elegido para la ejecución de los túneles de este tramo será el Nuevo Método Austríaco (NATM). Este método se basa en la instalación de un sostenimiento primario inmediatamente después de la excavación, de esta manera se aprovecha la capacidad portante del terreno que rodea al túnel de colaborar en el sostenimiento de la excavación, reaccionando frente a los esfuerzos solicitados mediante deformaciones aceptables.

Este método implica además que las tensiones a las que se encuentra sometido el túnel después de su excavación se han relajado en un porcentaje variable hasta la colocación del sostenimiento, esto optimiza el trabajo del sostenimiento y revestimiento.

Este procedimiento ha sido elegido en función de los siguientes condicionantes:

- 1.- Sección de excavación
- 2.- Longitud de los túneles
- 3.- Recubrimiento del túnel
- 4.- Características geotécnicas de los materiales atravesados
- 5.- Comportamiento esperado de los materiales frente a la excavación.

Este método se encuentra ampliamente contrastado para túneles de las características de los de este proyecto, teniendo en cuenta los puntos anteriores.

La excavación de los túneles se ha previsto con rozadora. La validez de las rozadoras de ataque puntual se basa en que la roca presenta una resistencia a compresión simple media. Estas máquinas permiten un mejor perfilado de la sección y una menor sobreexcavación.

De acuerdo con los ensayos de caracterización realizados la roca presenta una densidad seca de 2.54 a 2.74 Mg/m³ y aparente de 2.55 a 2.77 Mg/m³. La resistencia a tracción obtenida (10 ensayos) es de 4.18 MPa con un rango de 2.21 a 11.56 MPa. La abrasividad se ha estimado a partir de ensayos Schimazek y Cerchar con valores bajos a moderados del índice Schimazek ($F \approx 0.03-3.48$) pero más variables en la dureza (20-100 (campaña actual)) y abrasividad (0.3-3.4 (Campaña actual) / 0.5-2.2 (Estudio Informativo previo)) Cerchar.

En relación con la Resistencia a Compresión Simple (RCS) los materiales presentan un comportamiento bimodal con valores característicos de: 15-25 MPa (lutitas/limolitas) y 35-55 MPa (areniscas).

Los valores de RCS obtenidos en los diferentes ensayos se pueden diferenciar en:

- Ensayos de compresión uniaxial (21): 3.5 a 27.90 con un valor medio de 10.43 MPa, en el Est. Inf. del tramo de Galdakao a Usánsolo se obtuvo con 13 ensayos, un valor medio de 18 MPa (4-59 MPa). En general los valores de este ensayo pueden estar influidos por las roturas por discontinuidad.
- Ensayos de carga puntual (14): 21 a 42 con un valor medio de 30 MPa. Los valores más altos (>30 MPa) se concentran en los sondeos SEI2-16 y 17 con un valor aislado en el SEI-9 (TP-3: 37 MPa).
- Ensayos con esclerómetro (31): Este ensayo se debe considerar menos fiable, aunque muestra un comportamiento similar con dos familias de datos (≈ 45 MPa y ≈ 100 MPa).

Las ventajas en el empleo de la rozadora serían las siguientes:

- El recorte de la sección con este método es notablemente mejor que el que se consigue con el empleo de explosivos.
- La alteración del macizo es también menor al correspondiente a la excavación con explosivos. Tanto es así que las clasificaciones geomecánicas consideran un incremento en sus índices cuando la excavación se realiza con medios mecánicos.
- La experiencia en materiales similares en el entorno de la obra en proyecto ha sido muy positiva, con buenos rendimientos

En cualquier caso, dadas las dimensiones de la sección, y para obtener buenos rendimientos se debería utilizar una rozadora pesada, de al menos de 100 T y de 300 KW de potencia de la cabeza de corte.

La excavación de la sección completa se recomienda realizarla en dos fases sucesivas, correspondientes a Bóveda y Destroza en las Clase de macizo III y IV, pudiendo realizarse a plena sección en las restantes.

Tanto en las fases de Avance como en la de Destroza, la excavación se realizará en pases (avances) sucesivos cuya longitud máxima de avance estará estrechamente ligada a la Sección Tipo definida en cada caso, de tal forma que

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

garantice la estabilidad de la excavación hasta la colocación del sostenimiento. La longitud de los pases de avance se ha ligado a las características del terreno excavado en cada punto, dichas longitudes se han variado entre 0,75 m, en aquellas secciones excavadas en zonas de muy baja calidad geomecánica (emboquilles y zonas con presencia de suelos, fallas, etc.) y los 4,0 m previstos como longitud máxima de pase prevista para los tramos excavados en rocas de mejor calidad. Los pases de avance adoptados en general para la destroza son del orden del doble de los propuestos para el avance.

