

ANEJO N°9

Túneles y obras subterráneas

ÍNDICE

1. Introducción	1	6.6 Elementos de sostenimiento	26
2. Antecedentes	1	6.6.1 Cerchas	26
2.1 Antecedentes para la definición de los sostenimientos	2	6.6.2 Bulones	26
2.1.1 Nuevo Túnel ferroviario de Artxanda	4	6.6.3 Hormigón proyectado	27
2.1.2 Proyecto de los túneles de carretera: Ugasko-La Salve, Ugasko-Txorierri y Artxanda	4	6.6.4 Mallazo	27
2.1.3 Proyectos de líneas de Metro en Bilbao	6	6.6.5 Fibras de polipropileno	27
3. Descripción del túnel en mina proyectado	7	7. Emboquilles	27
4. Descripción geológico-geotécnica	8	8. Auscultación	28
4.1 Tramificación geológico-geotécnica	8	9. Revestimiento	31
4.2 Caracterización geológico-geotécnica de los materiales afectados	8	10. Impermeabilización y drenaje	31
4.2.1 Sustrato rocoso: margas, margocalizas y calcarenitas	8		
4.2.2 Sustrato rocoso. Limolitas calcáreas con pasadas areniscosas	9	APÉNDICE Nº9.1: PERFIL LONGITUDINAL TÚNEL EN MINA	
4.2.3 Sustrato rocoso. Calizas urgonianas	9	APÉNDICE Nº9.2: GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES	
4.2.4 Sustrato rocoso. Diabasa	9	APÉNDICE Nº9.3: CRITERIOS DE SOSTENIMIENTO	
4.2.5 Cuaternario. Arcillas y limos	10		
4.2.6 Cuaternario. Rellenos	10		
4.3 Excavabilidad	10		
5. Método constructivo	11		
5.1 Procedimiento genérico	11		
5.2 Excavabilidad	12		
5.2.1 Resistencia a compresión simple y tenacidad	13		
5.2.2 Cerchar	13		
5.2.3 Abrasividad Schimazek	15		
6. Diseño de los sostenimientos del túnel	17		
6.1 Clasificación de Barton basada en el parámetro Q	17		
6.2 Clasificación de Bieniawski basada en el parámetro RMR (Rock Mass Rating)	20		
6.3 Clasificación ETS	21		
6.4 Estimaciones de RMR realizadas	23		
6.5 Sostenimientos de las secciones tipo	25		
6.5.1 Boquillas	25		
6.5.2 Túnel	25		
6.5.3 Caverna	26		
6.5.4 Frentes	26		

1. INTRODUCCIÓN

En el presente anejo se recoge la definición del túnel proyectado en el estudio informativo de la Línea 4 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao.

Los datos geotécnicos de partida se recogen con detalle en el Anejo de Geología y Geotecnia, y se han llevado a cabo en dos campañas geotécnicas sucesivas realizadas por FULCRUM.

En los apartados siguientes se describe la geometría del túnel, se recoge una descripción geotécnica resumida de la traza y se hacen una serie de consideraciones encaminadas a definir el método constructivo. A continuación se exponen los diferentes tipos de sostenimiento basándose en la clasificación geomecánica de Bieniawski y en la propia de ETS. También se analizan y definen los cañones de acceso, con los condicionantes y particularidades existentes para cada uno de ellos, posibles tratamientos especiales y por último se recogen las consideraciones relativas al revestimiento y el drenaje.

La línea incluye seis estaciones, situadas en Deusto-Universidad, Parque, Moyúa (donde se podrá realizar un transbordo con la línea 1 y 2 en la estación existente) Zababuru, Irala y Rekalde. La longitud total de la línea de algo más de seis kilómetros discurre totalmente subterráneos salvo los metros iniciales en la conexión con la Línea 3.

2. ANTECEDENTES

Este anejo tiene por objeto la *ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA 4 DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE BILBAO*. Este estudio parte como base del estudio informativo de la línea 4 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao redactado en abril 2012 por SENER para ETS. En este proyecto el trazado es diferente al estudiado en este estudio informativo, de ahí la necesidad de una actualización en base a proyectos constructivos posteriores y/o estudios informativos parciales.

El Estudio informativo de 2012 sirvió de base para la realización de varios proyectos constructivos:

1. Matiko – Deusto (2018) SENER
2. Deusto - Moyua (2019) SENER
3. Rekalde – Irala (Actualidad) FULCRUM

Gran parte de la información de partida se desarrolla en el anejo nº 4 del presente proyecto donde se describen las propiedades geotécnicas de los materiales afectados. Una característica distintiva del metro de Bilbao es que se desarrolla prácticamente por completo en roca de calidad media-alta por lo que la metodología de aproximación al sostenimiento/revestimiento se ha basado tradicionalmente en el Nuevo Método Austriaco. El amplio histórico (aprox. 1988-actual) de las excavaciones en la zona han permitido fijar las propiedades básicas de los materiales. Se pueden citar algunas referencias bibliográficas de interés además de los proyectos:

- Madinaveitia J.R (1992). “Los túneles en roca del Metro de Bilbao” en Curso sobre túneles urbanos y Suburbanos (CEDEX-MOPT).
- Madinaveitia J.R y Sagaseta C.(1992) Excavaciones a cielo abierto en el Metro de Bilbao en Curso sobre túneles urbanos y Suburbanos (CEDEX-MOPT).
- Varios (1999) “Diez años de Metro en Bilbao”
- Madinaveitia J.R (2000) “Túneles urbanos perforados en roca: El caso del Metro de Bilbao” en Ingeotúneles 3.
- Madinaveitia J.R (2000) “Túneles urbanos perforados en el Metro de Bilbao” en I curso sobre excavación de túneles por voladura y/o rozadora.
- Pacios Ferrero P. y Mota E. (2008) “Excavación de túneles con rozadora. Aplicación en el tramo Aritz-Basauri en la línea 2 de Metro de Bilbao”.

Dado el carácter de Estudio Informativo y las limitaciones que impone un trazado urbano sin prácticamente afloramientos el estudio presenta algunas limitaciones significativas para la justificación de los sostenimientos que se compensan con los antecedentes disponibles.

La estructura del documento es:

- 1.- Revisión de antecedentes en el apartado 2: Se valoran los diferentes antecedentes del área en relación a las necesidades de sostenimiento de túneles ya ejecutados.
- 2.- Descripción geológico-geotécnica del trazado.
- 3.- Descripción y validación del método constructivo incluyendo la excavabilidad con rozadora
- 4.- Clasificaciones geomecánicas: se describen diferentes herramientas de calificación del macizo rocoso. Recomendaciones de sostenimiento y zonificación del macizo rocoso.
- 5.- Posteriormente se describen las actuaciones en las zonas de emboquilles, auscultación, revestimiento e impermeabilización y drenaje

2.1 ANTECEDENTES PARA LA DEFINICIÓN DE LOS SOSTENIMIENTOS

Los antecedentes son los siguientes:

- Nuevo Túnel ferroviario en Artxanda
- Proyecto de Construcción Túneles de Artxanda
- Proyectos de líneas de metro en Bilbao: Líneas 1, 2 y 3.

Todos estos proyectos utilizan la filosofía del nuevo sistema austriaco que ha demostrado su validez en la zona que nos ocupa.

Tal y como se ha descrito en el anejo 2 (Geología y geotecnia), la totalidad de la traza se desarrolla en roca que local y genéricamente se viene denominando “cayuela”. Ya en 1992 se indicaban como propiedades básicas la resistencia a compresión relativamente baja y homogénea (15-50 MPa) y con escasos problemas geotécnicos que se limitaban de acuerdo a esta publicación a:

- Diques rocas ultrabásicas con elevada resistencia (100-120 MPa). Entendemos que en este caso la problemática se debe al notable contraste de resistencia entre el dique y la roca encajante, lo que podía afectar a los rendimientos, desgaste de los útiles de corte e incluso selección del tipo de rozadora (Madinaveitia indica que en estas zonas los equipos tipo Milling parecen funcionar mejor). No obstante, el mayor problema potencial de estos diques es la alteración de la roca encajante que en ocasiones (p.e. zonas con escasa tapada) provoca flujos preferentes en la zona de contacto. En ningún caso entendemos que invalide el sistema de excavación dada su escasa potencia y la abrasividad moderada (carácter básico).
- Planos de debilidad (Roca fracturada y/o milonitizada) asociados a zonas de fractura los citados diques de con la cayuela.

En el proyecto que nos ocupa hay una notable similitud de los datos obtenidos en laboratorio con los datos publicados de las líneas de Metro ya construidas. Se puede apreciar que los valores obtenidos presentan una distribución muy homogénea y agrupada en torno al valor medio con una cierta asimetría debida a los datos de la zona de Artxanda (probablemente debida a un cambio o alternancia litológica que se produciría desde el final de la estación de Deusto (ver al respecto los antecedentes citados en el estudio geológico).

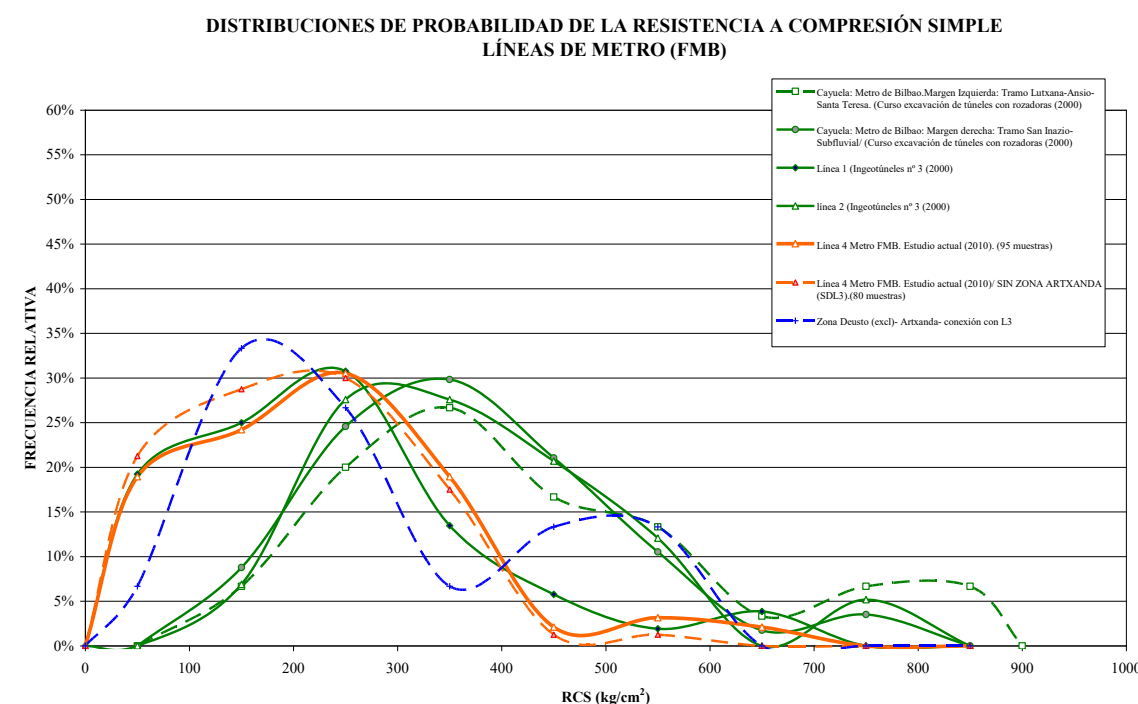


Figura nº1. Distribución de la resistencia a compresión simple en laboratorio para la línea 4 con y sin la zona de Artxanda (testigos de los sondeos SDL-01 y SDL3-02). Comparación con los datos publicados.

En el estudio realizado se ha podido apreciar que los factores que mayor incidencia presentan en la pérdida de calidad del macizo es la existencia de zonas discretas de fractura y en menor medida leves cambios litológicos que repercutirían en la naturaleza y grado de cementación. Ensayos que permiten ilustrar este aspecto son las relaciones entre la velocidad de las ondas P (relación con la humedad) y la relación humedad-RCS (**figuras 2.2. y 2.3**).

El ensayo de velocidad de ondas P es un buen indicativo de la fisuración mientras que la resistencia a compresión simple es un parámetro en el que pueden influir numerosos factores como la orientación entre la carga aplicada y los planos de debilidad. En la **figura 2.2** se muestra la correlación negativa existente entre la velocidad de las ondas P y la humedad mientras que en la **figura 2.3** podemos ver el mismo tipo de relación entre la humedad y la compresión simple (correlación negativa) aunque más difusa.

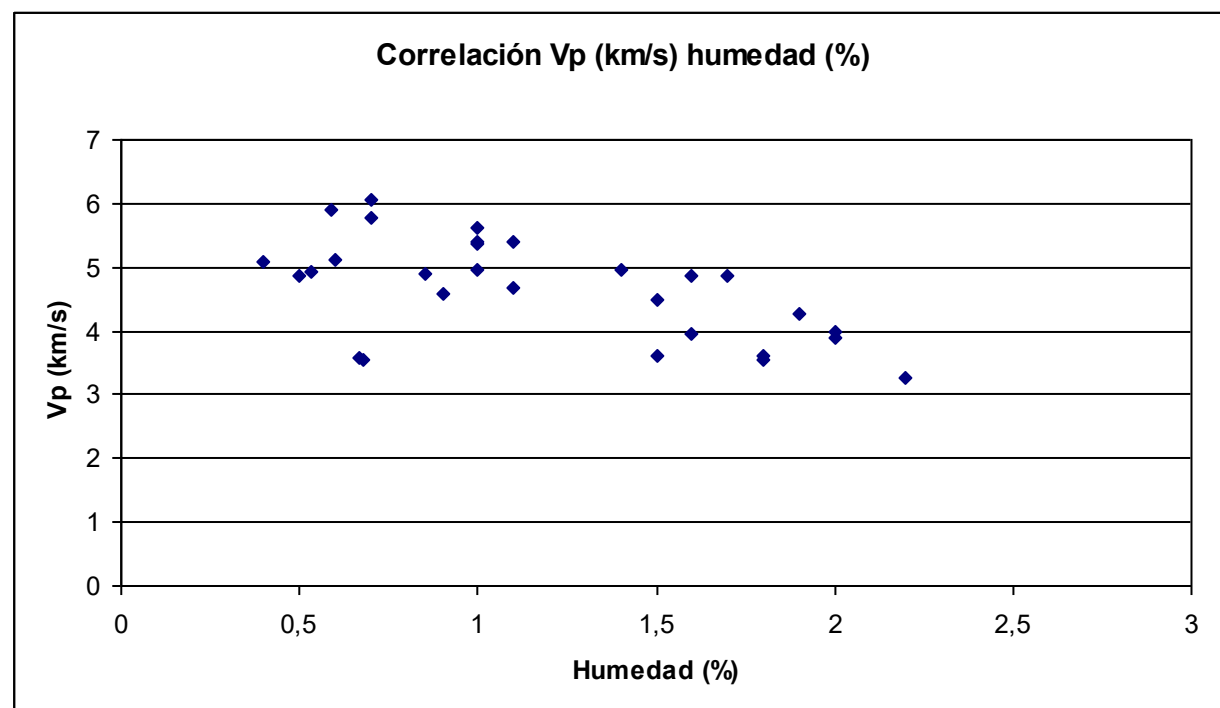


Figura nº2. Correlación Vp-humedad (%)

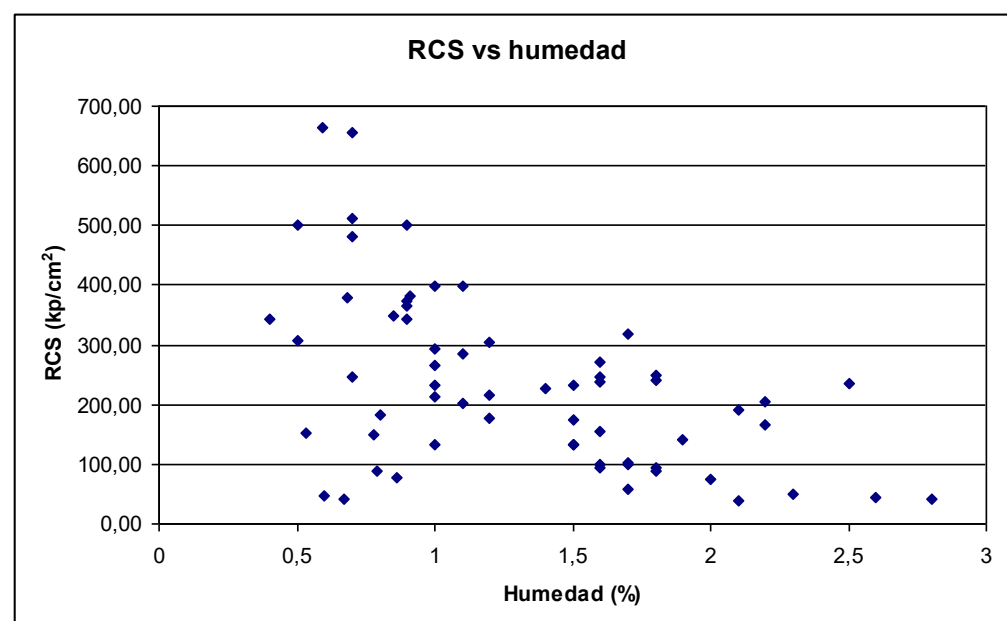


Figura nº3. Relación RCS vs humedad

En una publicación posterior se indicaba la problemática tectónica y concretamente la existencia de tensiones residuales en excavaciones “al hilo”, es decir excavaciones realizadas de forma paralela a la dirección de las capas lo que en este caso supone la directriz regional y por tanto se relacionan con la etapa compresiva a la que se asocia la generación del anticlinal bilbaíno. En el proyecto que nos ocupa las alineaciones preferentes del trazado son en general más favorables ya que la traza discurre desde:

- Rekalde hacia Irala con direcciones W-E para luego (0+800 aprox.) disponerse prácticamente S-N.
- De Irala-Zabalburu (1+500) a Zabalburu-Moyua la traza va en dirección SW-NE.
- De Zabalburu - Moyua al cruce de la Ría la traza discurre en sentido SE-NW (directriz regional). El cruce de la Ría se realiza de forma ortogonal con una lineación SSE-NNW con una lineación que gira suavemente hasta la zona de Deusto-Artxanda donde se dispone aproximadamente de nuevo según la directriz regional.

Por tanto, los tramos a priori más complejos desde el punto de vista estructural (descalce de la estratificación en uno de los hastiales (lado derecho en sentido de avance de p.k.)) serían:

- Subtramo Parque-Deusto hasta el cruce de la Ría.
- Tramo Deusto-Conexión con línea 3 desde la zona de boquilla de los túneles de Artxanda.

No obstante, se debe subrayar la necesidad de disponer de datos estructurales más precisos y completos dado que por ejemplo en el SZMR-01 la discontinuidad principal parece haber girado casi 30° hasta una dirección E-W (pasando de 41°/N-208 a 42°/N-182°).

Analizadas las problemáticas descritas en los antecedentes se valoran las medidas de sostenimiento aplicadas en los proyectos de la zona.

2.1.1 NUEVO TÚNEL FERROVIARIO DE ARTXANDA

Se dispone de la información del “Proyecto constructivo del túnel de Artxanda” (Esteyco 2008) donde se puede obtener una sección tipo del túnel. Se trata de un túnel de vía doble con bóveda en herradura con radio revestido de 3,80 metros (0,30 de revestimiento), en hastiales radio 8,20 hasta 1,49 metros y contrabóveda de radio 20,45 metros.

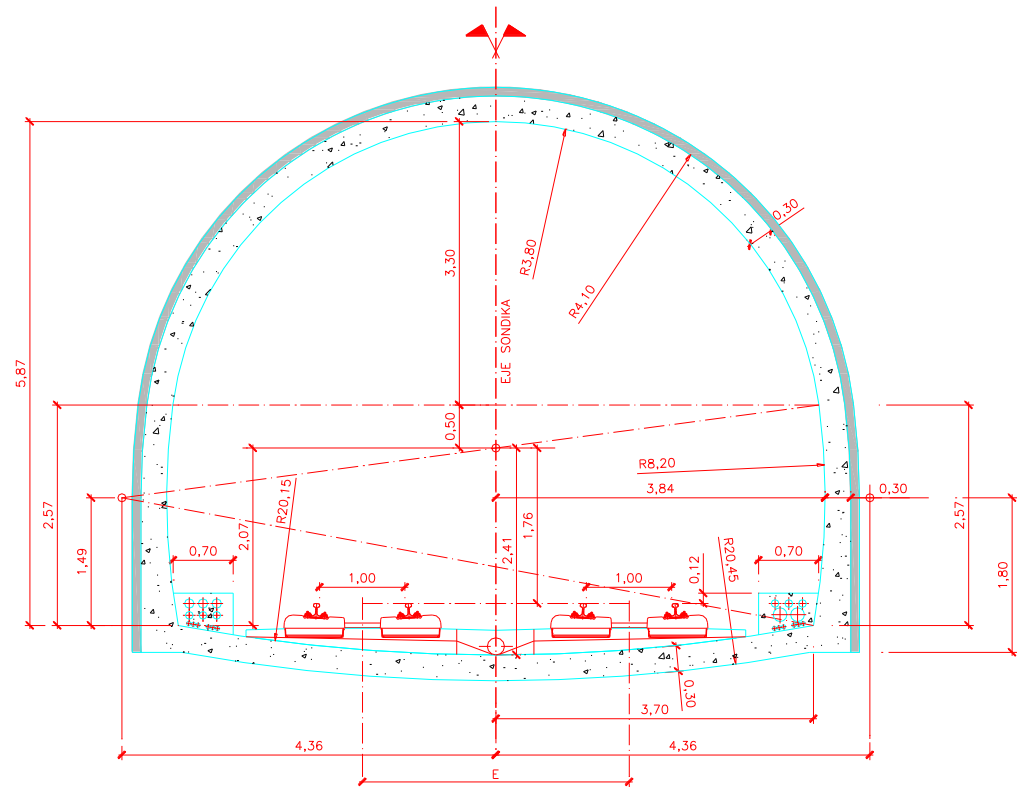


Figura nº4. Sección tipo vía doble. Excavación en recta o radio (R) mayor o igual a 950 (R ≥950)

El nuevo túnel de Artxanda presenta una longitud total de 1876 metros que se complementan con dos galerías peatonales. Cerca de la unión proyectada (≈p.k. 1+812) con la línea 4 conecta a su vez con la galería 1 (longitud de 239 metros) que tiene un uso para evacuación y ventilación del sistema formado por el túnel de la línea Deusto–Lezama junto al nuevo túnel. De esta manera las diferentes opciones de evacuación presentan, de acuerdo a la información contenida en los planos de proyecto, una longitud inferior a los 762 metros.

En cuanto a los diferentes sostenimientos propuestos se establecen según planos seis clases geomecánicas:

Clase	RMR	Bulonado	Gunita	Cerchas	Pase avance (m)	Observaciones
1	>70	Expansión L=3 metros en malla 2X2 metros	5 cm (sellado)	No	4,5	Excavación en tres fases con avance de 5,5 metros (destroza y contrabóveda de 1,36 m)
2	55-70	Expansión L=3 metros en malla 2X2 metros	8 cm	No	3	3 fases: avance 5,5 metros (1,39 m destroza y contrabóveda)
3	45-55	Expansión L=3 metros en malla 1,5X1,5 metros	12 cm: 3 (sellado)+9.	No	2,5	4 fases: avance 5,5 metros (1,49 m destroza (2 fases) y contrabóveda)
4	30-45	Expansión L=3 metros en malla 1,0 (T)X1,5 metros	4 (sellado)+14 (7+7) cm Doble mallazo	TH-21 (1,5 m)	1,8	4 fases: avance 5,5 metros (1,49 m destroza (2) y contrabóveda)
5	20-30	Bulón de resina φ 25 mm L=3 metros en malla 1,0 (T)X1,0 metros	4 (sellado)+14 (7+7) cm Doble mallazo	TH-29 (1,0 m)	1,5	4 fases: avance 5,5 metros (1,51 m destroza (2) y contrabóveda)
6	10-20	Bulón de resina φ 25 mm L=4 metros en malla 1,0 (T)X1,0 metros	Chapa Bernold 5+20+5= 30 centímetros cercha HEB-160 (cada metro)		1,2	4 fases: avance 5,5 metros (1,51 m destroza (2) y contrabóveda)

No se dispone de información adicional (p.e. sondeos o estaciones geomecánicas) respecto a la valoración geotécnica del trazado.