La separación entre las fases de Avance y Destroza se establece de forma que exista una división compensada de la sección completa, teniendo en cuenta condiciones geotécnicas, constructivas y de gálibo. En base a la experiencia en túneles de secciones útiles similares y a las características de la maquinaria que se maneja habitualmente en este tipo de obras, se ha considerado oportuno adoptar una altura de avance de 5.60 m.

Las fases de ejecución proyectadas son las siguientes:

1. Excavación y sostenimiento del avance con una altura de 5.60 m. En las secciones de peor comportamiento geotécnico podría plantearse la excavación del avance disponiendo un machón central.
2. Una vez que se ha estabilizado el macizo tras la excavación del avance se procederá a la excavación y posterior sostenimiento de la destroza. La excavación de la destroza podría subdividirse en varias fases o bataches.
3. Excavación y refino de la contrabóveda.
4. Colocación de láminas de impermeabilización, drenes y demás conducciones previstas.
5. Hormigonado del revestimiento.

En los tramos a excavar en pasos de falla y suelos de alteración, en las que es previsible una cierta inestabilidad del frente, se ejecutará previamente a la excavación del Avance un paraguas de micropilotes.

5 DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES DE SOSTENIMIENTO

5.1 Clasificaciones geomecánicas

5.1.1 Método de Barton (Q)

La clasificación geomecánica de Barton se basa en la obtención de un índice de calidad “Q” mediante la combinación de seis parámetros procedentes de la observación del macizo. Estos parámetros son los siguientes:

1. RQD: es un índice de fracturación en testigo normalizado
2. J_n: es un índice de diaclasado que contempla la cuantía de la fracturación,
3. J_r: es un índice de rugosidad que contempla la rugosidad, presencia de relleno y continuidad de las juntas,
4. J_a: es el índice de alteración de las juntas,
5. J_w: es un coeficiente reductor por la presencia de agua,
6. SRF (stress reduction factor): es un coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

Una vez establecidos los valores de dichos parámetros, en base a las tablas que incorpora el método de análisis, el índice Q se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

El rango de variación del índice Q es entre 0.001 y 1000. Este intervalo se ha dividido en nueve clases, que dan lugar a la siguiente clasificación cualitativa:

- a) Q: 0.001 a 0.01 Roca excepcionalmente mala
- b) Q: 0.01 a 0.1 Roca extremadamente mala
- c) Q: 0.1 a 1 Roca muy mala
- d) Q: 1 a 4 Roca mala
- e) Q: 4 a 10 Roca media
- f) Q: 10 a 40 Roca buena
- g) Q: 40 a 100 Roca muy buena
- h) Q: 100 a 400 Roca extremadamente buena
- i) Q: 400 a 1000 Roca excepcionalmente buena

En función del índice Q y del “diámetro equivalente” se proponen hasta 38 tipos diferentes de sostenimiento. A este respecto, el concepto de “diámetro equivalente” (De) se define como la relación entre el diámetro o ancho B de la sección y el parámetro designado como ESR, que para el caso en estudio (túneles de ferrocarril) valdría 1.0. No obstante, dado que este factor no implica una reducción del factor de seguridad asociada a la naturaleza de la obra (percepción de la seguridad e implícitamente introduce un aspecto probabilístico) se recomienda estudiar específicamente en el caso de cavernas con poca tapada o túneles bajo edificación.

En la siguiente figura se indican los ámbitos de aplicación de los distintos sostenimientos propuestos en función de los dos parámetros anteriormente descritos (Q y De).

En la siguiente tabla se muestra una posible estimación del rango del índice Q para la traza del Metro y los rangos de variación de los diferentes parámetros.

Parámetros/ Consideraciones		Rango
RQD	Fracturación en sondeo. En general elevado (90-100%) con zonas discretas de espesor métrico	40-80%
J _n (fracturación)	Una familia a 2-3 familias	2-6
J _r (rugosidad)	Consideramos planas a onduladas lisas	1.5-2.0
J _a (alteración)	Ligera alteración a alteraciones arcillosas	2-4
J _w (agua)	Excavaciones secas o con pequeño flujo de agua. Excepcionalmente flujo importante por vías locales (p.e. paso bajo Ibaizabal y Lekubaso)	0.5-0.66-1.0

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

Parámetros/ Consideraciones		Rango
SRF (<i>Stress Reduction Factor</i>)	Roca competente con pequeña a media cobertura (Zona Hospital y parte final alternativa 2)	2.5-0.5

Tabla 2: Factores de clasificación del sistema Q

En los túneles de la línea 5 del metro y de una manera simplificada se podrían establecer dos clases de macizo a los que corresponderían diferentes sostenimientos:

1. Clase I ($Q > 10$ (regular a bueno)): Corresponde a areniscas y limolitas sanas (grado de meteorización II). La resistencia corresponde a una roca de dureza baja-media-alta (R2-R3:10-25-50 MPa) con dos o tres familias de diaclasas cerradas (solo estratificación continua) y leve alteración en los bordes de las juntas (rellenos arcillosos que en general sellan el macizo). No es previsible circulación de agua o en cualquier caso sería posible un leve goteo.
2. Clase II ($Q: 2-4$ (pobre)) Es un macizo algo a bastante alterado (Grado de meteorización II-III) con fenómenos de meteorización química en zonas que pueden inducir una notable pérdida de resistencia de la matriz (RCS:5-10 MPa). La excavación será irregular debido a la resistencia heterogénea de la roca. Flujos de agua muy locales.