2.1.2 PROYECTO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA: UGASKO-LA SALVE, UGASKO-TXORIERRI Y ARTXANDA

Esta documentación comprende los tomos III y IV del proyecto de construcción de los túneles de Ugasko-La Salve, Ugasko-Txorierri y Artxanda. El proyecto es del año 1998. En el proyecto de construcción (1999) se indica que en la zona existen un gran número de antecedentes. Los más destacados en cuanto a su utilidad geotécnica serían:

- Anejo 2, Geología y Geotecnia, del Proyecto Básico Complementario del Túnel de Artxanda sobre Ugasko. Alternativa 2 FULCRUM, Mayo de 1997, para la Diputación Foral de Bizkaia.
- Este Anejo se basa a su vez en un Estudio Geológico-Geotécnico realizado por GEOCONSULT, S.A., en Marzo de 1996.
- Estudio Geotécnico del Túnel de Artxanda. Dames & Moore Iberia, S.A., 1972, para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas.

- Anejos 3, Geología, Geotecnia y Materiales, y 7, Túneles, del Proyecto de Trazado Corredor La Salve-Ibarrekolanda-Txorierrri (Subtramo Ibarrekolanda-La Salve). TYPESA, 1994, para la Diputación Foral de Bizkaia.
- Anejo Geotécnico del Corredor del Txorierrri. Tramo Enekuri-Derio. IDOM, 1990, para la Diputación Foral de Bizkaia.

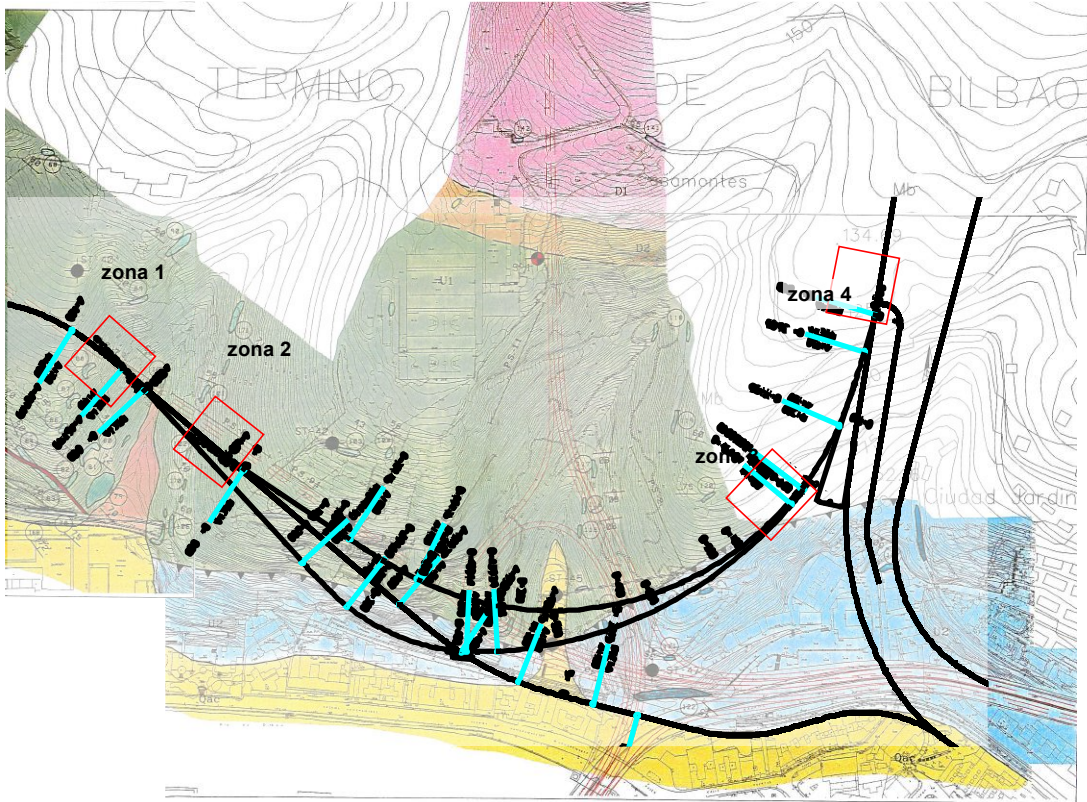


Figura nº5. Planta geológica sintética de la zona (base geológica del proyecto de 1998 (Proyecto de construcción de los túneles de Ugasko-La Salve, Ugasko-Txorierrri y Artxanda (Euroestudios)))

En la siguiente figura se puede apreciar las notables diferencias de esta cartografía con la geológica del EVE (2003). Además de las unidades litológicas y los contactos son fácilmente observables elementos singulares como por ejemplo la definición del cabalgamiento, extensión de los rellenos o el filón de roca volcánica cartografiado cerca de la Universidad.

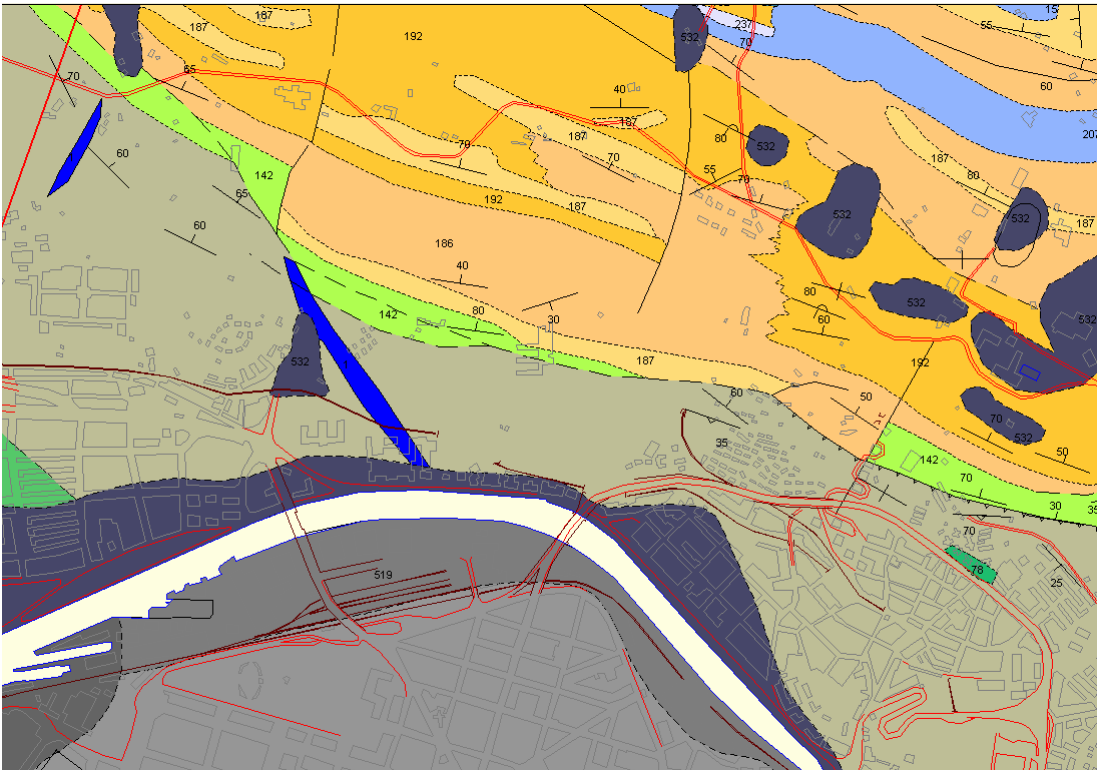


Figura nº6. Planta geológica sintética de la zona (EVE, 2003)

Al respecto del cabalgamiento se debe destacar la geometría compleja que presentan en ocasiones estos elementos por lo que su influencia debe ser estudiada en detalle.

Se establecían en este proyecto tres clases de sostenimiento con una excavación en fases:

- 1.- Avance.
- 2.- Destroza en tres fases: machón central y hastiales.

Los sostenimientos que aplicar serían:

Clase	RMR	Bulonado	Gunita	Cerchas	Pase avance (m)	Observaciones
1	>50	Expansión L=4 metros en malla 3X2,5 metros	8 cm	No	3	
2	40-50	Expansión L=4 metros en malla 2X2 metros	12 cm	No	2	
3	45-55	Expansión L=4 metros en malla 1,5X1,5 metros	18 cm	TH-29 cada 1,5 metros.	1,5	Enfilajes. Tratamiento frente con sellado de 3 cm.

2.1.3 PROYECTOS DE LÍNEAS DE METRO EN BILBAO

La construcción del Ferrocarril Metropolitano en Bilbao supone un histórico de más de 20 años (aprox. desde 1988) a lo largo de los cuales se ha consolidado una metodología constructiva basada en el Nuevo Método Austriaco. Las características de las secciones se mantienen relativamente constantes y se pueden sintetizar en:

- Túnel único de doble vía con una sección de unos 62 m². Se excavaba inicialmente en dos fases con un avance de unos 40 m². Los sostenimientos han venido siendo tradicionalmente mediante bulones colocados en función de la naturaleza de los bloques, hormigón proyectado y muy ocasionalmente cerchas.
- Cavernas: Las estaciones presentan una gran sección de unos 200 m². Sostenimiento similar a sección de túnel. Excavación prevista en varias fase: avance (central + hastiales), destroza (tres fases) y contrabóveda. En general estaban previstas cerchas que se aplican en zonas de baja calidad (fracturación).
- Ramales de vía única: Esta sección es muy poco habitual y en el proyecto que nos ocupa se ha aplicado a los ramales de conexión con la línea 3.

Roca	RMR	LONG. AVANCE	TÚNEL BAJO CALLE	TÚNEL BAJO EDIFICIOS	TÚNEL GRAN COBERTURA
A ₁	>70	3-4 m	* 5 cm horm. proyectado con fibra. * Bulones Swellex locales L = 3 m (3 a 4 piezas/0vance) (1) (2)		* 5 cm horm. proyectado con fibra * Bulones Swellex 2 x 1,5 L = 3 (1) (2) (3)
A ₂	70 – 60	3-4 m	* 8 cm horm. proyectado con fibra. * Bulones Swellex 2 x 1,5 L = 4m. (1) (3) (5) (6)	* 8 cm horm. proyectado con fibra. * Bulones Swellex 2 x 1,5 L = 3 m. (1)(2) (3)	* 8 cm horm. proyect. con fibra. * Bulones Swellex 2 x 1,5 L = 4 m. (3) (5) (6)
AB ₁	60 – 50	2,5 m	* 10 cm horm. proyectado con fibra. * Bulones Swellex, SN, 2 x 1,5 L= 4m (1) (3) (5) (6)	* 10 cm horm. proyectado con fibra. * Bulones SN 2 x 1, 5 L = 4 m. (1) (3) (5) (6)	* 10 cm hormigón proyectado con fibra. * Bulones SN, 2 x 1, 5 L = 4 m. (1) (3) (5) (6)
AB ₂	50 – 40	2,5 m	* 13 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1,5 x 1,5 L = 4 m. (3) (5) (7)	* 13 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1,5 x 1,5 L = 4 m. T = 11 t. (3) (7)	* 13 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1,5 x 1,5 L = 4 m. (3) (5) (7)
B	< 40	1,5 m	* 18 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1x 1,5 L = 4 m. T = 11 t. * Cercha TH-21 a 1 m (3) (7)	* 18 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1x 1,5 L = 4 m. T = 11 t. * Cercha TH-21 a 1 m (3) (7)	* 18 cm horm. proyectado con mallazo # 6. 150. 150 * Bulones SN, 1x 1,5 L = 4 m. * Cercha TH-21 a 1 m (3) (7)

Notas:

- (1) La cuota de fibra es 40 kg/m3 de hormigón proyectado.
- (2) Bulón Swellex se refiere a Swellex Standard.
- (3) En la separación entre bulones “a x b”, “a” es la separación longitudinal y “b” la transversal.
- (4) Bulón SN se refiere a bulón de acero diámetro 25 mm.
- (5) Es posible usar bulón Superswellex en lugar del tipo SN.
- (6) Si hace falta sellado se añadirán otros 3 cm de hormigón proyectado.
- (7) Ya se incluyen en el espesor de hormigón proyectado los 3 cm del sellado, que se efectúa siempre.

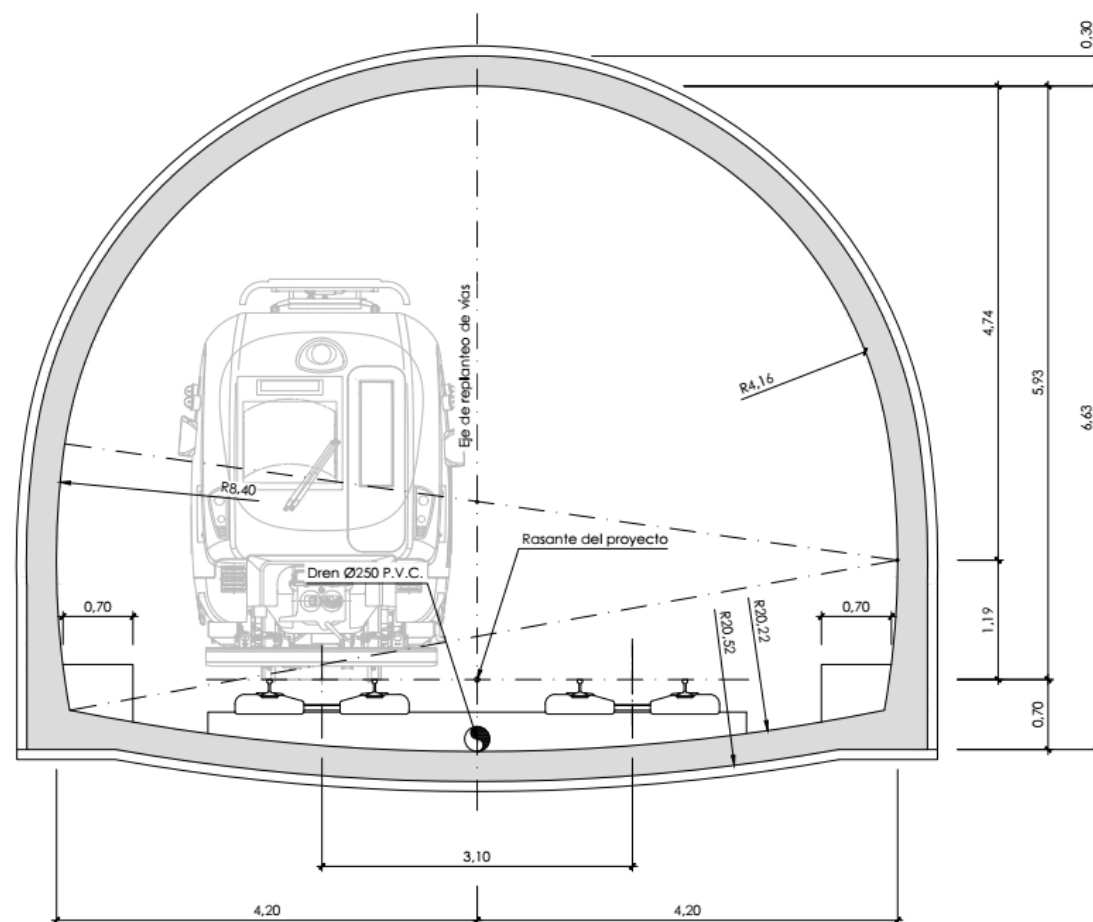
En el caso del metro de Bilbao ha primado el hormigón proyectado ya que el riesgo de formación de bloques es relativamente bajo (ver al respecto Madinaveitia, J.R. (2000)). Los criterios de caracterización aplicando diferentes sistemas de calificación del macizo (ver apartado siguiente para una descripción de los diferentes sistemas de clasificación del macizo) serían:

Aplicación	Túneles			Cavernas	
	Barton	Bieniawski	Louis	Barton	Bieniawski
Hormigón proyectado (cm)	2,5-5	5-10	12-15	--	--
Bulones (φ25) pasivos. Patrón (m) y longitud (m)	1X1 (L=4 m)	1,5X1,5 (L=4 m)	2X2 (L=4 m)	--	--
Bulones (φ25) activos Patrón (m), longitud (m) y carga (T)	--	--	--	1X1 (L=5 m) (15 T)	1X1 (L=6 m) (12 T)
Malla electrosoldada	6X150X150	6X150X150 (en bóveda)	--		
Cerchas				TH-29	TH-21

3. DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL EN MINA PROYECTADO

El tramo proyectado en túnel se inicia en el PK 0+070 y finaliza en el PK 6+120.

Se trata de un túnel en vía doble, con pendiente variable de hasta 45 milésimas, cuyas características geométricas se recogen en la figura siguiente:



Sección tipo túnel en mina (en recta)
Escala: 1/40

Figura nº7. Sección de túnel en mina

La sección geométrica para el túnel proyectado cumple con los gálibos establecidos por METRO BILBAO así como con los condicionantes para la disposición de los equipos de ventilación y otras instalaciones, y lo recogido en la instrucción para seguridad de túneles ferroviarios. La anchura total es de 8.40 m.

Por otra parte, se ha previsto la ejecución de varias cavernas en las zonas de estación y en otros dos puntos, al inicio del trazado, para conexión con futuras líneas. Las estaciones tienen una longitud de 109.4 m para ambas estaciones, con una anchura de 17.70 m.

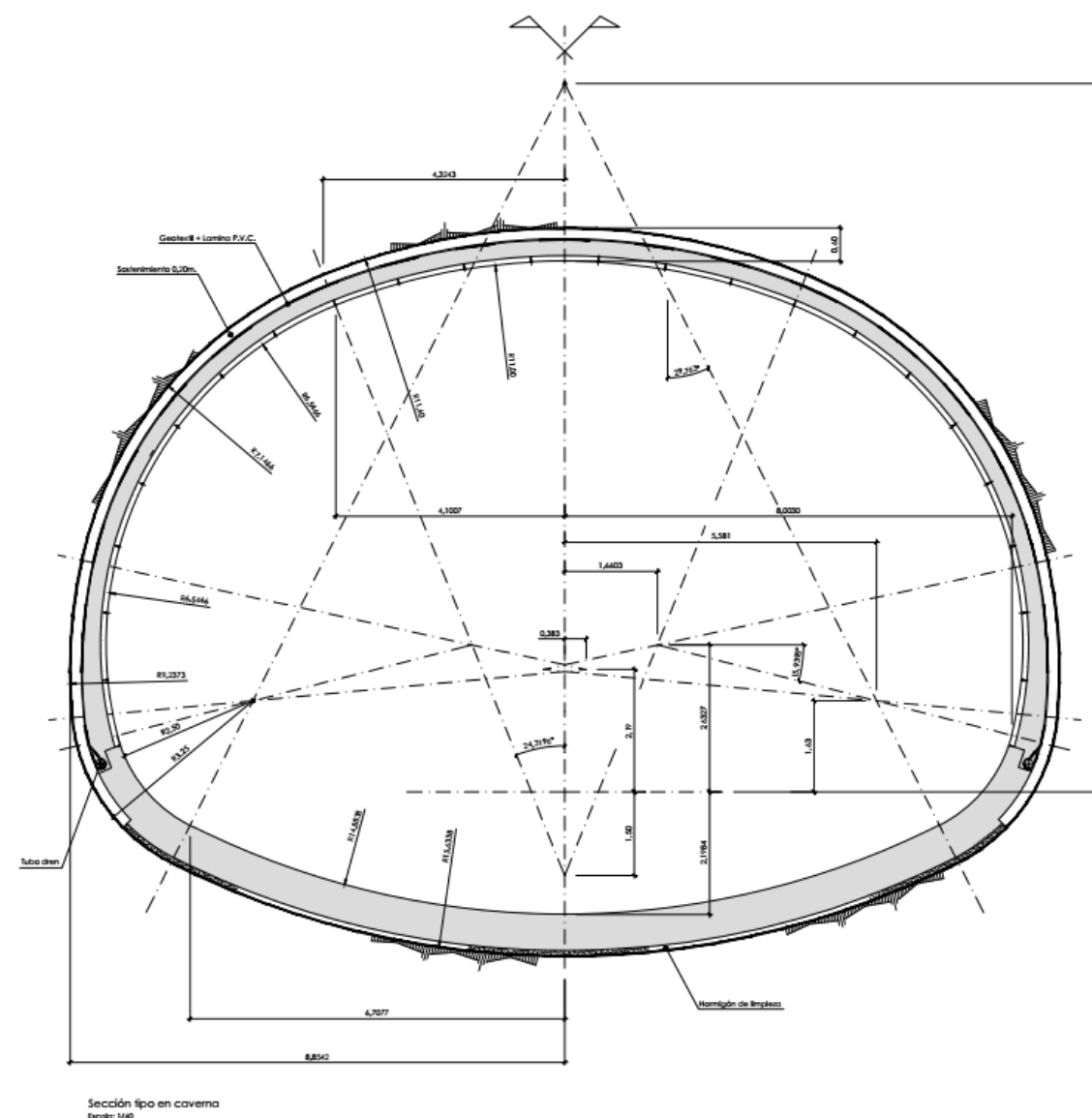


Figura nº8. Sección de caverna

Se ha previsto así mismo la ejecución de varios cañones de acceso por estación así como varias rampas de ataque que conectan con el túnel en línea y dos ascensores uno por estación.

4. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

El túnel en mina proyectado se ejecutará entre el PK 0+120 y el PK 6+220, con una longitud total de 6100 m.

4.1 TRAMIFICACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

El túnel atraviesa un macizo rocoso en el que pueden distinguirse dos litologías:

- Limolitas calcáreas con pasadas areniscosas
- Margas, margocalizas y calcarenitas

Ambas litologías pertenecen al Cretácico Inferior, en concreto al complejo Urgoniano (Aptiense-Albiense) y sus características se describen con detalle en el Anejo 3 Geología y Geotecnia, donde se recogen también los datos aportados por los trabajos de campo y ensayos de laboratorio realizados. Estas dos formaciones son conocidas como “cayuelas de Bilbao” sin diferenciar entre ambas. De los estudios realizados se desprende que su comportamiento geomecánico es muy similar.

Ocasionalmente y de forma puntual pueden aparecer Calizas urgonianas así como diques de rocas subvolcánicas (Diabasas).

También se han detectado en la zona de estudio distintos niveles cuaternarios (rellenos y aluvial) y roca alterada, con incidencia en el diseño de las boquillas.

El inicio de la línea se caracteriza por la presencia de una cobertera de suelos asociada a una vaguada donde se han apoyado las pilas del viaducto de La Salve. El progresivo aumento del espesor de suelos ha llevado a que se adopte en esta estructura una solución pilotada.

Por otro lado, bajo el estribo de la calle Maurice Ravel, la cota de roca sube rápidamente hasta el túnel del antiguo ferrocarril en roca.

La superficie del terreno se mantiene constante hasta el PK 0+360, en el que el túnel va ganando en montera rápidamente. A partir del PK 1+300 la superficie topográfica se mantiene relativamente constante bajo el núcleo urbano de Bilbao. La cota de la rasante del túnel en mina viene dada por las estructuras subterráneas atravesadas a lo largo de toda su longitud, salvo en el caso de la paleovaguada de Rekalde, en la que se evita, en la medida de lo posible, excavaciones en suelos.

En el tramo de túnel en mina se han detectado dos litologías: limolitas calcáreas con pasadas areniscosas y Una alternancia de margas, margocalizas y calcarenitas cuyos contactos se han estimado a partir de la información disponible (la pendiente de los contactos mecánicos no se ha representado ya que no se dispone de ese dato) y a los que se ha asignado un espesor de unos 20 m. Estas dos formaciones son muy similares de visu y ambas son conocidas como las “cayuelas de

Bilbao). Dada la falta de afloramientos a lo largo del trazado se ha estimado la posición del contacto entre ambas formaciones en el PK 1+700, coincidiendo con el paso bajo la ría. Los diferentes sondeos proporcionan información sobre la calidad y el estado del macizo rocoso, pudiendo estimarse un rango de RMR que se ha reflejado por tramos en el perfil geológico-geotécnico longitudinal.

Por otra parte, se ha detectado la existencia de varios diques de diabasa, para el que se ha procedido a una caracterización específica. Al igual que con los contactos mecánicos anteriormente citados, se ha estimado un espesor aproximado con objeto de tenerlo en cuenta en las mediciones, mientras que la orientación y la inclinación se corresponden con la estructura regional.

Sobre el sustrato rocoso ligeramente meteorizado se ha detectado una capa de sustrato rocoso altamente meteorizado de pequeño espesor (limolitas calcáreas).

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES AFECTADOS

En este punto se resumen las consideraciones recogidas en el Anejo 3 Geología y Geotecnia, en el cual se recopilan e interpretan todos los datos disponibles sobre las diferentes unidades geotécnicas presentes a lo largo de la traza del túnel.