Localmente pueden aparecer condiciones desfavorables por la combinación de la fracturación y meteorización que equivalen a condiciones muy pobres de macizo rocoso.

Se proyectan las clases e índices sobre los ábacos que propone Barton para establecer las necesidades de sostenimiento. La anchura que se ha considerado es en torno a los 10 metros de túnel para vía doble.

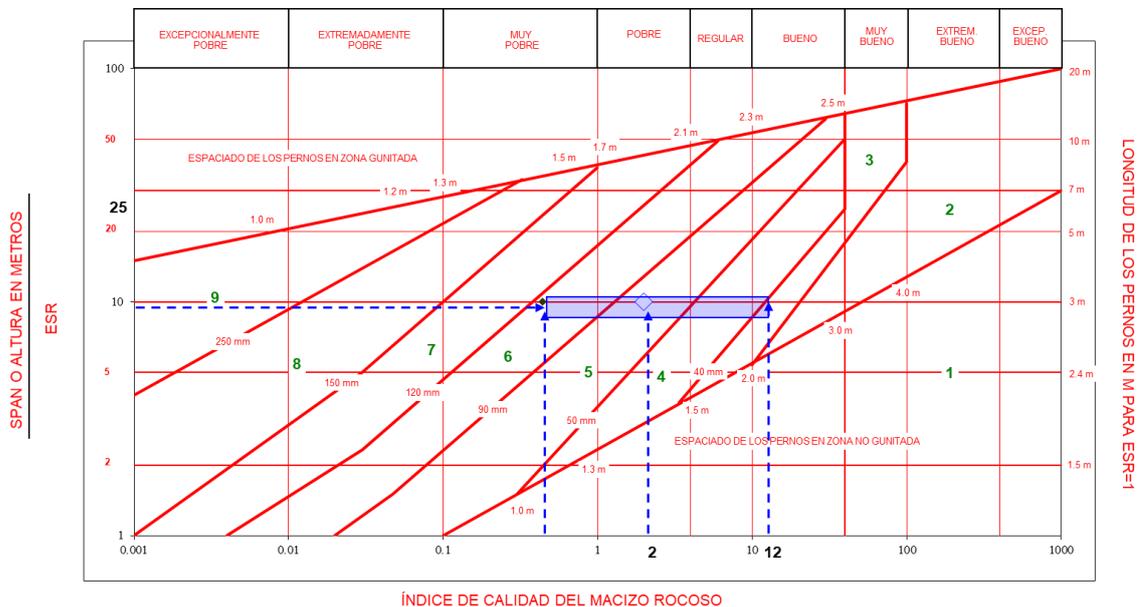


Figura 17: Gráfico Q y rango de variación establecido.

En síntesis, se podría establecer que para las condiciones medias: Macizo de calidad media para túnel de vía doble: Clase sostenimiento 3-4. Las recomendaciones son bulonado sistemático (espaciado 1-2 metros/ longitudes de unos 3-4 metros) con mallazo metálico y un espesor de hormigón proyectado de unos 5-10 cm. Para las diferentes clases de macizo se obtendría:

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

Clase macizo	Q	Tipo túnel	Clase genérica sostenimiento Q	Subclase sostenimiento	Observaciones sostenimiento
1	≈>10	Túnel vía doble	4	13	BULONADO SISTEMÁTICO CON 40-100 mm DE GUNITA
2	≈2-4	Túnel vía doble	5	23	GUNITADO REFORZADO CON FIBRAS (50-90 mm) Y BULONADO.
3	≈0.5-1.0	Túnel vía doble	6	31	GUNITADO REFORZADO CON FIBRAS (90-120 mm) Y BULONADO.

Tabla 3: Clases de macizo y sostenimiento de acuerdo con el sistema Q

5.1.2 Método de Bieniawski (RMR)

Bieniawski establece una serie de sostenimientos para un túnel de 10m de anchura y una tensión vertical de 25Mpa, en función del RMR₈₉:

Clase Macizo Rocoso	Excavación (pase)	Bulones	Hormigón Proyectado	Cerchas
Roca Muy Buena RMR 81 - 100	Sección Completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
Roca Buena RMR 61 - 80	Sección Completa (1-1,5m) Sostenimiento completo a 20m del frente	Localmente en clave. L= 3m espaciados a 2,5m. Con mallazo ocasional	50mm en clave donde sea necesario	No necesarias
Roca Media RMR 41 - 60	Excavación en avance y destroza. (1,5-3m en avance) Iniciar el sostenimiento con el avance después de cada voladura y terminado a 10m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4m. Espaciados 1,5 a 2,0m con mallazo	50-100mm en clave 30mm en hastiales	No necesarias
Roca Mala RMR 21 - 40	Excavación en avance y destroza (1-1,5m en avance) Instalar sostenimiento con el avance de la excavación y hasta 10m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4-5m espaciados a 1,0-1,5m. Con mallazo.	100-150mm en clave 100mm en hastiales	Ligeras a medias, espaciadas 1,5m donde sea necesario
Roca Muy Mala RMR < 20	Galerías múltiples (0,5-1,5m en avance) sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6m espaciados a 1,0-1,5m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda	150-200mm en clave 150mm en hastiales 50mm en el frente	Medias a pesadas, espaciadas a 0,75m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda.

Tabla 4: Tabla de sostenimientos recomendada por Bieniawski en función del RMR₈₉

Según Romana, el método de Bieniawski establece el sostenimiento tipo en función de la clasificación RMR, definiendo cinco tipos de sostenimiento, uno para cada clase de macizo rocoso. Cada clase cubre un intervalo de 20 puntos en dicha clasificación.

Esta tipificación del sostenimiento resulta escasa teniendo en cuenta que la gran mayoría de las rocas presentan valores de RMR entre 40 y 60, siendo muy diferentes las rocas con RMR = 60 de las rocas con RMR = 40, así como sus necesidades de sostenimiento.

El método de Romana propone una sustitución del sistema de 5 Clases de Bieniawski por otro de 10 Subclases, cubriendo cada subclase un rango de 10 puntos.

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	
		MÁXIMA	RECOMENDADA			
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA	TBM ABIERTO VOLADURAS ROZADORA	
90	I b		≥ 5			
80	II a	16.0	≥ 5			
70	II b	9.5	4/6			
60		6.0				
50	III a		3/4			
40	III b	4.0	2/3			
30	IV a	2.5	1/2			GALERÍA DE AVANCE GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABO VEDA ESCUDO FRESADO ESCARIFICACIÓN/PALA
20	IV b	1.75	1			
10	V a	1.0	0,5/0,75			
0	V b		0,5			

Notas

- 1 La unidad para el pase es el metro (m)
- 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
- 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
- 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

Tabla 5: Longitudes de pase y secciones de excavación para las 10 subclases establecidas por Romana

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

RMR	CLASE	BULONADO			HORMIGÓN PROYECTADO			ARMADURA		CERCHAS		MÉTODOS ESPECIALES	
		L (m)	b/m ²	s' (m)	e (cm)	CAPAS	SELLADO	MALLAZO	FIBRAS	TIPO	S' (m)		
100	Ia	-	-	-	-	-	-						
90	Ib	2/3	0.10	Ocasional	2	Ocasional	No	SENCILLO OCASIONAL			No		
80	IIa	3	0.10/-0.25	Ocasional	5	1	Ocasional						No
70	IIb	3	0.25/0.44	2x 2/1.5 x 1.5	6-10	1/2	Si	No					
60	IIIa	3/4	0.44/0.66	1.5 x 1.5/1 x 1.5	8-15	2/3	Si				SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH-21
50	IIIb	4	0.66/1	1 x 1.5/1 x 1	12-20	2/3	Si	1.5					
40	IVa	4/4.5	0.80/1	1 x 1.25/1 x 1	16-24	3	Si				SENCILLO		TH-29
30	IVb	4.5/5	1	1 x 1	20-30	3	Si	DOBLE		HEB	0.75/1		
20	Va	-	-	-	30-40	3/4	Si				0.5/0.75	BERNOLD PARAGUAS	
10	Vb	SISTEMAS ESPECIALES											
0													

Notas:

- Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad en bulones por m² (b/m²) y s, espaciamiento en metros (m)
- La unidad para e, espesor mínimo de hormigón proyectado, es el centímetro (cm). No se ha tenido en cuenta la sobreexcavación.
- El número de capas de hormigón proyectado incluye la capa de sellado
- La unidad para S, separación entre cerchas, es el metro (m).
- Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- Las líneas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces.