Se han llevado a cabo diversos trabajos de campo que han consistido fundamentalmente, en la realización de sondeos mecánicos correspondientes a varias campañas, el listado puede consultarse en el anejo de geología y geotecnia.

A continuación se resumen las características geotécnicas de las unidades afectadas por el trazado, y que como se ha señalado anteriormente se describen con detalle en el Anejo 3 Geología y Geotecnia:

4.2.1 SUSTRATO ROCOSO: MARGAS, MARGOCALIZAS Y CALCARENITAS

Desde el inicio de la línea hasta el cruce de la ría el túnel en mina será excavado en este tipo de materiales. Sus principales características desde el punto de vista de la ejecución del túnel son las siguientes:

R.C.S.	27.37 MPa
Resistencia a tracción	5.46 MPa
Módulo de deformación	36.000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.31
Densidad aparente	26.5 kN/m3

En cuanto a la rozabilidad, los parámetros de los que se dispone datos son los siguientes:

Abrasividad Cerchar	1.73
---------------------	------

4.2.2 SUSTRATO ROCOSO. LIMOLITAS CALCÁREAS CON PASADAS ARENISCOSAS

Es la unidad mayoritaria a lo largo del trazado y únicamente es interrumpida por la aparición de un paquete de calizas (en una zona de cañón de acceso) y de tres diques de diabasa de escaso espesor. Aparecen entre el cruce de la ría hasta el final del trazado.

Se diferencian dos subniveles en función del grado de meteorización:

- Altamente meteorizadas: Generalmente son de color marrón y pueden describirse como material con aspecto y comportamiento de suelo arcilloso con proporción variable de limos. En este subnivel quedan englobadas las limolitas completamente meteorizadas. A partir de los golpes obtenidos en los ensayos SPT, se clasifican como materiales muy compactos a duros.
- Ligeramente meteorizadas: Presentan coloraciones grises oscuras. Ocasionalmente se ha observado alguna pasada areniscosa típica de esta Formación. En este nivel se engloban también los materiales testificados como sanos y ocasionalmente algunas franjas bastante meteorizadas. Por lo general, la calidad de la roca es buena, los valores de resistencia a compresión simple se encuentran mayoritariamente en el rango de 10 a 30 MPa y a la vista de los ensayos se trata de materiales poco abrasivos y de rozabilidad muy buena.

Desde el punto de vista geotécnico sus propiedades son las siguientes:

R.C.S. (MPa)	
R.C.S.	22.49 MPa
Resistencia a tracción	5.95 MPa
Módulo de deformación	14.500 MPa
Coefficiente de Poisson	0.22
Densidad aparente	26.9 kN/m3

Respecto a la resistencia las medias son las siguientes:

Abrasividad Cerchar	0.82
Dureza Cerchar	156.21
Ischimazeck	0.27
Contenido eq. en Q	24.90%

4.2.3 SUSTRATO ROCOSO. CALIZAS URGONIANAS

Puesto que la mayor parte del trazado discurre por zona urbana, no ha sido posible observar en superficie y a lo largo de la traza estos materiales. Esta unidad se ha detectado únicamente en varios de los sondeos realizados en el entorno de la vaguada de Rekalde. Se trata de una barra caliza que es atravesada en su muro de forma longitudinal.

Se trata calizas de color gris generalmente masivas con abundante presencia de fósiles que son típicos del Complejo Urgoniano que está englobado dentro del Cretácico Inferior.

Se presentan ligeramente meteorizadas. La calidad en los sondeos es excelente, y según los ensayos de laboratorio se trata de rocas duras (resistencia a compresión simple en el rango 60-110 MPa) y muy poco abrasivas.

Las calizas presentan una importante karstificación que afecta a un 20% de los sondeos en este material, bien con ausencia de material o bien por la existencia de materiales arcillosos.

En el caso de las calizas las propiedades relevantes son las siguientes:

R.C.S. (MPa)	
R.C.S.	49.28 MPa
Resistencia a tracción	14.41 MPa
Módulo de deformación	92.000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.21
Densidad aparente	27.0 kN/m3

Y la rozabilidad viene dada por los siguientes parámetros:

Abrasividad Cerchar	1.00
Dureza Cerchar	160.00
Ischimazeck	0.05
Contenido eq. en Q	13.61%

4.2.4 SUSTRATO ROCOSO. DIABASA

A lo largo del trazado únicamente se ha detectado en unos de los sondeos, en concreto en el S-3 realizado por UTE Pagasarri. Cartográficamente aparecen tres filones en el desmonte de la A-8. Es posible que a lo largo de la traza aparezca alguna franja más de este tipo de materiales ya que son típicos de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Las diabasas son rocas filonianas y pueden presentar espesores variables en cuanto a su meteorización. En concreto, en el sondeo S-3 presenta una capa de alteración de 16,90 m pasando a continuación a aparecer un paquete de aproximadamente 4m de diabasa ligeramente meteorizada. Hay que tener en cuenta que estos materiales presentan generalmente buzamientos regionales de aproximadamente 70-80° y por tanto al “cortarlos” aparecerá de nuevo la roca encajante, en este caso las lutitas calcáreas.

Como se ha comentado anteriormente existe un primer subnivel de diabasa completamente a bastante meteorizada de aproximadamente 17 m de espesor que se comporta como un suelo arenoso de color amarillento con indicios de grava, denso. A continuación aparece la diabasa ligeramente meteorizada, descrita como roca de color gris blanda a bastante dura que presenta numerosas fracturas (calidad muy mala – mala).

Los ensayos realizados sobre este tipo de roca permiten delimitar las siguientes propiedades:

Abrasividad Cerchar	2.16
Dureza Cerchar	240
Resistencia a tracción	9.62

El resumen para las rocas atravesadas será el siguiente:

Unidad	RCS (Mpa)	M. Young (Mpa)	Coef. Poisson	Abrasividad Cerchar	Dureza Cerchar	Resistencia Tracción (Mpa)	Indice Schimazeck
Margas y Margocalizas	27,37	36.000	0,31	1,73		5,46	
Lutitas calcáreas	22,49	14.500	0,22	0,82	156,21	5,95	0,27
Calizas Urganianas	49,28	92.000	0,21	1	160	14,41	0,05
Diabasas				2,16	240	9,62	

Parámetros de las unidades de roca

4.2.5 CUATERNARIO. ARCILLAS Y LIMOS

Se han detectado tres niveles fundamentales dentro del conjunto aluvial, de arriba abajo son los siguientes:

4.2.5.1 ARCILLAS MARRONES

Las arcillas y limos son de color marrón con un origen aluvial. Teniendo en cuenta los ensayos SPT que se han llevado a cabo en los sondeos, se trata de materiales medianamente compactos a duros.

Se detectan en todos los sondeos realizados en esta campaña, con un desarrollo mayor en la vaguada de Rekalde.

4.2.5.2 ARCILLAS GRISES

Habitualmente definidos como limos grises presentan baja plasticidad

4.2.5.3 GRAVAS

El tramo más profundo queda representado por gravas arcillosas en la que los cantos en ocasiones se encuentran alterados.

4.2.6 CUATERNARIO. RELLENOS

Se trata principalmente de materiales arcillosos y/ limosos de color marrón entre los cuales existen paquetes con un mayor predominio de material granular. Su compacidad/densidad es muy variable.

Puesto que el trazado discurre en zona urbana, los rellenos se han detectado en la totalidad de los trabajos realizados. Los mayores espesores se han encontrado en la zona del parque Eskurtze con potencias de hasta 8 m en el sondeo SL4-3 y en el sondeo SL4-1 en el antiguo acceso a Bilbao con 7.70 m.

4.3 EXCAVABILIDAD

Por las características de los materiales rocosos a atravesar, la excavación podrá llevarse a cabo mediante métodos mecánicos, como la rozadora.

Como puede comprobarse en la figura siguiente, teniendo en cuenta los rangos de calidad de la roca (mediana-buena) y de resistencia a compresión simple (según los resultados de los ensayos de laboratorio, las limolitas calcáreas (se toma por este nombre las dos unidades denominadas comúnmente cayuelas, es decir, las limolitas calcáreas con pasadas areniscosas y las margas y margocalizas con calcarenitas) se encuentran en el rango 20 – 60 MPa de rocas de resistencia media y las calizas en el rango 40 – 120 de rocas de resistencia alta), nos encontramos en las zonas C y D, excavables con rozadoras de más de 50 t.

En las zonas más milonitizadas o de peor calidad, se estima que este método de excavación también será aplicable.

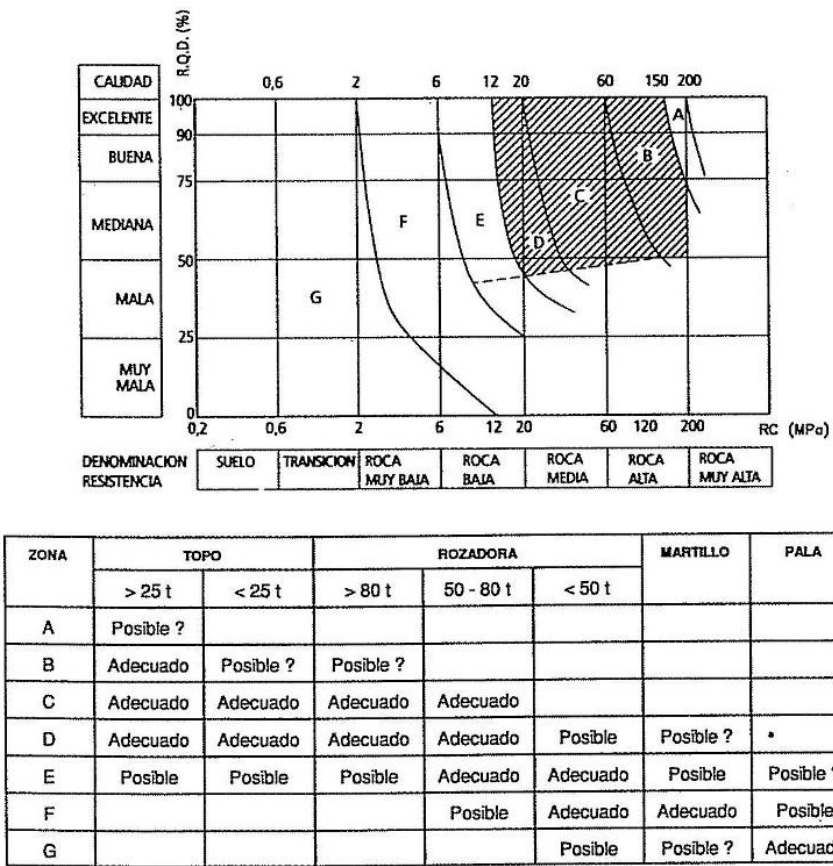


Figura nº9. Clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad mecánica en túneles (Romana, M., 1994)

Por otra parte, las características (dimensiones) del túnel proyectado también hacen recomendable el empleo de rozadora, ya que ésta es una máquina de ataque puntual y cuerpo bajo y compacto que se puede manejar sin problemas en espacios reducidos. Además, el ciclo de trabajo es más corto que en otros métodos (no hay voladura ni fase de ventilación de los gases de la explosión) y la excavación y sostenimiento son más compatibles que en otros casos (por ejemplo con tuneladoras o voladuras). Además, la excavación es muy limpia, apenas hay sobreexcavación y se minimizan los daños al macizo en las paredes de la excavación. Son máquinas que pueden trabajar en gran variedad de terrenos, por lo que la posibilidad de que aparezcan zonas de RMR bajo en tramos puntuales del túnel queda cubierta con este método, como se ha expuesto anteriormente.

Los materiales rocosos presentes en la traza del túnel presentan, según los ensayos de laboratorio realizados, unas características de rozabilidad y abrasividad adecuadas para el empleo de rozadora:

MATERIAL ROCOSO	ASPECTO	VALOR MEDIO ENSAYOS	VALORACIÓN
LIMOLITAS	ROZABILIDAD	FSchimazek = 0.27	ROZABILIDAD MUY BUENA
	ABRASIVIDAD	ICerchar = 1.03	MUY POCO ABRASIVOS
CALIZAS	ROZABILIDAD	FSchimazek = 0,05	ROZABILIDAD MUY BUENA
	ABRASIVIDAD	ICerchar = 1.08	MUY POCO ABRASIVOS

A lo largo de la traza del túnel se han detectado dos litologías, limolitas y calizas, predominando las primeras ya que se estima que aparecerán en el 70-75% del mismo mientras que el tramo de calizas será un 25%. No obstante, como se ha expuesto anteriormente, la litología caliza es más dura con resistencias a compresión simple de la roca matriz del orden de 50 MPa, lo que condicionará la elección del tipo de rozadora (peso y potencia de corte). Otro aspecto que también habrá que tener en cuenta serán las dimensiones de la excavación a realizar (geometría de la sección tipo de túnel, cota de avance, apartaderos proyectados). La experiencia en obras realizadas en litologías de similares características hace más recomendable el uso de rozadoras por encima de las 100t. No obstante, la elección del modelo y características de la rozadora quedarán de parte del contratista, quien tendrá en cuenta además otros criterios como la eficacia, disponibilidad, etc.

5. MÉTODO CONSTRUCTIVO

5.1 PROCEDIMIENTO GENÉRICO

El denominado Nuevo Método Austriaco (NMA ó NATM) consiste en colocar el sostenimiento necesario para la estabilización de la cavidad. Al NMA se le describe muchas veces como una filosofía, tal vez para señalar que carece de una metodología definida. En realidad se trata de un método, sin reglas fijas, en el que se coloca un sostenimiento basado en la experiencia o en las clasificaciones geomecánicas. El comportamiento de este sostenimiento se controla mediante la toma de medidas de deformaciones para, en función de la evolución de éstas, certificar la validez del sostenimiento colocado o, por el contrario, proceder a su refuerzo.

Su aplicación práctica consiste en la aplicación inmediata de un sostenimiento flexible (por ello el NMA va indisolublemente ligado al hormigón proyectado hasta el punto de llamarle, incluso, método del hormigón proyectado) que se opone a la deformación de la sección hasta su estabilización, lo cual redundará en una optimización de los elementos de sostenimiento.

La gran ventaja del método y principal filosofía del método redundan precisamente en la consecución de la estabilización de la sección con la suficiente antelación como para evitar que la relajación de tensiones y descompresión del macizo desencadene problemas en la sección excavada cuya paliación resulta mucho más difícil una vez se han desencadenado. De este modo se intenta conseguir un equilibrio tensional entre el macizo y el sostenimiento, persiguiéndose un carácter autoportante del propio conjunto macizo-sostenimiento.

Lo atractivo del método así como el desarrollo de las clasificaciones geomecánicas, han contribuido a la popularidad y extraordinaria difusión del método que se utiliza en una extensa gama de materiales que van desde los suelos hasta las rocas duras. No obstante, no se debe considerar el empleo de este método en suelos, ya que en general va unido al empleo de grandes espesores de gunita y a un aumento y reducción del área de las secciones de excavación, confiando ya no en el equilibrio macizo-sostenimiento, sino puramente en la contención con grandes espesores de hormigón proyectado. Esta circunstancia ha llevado a relevantes fracasos constructivos, muy conocidos algunos como el caso de diversos túneles metropolitanos en suelos, por lo que actualmente está claramente desaconsejado en suelos.

Aunque no sea más que como un recordatorio, se debe señalar también que en sus orígenes, la Escuela Austriaca, de donde procede (Müller, Von Rabcewicz) fijaron una serie de condicionantes que deberían cumplirse para poder hablar propiamente de NMA. En efecto, el NMA se diseña para los grandes túneles alpinos, de gran profundidad y materiales homogéneos. Además, alguna de sus premisas (formas redondeadas, excavación a sección entera, cierre del sostenimiento en toda la sección) están muy lejos de cumplirse en muchos túneles. Sin embargo, lo sencillo de los conceptos así como su flexibilidad y adaptabilidad a muy diferentes circunstancias, justifican su utilización en otros casos diferentes a los previstos en su origen. En el caso concreto de la ciudad de Bilbao y su

entorno, se cuenta con una amplia experiencia en la aplicación de este método para la ejecución de numerosos túneles (destacando los correspondientes al metro), por lo que está contrastada la eficacia del mismo y su posibilidad de aplicación para los materiales y características del túnel proyectado.

La correcta aplicación del método exige una información directa y fiable del frente mediante el examen geológico de la excavación y el control permanente de la auscultación, que proporciona datos precisos sobre el comportamiento de los sostenimientos aplicados.

5.2 EXCAVABILIDAD

En este capítulo es interesante citar algunas publicaciones sobre la excavación mecánica de túneles, aplicación de máquinas de ataque puntual y específicamente sobre la utilización de las rozadoras en los proyectos del Metro de Bilbao:

- Cornejo L. (1985): “Las máquinas rozadoras en túneles y minas”.
- Cornejo L. (1988): “Excavación mecánica de túneles”.
- Oyanguren Ramirez P. y Cornejo L (1988) “La importancia de los ensayos en la adecuada elección de las máquinas de ataque puntual como método de excavación”.
- Varios (1996) “Manual de túneles y obras subterráneas”.
- (1989) “Rock abrasiveness testing for tunneling”, International journal of rock mechanics and mining sciences.
- Norma para el Test de abrasividad Cerchar NF-P94-430-1.
- Norma para el Test de dureza Cerchar: XP P94-412
- Gehring K.H (2000) “Excavación mecánica de túneles con rozadoras, campos y modos de aplicación”.
- Madinaveitia J.R (2000) “Túneles urbanos perforados en el Metro de Bilbao” en I curso sobre excavación de túneles por voladura y/o rozadora.
- Pacios Ferrero P. y Mota E. (2008) “Excavación de túneles con rozadora. Aplicación en el tramo Aritz-Basauri en la línea 2 de Metro de Bilbao”.

Las tres primeras publicaciones (Cornejo L. et al. 1985, 1988) resultan poco vigentes para los equipos actuales pero nos permiten situarnos en el contexto de proyecto de los primeros tramos del metro de Bilbao que han aportado interesantes conclusiones sobre la validez de los equipos de rozado en el sustrato de Bilbao. Las normativas de abrasividad permiten abordar el estudio previo de este parámetro y su controvertida influencia en los rendimientos de los diferentes equipos. Por último las referencias de Madinaveitia J. R. (2000) y Pacios P. (2008) aportan datos reales del funcionamiento de diferentes tipos de equipos y la evolución de los mismos.

Podemos concluir que las obras del Metro de Bilbao se ejecutan mediante Rozadoras basándose en las características de los materiales y la naturaleza de los proyectos (entendiendo como tal el entorno donde se ejecuta y las características de los proyectos en cuanto a tramificación y longitudes asignadas a cada empresa constructora). También podemos establecer que los rendimientos son muy heterogéneos influyendo aspectos muy variados que van desde las características del equipo (destacando el peso, pero también el tipo de cabeza de corte pero también la fiabilidad y elementos auxiliares), operador y las características del sustrato.

A nivel de Estudio Informativo nos centraremos en las características de los materiales y trataremos de contrastarlas con las de otros tramos ya ejecutados para de esta manera abordar en fases posteriores de proyecto la selección de equipos, cabeza de corte, estimación de desgaste, etc. con las máximas garantías.

Con respecto a los resultados obtenidos en el estudio se deben citar los siguientes ensayos de laboratorio realizados:

Sondeo	Cotas relativas	Observaciones ensayos complementarios	Observaciones material	Ensayos
S-P-03	15,9-16,2	1,42	Lutita calcárea de tonalidad negruzca	RCS: 177,05 kp/cm ²
S-R-02	15,0-15,4	1,45	Lutita calcárea de tonalidad negruzca	RCS: 177,05 kp/cm ² RT:64,16 kp/cm ²
SDL3-2	16,2-16,5	1,73	Lutita de tacto arenoso. Tonalidad grisácea oscura	
SZMR-01	22,8-23,3	1,13	Limolitas calcáreas de color gris oscuro con pasadas areniscosas. Diseminaciones de calcopirita	
SPD-2	29,6-30,0	1,07	Limolita calcárea con pasadas areniscosas	RCS: 133,65 kp/cm ²
SPD-1	22,2-22,8	1,06	Limolita calcárea con pasadas areniscosas	RCS: 246,26 kp/cm ²

Tres ensayos Schimazek

Sondeo	Cotas	Observaciones ensayos	Observaciones material (sondeo)	Tramo
S-R-I-02	38,9-39,5 metros	R=2,72 g/cm ³ RCS=132,08 kp/cm ²	Limolita calcárea	Rekalde-Irala
S-P-D-02	25,2-25,6 metros	RCS=133-202 kp/cm ²	Lutita	Parque-Deusto
S-D-L3-02	30,6-31,2 metros	RCS≈400-500 kp/cm ²	Limolita calcárea	Deusto-L3 (zona Artxanda)

Además se dispone de algunos ensayos petrográficos:

Muestra	Observaciones petrográficas	Observaciones ensayos
SRI-2 (tramo Rekalde-Irala) 23,9 metros	Argilita-Limolita con fino bandeo de material arcilloso. Granos dispersos de tipo detrítico (0,02 mm (limo)). Presencia significativa de opacos (cristales de pirita de hasta 0,5 mm)	$\square=2,7 \text{ T/m}^3$ RCS: 99,6 kp/cm ²
SZMR-01 (tramo Zababuru-Moyua) 14,4 metros.	Limolita con predominio de minerales de la arcilla (illita). Granos detríticos aislados (0,04-0,12 mm (limo grueso-arena)) que corresponden a granos de cuarzo y bioclastos. Opacos de hasta 0,5 mm de diámetro.	$\square=2,71 \text{ T/m}^3$ RCS: 284,32 kp/cm ²
SDL-3-2 (tramo Deusto-Artxanda conexión L3) (9,8 metros)	Limolita con bandeo textural (bandas de arcillas (illitas) con calcita micrítica), cristales de pirita de 0,2-0,5 mm	$\square=2,69 \text{ T/m}^3$ RCS: 264,26 kp/cm ²

No obstante, uno de los aspectos que se consideran críticos y que Madinaveitia J.R. fue analizando en las sucesivas publicaciones es la elevada resistencia a tracción incorporada a la tenacidad (ver siguiente apartado). A continuación se tratan los, en ocasiones, controvertidos, valores de abrasividad a partir de los ensayos más habituales: Cerchar basado en una filosofía de medida directa y Schimazek como valor indirecto asociado a una escala mineralógica. Como último punto se han elaborado unas conclusiones en las que se incorporan las valoraciones realizadas sobre el rendimiento de equipos en las líneas 1 y 2.

5.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y TENACIDAD

La tenacidad se define como:

$$Ti = \frac{RC^2}{2 \cdot E} \cdot 100$$

Donde:

- RC= resistencia a compresión simple en MPa.
- E= Módulo de elasticidad en GPa.

Otros autores utilizan en sus expresiones un cociente entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Por ejemplo, Gehring (1989) indica:

$$Ls = \frac{K \cdot N}{RCS}$$

Donde:

- Ls= Rendimiento de rozado en m³/h.
- N= Potencia de la cabeza de corte en KW.
- RCS= resistencia a compresión simple en MPa.
- K= Coeficiente de tenacidad que depende de la relación entre la resistencia a compresión y tracción.

Se indica que dicho coeficiente puede variar:

- 6-7 rocas dúctiles.
- 7-9 Rocas de tipo medio.
- >9 para rocas frágiles y por tanto fáciles de cortar.

5.2.2 CERCHAR

De una forma rigurosa el ensayo Cerchar para calificar la rozabilidad de una roca se compone de la medida de la abrasividad (ICA) y de la resistencia Cerchar (ICD):

$$I_A = IC_D \cdot IC_A$$

No obstante, en la mayor parte de las recomendaciones se cita casi de forma exclusiva el test de abrasividad que consiste en una medida directa del desgaste de un útil de acero normalizado. Esta medida se ha correlacionado con la resistencia a compresión simple y la abrasividad con ligeras modificaciones sobre el material normalizado se ha correlacionado con bastante precisión con el consumo de picas.

5.2.2.1 ABRASIVIDAD CERCHAR

En cuanto a la abrasividad se han establecido:

- Fase estudio de alternativas: en los dos ensayos realizados (ensayo tipo Cerchar) valores de 1,42-1,45 (que respectivamente corresponden a los sondeos S-P-03 y S-R-02) que indicarían que se trataría de rocas de baja abrasividad (nivel 2 de la clasificación Cerchar para índices inferiores a 2,5).
- Fase Estudio informativo: Se han obtenido valores de 1,06 a 1,73 que resultan por tanto los extremos del rango finalmente obtenido. También se han realizado dos ensayos de dureza Cerchar.

Resultados de ensayos de abrasividad:

Sondeo	Cotas relativas	Valor obtenido Abrasividad (NF P94-430-1:2000)	Dureza Cerchar XP P94-412: 2001	Observaciones
S-P-03	13,1-13,5	1,42		$\square=2,68 \text{ T/m}^3$ RCS: 177,05 kp/cm ²
S-R-02	15,0-15,4	1,45		RCS: 177,05 kp/cm ² RT:64,16 kp/cm ²
SDL3-2	16,2-16,5	1,73		
SZMR-01	22,8-23,3	1,13		
SPD-2	29,6-30,0	1,07	13,05 (11,76-16,53)	RCS: 133,65 kp/cm ²
SPD-1	22,2-22,8	1,06	16,05 (11,76-18,52)	RCS: 246,26 kp/cm ²

A continuación, se muestra una tabla con los grado habitualmente considerados en la valoración de la abrasividad Cerchar:

Clasificación	Índice Cerchar	Tipo de roca	Observaciones estudio
Muy poco abrasiva	>1,2		Valores obtenido en el estudio 1,06-1,07 (SPD)-1,13 (SZMR) 1,42-1,73 (Parque-conexión con línea 3 y Rekalde)
Poco abrasiva	1,2-2,5	Arenisca Portland	
Media	2,5-3,5	Gneis	
Moderada	3,5-4,0	Areniscas	
Abrasiva	4,0-4,25	Granito/ Gneiss/ Esquistos/ Piroxenitas/ areniscas	
Altamente abrasiva	4,25-4,5	Anfibolita/ Granito	
Extremadamente abrasiva	>4,5	Gneis/pegmatita/ Granito	

Johnson (1986) obtuvo una correlación entre el consumo de picas (picas/m³) y el coeficiente de abrasividad. Gehring K.H (2000) indica también una correlación entre el consumo de picas, la abrasividad y la resistencia a compresión simple que evidencia que para un índice de abrasividad superior a 2 se produce una notable influencia de la abrasividad (correlación no lineal) que perdería significación a medida que aumenta la resistencia a compresión simple. Para los valores obtenidos en la zona se tendrían valores en inferior a 0,5 picas/m³ según el gráfico de Jonson que no tiene en cuenta la resistencia a compresión simple y de aproximadamente 0,01 picas/m³ en banco para el ábaco de Gehring. Otros autores (Ruehl et al. (2006)) parecen haber establecido la influencia de las condiciones tensionales en los resultados del ensayo de abrasividad:

$CAI = 0,1 \cdot \sigma + 1,0$ (para un tipo determinado de arenisca)

5.2.2.2 DUREZA CERCHAR

Con respecto a la dureza Cerchar se trata de una parte del ensayo menos frecuente al recurrirse habitualmente a correlaciones con la resistencia a compresión simple. Los valores de referencia oscilan entre 0 (p.e. carbón) y más de 200 (rocas extremadamente duras). Se indica una relación aproximada de:

$RCS = 4,5 \cdot IC_D \text{ (1987)}$

Resultados de ensayos de dureza Cerchar (XP P94-412: 2001):

Tipo de roca	Dureza Cerchar	Valores obtenidos	Observaciones
Blanda	0-20	13,05 (SPD-02)-16,05 (SPD-01)	SPD-02 (RCS=133,65 kp/cm ²)/ SPD-01 (246,26 kp/cm ²)
Medianamente blanda	21-40		
Dura	41-80		
Muy dura	81-120		
Extremadamente dura	>120		

En nuestro caso y con los datos disponibles se podría proponer una correlación de la RCS:

$RCS = 13 \cdot IC_D \text{ (2 datos)}$

Integrando los dos factores (abrasividad y dureza) se obtiene un índice de excavabilidad que debe ser valorado en el contexto de cada túnel (tamaño de la sección o frente considerado) y de acuerdo a los medios disponibles (área donde se realice el proyecto y posibles avances tecnológicos con respecto a las consideraciones que se citan en la bibliografía). Hughes (1986) demostró que el límite superior para máquinas ligeras se situaba en un índice Cerchar de 18:

$I_A = IC_D \cdot IC_A < 18$

Para máquinas pesadas Laureano Cornejo (1988) estimaba un valor aproximado de 30. En nuestro caso se ha obtenido un valor de 18 y se podría estimar un intervalo para el parámetro I_A de <14 a >50 (aproximadamente basándonos en los valores más altos de RCS de unos 650 kp/cm² y valores de abrasividad en torno a 1,7). El valor medio se situaría en torno a 20-25 (RCS=226 kp/cm²).

Teniendo en cuenta los avances en los métodos de excavación y los valores obtenidos se puede establecer que los medios mecánicos (rozadoras pesadas) resultarían aptos para la traza en estudio.

5.2.3 ABRASIVIDAD SCHIMAZEK

El índice Schimazek (F) combina

- La medida de la resistencia a tracción (Rt de acuerdo al ensayo brasileño) (kp/cm²).
- ϕ_m = diámetro medio de los granos de cuarzo (cm)
- % Q= contenido en sílice (s.l. ya que en general se indica cuarzo pero se aplican equivalencias para la transformaciones de diferentes fases minerales a su equivalencia a la abrasividad de referencia del SiO₂ (100%), p.e. el Circonio (332%) o la Andalucita (159%) suponen factores superiores al 100%, los metálicos como la pirita o hematita en torno al 50% y los filosilicatos aportan valores muy bajos (p.e. moscovita 3,6%).

Así el índice F se obtendría de acuerdo a la expresión:

$$F = \%Q \cdot \phi_m \cdot R_t$$

Los resultados obtenidos han sido:

Sondeo	Cotas	%Q	Tamaño medio granos de Q (cm)	Resistencia tracción (kp/cm²)	F (kN/m)	Observaciones petrografía	Observaciones tramo
S-R-I-02	38,9-39,5 metros	8,72	0,009312	33,8	0,03	Arcillita-limolita de aspecto homogéneo y tacto suave. Bien compactada, sin foliación.	Rekalde-Irala
S-P-D-02	25,2-25,6 metros	17,65	0,013296	34,9	0,08	limolita de aspecto homogéneo y tacto aspero. Bien compactada, sin foliación.	Parque-Deusto
S-D-L3-02	30,6-31,2 metros	9,08	0,013036	79,8	0,09	Arcillita-limolita de aspecto homogéneo y tacto suave. Bien compactada, sin foliación.	Deusto-L3 (zona Artxanda)

A partir del índice F se puede estimar la rozabilidad:

Coeficiente de abrasividad F (kp/cm)	Rozabilidad		Resultados obtenidos	Observaciones
	Calificación	m³/h		
0,20-0,3	Muy buena	45-65	F=0,03-0,08-0,09	RT=33,8-79,8
0,3-0,4	Buena	30-45		
0,4-0,5	Moderada	20-30		
0,5-0,6	Regular	15-20		
0,6-0,8	Mala	10-15		
0,8-1,0	Muy mala	5-10		

En el año 2000 se realizaba una interesante síntesis cualitativa sobre los rendimientos obtenidos con diferentes equipos en la excavación de las líneas 1 y 2 (no obstante, no se proporcionan datos y la valoración parece condicionada por las horas netas de corte). Hay que destacar de los equipos analizados los que presentaban una mejor valoración:

- Campaña 1991-1994:
 - Voest- Alpine-Tunnel-Miner (62T/ripping). Estaciones de Moyua y Abando.
 - Eickhoff ET-250 (61 T/Milling) Estación de Deusto
 - Paurat modelo E-280 (76 T /Milling) Tramo Ansio-Santa Teresa
- Campaña 1997-1999:
 - Howden-Paurat- Model E-242 (120 T/Milling) para el tramo San Inazio-Monte Cabras. Considerando un comportamiento notable.
 - Howden-Paurat- Model E-248 T2.13 (72 T/Milling) para el tramo Lutzana-Ansio.
 - Alpine-Tunnel-Miner (100T/ripping). Tramo Ansio –Santa Teresa

Por tanto, para una resistencia media en torno a los 30-50 MPa se considera aplicable una máquina de 70-120 toneladas, aunque se debe tener en cuenta las importantes mejoras que han sufrido este tipo de equipos desde la ejecución de estos tramos. No obstante, no son la resistencia a compresión simple de la roca y el peso de la rozadora los únicos factores a tener en cuenta en la valoración del equipo idóneo de rozado.

En la misma publicación se recogían tablas de síntesis de datos de la línea 2 con un cálculo de la tenacidad de la roca. Los valores de relación compresión/tracción varían de 2 a 23 con valores modales en torno a 4-5 para la margen derecha y muestran un rango de 3 a 13 con valores modales (6-7) algo superiores para la margen izquierda. Son por tanto llamativos los valores anormalmente bajos que implican valores de resistencia a tracción muy elevados para rocas sedimentarias lo que puede deberse a varios factores (estructura y disposición frente a las cargas, influencia de microestructuras, naturaleza de la cementación, etc.). Para el estudio realizado para la línea 4 se han obtenido valores similares:

Sondeo	Tracción indirecta	RCS	Co/Tr.	“Tenacidad”
S-R-I-02 38,9-39,5 m	33,81	132,08	3,91	0,26
SI-1 9-9,4 m	8,37	45,35	5,42	0,18
SI-1 15-15,3 m	27,22	39,50	1,45	0,69
SI-1 30-30,6 m	15,81	48,46	3,07	0,33
SI-3 14,2-14,8 m	26,74	173,28	6,48	0,15
S-Z-02 9,5-9,8 m	47,58	250,38	5,26	0,19
SZMR-02 11,8-12,3 m	26,62	191,97	7,21	0,14
SZMR-02 21-21,4 m	20,61	167,00	8,10	0,12
SPD-01 12-12,6 m	33,42	272,08	8,14	0,12
SPD-01 29,4-30 m	36,13	303,32	8,40	0,12

Sondeo	Tracción indirecta	RCS	Co/Tr.	“Tenacidad”
SPD-02 22,8-23,2 m	23,66	103,68	4,38	0,23
SDL3-01 24-24,6 m	69,83	372,99	5,34	0,19
SDL3-01 31,8-32,4 m	62,48	397,82	6,37	0,16
SDL3-02 27,6-28,2 m	54,34	512,58	9,43	0,11
SDL3-02 30,6-31,2 m	79,80	481,97	6,04	0,17
Promedio	37,76	232,83	5,93	0,21
Promedio	40,83	262,12	6,32	0,17

Ensayos de resistencia a compresión y tracción coincidentes y ratio entre los dos parámetros.

Madinaveitia realiza un análisis detallado e indica a partir de una definición de tenacidad:

$$\text{Tenacidad} = \text{Tracción} / \text{Compresión}$$

Indica el autor que para la margen derecha el 80% de los ensayos muestran un valor por encima del límite de 0,10 y de estos el 62% superan el 0,15. Para valores de 0,10 se espera un desgaste superior de los útiles de corte.

Para la margen izquierda no se realiza esta reflexión pero los valores son similares aunque más agrupados en torno a un 0,13. No obstante el 76% de los valores superan el 0,10 pero solo un 35% supera el 0,15. Por el contrario el valor medio es algo superior 0,07 frente al 0,06. Para la litología afectada en la zona de Artxanda (tramo Deusto hasta conexión de línea 3) se propone un valor medio de resistencia a tracción de 55 kp/cm² con una desviación típica de 12,6 y un cociente de 0,12.

Como resulta habitual en la zona de Bilbao las relaciones compresión/tracción son bastante bajas (las resistencias a tracción alcanzan en algún caso los 150 kp/cm²). Las relaciones tracción/compresión (≈tenacidad) superan habitualmente el valor de 0,10 con frecuentes valores por encima de 0,15 (los valores medios de resistencia tracción serían de unos 49 kp/cm² y la resistencia compresión de unos 240 kp/cm² por lo que el ratio medio sería de 0,20) al igual que se cita en los antecedentes, esta elevada tenacidad puede repercutir en los rendimientos de la excavación mecánica (ver referencias de Gehring K.H. y la citada de Madinaveitia. al respecto) penalizando las conclusiones genéricas que parecen deducirse del índice Cerchar.

Al respecto de los índices Schimazek hay tres antecedentes que parecen indicar valores muy bajos que no habrían reconocido términos areniscosos:

- Margen derecha: Valor F de 0,06, muy bajo.
- Tramo Lutzana-Ansio: Valor F de 0,004 por tanto extremadamente bajo.
- Para el caso de Artxanda se aprecia una aparente contradicción entre los valores de los índices Cerchar y Schimazek que no se justifica en el estudio:

Litología	Índice Schimazek	Abrasividad Cerchar
Calizas arcillosas y limolitas calcáreas	0,00165	5,8-6,3

El índice Schimazek obtenido en los ensayos de este tramo ha sido de 0,03 a 0,09 donde únicamente merece la pena destacar la elevada resistencia tracción que ha alcanzado en la muestra del SDL32 los 79,8 kp/cm². Los bajos porcentajes de cuarzo y el pequeño tamaño de los granos influye en la calificación de la rozabilidad (>0,20 MUY BUENA) a partir de este índice.

En la publicación de 2008 sobre la aplicación de rozadoras Sandvik que proporciona datos reales de rendimiento del modelo MT-720 para la línea 3. Estas máquinas presentan como características básicas:

- Peso: 120 Toneladas.
- Potencia de corte en cabeza: 300 KW

Los datos aportados para el tramo Aritz-Basauri son bastante difíciles de interpretar ya que se indican para los dos equipos:

- Boca Bidasoa: MT-720 nº 63: Excavación de galería de acceso , estación de Basauri,...etc. Se indica un total de 35.000 m³. El rendimiento sería de un 50% del esperado.
- Boca Azbarren: Estación de Ariz y túnel en línea. Excavación en fase de destroza mediante retroexcavadora con martillo hidráulico. Excavación total de unos 50.000 m³. El avance que se cita como el esperado sería de unos 4-6 m/día.

Suponiendo por tanto que los valores de avance/día se refieren a túnel de línea se podría estimar los rendimientos se situarían en unos 30 m³/hora para el mejor de los casos y en unos 15 m³/hora para el caso de la Boca Bidasoa.

Se puede concluir también que la abrasividad no sería un factor determinante en el estudio pero la tenacidad puede repercutir en los rendimientos y naturaleza de los equipos por lo que se recomienda profundizar en la valoración de este aspecto.

6. DISEÑO DE LOS SOSTENIMIENTOS DEL TÚNEL

En la publicación del año 2000 se ofrece una síntesis sobre las clasificaciones geomecánicas y su aplicación al diseño de sostenimientos para el Metro de Bilbao, destacan en estas recomendaciones la aplicación de los criterios de Louis (1974), Barton (1974 con su sistema Q) y Bieniawsky (sistema RMR desarrollado y modificado en el periodo 1972-1989 pero parece que el aplicado seria la revisión de 1979). En este apartado se realiza una primera descripción de las clasificaciones geomecánicas más habituales en túneles y se expone a modo de antecedente del criterio de Louis. Los sistemas más habituales serían:

- El sistema RMR (Rock Mass Rating). Desarrollado por Bieniawski durante el año 1972-73 y modificado en versiones posteriores (1976, 1979, 1989). Se obtiene como suma de cinco parámetros en función de la resistencia de la roca sana; RQD; Separación entre diaclasas; estado de estas; presencia de agua, considerando también un factor adicional en el que se tiene en cuenta la orientación de los estratos en relación a la traza.
- El Sistema-Q o Clasificación de Barton et al. Desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lie y Lunde del Instituto Geotécnico de Noruega. Actualmente se conoce como Nuevo Método Noruego de túneles. Depende de 6 parámetros: RQD, Índice de Diaclasas, Índice de rugosidad de las juntas, Índice de alteración de las juntas, Índice de presencia de agua y del SRF (*Stress Reduction Factor*) que depende del estado tensional de la roca del túnel. El sistema Q presenta como ventaja la inclusión de las dimensiones del túnel aunque su orientación a rocas ígneas (debido a que en su génesis los autores se basaron en el comportamiento de excavaciones en este tipo de sustrato) implica una falta de contraste en medios estratificados y probablemente una menor continuidad de los sistemas de juntas (ello puede suponer un sostenimiento menor en macizos de buena calidad, poco alterables y más orientado en general a coronas radiales de bulones).

Como criterio general en la red de Metro se ha aplicado el índice RMR por lo que se considera este método de clasificación como principal y el índice Q como complementario. A modo de ejemplo en la referencia del 2000 se indicaba que el 81% de la traza se habría excavado en roca con un RMR superior a 45 (lo cual implica (clase AB₁ o superior) de acuerdo a las tablas adjuntas en el apartado precedente que el sostenimiento estaría formado por bulones y hormigón proyectado). Los porcentajes de relajación del frente serían de un 50% del movimiento absoluto se produce antes de la llegada del frente (y un 15% adicional en la excavación).

Clasificación de ETS para el metro de Bilbao:

SECCIÓN TIPO	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4A	ST-4B	ST-5 ⁽¹⁾
CALIDAD DE TERRENO	RMR≥70	70>RMR≥55	55>RMR≥45	45>RMR≥35	35 >RMR≥25	RMR<25
RECUBRIMIENTO DE TERRENO SOBRE CLAVE	>20m	>20m	>15m	>10m	>10m	-
ESPESOR DE ROCA SANA SOBRE CLAVE	>8m (Grupo 2,3) >16m(Grupo 4)	>6m (Grupo 2,3) >10m(Grupo 4)	>4m (Grupo 2,3) >6m(Grupo 4)	>2m (Grupo 2,3) >4m (Grupo 4)	>2m (Grupo 2,3) >4m (Grupo 4)	-
Grupo 1. Dimensión equivalente <4m • Pozos de ventilación • Pozos de ascensores.	HP (6) Fbr (35) Bsw 3x2x2 Sección completa. Pase 2,5 a 3m		HP (8) ME 4x15x15 o Fbr (35) Bst 3x1,5x1,5 Sección completa. Pase 2,0 a 2,5m	HP (9) ME 4x15x15 o Fbr (35) Bst 3x1x1 Sección completa Pase 1,5 -2,0 m	HP (11) 2xME 4x15x15 o Fbr (35) Bst 3x1x1 Avance y destroza. Pase 1,5m	HP (20) 2xME 6x15x15 TH21 c/1,5 Avance y destroza. Pase 1,5m
Grupo 2. Dimensión equivalente 4-7m • Cañones de acceso • Túnel de línea (1 vía).	Sll (3) HP (5) Fbr (35) Bsw 3x2x2 Sección completa. Pase 4m	Sll (3) HP (8) Fbr (35) Bsw 3x2x2 Sección completa. Pase 2,5 a 3m	Sll (3) HP (10) ME 6x15x15 o Fbr (35) Bst 3x1,5x1,5 Sección completa. Pase 2 a 2,5m	Sll (3) HP (12 ME) 6x15x15 Bst 3x1 x1 Sección completa. Pase 2 a 2,5m	Sll (3) HP (14) 2xME 6x15x15 o Fbr (35) Bst 3x1 x1 Sección completa. Pase 2 a 2,5m	Sll (3) HP (17) 2xME 6x15x15 TH21 c/1 Sección completa. Pase 1 a 1,5m
Grupo 3. Dimensión equivalente 7-10m • Túnel de línea(2 vías) • Accesos a la obra para camiones en estación Moyúa y Parque. • Mango de maniobra • Pasillo entre estaciones Moyúa L1 y L4 • Galerías de ventilación	Sll (3) HP (5) Fbr (35) Bsw 3x2x2 Avance y destroza. Pase 4m	Sll (3) HP (10) Fbr (35) Bsw 4x2x Avance y destroza. Pase 3,5m	Sll (3) HP (15) ME 6x15x15 Bsw 4x1,5x1,5 Avance y destroza. Pase 3m	Sll (3) HP (18) ME 6x15x15 TH21 c/1m Bst 4x1x1 Avance y destroza. Pase 1m	Sll (3) HP (18) 2xME 6x15x15 o Fbr (35) TH29 c/1m Bst 4x1x1 Avance y destroza. Pase 1m	Sll (3) HP (22) 2xME 6x15x15 HEB200 c/1m Avance y destroza. Pase 1m
Grupo 4. Dimensión equivalente >10m • Cavernas de estación • Bifurcación almango de maniobra	Galería Piloto: Pase 4m Sll (5) HP (15) Fbr (35) Bsw 4x1,5x2 ⁽²⁾ Resto : Pase 2m Sll (5) HP (15) Fbr (35) Bsw 6x2x2	Galería Piloto: Pase 4m Sll (5) HP (15) Fbr (35) Bsw 4x1,5x2 ⁽²⁾ Resto : Pase 2m Sll (5) HP (15) 2xME 6x15x15 o Fbr (35) TH29 c/2 Bsw 6x2x2	Galería Piloto: Pase 3-4m Sll (5) HP (20) Fbr (35) Bsw 4x1,5x1,5 ⁽²⁾ Resto : Pase 1,5 a 2m Sll (5) HP (20) 2xME6x15x15 o Fbr (35) TH29 c/1,5 Bsw 6x1,5x1,5	Galería Piloto: Pase 2 a 3m Sll (5) HP (20) ME 6x15x15 o Fbr (35) Bsw 4x1,5x1 ⁽²⁾ Resto : Pase 1,5 a 1m Sll (5) HP (20) 2xME6x15x15 TH29 c/1 Bsw 6x1x1	Galería Piloto: Pase 2 a 3m Sll (5) HP (25) ME 6x15x15 o Fbr (35) Bsw 4x1,5x1 ⁽²⁾ Resto : Pase 1,5 a 1m Sll (5) HP (25) 2xME6x15x15 TH29 c/1 Bsw 6x1x1	Galería Piloto: Pase 1m Sll (5) HP (30) 2xME 6x15x15 Bsw 4x1,5x1 ⁽²⁾ Resto: Pase 1-1.5m Sll (5) HP (30) 2xME6x15x15 HEB200 c/1

6.1 CLASIFICACIÓN DE BARTON BASADA EN EL PARÁMETRO 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:

- RQD: es un índice de fracturación en testigo normalizado
- Jn: es un índice de diaclasado que contempla la cuantía de la fracturación,
- Jr: es un índice de rugosidad que contempla la rugosidad, presencia de relleno y continuidad de las juntas,
- Ja: es el índice de alteración de las juntas,
- Jw: es un coeficiente reductor por la presencia de agua,
- 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 = (RQD / Jn) * (Jr / Ja) * (Jw / SRF)

El rango de variación del índice Q está entre 0,001 y 1000. Este intervalo se ha dividido en nueve clases, que dan lugar a la siguiente clasificación cualitativa:

- Q: 0,001 a 0,01 Roca excepcionalmente mala
- Q: 0,01 a 0,1 Roca extremadamente mala
- Q: 0,1 a 1 Roca muy mala
- Q: 1 a 4 Roca mala
- Q: 4 a 10 Roca media
- Q: 10 a 40 Roca buena
- Q: 40 a 100 Roca muy buena
- Q: 100 a 400 Roca extremadamente buena
- Q: 400 a 1000 Roca excepcionalmente buena

El valor del índice Q permite, entre otras cosas, determinar empíricamente la presión ejercida por el macizo rocoso, para la cual se debe dimensionar el sostenimiento, tal como se recoge en la figura siguiente:

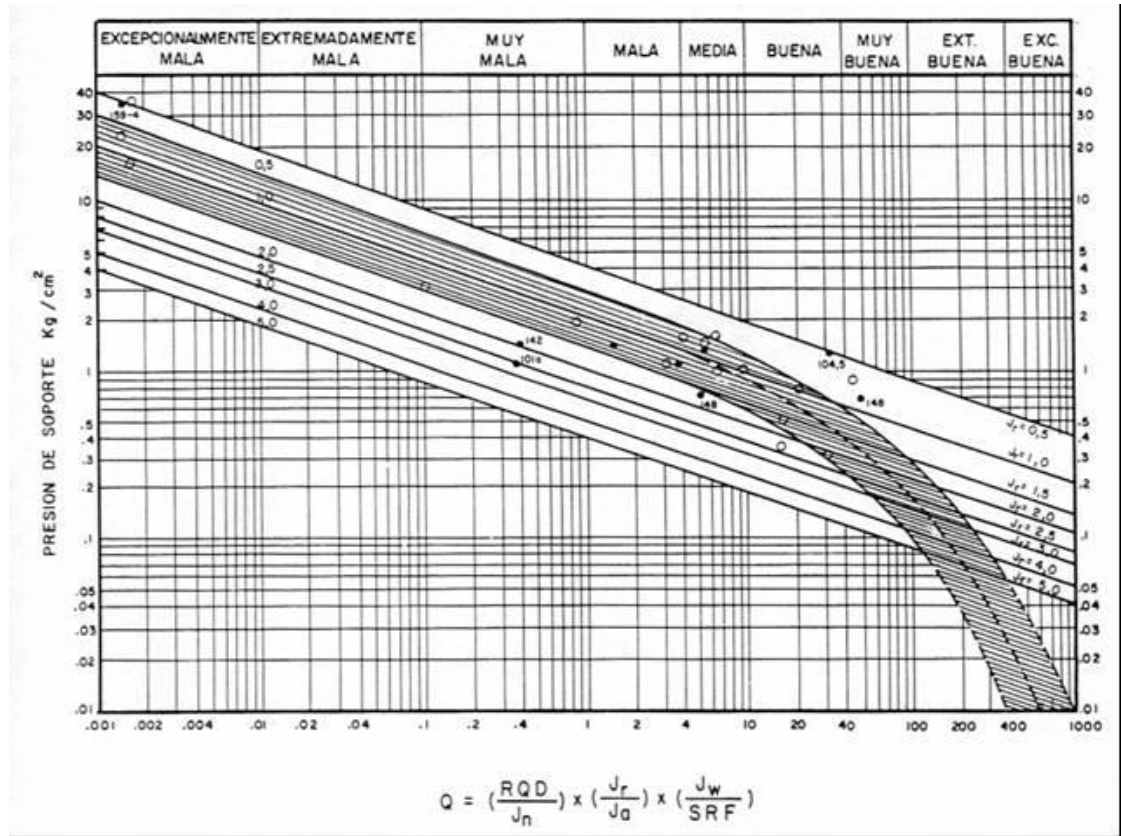


Figura nº10. Presión sobre el sostenimiento. Criterio de Barton

Por otra parte, 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” 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).