Tabla 6: Sostenimientos con las 10 subclases establecidas por Romana

Según esta clasificación se podrían establecer los siguientes sostenimientos:

Aplicación	RMR	SubClase	Bulones	Hormigón Proyectado	Cerchas
Zonas con tapada media en rocas de buena calidad y con escasa fracturación	55-70	IIIa-IIIb	L = 3 o 4 m en malla 1,0x1,5 m a 2,0x2,0 m	6-15 cm con fibras o mallazo sencillo	No necesarias o TH-21 ocasionales
Zonas de roca sana y moderadamente fracturada en el entorno de Usánsolo	45 - 55	IIIa-IIIb	L = 3-4 m malla 1,0x1,0 m a 1,5x1,5 m	8 - 20 cm con fibras o mallazo sencillo	TH-29 o TH-21 con una separación 1,5 m
Zonas de fractura y meteorización. Zonas de tapada reducida (<10 m) bajo edificios	30-45	IVa-IIIb	L = 4,0 a 4,5 m malla 1,0x1,0 a 1,0x1,5m	12 - 24 cm con fibras o mallazo sencillo	TH-29 con una separación 1,0 m
Posible aplicación a pasos bajo cauce y boquillas	20-30	IVb	L = 4,5 a 5,0 m malla 1,0x1,0 m	20 - 30 cm con fibras o mallazo doble	TH-29/HEB con una separación entre 0,75-1,0 m. Chapa bernold y/o micropilotes

Tabla 7: sostenimientos propuestos para los distintos grupos geomecánicos en función de la Clasificación de Romana.

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

5.2 Sostenimientos adoptados

Como resultado de la clasificación del macizo rocoso (RMR/Q) y sostenimientos adoptados en el FMB por ETS (ver tabla en 7.1) se ha definido cinco secciones de sostenimiento denominadas, de más ligera a más pesada de la siguiente manera: S-I, S-II, S-III, S-IV y S-V (grupo 3: túnel de línea):

- S-I: RMR>70. Sostenimiento basado en bulones y hormigón proyectado (5 cm)
- S-II: RMR=55-70. Sostenimiento basado en bulones y hormigón proyectado fibras (10 cm)
- S-III: RMR: 45-55. Sostenimiento basado en bulones y hormigón proyectado sobre mallazo (12 cm)
- S-IV: RMR:20-45 Sostenimiento basado en bulones, hormigón proyectado (18 cm) y cerchas TH-21
- S-V: RMR:10-20. Sostenimiento basado en hormigón proyectado (10 cm), bulones, perfiles HEB-180 y hormigón bombeado en chapa Bernold (20 cm).

Teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas se ha realizado una propuesta de tramificación de los sostenimientos a aplicar en las dos alternativas:

Alternativa	PKs		L (m)	RMR clase 1	Clases Terreno						Observaciones
	De	A			Clase 1	%	L1 (m)	Clase 2	%	L2 (m)	
Alt. 1	0+000	0+160	160	45-55	Tipo III		160				Salida Est. Hospital. Tapada suficiente
Alt. 1	0+160	0+220	60	<45	Tipo IV		60				Paso bajo río Ibaizabal. Tapada reducida/entrada de agua
Alt. 1	0+220	0+500	280	45-55	Tipo III	80	224	Tipo IV	20	56	Paso bajo zona Usánsolo. Tapada moderada
Alt. 1	0+500	0+530	30		Tipo V		30				Zona boquilla
Alt. 1	0+530	0+770	240								Falso túnel
Alt. 2	0+000	0+160	160	45-55	Tipo III		160				Salida Est. Hospital. Tapada suficiente
Alt. 2	0+160	0+220	60	<45	Tipo IV		60				Paso bajo río Ibaizabal. Tapada reducida/entrada de agua
Alt. 2	0+220	0+500	280	45-55	Tipo III	80	224	Tipo IV	20	56	Paso bajo zona Usánsolo. Tapada moderada
Alt. 2	0+500	0+680	180		Tipo IV		180				Tapada reducida en zona vaguada
Alt. 2	0+680	0+820	140	45-55	Tipo III	90	126	Tipo IV	10	14	
Alt. 2	0+820	0+920	100	45-55	Tipo III	70	70	Tipo IV	30	30	Entronque galería evacuación y ventilacion. Zona Lekubaso
Alt. 2	0+920	1+390	470	45-55	Tipo II	90	423	Tipo III	10	47	

Tabla 8: Propuesta de tramificación de sostenimientos.

Alt1		Alt2	
Tipo III	458	Tipo III	1035
Tipo IV	132	Tipo IV	365
Tipo V	50	Tipo V	47

Tabla 9: Síntesis tramificación de sostenimientos.

6 REVESTIMIENTO

Se mantiene el revestimiento previsto en el resto de proyecto y que consistiría en un anillo continuo de hormigón HM-30 en masa de 30 cm de espesor. Se ha previsto la colocación de mallazo de 150x150 10 en hastiales, desde la contrabóveda y hasta una altura de 2.5 m. Para la bóveda se prescinde de la colocación de armadura tanto por los momentos flectores que previsiblemente aparecerán en la bóveda del túnel son lo bastante pequeños como para no necesitar ninguna armadura. Por otra parte, la complicación constructiva que supone el colocar armadura en la bóveda hace preferir siempre acudir a espesores mayores de hormigón que armar la sección.