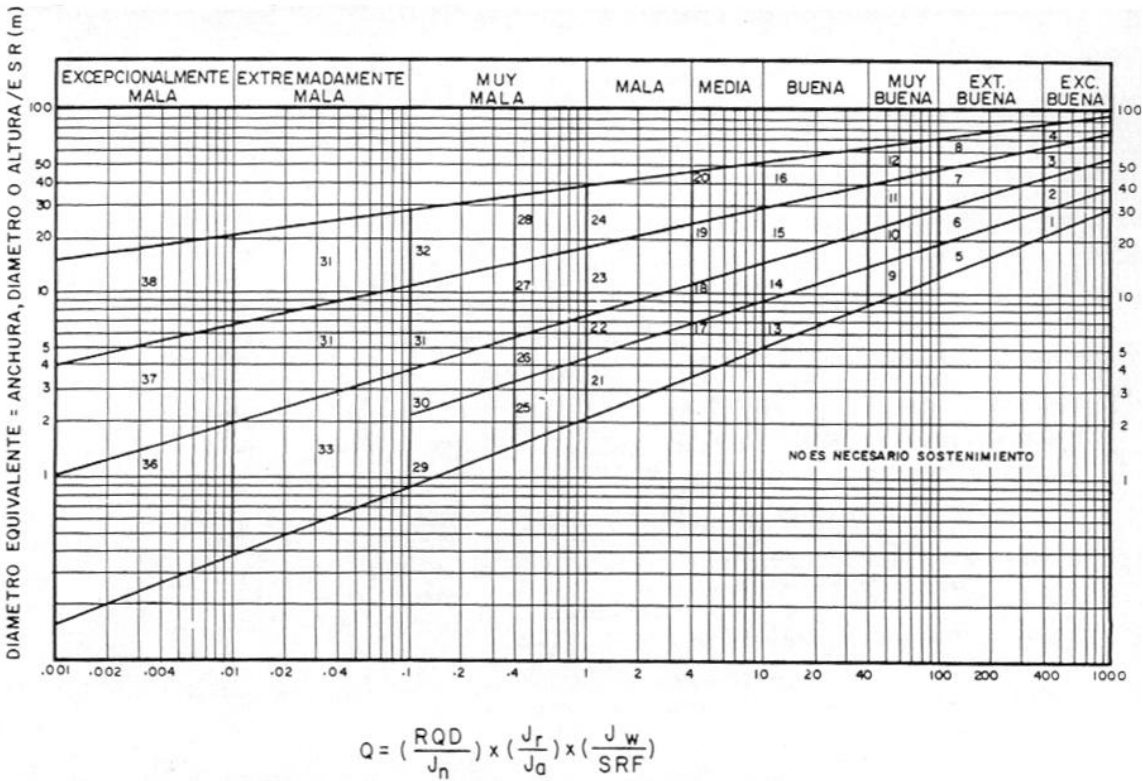


Figura nº11. Ámbito de aplicación de los distintos sostenimientos propuestos

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.

Parámetro/ Consideraciones		Rango (Valores medios)	Factores
RQD	Fracturación en sondeo. En general elevado (90-100%) con zonas discretas de espesor métrico	60-100 (80-90%)	30-50
Jn (fracturación)	Estratificación (p.e. SZM-01) cerrada a Dos-tres familias	2-6	
Jr (rugosidad)	Consideramos planas a onduladas lisas	1,5-2,0	0,3-1,0
JA (alteración)	Ligera alteración a alteraciones arcillosa	2-4	
Jw (agua)	Excavaciones secas o con pequeño flujo de agua. Excepcionalmente flujo importante por vías locales (p.e. zona Irala?)	0,5-0,66-1,0	0,2-2
SRF (stress reduction factor)	Roca competente con pequeña cobertura a gran cobertura (Artxanda)	2,5-0,5	

En el túnel de la línea 4 del metro y de una manera simplificada se podrían establecer dos clases de macizo a los que corresponderían diferentes sostenimientos:

Clase I (Q>10): Corresponde a la limolita inalterada a levemente alterada (grados de meteorización I-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.

Clase II (Q:2-4) 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.

Se van a proyectar las clases e índices sobre los ábacos que propone Barton para establecer las necesidades de sostenimiento. La anchura que se ha considerado va desde los 6 metros del túnel de vía única, pasando por los 10 de vía doble hasta unos 17 metros de las zonas en caverna.

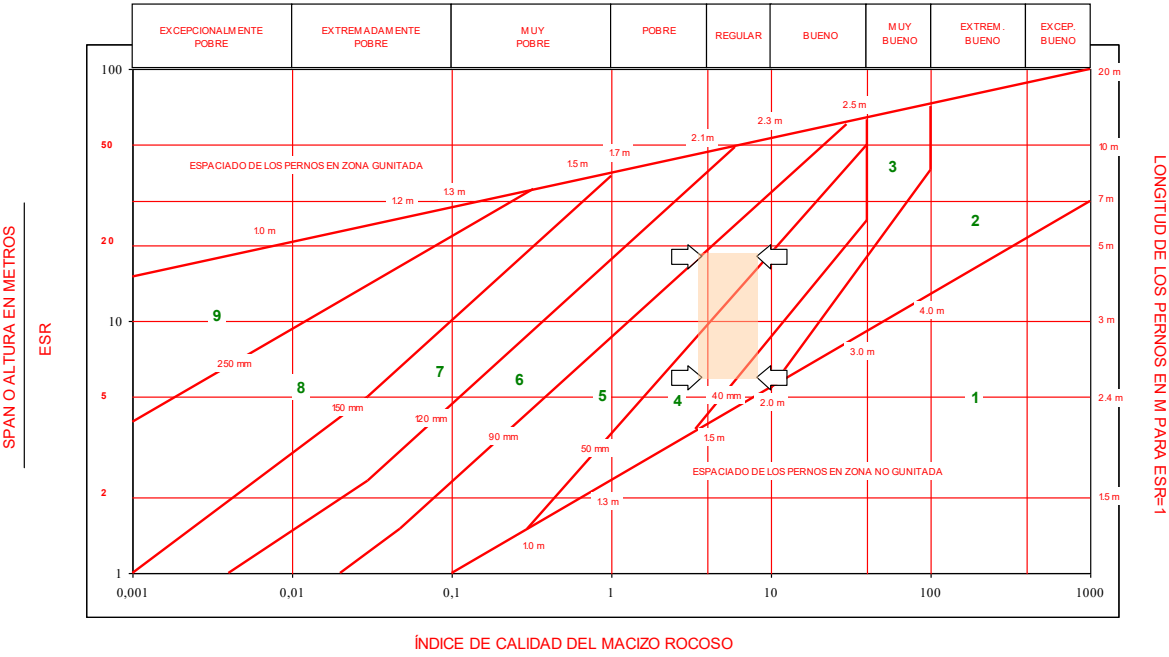


Figura nº12. Gráfico Q y rango de variación establecido.

En síntesis, se podría establecer que para las condiciones medias: Macizo de calidad media-buena para túnel de vía doble: Clase sostenimiento 3-4. Las recomendaciones son bulonado sistemático (espaciado 1-2 metros/ longitudes de unos 3 metros) con malla metálica y un espesor de hormigón proyectado de unos 5-10 cm. Para los extremos (tamaño y clase Q) se obtendría:

Clase macizo	Q	Tipo túnel	Clase genérica sostenimiento Q	Subclase sostenimiento	Observaciones sostenimiento
1	≈>10	Caverna	4-5	15	Bulonado sistemático+ malla/ hormigón proyectado 5-10 cm
1	≈>10	Túnel vía doble	4 (vía única 3)	13	Bulonado sistemático+ malla/ hormigón proyectado 3 cm
2	≈2-4	Caverna	5	23	Bulonado sistemático (1,0-1,5 m)+ malla/ hormigón proyectado 10-15 cm
2	≈2-4	Túnel vía doble	4 (vía única 4)	21	Bulonado sistemático (1,0-1,5 m)+ malla/ hormigón proyectado 5 cm

6.2 CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI BASADA EN EL PARÁMETRO RMR (ROCK MASS RATING)

El sistema de clasificación del macizo rocoso (*Rock Mass Ratio*) se basa en más de 300 casos reales de túneles y minas. Bieniawski desarrolló el concepto orientado a túneles, pero ha permitido el desarrollo de índices específicos para taludes (Slope Mass Ratio) y cimentaciones de presas (Dam Mass Ratio).

El índice básico (RMR básico independiente de la orientación con el sistema principal de discontinuidades) se obtiene mediante cinco sumandos:

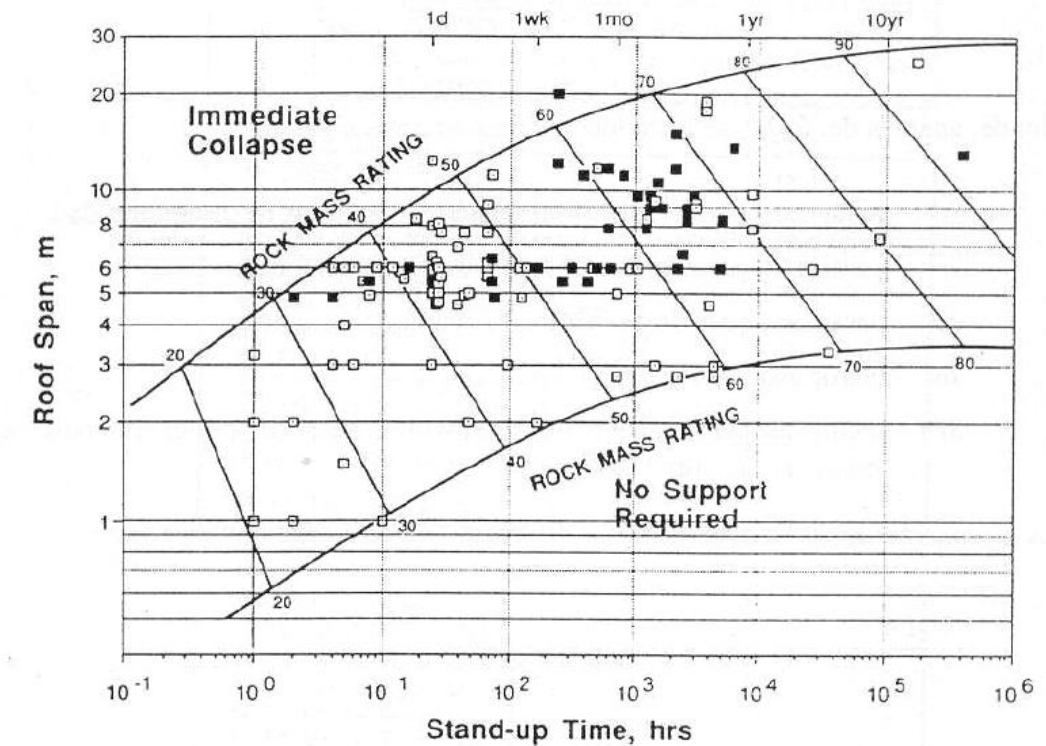
- Resistencia de la roca matriz: valorada a partir de la resistencia a compresión simple o a la carga puntual.
- Separación en la red de discontinuidades: Condiciones de las discontinuidades (diaclasado y estratificación), en las que se valora la separación y el estado de las diaclasas.
- Condiciones de las discontinuidades (diaclasado y estratificación), en las que se valora la separación y el estado de las diaclasas.
- Efecto del agua.
- Posición relativa (orientación) de las discontinuidades respecto a la excavación.

La incidencia de esos factores se tiene en cuenta a través de una serie de parámetros a los cuales se les asigna una serie de valoraciones específicas que se encuentran convenientemente tabuladas.

Una vez establecidos los valores de dichos parámetros, el índice RMR tiene un rango de variación entre 0 y 100. Este intervalo se ha dividido en cinco categorías, que dan lugar a la siguiente clasificación cualitativa:

- RMR: 81 a 100 Clase I: roca muy buena
- RMR: 61 a 80 Clase II: roca buena
- RMR: 41 a 60 Clase III: roca media
- RMR: 21 a 40 Clase IV: roca mala
- RMR: 0 a 20 Clase V: roca muy mala

Bieniawski (1979) recoge en un ábaco la relación entre la longitud libre sin soporte, el tiempo de permanencia estable y la clase geomecánica.



Tiempo de estabilidad de excavaciones sin soporte.

En función del valor del parámetro RMR del macizo rocoso, se establecen las necesidades de sostenimiento para cada clase de roca.

Clase Macizo Rocosos	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.

Se debe tener en cuenta que las recomendaciones de Bieniawski se aplican a secciones de hasta 10 metros de anchura y máxima tensión vertical de 250 kp/cm².

La calificación del RMR (1989) sería:

Factor	Rango considerado (Valor Medio/ Modal)	RMR (1989) Valor considerado (Valor Medio)
RCS	5-60 (23) (MPa)	2-7 (5)
RQD	50-100% (90%)	8-20 (17)
Espaciado discontinuidades	0,2>2,0 (m) (0,6-2,0 m)	8-20 (15)
Condición/ Estado de las discontinuidades	Discontinuidades abiertas con relleno arcillosos con continuidad limitada pasando por espejos de falla a diaclasas discontinuas con bordes duros	10-25 (20)
Agua	Caudales en general muy reducidos (baja permeabilidad y escasa carga de agua). Flujos locales excepcionales.	4-15 (12)
Orientación	Paralela con buzamientos <45º (Media) a favorable (a favor de buzamiento)	-2 a -5 (-5)
Total	30-82 (64)	

6.3 CLASIFICACIÓN ETS

Para el presente proyecto, y en base a la experiencia de ETS en el metro de Bilbao, la elección del sostenimiento se podría establecer de acuerdo a las recomendaciones genéricas que dependen de la calidad del macizo rocoso (RMR) y de la sección equivalente:

(Cada uno de los Grupos en los que se subdividen las actuaciones de sostenimiento queda definido en el apéndice 9.3).

	SOSTENIMIENTO TIPO I RMR > 70	SOSTENIMIENTO TIPO II 70 > RMR > 55	SOSTENIMIENTO TIPO III 55 > RMR > 40	SOSTENIMIENTO TIPO IV 40 > RMR > 30	SOSTENIMIENTO TIPO V 30 > RMR > 20
GRUPO 1	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4.5 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - CERCHAS HEB-180 c/ 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 1R	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4.5 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 2	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 3,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/10 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m. - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/8 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m. - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/6 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO = 20 cm. - ARMADO: FIBRA PP O MALLAZO 6 x 150 x 150 (*) - CERCHAS TH-21 c/1,5 m. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 (***) . L = 4,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m. - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1.5/3 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO = 25 cm. - ARMADO: MALLAZO 6 x 150 x 150 - CERCHAS TH-29 c/1,0 m. - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m - PRESOSTENIMIENTO: PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL - AVANCE CON BULONES EN HASTIALES TIPO SWELLEX . L = 4,0 m. Sxd = 1 x 1 m. OCASIONAL (**)
GRUPO 3	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm - BULONES TIPO SWELLEX MN-16 L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m. - PASE: SECCION COMPLETA: AVANCE =4 m		- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 . L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m. - PASE: SECCION COMPLETA: AVANCE = 3 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - CERCHAS TH-21 c/1,5 m. - PASE: SECCION COMPLETA: AVANCE = 1.5 m	- ESPESOR HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - CERCHAS HEB-140 c/1 m. - AVANCE = 1 m. Y DESTROZA Y CONTRABOVEDA - PRESOSTENIMIENTO: PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL
GRUPO 4	ESPESOR HORMIGON PROYECTADO = 5 cm. SECCION COMPLETA				

NOTAS: (*) SE COLOCARÁ FIBRA DE PP O MALLAZO A DISCRECIÓN DE LA DIRECCIÓN DE OBRA

(**) SE COLOCARÁN LOS BULONES EN LOS HASTIALES DEL AVANCE A DISCRECIÓN DE LA DIRECCIÓN DE OBRA

(***) LOS BULONES DESCRITOS PODRÁN SER MODIFICADOS A CRITERIO DE LA DIRECCIÓN DE OBRA, LA CALIDAD DE LA ROCA Y LAS CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS

6.4 ESTIMACIONES DE RMR REALIZADAS

A partir de la información que proporcionan los sondeos mecánicos y los escasos afloramientos detectados (en la zona de la boquilla Este), se han estimado rangos de RMR a la profundidad de la traza del túnel que se han extrapolado a lo largo del mismo. Esta información debe comprobarse de forma continua durante la obra, ya que será una de las pautas para confirmar la idoneidad del sostenimiento previsto en cada momento.

En la tabla siguiente se resume la tramificación del túnel en mina en función de los valores de RMR asignados, a partir de los cuales se establecen los sostenimientos de partida, que también se refleja en el perfil geológico-geotécnico longitudinal:

pk inicio	pk fin	m parcial	RMR	SOST. I		SOST. II		SOST. III		SOST. IV		SOST. V	
				%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)
78	230	152	55>RMR>40			10	15,2	60	91,2	20	30,4	10	15,2
230	260	30	55>RMR>40									100	30
260	330	70	55>RMR>40			10	7	70	49	20	14		
330	400	70	70>RMR>55					10	7	90	63		
400	595	195	70>RMR>55	10	19,5	70	136,5	20	39				
595	675	80	55>RMR>40			10	8	70	56	20	16		
675	795	120	70>RMR>55					100	120				
795	1080	285	70>RMR>55	10	28,5	70	199,5	20	57				
1080	1351	271	55>RMR>40			10	27,1	70	189,7	20	54,2		
1351	1455	104	55>RMR>40			10	10,4	70	72,8	20	20,8		
1455	1695	240	55>RMR>40			10	24	70	168	20	48		
1695	1835	140	55>RMR>40					20	28	70	98	10	14
1835	2095	260	55>RMR>40			10	26	60	156	20	52	10	26
2095	2220	125	70>RMR>55			10	12,5	70	87,5	10	12,5	10	12,5
2220	2323	103	70>RMR>55			70	72,1	20	20,6	10	10,3		
2323	2455	132	70>RMR>55			10	13,2	60	79,2	20	26,4	10	13,2
2455	2845	390	55>RMR>40			10	39	60	234	20	78	10	39
2845	2915	70	55>RMR>40			10	7	30	21	50	35	10	7
2915	2925	10	55>RMR>40			10	1	60	6	20	2	10	1
2925	3025	100	55>RMR>40			20	20	70	70	10	10		
3025	3056	31	55>RMR>40			10	3,1	70	21,7	10	3,1	10	3,1
3056	3076	20	70>RMR>55			20	4	70	14	10	2		
3076	3330	254	70>RMR>55			70	177,8	20	50,8	10	25,4		
3330	3380	50	70>RMR>55					50	25	50	25		
3380	3478	98	70>RMR>55			90	45	10	9,8				
3478	3588	110	70>RMR>55			60	58,8	40	44				
3588	4180	592	70>RMR>55			60	66	40	236,8				
4180	4290	110	70>RMR>55			90	532,8	10	11				
4290	4390	100	70>RMR>55			80	88	20	20				
4390	4420	30	40>RMR>30					20	6	80	24		
4420	4800	380	70>RMR>55			80	24	20					
4800	4850	50	40>RMR>30					20	10	80	40		
4850	4940	90	70>RMR>55			80	40	20	18				
4940	4960	20	40>RMR>30					20	4	80	16		
4960	5350	390	70>RMR>55			80	16	20	78				
5350	5455	105	70>RMR>55			80	312	20	21				
5455	5560	105	70>RMR>55			80	84	20	21				
5560	5620	60	55>RMR>0									100	60
5620	6220	600	70>RMR>55			80	480	20	120				

En el caso de los cañones de acceso los valores del RMR y las secciones de sostenimiento se ha optado por los siguientes valores para el RMR y sección de sostenimiento:

Denominación	Longitud	RMR	Sostenimiento
Av. Madariaga	108.24	40<RMR<55	S-III
Pl. San Pío X	102.57	40<RMR<55	S-III
Pl. Euskadi	101.55	40<RMR<55	S-III
Parque Casilda	100	40<RMR<55	S-III
Conexión línea 1/2 Moyua	63	40<RMR<55	S-III
C. Bertendona	92.45	40<RMR<55	S-III
Al. San Mamés	63.19	40<RMR<55	S-III
Pl. Zababuru	82.52	40<RMR<55	S-III
C. Juan de Garay	173.58	40<RMR<55	S-III
Pl. Ezkurtze	133.31	40<RMR<55	S-III
Pl. Rekalde	122.61	40<RMR<55	S-III
C/ Sollube	130.86	40<RMR<55	S-III

En el caso de las cavernas para las estaciones la previsión de valores de RMR y secciones de sostenimiento son las siguientes:

Denominación	De PK a PK	RMR	Sostenimiento
Caverna 1	0+595 – 0+675	55>RMR>40	10% S-II, 70% S-III, 20% S-IV
Caverna 2	0+675 – 0+795	70>RMR>55	100% S-III
Deusto - Universidad	1+351 – 1+455	55>RMR>40	10% S-II, 70% S-III, 20% S-IV
Parque Casilda	2+220 – 2+323	70>RMR>55	70% S-II, 20% S-III, 150% S-IV
Moyua	2+925 – 3+025	55>RMR>40	20% S-II, 70% S-III, 10% S-IV
Zababuru	3+478 – 3+588	70>RMR>55	60% S-II, 40% S-III
Irala	4+185 – 4+277	70>RMR>55	90% S-II, 10% S-III
Rekalde	5+360 – 5+455	70>RMR>55	80% S-II, 20% S-III

Con lo que los porcentajes totales para los túneles en mina y las cavernas (cañones excluidos) es:

SOST. I		SOST. II		SOST. III		SOST. IV		SOST. V	
%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)
0.77	48,00	40.84	2.540,10	36.43	2.265,90	11.35	706,10	3.55	221,00

Es fundamental tener en cuenta que los PK reflejados en la tabla anterior son aproximados y pueden sufrir variaciones considerables durante la obra, ya que la extrapolación de los datos geomecánicos se ha realizado con objeto de contar con una previsión razonable de la distribución de los diferentes sostenimientos a lo largo del túnel, pero no es posible conocer con exactitud la localización de cada tramo. Del mismo modo, también sería posible que apareciera alguna zona milonitizada que no es posible esperar a partir de la información disponible.

6.5 SOSTENIMIENTOS DE LAS SECCIONES TIPO

Se han diferenciado las siguientes secciones tipo.