El hormigón será puesto en obra mediante bombeo.

Se empleará como aditivo del hormigón una dosificación de 2 kg/m³ de fibras de polipropileno monofilamentadas de 25 m. de diámetro. Se encargarán de minimizar la aparición de fisuras por retracción, aumentando la durabilidad, impermeabilidad y resistencia al fuego del hormigón (reducen el fenómeno del “spalling” o desconchado de la cara vista).

7 APÉNDICES

7.1 TABLAS

Ejecución /Sostenimientos		Sostenimiento Tipo S-I	Sostenimiento Tipo S-II	Sostenimiento Tipo S-III	Sostenimiento Tipo S-IV	Sostenimiento Tipo S-V
Hormigón Proyectado	Avance	Sellado de 5cm	Sellado de 10 cm con fibras de acero	12cm Hormigón Armado, mallazo #6x150x150.	18 cm de Hormigón Armado, mallazo 2# 4x150x150.	Sellado de 5 cm de H. Proyectado reforzado con fibras de acero. 25 cm de Hormigón Proyectado reforzado con fibras de acero.
	Destroza	Sellado de 5cm	Sellado de 10 cm con fibras de acero.	12cm Hormigón Armado, mallazo #6x150x150.	18 cm de Hormigón Armado, mallazo 2# 4x150x150.	Sellado de 5 cm de H. Proyectado reforzado con fibras de acero. 25 cm de Hormigón Proyectado reforzado con fibras de acero.
Bulones	Avance	Swellex en malla de 2,0 x 2,0 m de 3m de longitud.	Swellex en malla de 2,0 x 2,0 m de 4m de longitud.	Resina en malla de 1,5 x 1,5 m de 4m de longitud.	Resina de 11tn y Ø25, en malla de 1,0 x 1,0 m de 4m de longitud.	
	Destroza	Swellex en malla de 2,0 x 2,0 m de 3m de longitud.	Swellex en malla de 2,0 x 2,0 m de 4m de longitud.	Resina en malla de 1,5 x 1,5 m de 4m de longitud.	Resina de 11tn y Ø25, en malla de 1,0 x 1,0 m de 4m de longitud.	
Cerchas					Cerchas TH-21 espaciadas 1m.	Cerchas HEB-180 espaciadas 0,75 m, arriostradas con tresillones.
Revestimiento		30 cm de hormigón encofrado HM-30	30 cm de hormigón encofrado HM-30	30 cm de hormigón encofrado HM-30	30 cm de hormigón encofrado HM-30	30 cm de hormigón encofrado HM-25
Contrabóveda						40 cm de hormigón HM-25
Excavación		Avance y Destroza, con pases en Avance de 4m. En el caso de la Destroza los pases serán dos veces los indicados previamente para el Avance.	Avance y Destroza, con pases en Avance de 2,5 a 3,0m. En el caso de la Destroza los pases serán dos veces los indicados previamente para el Avance.	Avance y Destroza, con pases en Avance de 2 a 2,5m. En el caso de la Destroza los pases serán dos veces los indicados previamente para el Avance.	Avance y Destroza, con pases en Avance de 1,5m. En el caso de la Destroza los pases serán dos veces los indicados previamente para el Avance.	Avance y Destroza, con pases en Avance de 0,75 m. En el caso de la Destroza los pases serán dos veces los indicados previamente para el Avance. El avance podrá ser excavado de una sola vez (sección completa), aunque podrá ser necesario, en algunos casos la disposición de machón central, mientras que la destroza se excavará en dos/tres fases. La excavación del Avance se realizará siempre al amparo de un paraguas de micropilotes