6.5.1 BOQUILLAS

SOSTENIMIENTO BOQUILLAS
ST B
Paraguas de micropilotes $\phi 150$ (camisa de $\phi 89$ y $e = 7$ mm), cada 0,5 m. 3 paraguas sucesivos, solapados 3 m Inyección de lechada
<u>Excavación en avance:</u> Hormigón proyectado HPro-25, $e = 15$ cm con mallazo Cerchas TH-21 c/1,5 m, con bulones al pie $L = 4,0$ m Pase en avance: 1,5 m <u>Excavación en destroza:</u> Hormigón proyectado HPro-25, $e = 15$ cm con mallazo Cerchas TH-21 c/1,5 m, con Bulones al pie $L=4,0$ m Pase en avance: 3 m

6.5.2 TÚNEL

	TIPO I RMR>70	TIPO II 70>RMR>55	TIPO III 55>RMR>40	TIPO IV 40>RMR>30	TIPO V 30>RMR>20
Espesor de hormigón proyectado con fibra de PP	10 cm	15 cm	15 cm		
Tipo de bulones	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16
Longitud de bulones	3m	3m	3m	4m	4m
Malla de bulones	2.5 x 2.5 m	2.0 x 2.0 m	1.5 x 1.5 m	1.5 x 1.5 m	1.0 x 1.0 m en hastiales del avance a discreción de la D.O.
Cerchas				TH-21/1.5 m	TH-29 / 1.0 m
Otros				Mallazo 150 x 150 x 6 mm	Mallazo 150 x 150 x 6 mm Paraguas de micropilotes ocasional
Longitud de pase (avance/destroza)	5 / 10 m	4 / 8 m	3 / 6 m	1.5 / 3 m	

6.5.3 CAVERNA

	TIPO I RMR>70	TIPO II 70>RMR>55	TIPO III 55>RMR>40	TIPO IV 40>RMR>30	TIPO V 30>RMR>20
Espesor de hormigón proyectado con fibra de PP	10 cm	20 cm	25 cm	30 cm	
Tipo de bulones	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	SWELLEX MN16	
Longitud de bulones	6m	6m	6m	6m	
Malla de bulones	2.5 x 2.5 m	2.0 x 2.0 m	1.5 x 1.5 m	1.0 x 1.0 m	
Cerchas	TH-29	TH-29	TH-29	HEB-180 / 1m	
Otros					
Longitud de pase (avance/destroza)	5 / 6 m	4 / 5 m	3 / 4.5 m	1 / 2 m	

6.5.4 FRENTERES

No se contempla el sellado del frente excepto con RMR muy bajos que requieran un sostenimiento especial o por la presencia de inestabilidades en el frente.

6.6 ELEMENTOS DE SOSTENIMIENTO

Se ha previsto el empleo de bulones, hormigón reforzado con fibras y cerchas metálicas como elementos de sostenimiento, cuya disposición y distribución varía en las distintas secciones tipo consideradas.

6.6.1 CERCHAS

Como elementos de sostenimiento en terrenos de baja calidad se emplean cerchas de acero embebidas en el hormigón. Los perfiles más comunes son los de tipo THN y HEB.

Los primeros tienen una sección en que los hacen más flexibles y permiten una puesta en obra más fácil, pudiendo ser atresillonados mediante barras corrugadas de acero o ser fijados al terreno mediante bulones anclados o friccionantes.

Los perfiles HEB son más rígidos, y por tanto menos deformables, son más adecuados cuando el terreno transmite cargas muy altas, ya que se fabrican en acero de límite elástico superior al de las cerchas THN por tanto trabajan en régimen elástico sin grandes deformaciones.

Se emplearán cerchas TH-21 en las secciones tipo ST-IV y ST-B de túnel, así como en el tramo de túnel en el entorno del entronque de la galería de ventilación. En el caso de las cavernas las cerchas a utilizar son las TH-29.

6.6.2 BULONES

El bulonaje es una técnica de sostenimiento que consiste en anclar en el interior de las rocas una barra de material resistente que aporta una resistencia a tracción y confina el macizo rocoso, permitiendo aprovechar las características resistentes de las rocas.

Los bulones aportan dos efectos básicos como elementos de sostenimiento:

- El bulonado cose las juntas de la roca, impidiendo que cuñas y bloques puedan deslizarse a favor de la fractura. Generalmente la rotura de un macizo rocoso se produce siempre a favor de las juntas.
- Por otra parte, el bulonado tiene un efecto de confinamiento de la roca, actuando del mismo modo que la armadura lo hace dentro del hormigón. Gracias a este efecto se consiguen absorber las tracciones que aparecen en el terreno, e impedir la formación de zonas descomprimidas.

En la actualidad se utilizan básicamente cuatro tipos de bulones en la construcción de túneles:

- Bulones convencionales, a base de redondos corrugados, de anclaje repartido con adhesivo de resina o cemento encartuchado.
- Bulones autoperforantes
- Bulones friccionantes de expansión colocados mediante hinchado por agua a presión.
- Bulones de resina de poliéster armados con fibra de vidrio.

La elección del tipo de bulón que debe utilizarse en una obra debe estar condicionada por las exigencias que el terreno impone al bulonaje, y entre los bulones que cumplen los requisitos técnicos necesarios, se deben emplear los más económicos.

Los terrenos con un RMR superior a 35-40 no ofrecen problemas para anclar en ellos cualquier tipo de bulón. En terrenos clasificados con un RMR entre 25 y 35 la colocación de bulones anclados con resina de cemento resulta muy dificultosa y en estos terrenos los bulones tipo Swellex presentan una notable ventaja. Finalmente, en terrenos con un RMR inferior a 25 prácticamente sólo se pueden colocar bulones autoperforantes.

En este caso se ha previsto utilizar bulones tipo Swellex Mn-16 en las secciones tipo ST-I a ST-V, con diferentes separaciones, como puede verse en el cuadro anterior y en los planos

6.6.3 HORMIGÓN PROYECTADO

El hormigón proyectado es un elemento básico en los sistemas de sostenimiento flexibles que contribuye a la estabilidad de la excavación a través de dos efectos principales:

- Sella la superficie de la roca, cerrando las juntas, evitando la decompresión y la alteración de la roca. De este modo el terreno puede mantener, en una mayor medida, sus características iniciales.
- El anillo de hormigón proyectado desarrolla una resistencia y puede trabajar como lámina, resistiendo las cargas que le transmite la roca al deformarse. También resiste la carga puntual ejercida por pequeñas cuñas o bloques de roca que descansan sobre la capa de hormigón.

La relación entre la resistencia a tracción de un hormigón y su resistencia a compresión es muy baja, y también lo es la capacidad de absorber energía antes de la rotura. Estos aspectos se mejoran notablemente con el empleo de elementos de refuerzo como son el mallazo y las fibras de acero.

6.6.4 MALLAZO

La malla electrosoldada o mallazo está formada por una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldadura, y se utiliza como refuerzo del hormigón proyectado por su facilidad de adaptación a la forma del túnel. La sujeción de los paños al terreno se realiza mediante las placas de los bulones o picas donde no se dispongan bulones, manteniendo al menos 20-30 cm de solape. El hormigón proyectado deberá llevarse a cabo en dos capas, colocando el mallazo entre ambas. En caso de no hacerlo así y gunitar una vez colocado el mallazo, podría haber problemas de durabilidad (corrosión del acero) y un peor comportamiento estructural (el acero no quedaría totalmente embebido en el hormigón).

En las secciones tipo ST-IV, ST-V se dispondrá mallazo 150x150x6 mm, de acero B500T a discreción de la dirección de obra.

6.6.5 FIBRAS DE POLIPROPILENO

La presencia de fibras de polipropileno en el hormigón proyectado mejora sus propiedades mecánicas: disminuye su fragilidad, aumenta su ductilidad después de la figuración, aumenta la resistencia a la rotura y la capacidad de absorción de energía, disminuye la tendencia a las roturas por retracción, aumenta la resistencia a la aparición y propagación de grietas, aumenta la resistencia a tracción, al impacto y la cizalladura, mejora el comportamiento a flexotracción y aumenta la durabilidad.

Desde el punto de vista constructivo las fibras sustituyen al mallazo tradicional al suprimir el riesgo de huecos detrás de él (por efecto de sombra o pantalla), disminuyen la cantidad de mortero y hormigón proyectado para recubrirlo totalmente y el rendimiento de colocación es superior.

La dosificación de estas fibras de polipropileno será de 4 kg/m³.

7. EMBOQUILLES

Como preparación al comienzo de los trabajos de excavación en mina se efectuarán en ambas bocas labores previas, como se ha señalado anteriormente, encaminadas a proteger el progreso de los primeros metros de túnel que son siempre especialmente conflictivos. En particular, en este caso nos encontramos con la siguiente problemática o condicionantes:

- Boquilla Guardia Civil
- Boquilla rampa de ataque Artxanda
- Boquilla rampa de ataque Abandoibarra
- Boquilla Rampa de ataque C/ Bertendona
- Boquilla rampa de ataque Avda Ferrocarril
- Boquilla rampa de ataque Parque Ezkurtze
- Boquilla rampa de ataque rotonda de Rekalde
- Boquilla Rampa de ataque Masustegi

En la mayor parte de los casos se prevé la ejecución de pantallas debido a la potencia considerable se suelos.

La excavación al abrigo de estas pantallas se continuará mediante un emboquille.

Los emboquilles han sido definidos como:

Se trata de micropilotes de 150 mm de diámetro de perforación, con camisa de acero de 89 mm de diámetro y 7 mm de espesor, que se dispondrán cada 0,50 m (distancia entre centros). Se dispondrán micropilotes de 11 m de longitud. Los micropilotes se llevarán a cabo en un arco de 130° y con una ligera inclinación longitudinal (1,5°) hacia arriba en sentido longitudinal. La tanda exterior constará de micropilotes de inyección repetitiva, mientras que las dos restantes (interiores) serán de micropilotes de inyección única.

8. AUSCULTACIÓN

La utilización de sistemas de auscultación es una obligación en una obra de esta naturaleza (excavación somera de túneles/cavernas en roca mediante NATM) y para el entorno (zona urbana con cimentaciones directas) en el que se realiza. Las zonas de mayor importancia para el desarrollo de una auscultación intensiva serían:

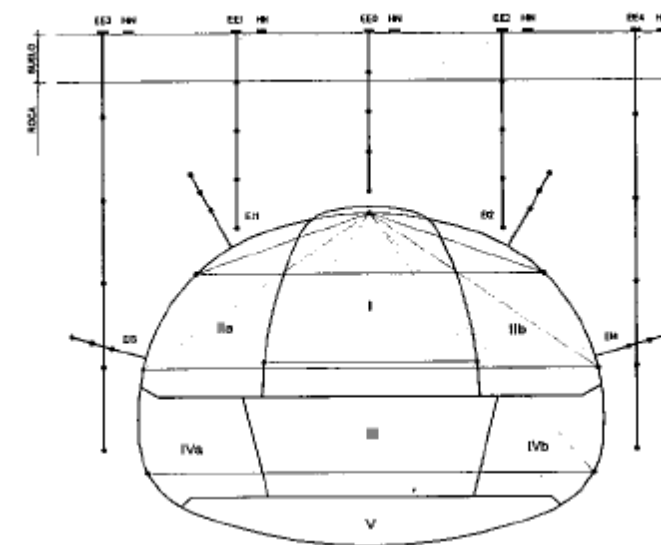
- Cavernas y especialmente aquellas someras o donde las excavaciones se desarrollan bajo la edificación.
- Pasos bajo infraestructuras ferroviarias en servicio como ocurre por ejemplo en la zona de Artxanda (túnel Ugasko-La Salve).
- Paso bajo la Ría de Bilbao
- Zonas de escasa tapada en roca como ocurre en la parte final de la estación de Parque y tramo Parque-Deusto en la aproximación a la margen izquierda de la Ría de Bilbao, en la vaguada del 0+640, en la paleo vaguada de Rekalde, etc.

En cuanto a los equipos a disponer se citan en los antecedentes los siguientes equipos:

- Hitos de nivelación en superficie.
- Extensómetros de interior y exterior.
- Convergencias en avance y destroza.
- Células de carga.
- Células de presión
- Inclínómetros.

Se hace hincapié en las medidas deformacionales si bien se indica que los asientos en superficie son prácticamente despreciables.

También en la referencia del año 2000 se incluye una sección de auscultación en caverna.



Sección de auscultación en caverna (Madinaveitia, J.R: (2000))

En esta sección se recogen únicamente los elementos deformacionales con el siguiente esquema de control:

- Afecciones a superficie: medida directa mediante elementos de control desde superficie:
 - Sección de hitos de nivelación.
- Deformaciones de la sección excavada: Convergencias en caverna:
 - Se dispone un perno en la clave y tres parejas que permiten la medida de un total de 9 cuerdas.

Además de estos elementos se contaba con células en bulones

A nivel de Estudio Informativo y dado el entorno urbano donde se desarrollan las obras se recomiendan dos tipos de secciones para túnel de línea, una sección tipo para caverna y algunos elementos adicionales:

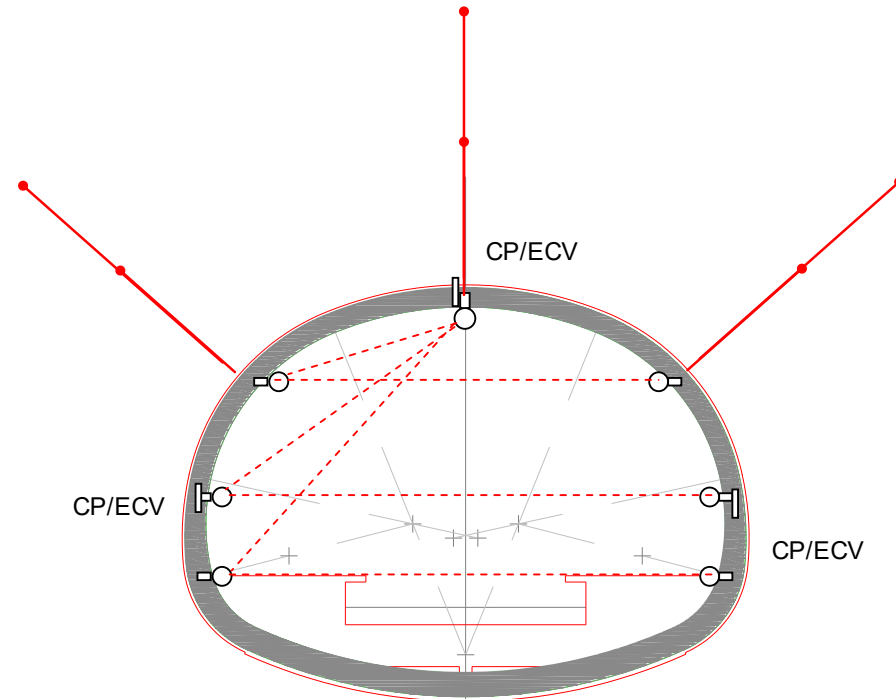
Sección tipo en caverna (estaciones):

Afecciones a superficie: La mejor herramienta es la valoración del estado del edificio y condiciones de cimentación. Se partirá por tanto de un inventario de la edificación existente con una calificación de su sensibilidad en función de lo que se dotara de una instrumentación específica (p.e. defómetros sobre grietas existentes, medida de vibraciones, etc.). En general este tipo de control deberá incluir:

- Controles deformacionales para edificación: Control nivelación y distorsiones en líneas de fachada, control de grietas (medidores de juntas), control acústico y control de verticalidad en edificios para las zonas de Irala, Zabaltzu, Moyua y Deusto.
- Controles en zona de calzada: Afecciones a superficie mediante hitos de nivelación dispuestos en secciones cuando sea posible.

Comportamiento de los sostenimientos: Se recomienda la instrumentación mediante células de presión total (CP) en disposición radial y tangencial al perímetro de la excavación. Las secciones se completarán con extensómetros de cuerda vibrante (ECV) para la medida de las deformaciones y consecuente estimación de tensiones en el hormigón.

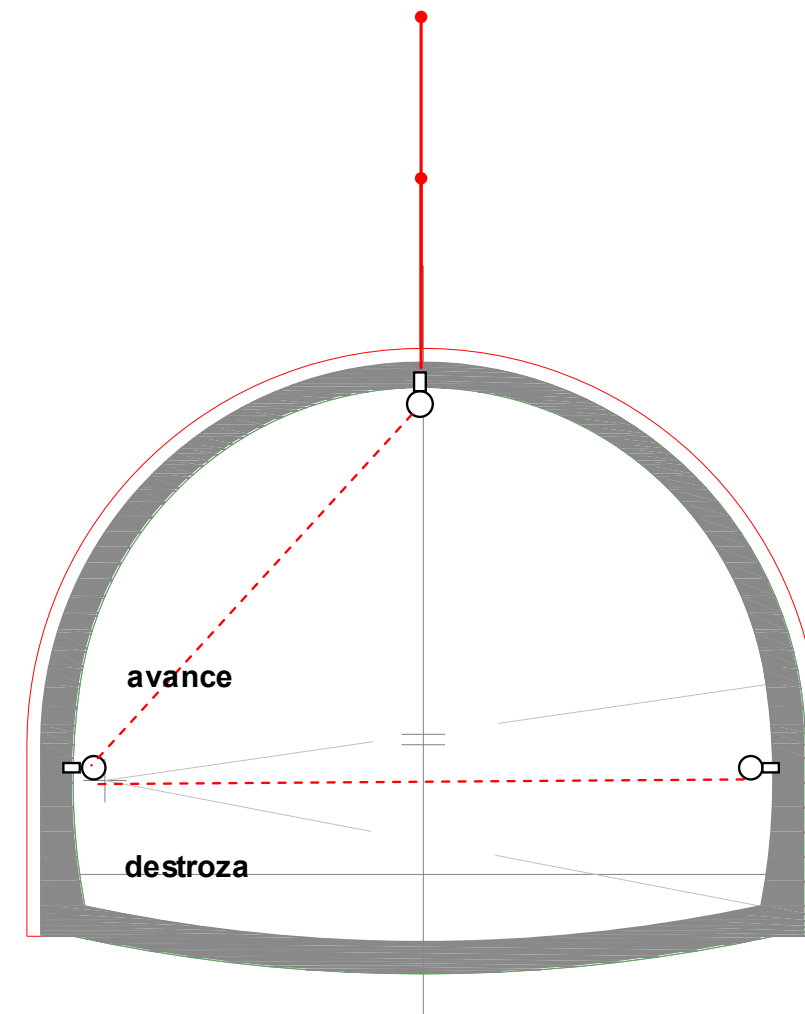
- Comportamiento deformacional de la excavación: Se mantiene el esquema de convergencias, aunque se recomienda la nivelación de los pernos inferiores y la utilización de un sistema óptico frente a o combinado con cinta de convergencia de tipo invar.



Sección de auscultación propuesta para caverna .

En el Túnel de vía doble y ramales de vía única se consideran dos tipologías de secciones:

- Sección de control deformacional: Formada por tres pernos con nivelación en hastiales. Se dispondría por tanto de tres cuerdas que deben controlarse desde la excavación hasta estabilización de deformaciones. Adicionalmente se recomienda el control de desplazamientos en la clave mediante bulón extensométrico.



Sección de auscultación propuesta para túnel en vía doble

- Sección de control tensional-deformacional: En este caso se dispondría de:
 - Pernos de convergencia (3)/ nivelación (2 en hastiales).
 - 3 células de presión total en disposición tangencial y una célula radial en clave.
 - 3 sistemas de control deformacional en sustrato mediante bulón extensométrico.

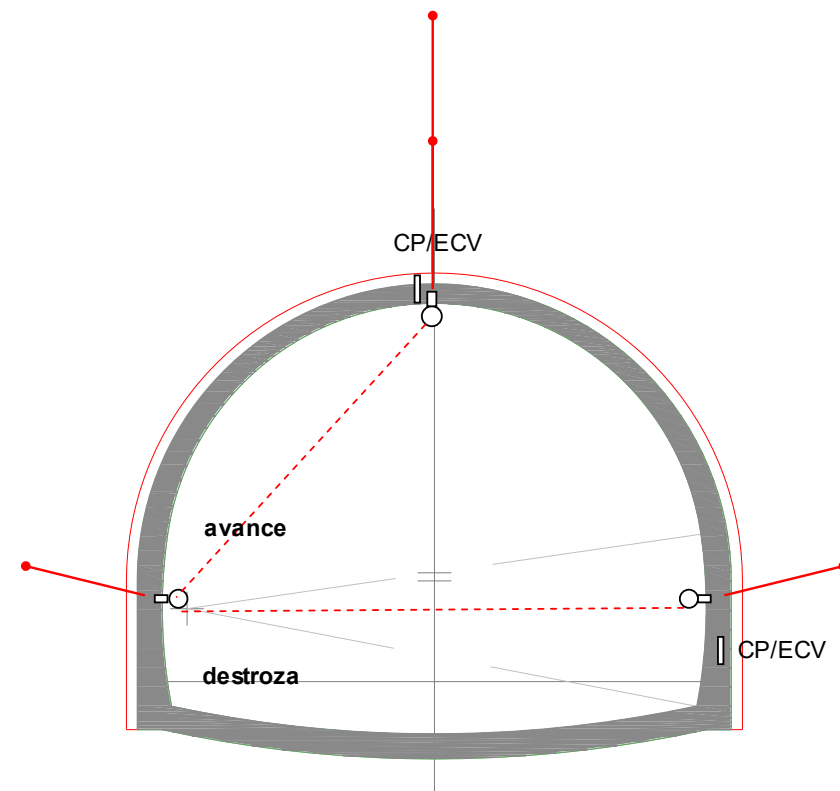
Este tipo de sección se dispondría según los siguientes criterios:

Al menos dos secciones por tramo entre estaciones (por ejemplo, Irala –Zabalburu debería disponer de dos secciones de este tipo. En principio las secciones deberían coincidir con alguno o varios de los siguientes factores:

- Variaciones notables en la cobertura: por ejemplo, paso de vaguadas o escarpes superficiales.
- Paso bajo edificación sensible a los asientos. En este caso se combinaría con elementos de control de asientos, verticalidad de fachadas y distorsiones angulares.
- Zonas de menor calidad de roca.

En las zonas singulares se deberá disponer de al menos una sección adicional de este tipo:

- Tramo Rekalde-Irala: Paso bajo túnel de ferrocarril Basurto-Ariz.
- Tramo Irala-Zabalburu: Pasos bajo RENFE cercanías y FEVE cercanías.
- Tramo Zabalburu-Moyua: Paso bajo líneas 1-2
- Tramo Moyua-Parque: Paso bajo edificación
- Paso bajo la Ría.
- Salto del Carnero y zona vaguada en paso bajo Túnel Ugasko-La Salve (0+640).



Sección de auscultación propuesta para túnel en vía doble. Sección especial

Adicionalmente se consideran los siguientes aspectos

- Control de acciones: Control de nivel freático mediante dos piezómetros de cuerda vibrante en cabeza y cola de cada una de las estaciones donde sea previsible que el nivel alcance las estructuras de contención: A priori previsto para las estaciones de Moyua, Parque y Deusto. Este control se hace extensivo al tramo Parque-Deusto con la disposición de piezómetros cada 50 metros de traza.
- Control evolutivo: De cara a valorar la evolución del comportamiento del sistema roca-sostenimiento-revestimiento se recomienda desarrollar una serie de secciones de control sobre las que se aplicaran técnicas no destructivas por ejemplo geofísicas (radar) combinadas con un control a largo plazo de las acciones sobre el revestimiento-sostenimiento (medidas de evolución de nivel freático y empujes totales sobre células).

9. REVESTIMIENTO

Se ha previsto un revestimiento continuo de hormigón en masa HM-25 de 30 cm de espesor.

El revestimiento de un túnel tiene una función estructural fundamental ya que garantiza su estabilidad a largo plazo, en la hipótesis de pérdida total de eficacia de los elementos metálicos de sostenimiento por fluencia y/o corrosión.

Consecuentemente su ejecución deberá ser extremadamente cuidadosa en cuanto a la calidad y continuidad de los citados elementos, evitándose la formación de juntas con una disposición y calidad que disminuyan la capacidad estructural.

10. IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE

Para proteger el revestimiento de la acción de las aguas subterráneas y para evitar goteos sobre la plataforma, se dispondrá un sistema de impermeabilización en los cañones y zonas de instalaciones así como en las cavernas de estación.