Tabla 10: Resumen de sostenimientos y proceso de excavación

Estudio Informativo de la Línea 5 del FMB: Túneles

Identificación				Estado			Resistencia a compresión simple				PLT		Tracción		Abrás. Cerchar		Schimazek			Dureza Cerchar		Velocidad propagación		
Sondeo	Litotipo	Muestra	De	a	W (%)	Dens. Seca	Dens. Aparente	RCS		E	υ	IS ₅₀	RCS _{acta}	RT		Ain	Clase	F	Q	d	Ain	Clase	VL	VT
					m	W (%)	Mg/m ³	Mg/m ³	Mpa	kp/cm ²	Mpa	ad	Mpa	Mpa	kp/cm ²			Mpa	kN/m	%			cm	m/s
SEI-5	Limolita	26	TP-3	14.55	14.85	1.9	2.698	2.749	7.3	74.44	1030.35	0.15												
SEI-5	Limolita	26	TP-5	27.55	28	1	2.618	2.644	5.5	56.08														
SEI-5	Limolita	26	TP-7	32.151	32.5	1.7	2.566	2.61	10.2	104.01													3958	3843
SEI-6	Limolita	26	TP-11	12.05	12.5	2.6	2.619	2.687	10.7	109.11														
SEI-6	Limolita	26	TP-4	22	22.3	1.3	2.65	2.684	9.4	95.85	1623.49	0.16											3243	3532
SEI-7	Limolita	26	TP-2	24.4	24.6	0.8	2.718	2.696	27.9	284.50														
SEI-7	Limolita	26	TP-1	12.7	13.2											3.4	Muy abrasiva				100	Extremadamente resistente		
SEI-8	Limolita	21	TP-1	8.5	9	1.68	2.63	2.68	11.8	120.33			0.91	23.04	43	4.22								
SEI-8	Limolita	21	TP-2	13.8	14.4	0.96	2.66	2.7	12.6	128.48			0.77	24.52										
SEI-8	Limolita	21	TP-3	19.2	19.6		2.61	2.64					0.87	21.18										
SEI-8	Limolita	21	TP-4	24	24.9		2.62	2.64					0.98	24.94	32.5	3.19								
SEI-9	Limolita	21	TP-1	11.4	12	1.48	2.59	2.63	14.8	150.92			0.88	22.15			1.9	Abrasiva				20	Suf. Resistente	
SEI-9	Limolita	21	TP-2	13.5	13.8		2.6	2.64							38.4	3.77								
SEI-9	Limolita	21	TP-3	18.9	19.2		2.68	2.72					1.43	37.81										
SEI-9	Limolita	21	TP-4	24.6	25		2.59	2.63					1.2	27.85										
SEI-10	Limolita	21	TP-1	6.7	7.2	1.9	2.68	2.74	3.51	35.79							0.3	Muy poco abrasiva				20	Suf. Resistente	
SEI-10	Limolita	21	TP-2	11	11.44	1.4	2.71	2.75							29.9	2.93			0.027	18.4	0.00506			
SEI-10	Limolita arenisca	26	TP-3	17.7	18	2.9	2.66	2.72	4.59	46.81	9782	0.31												
SEI-11	Limolita arenisca	9	TP-1	7.8	8.2	1.8	2.57	2.59	4.05	41.30														
SEI-11	Limolita arenisca	9	TP-2	10.85	11.15	1.4	2.62	2.65							22.5	2.21								
SEI-11	Limolita	26	TP-3	19	19.5	2	2.67	2.72	6.53	66.59	7370	0.25												
SEI-12	Limolita	26	TP-1	8.6	9	2.3	2.59	2.65	5.23	53.33														
SEI-12	Limolita	26	TP-2	11.45	11.55	2.2	2.64	2.7	9.17	93.51														
SEI-12	Limolita	26	TP-3	18.7	19	1	2.74	2.76	17.37	177.13	20259	0.23												
SEI-14	Limolita	21	TP-1	7.3	7.8	2.4	2.58	2.64					1.31											
SEI-14	Limolita	21	TP-2	10.4	10.8	1.8	2.62	2.67	12.4	126.45														
SEI-14	Limolita	21	TP-3	16.4	16.8	2.2	2.6	2.66							40.9	4.01								
SEI-14	Limolita	21	TP-4	19.2	19.7	1.7	2.61	2.66																
SEI-15	Arenisca	21	TP-1	12.65	13	0.4	2.54	2.55	20.1	204.96			0.9		117.9	11.56								
SEI-15	Arenisca	21	TP-2	15	15.4	0.6	2.68	2.7															>80	Extremadamente resistente
SEI-15	Limolita	21	TP-3	21.8	22.2	0.6	2.67	2.69							39.4	3.86								
SEI-15	Limolita algo arenosa	21	TP-4	28.2	28.5	1.3	2.66	2.7	7.4	75.46														
SEI2-16	Limolita arenisca (mm)	26	TP-2	15	15.4												3.1	Muy abrasiva						
SEI2-16	Limolita arenisca (mm)	26	TP-3	18.6	19	0.8	2.63	2.65					1.86										4058	
SEI2-16	Limolita arenisca (mm)	26	TP-4	22.3	22.6	1.7	2.57	2.61					1.72		28.8	2.82								
SEI2-16	Limolita arenisca (mm)	26	TP-5	24.7	25.1	1.6	2.6	2.64	6.63	67.61	18388	0.13												
SEI2-17	Alternancia limolita y arenisca	26	TP-2	11.7	12	0.8	2.65	2.67					1.74										3758	

Identificación				Estado			Resistencia a compresión simple				PLT		Tracción		Abras. Cerchar		Schimazek			Dureza Cerchar		Velocidad propagación			
Sondeo	Litotipo	Muestra	De	a	W (%)	Dens. Seca	Dens. Aparente	RCS		E	υ	IS ₅₀	RCS _{acta}	RT		Ain	Clase	F	Q	d	Ain	Clase	VL	VT	
			m	W (%)	Mg/m ³	Mg/m ³	Mpa	kp/cm ²	Mpa	ad	Mpa	Mpa	kp/cm ²	Mpa	kN/m			%	cm	m/s			m/s		
SEI2-17	Limolita negra	26	TP-3	15.6	15.9	1.5	2.6	2.64						1.11		32.6	3.20								
SEI2-17	Alternancia limolita y arenisca	26	TP-4	17.5	17.8	1.7	2.6	2.64														29	Resistente		
SEI2-17	Limolita negra con MO	26	TP-5	21.6	21.8	2.1	2.64	2.69	11.8	120.33															

40 40 33 38 38 21 21 6 6 13 7 10 10 4 4 1 1 1 5 5 4 2

Identificación				Estado			Resistencia a compresión simple				PLT		Tracción		Abras. Cerchar		Schimazek			Dureza Cerchar		Velocidad propagación		
Sondeo	Litotipo	Muestra	De	a	W (%)	Dens. Seca	Dens. Aparente	RCS		E	υ	IS ₅₀	RCS _{acta}	RT		Ain	Clase	F	Q	d	Ain	Clase	VL	VT
			m	W (%)	Mg/m ³	Mg/m ³	Mpa	kp/cm ²	Mpa	ad	Mpa	Mpa	kp/cm ²	Mpa	kN/m			%	cm	m/s			m/s	
Media					1.56	2.63	2.67	10.43	106.33	9742.14	0.21	1.21	25.93	42.59	4.18	2.18		0.03	18.40	0.01	42.25		3754.25	3687.50
Desviación					0.61	0.05	0.05	5.93	60.49	8158.33	0.07	0.38	5.67	27.20	2.67	1.41					38.73		362.94	219.91
CDV					2.55	57.38	58.00	1.76	1.76	1.19	2.94	3.22	4.57	1.57	1.54						1.09		10.34	16.77
Máximo					2.90	2.74	2.76	27.90	284.50	20259.00	0.31	1.86	37.81	117.90	11.56	3.40		0.03	18.40	0.01	100.00		4058.00	3843.00
Mínimo					0.40	2.54	2.55	3.51	35.79	1030.35	0.13	0.77	21.18	22.50	2.21	0.30		0.03	18.40	0.01	20.00		3243.00	3532.00

Tabla 11: Resumen de ensayos en muestras de roca

Sondeo	Descripción	Muestra	Cota cabeza	Prof.	Humedad		Dens. Seca		Dens. Aparente		Granulometría (tamiz (mm))															LLAA			RCS					Corte			Sulfatos					
					w	U	ρ_d	U	ρ_s	U	100	80	63	50	40	31.5	25	20	10	6.3	5	2	1	0.63	0.4	0.2	0.13	0.08	0.06	Wl	Wp	Ip	ρ_d	w	RCS _M	ϵ	RCS ₁₅	Tipo	ϕ	c	SO4	
Nº		Nº	m	De	a	%	%	Mg/m ₃	%	Mg/m ₃	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ₃	%	KPa	%	KPa		°	KPa	mg/kg		
18	18	18	0	18	18	18	11	18	2	18	2	15	15	15	16	1	15	1	18	18	15	18	18	15	15	18	15	15	18	15	17	17	17	4	7	7	7	5	5	5	5	1

Sondeo	Descripción	Muestra	Cota cabeza	Prof.	Humedad		Dens. Seca		Dens. Aparente		Granulometría (tamiz (mm))															LLAA			RCS					Corte			Sulfatos					
					w	U	ρ_d	U	ρ_s	U	100	80	63	50	40	31.5	25	20	10	6.3	5	2	1	0.63	0.4	0.2	0.13	0.08	0.06	Wl	Wp	Ip	ρ_d	w	RCS _M	ϵ	RCS ₁₅	Tipo	ϕ	c	SO4	
Nº		Nº	m	De	a	%	%	Mg/m ₃	%	Mg/m ₃	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ₃	%	KPa	%	KPa		°	KPa	mg/kg			
Promedio						23.4		1.70		2.09		10	10	10	10	9	99	8	96	93	91	88	83	81	78	77	73	67	67	32	22	10	2	28	68	15	75		27	70	77	
Máx						55.4		2.19		2.44		10	10	10	10	9	10	8	100	100	100	100	100	100	100	100	99	96	96	90	51	35	17	2	55	168	27	157		37	156	77
Mín						11.2		1.12		1.73		10	10	10	10	9	92	8	73	58	60	44	31	39	33	18	23	21	13	20	27	18	6	1	13	19	3	26		11	22	77
Desv. Típica						10.2		0.22		0.14						2		8	14	15	19	24	25	26	29	28	26	27	24	6	4	3	0	13	49	8	50		10	52		
Coef. Variación						2.28		7.81		15.01						49		12	7	6	5	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	4	12	2	1	2	2		3	1		

Tabla 12: Resumen de ensayos en muestras de suelo