APÉNDICE N°9.1

Planta y perfil longitudinal túnel en mina

Litología

Cuaternario

Qc

Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg

Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu

Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca

Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq

Filones de cuarzo

Dv

Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

DISTANCIA AL EJE
(+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

Contacto litológico discordante

Contacto litológico

Contacto mecánico

Estudio informativo 2021

Campaña complementaria 2020-2021

Edificación Albergue Elejabarri

Estudio informativo intermodal Balueta-Abando

Parking Kirikiño

Parking plaza Rekalde

Parking Zababuru

Soterramiento FEVE

Estudio alternativas 2024

Viviendas Gaztelondo

Ramón y Cajal, Deusto

Abandoibarra

Museo Bellas Artes

Línea 1 Metro Bilbao

Plaza Amezola

Accesos Bilbao NRFPV

Otros

Tuneles Artxanda

Geofísica tunel viario (Ugasko - La Salve)

Perfil de sísmica pasiva tunel viario (Ugasko - La Salve)

Tomografía eléctrica

Tomografía eléctrica 3D

Proyecto constructivo Matiko-Deusto

Perfil de sísmica pasiva

Tomografía eléctrica

Estudio informativo Línea 4 2012

Perfil de sísmica pasiva

Tomografía eléctrica

Proyecto constructivo Deusto-Moyua

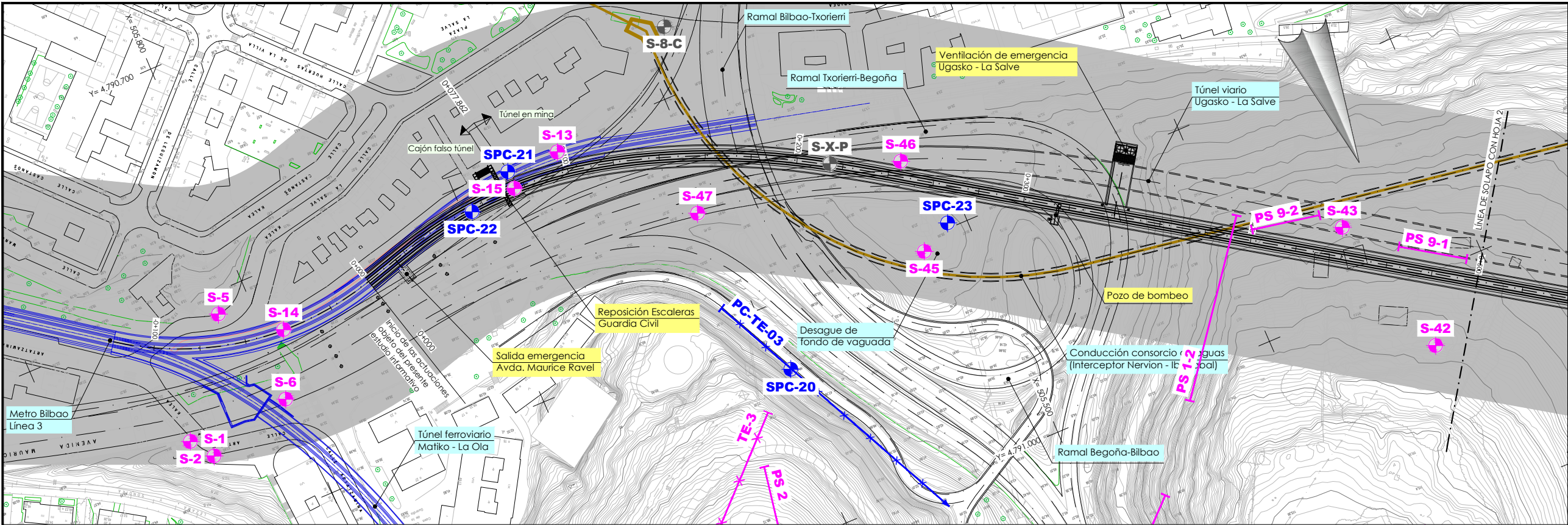
Perfil de sísmica pasiva

Tomografía eléctrica

Tomografía eléctrica 3D

OHARRAK :
NOTAS :

A	PROYECTO	Oct.-25			
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES					
AHOLKULARIA CONSULTOR			INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR		
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR			ERREFERENTZIA REFERENCIA		



Planta
Escala: 1/1000

OHARRAK:
NOTAS:

Litología

- Cuaternario
 - Qc Cuaternario indiferenciado
- Cretácico inferior
 - Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas
 - Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas
 - Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales
 - Dq Filones de cuarzo
 - Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

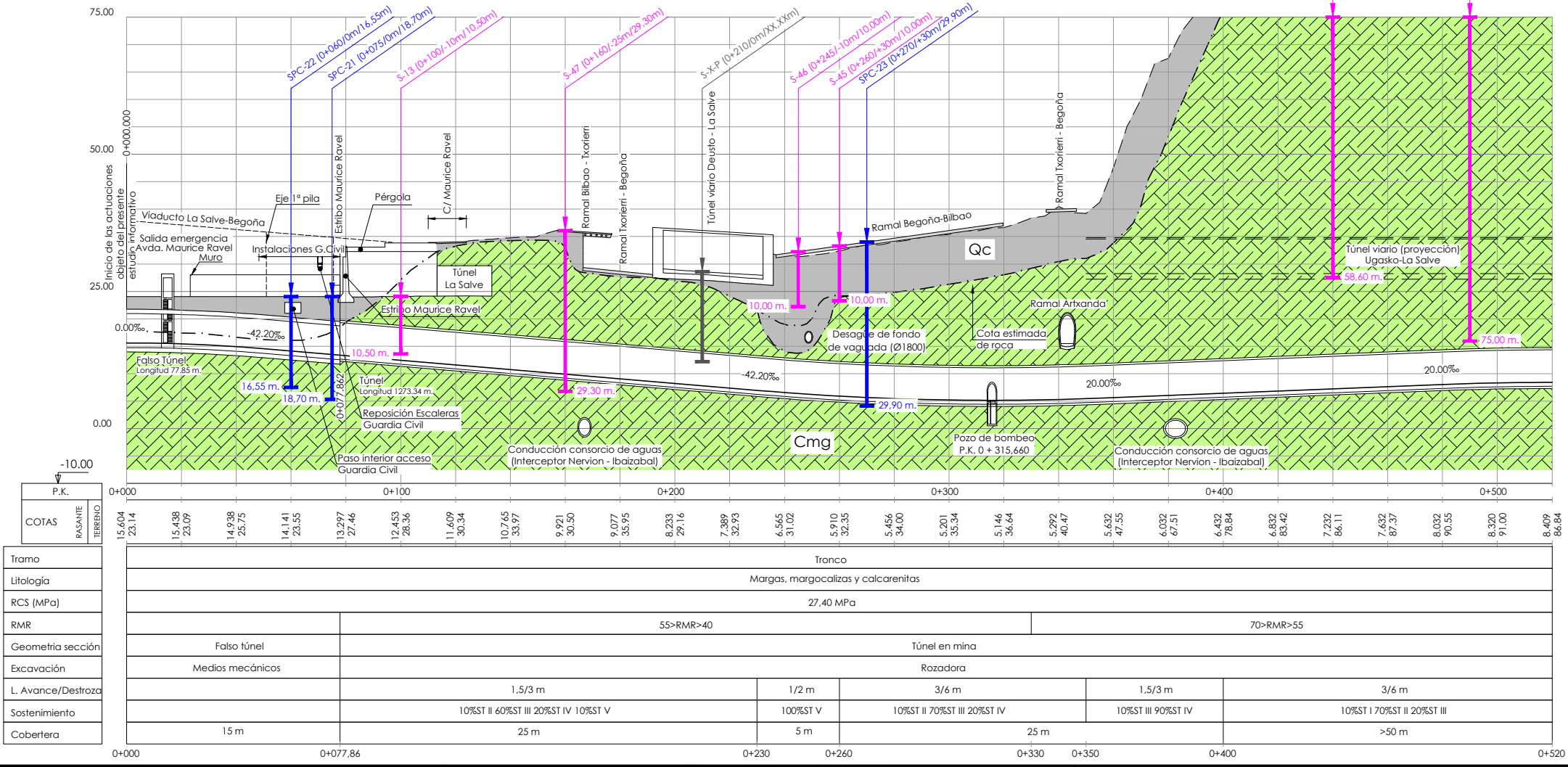
TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)
P.K.

DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Iza.)

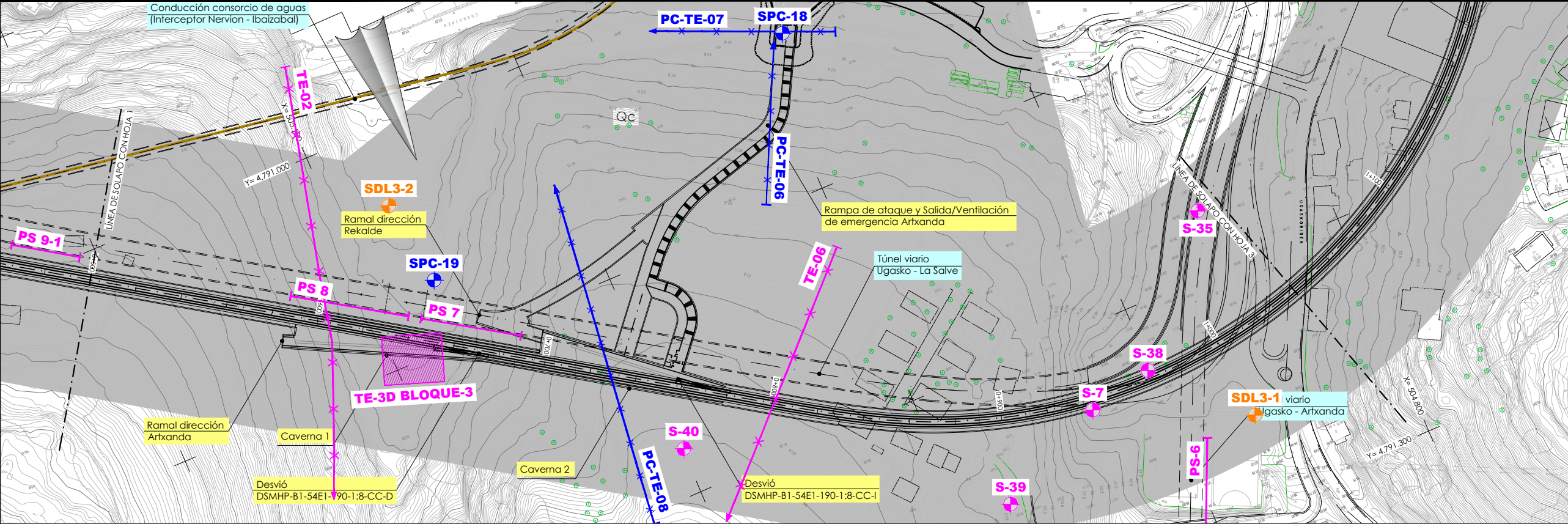
PROFUNDIDAD

— — Contacto litológico discordante
— — Contacto litológico
— — Contacto mecánico

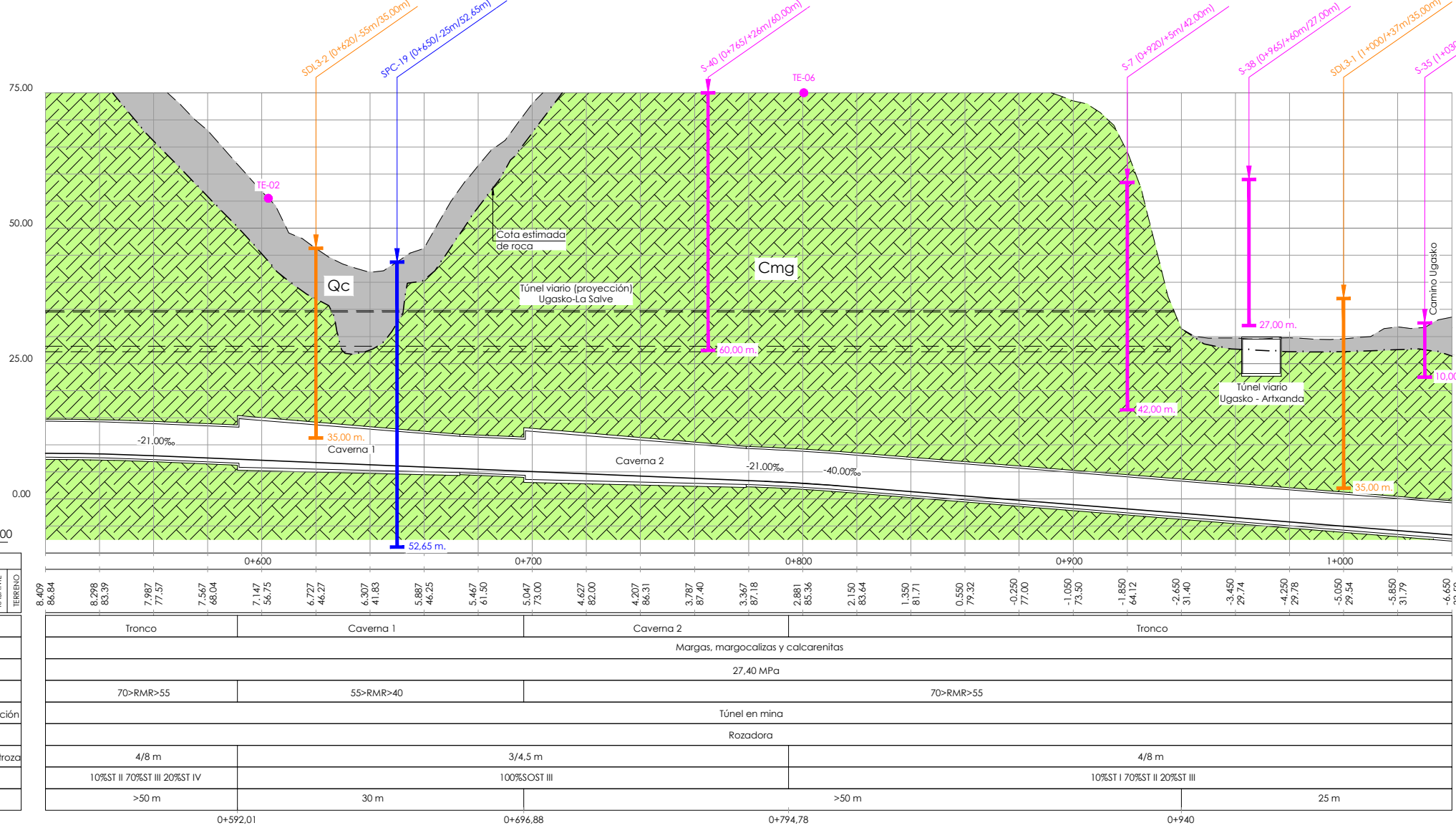


Tramo	COTAS
Litología	15.604
RCS (MPa)	23.14
RMR	15.438
Geometría sección	23.09
Excavación	14.938
L. Avance/Destroza	25.75
Sostenimiento	14.141
Cobertera	23.55

P.K.	0+000	0+077,86	0+230	0+260	0+330	0+350	0+400	0+520
Tramo	Tronco							
Litología	Margas, margocalizas y calcarenitas							
RCS (MPa)	27,40 MPa							
RMR	55>RMR>40				70>RMR>55			
Geometría sección	Falso túnel				Túnel en mina			
Excavación	Medios mecánicos				Rozadora			
L. Avance/Destroza	1,5/3 m				3/6 m			
Sostenimiento	10%ST II 60%ST III 20%ST IV 10%ST V				10%ST I 70%ST II 20%ST IV			
Cobertera	15 m				25 m			



Planta
Escala: 1/1000



OHARRAK :
NOTAS :

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

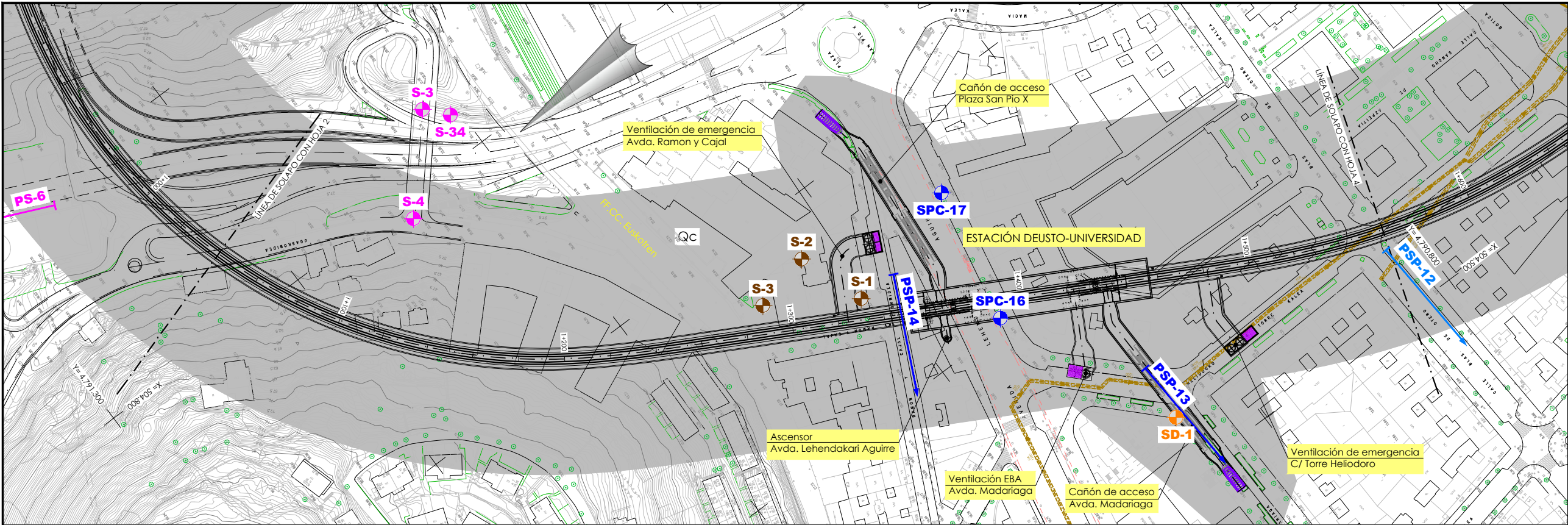
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

— — Contacto litológico discordante

— — Contacto litológico

— — Contacto mecánico



Planta
Escala: 1/1000

OHARRAK:
NOTAS:

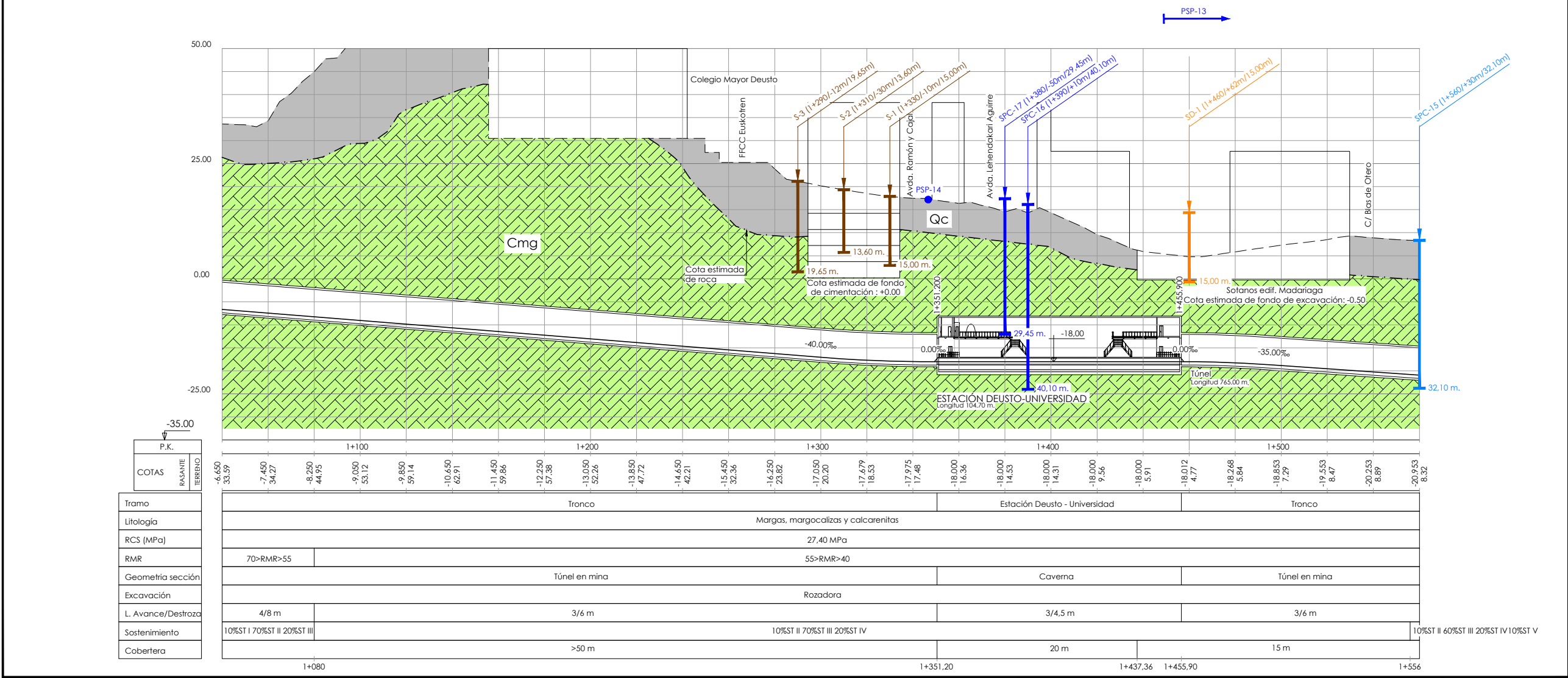
Litología

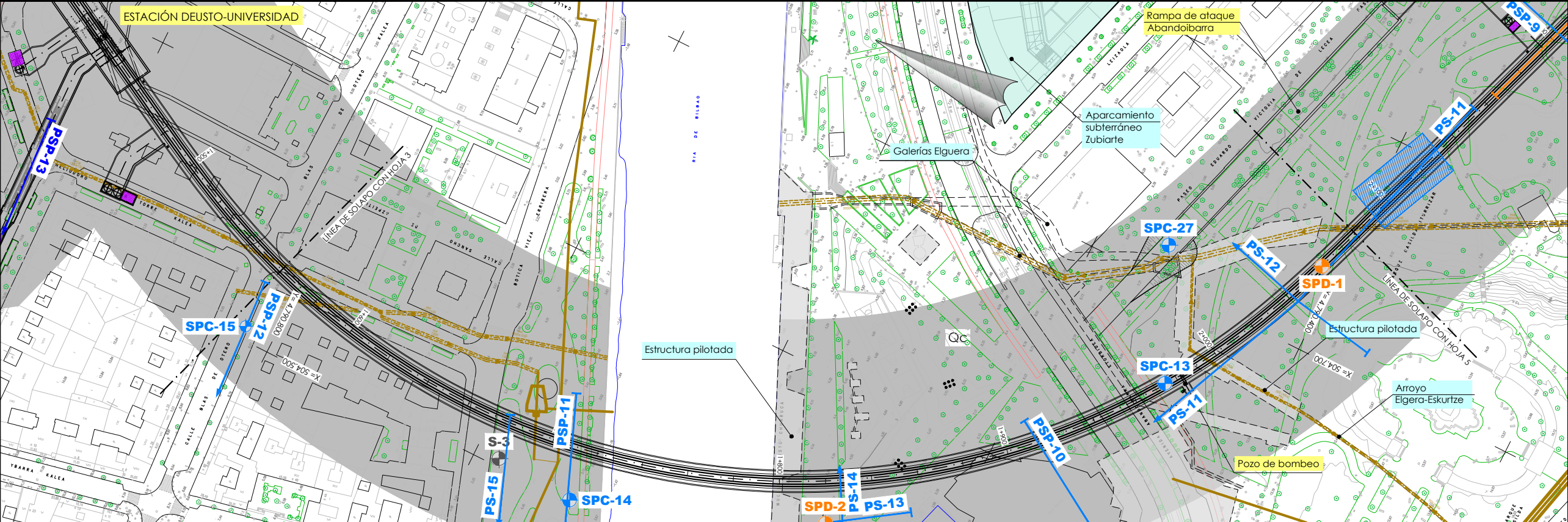
- Cuaternario
 - Qc Cuaternario indiferenciado
- Cretácico inferior
 - Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas
 - Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas
 - Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales
 - Dq Filones de cuarzo
 - Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO S-1 (0+595/ +25/ 17,60)
P.K.
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)
PROFUNDIDAD

— — Contacto litológico discordante
— — Contacto litológico
— — Contacto mecánico





Planta
Escala: 1/1000

OHARRAK:

NOTAS:

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

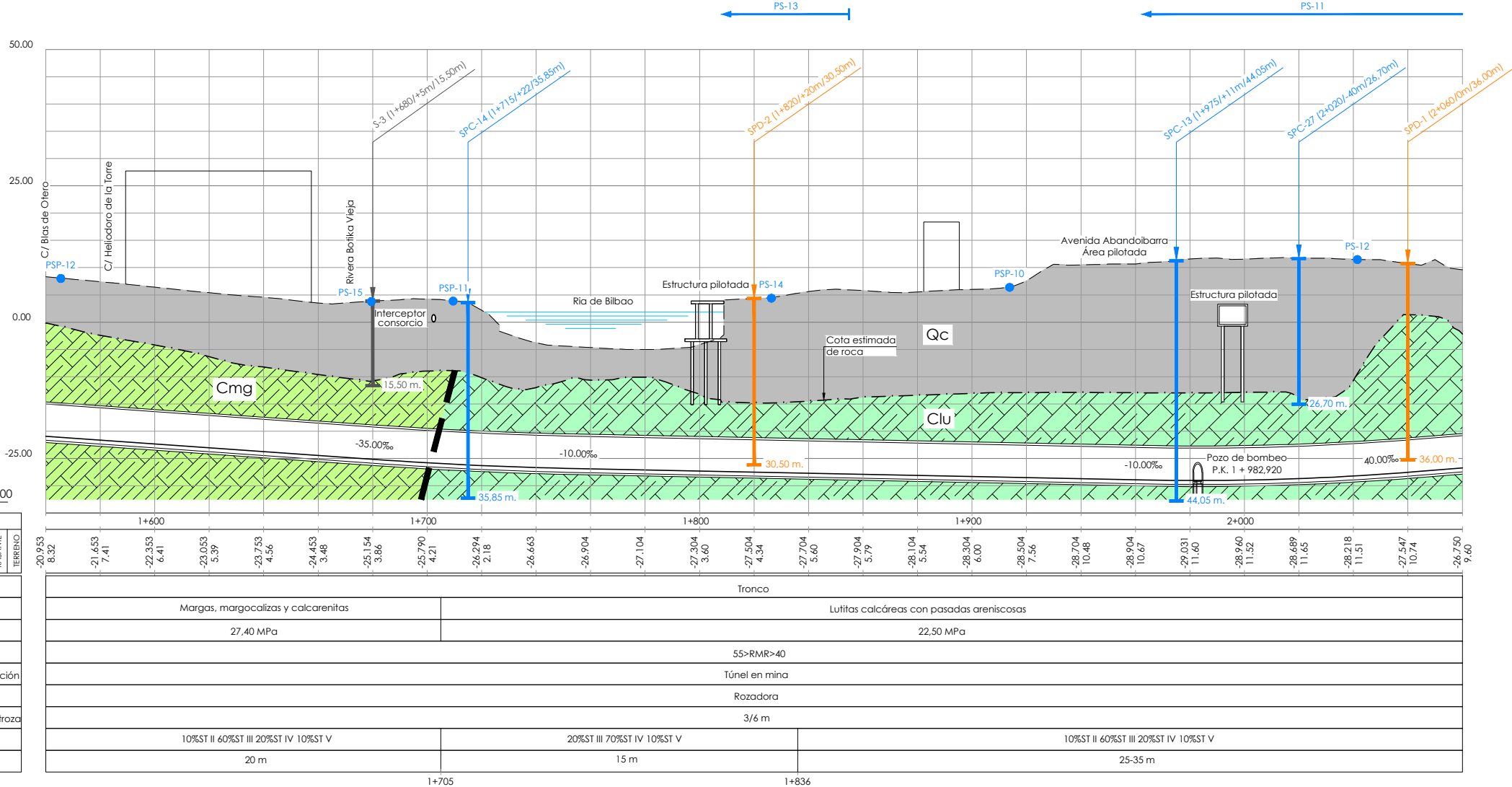
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

— — Contacto litológico discordante

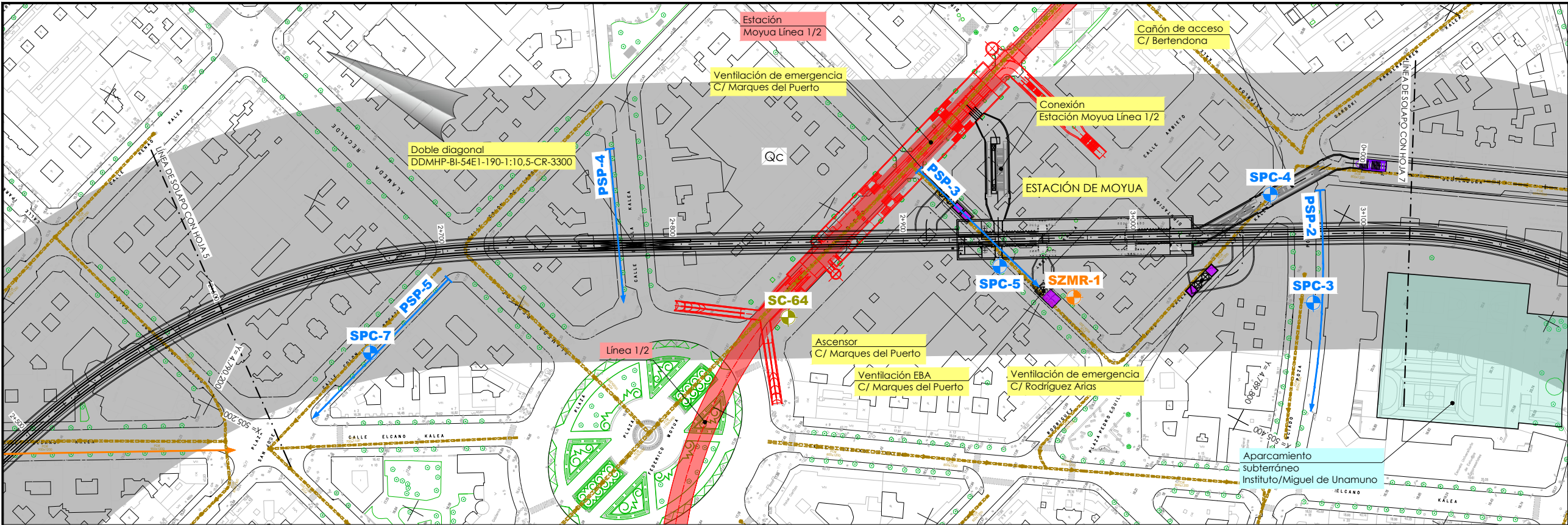
— — Contacto litológico

— — Contacto mecánico



Tramo	COTAS
Basante	P.K.
TERRERIO	
Litología	
RCS (MPa)	
RMR	
Geometría sección	
Excavación	
L. Avance/Destroza	
Sostenimiento	
Cobertera	

Tronco	
Margas, margocalizas y calcarenitas	Lutitas calcáreas con pasadas areniscas
27,40 MPa	22,50 MPa
55>RMR>40	
Túnel en mina	
Rozadora	
3/6 m	
10%ST III 60%ST III 20%ST IV 10%ST V	20%ST III 70%ST IV 10%ST V
20 m	15 m
1+705	1+836



Planta
Escala: 1/1000

OHARRAK:
NOTAS:

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

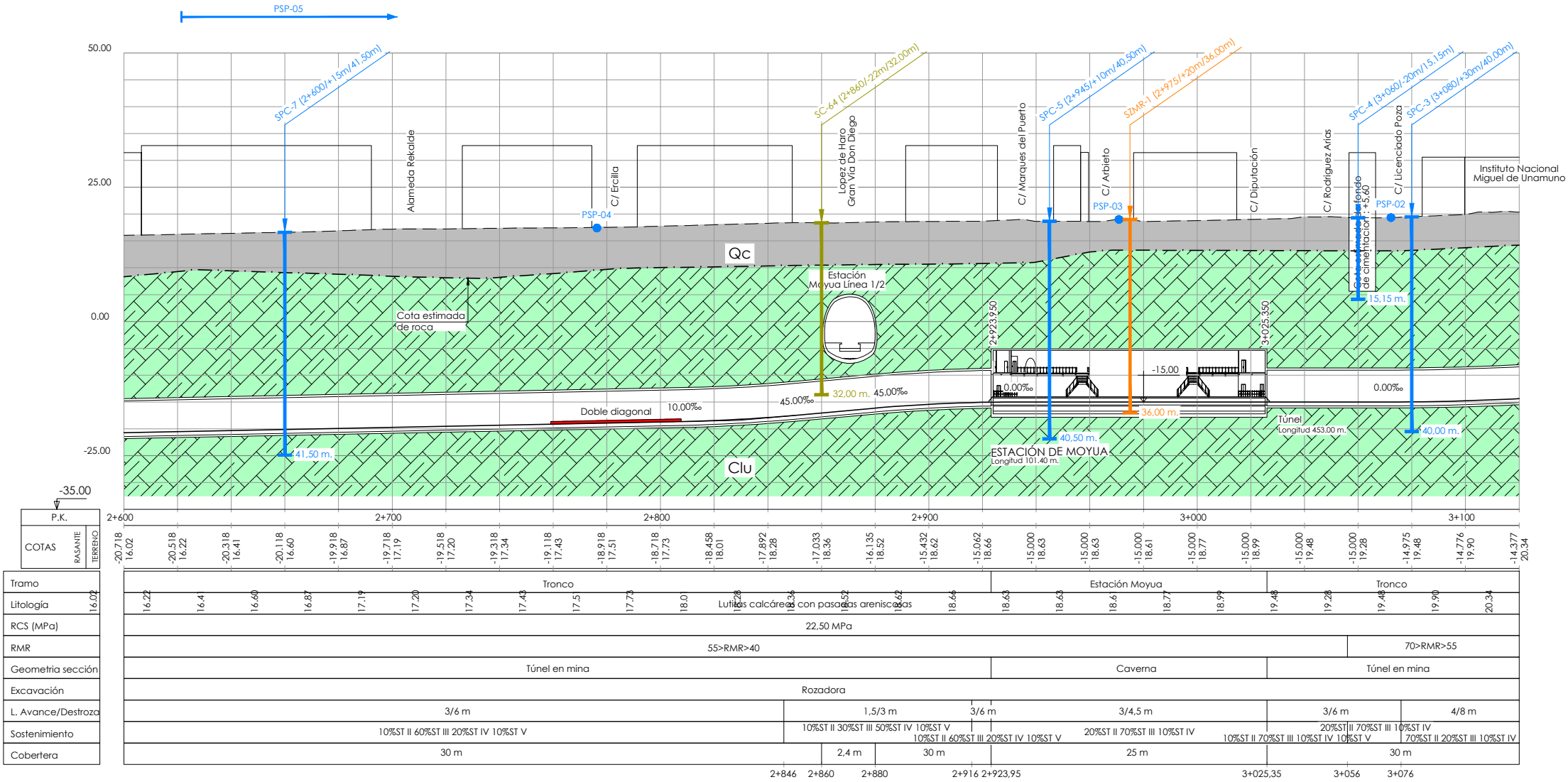
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

Contacto litológico discordante

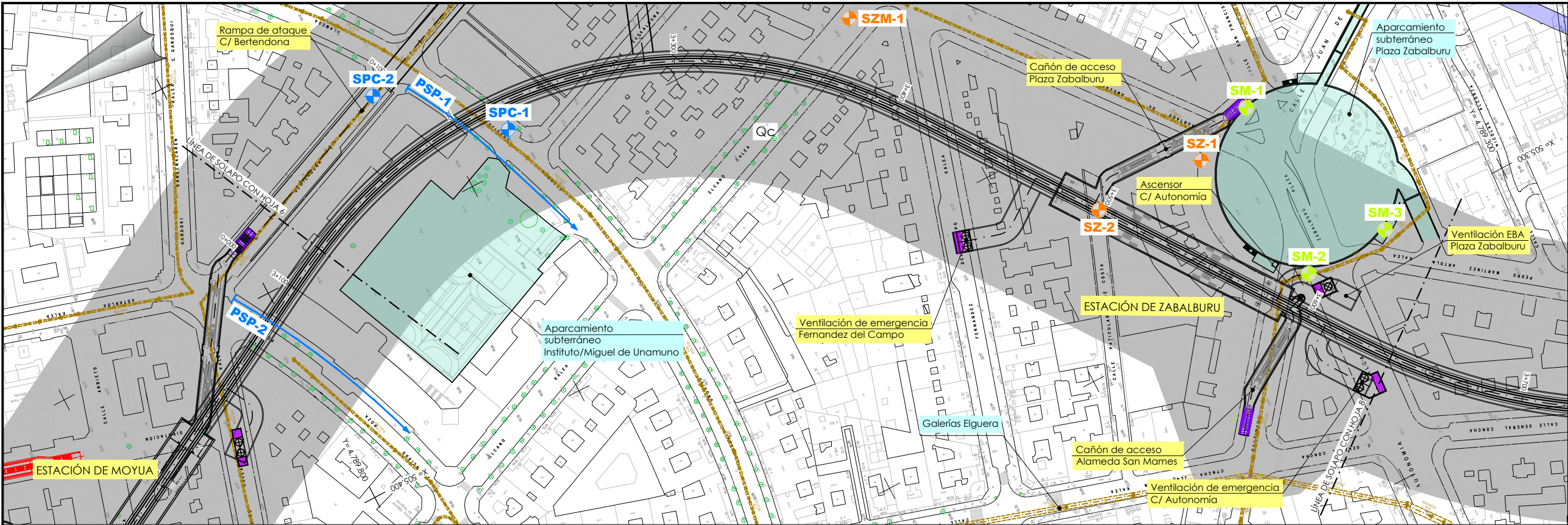
Contacto litológico

Contacto mecánico



Tramo	COTAS
Litología	16.02
RCS (MPa)	
RMR	
Geometría sección	
Excavación	
L. Avance/Destroza	
Sostenimiento	
Cobertera	

A	PROYECTO	Oct-25			
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES					
AHOLKULARIA CONSULTOR			INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR		
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR			ERREFERENTZIA REFERENCIA		



Planta
Escala: 1/1000

OHARRAK :
NOTAS :

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

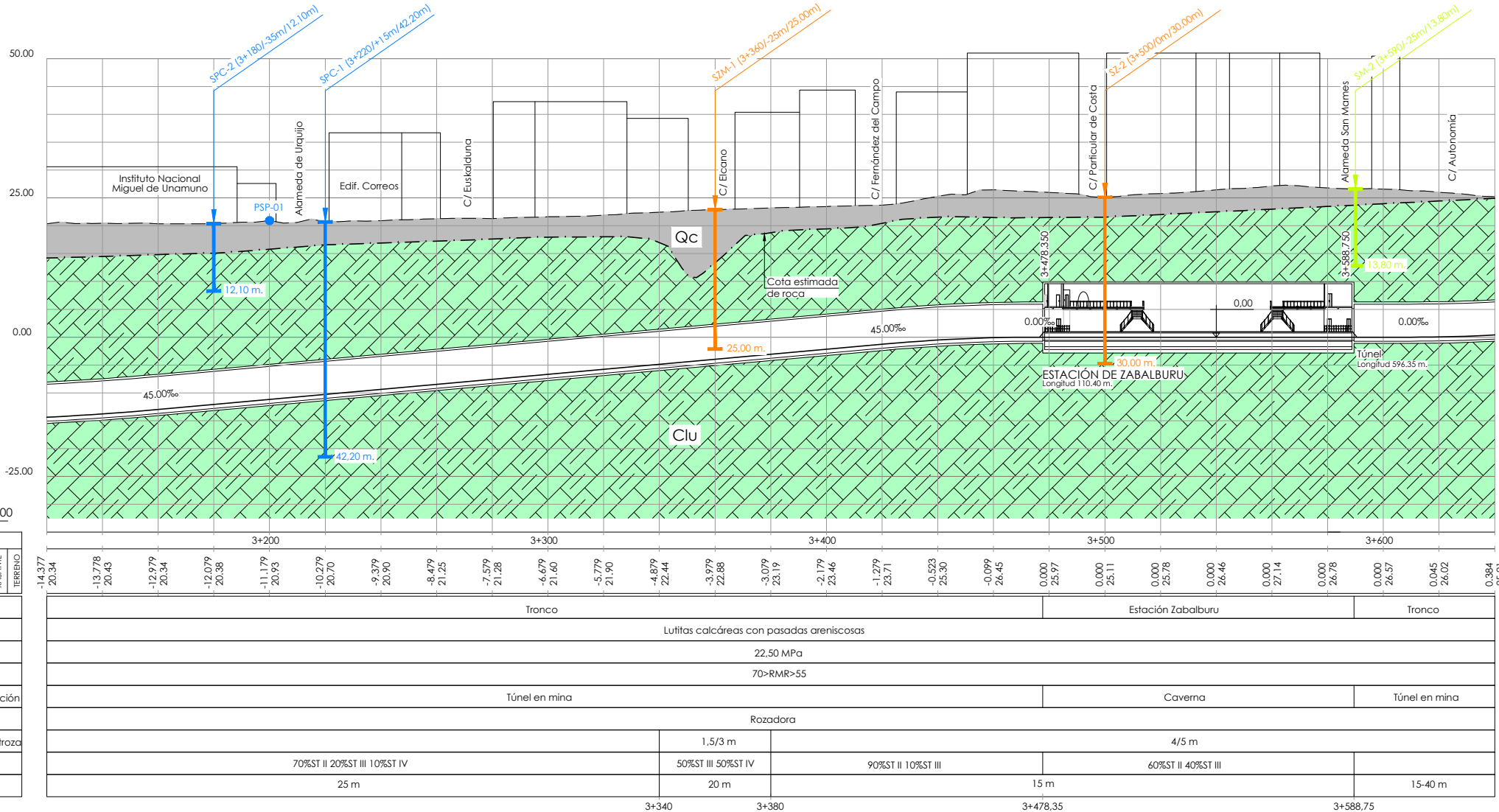
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

Contacto litológico discordante

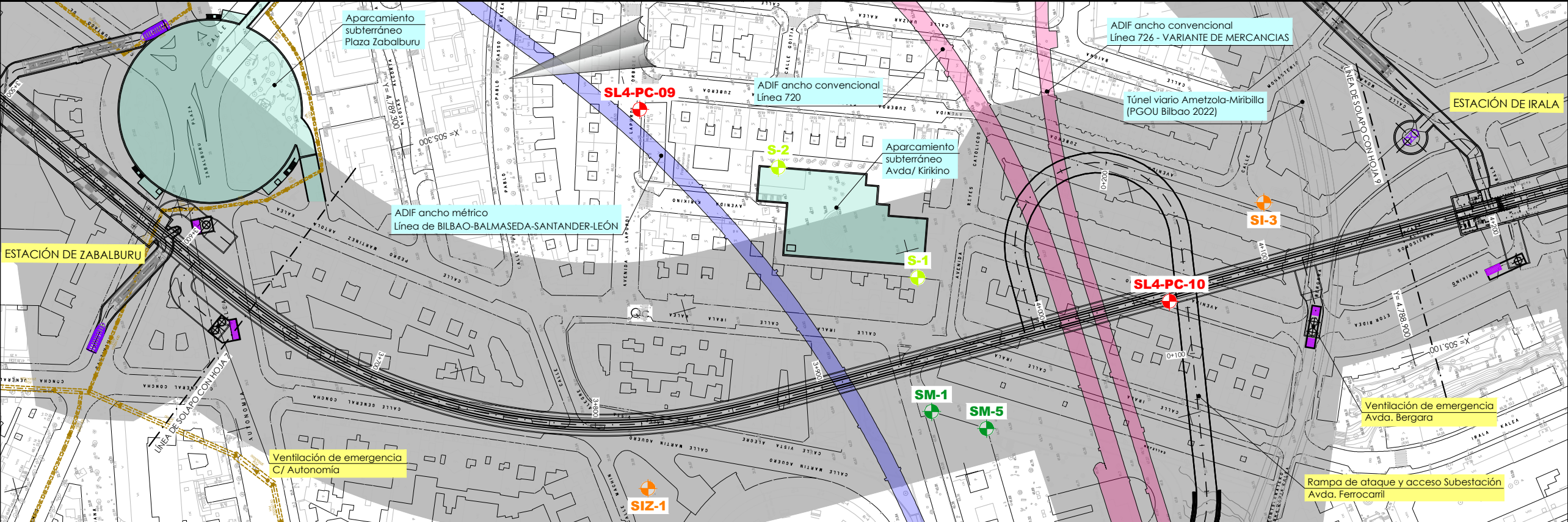
Contacto litológico

Contacto mecánico

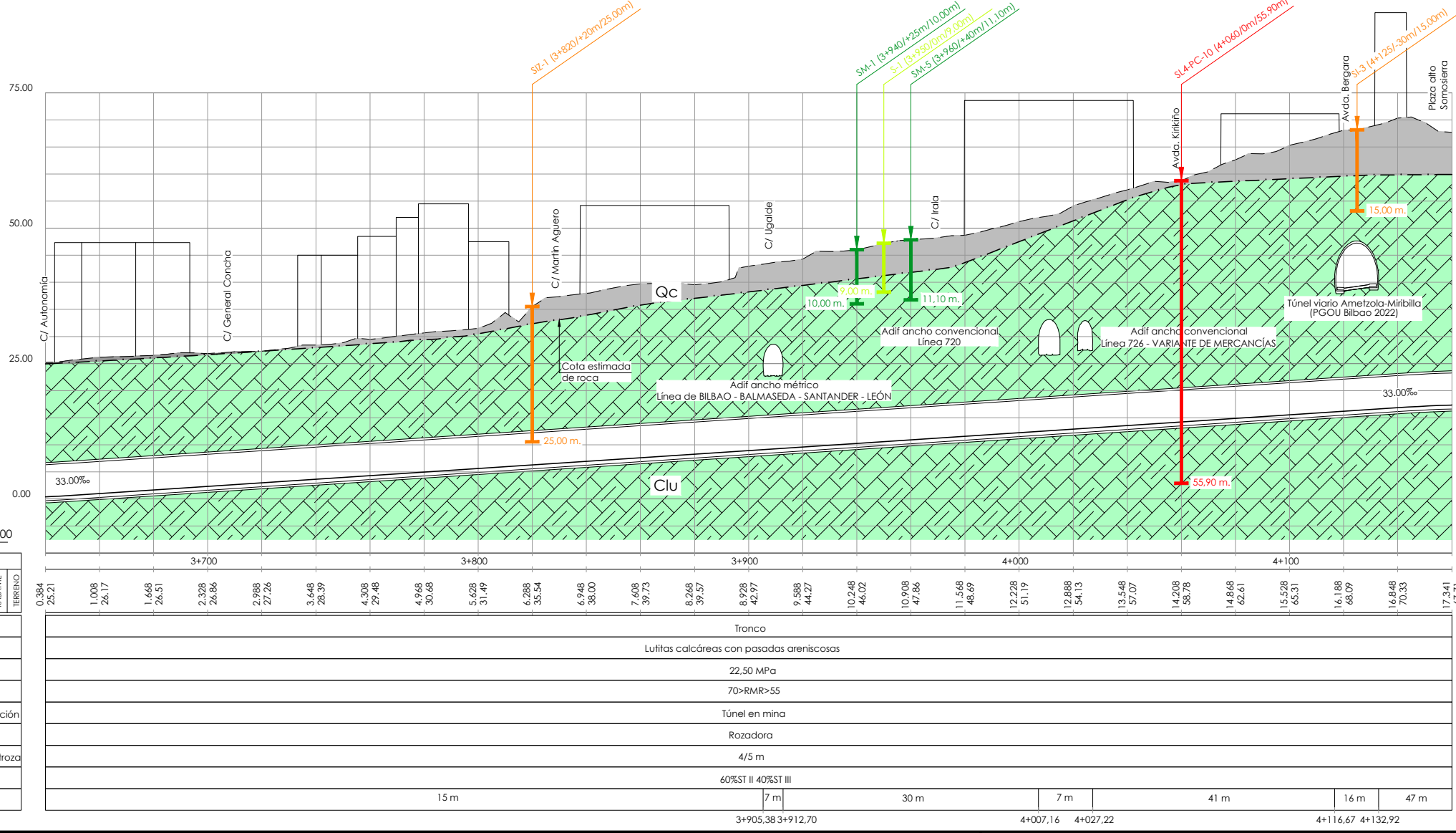


Tramo	Litología	RCS (MPa)	RMR	Geometría sección	Excavación	L. Avance/Destroza	Sostenimiento	Cobertera
Tramo	Litología	RCS (MPa)	RMR	Geometría sección	Excavación	L. Avance/Destroza	Sostenimiento	Cobertera

Tramo	Litología	RCS (MPa)	RMR	Geometría sección	Excavación	L. Avance/Destroza	Sostenimiento	Cobertera
Tramo	Litología	RCS (MPa)	RMR	Geometría sección	Excavación	L. Avance/Destroza	Sostenimiento	Cobertera



Planta
Escala: 1/1000



OHARRAK :
NOTAS :

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

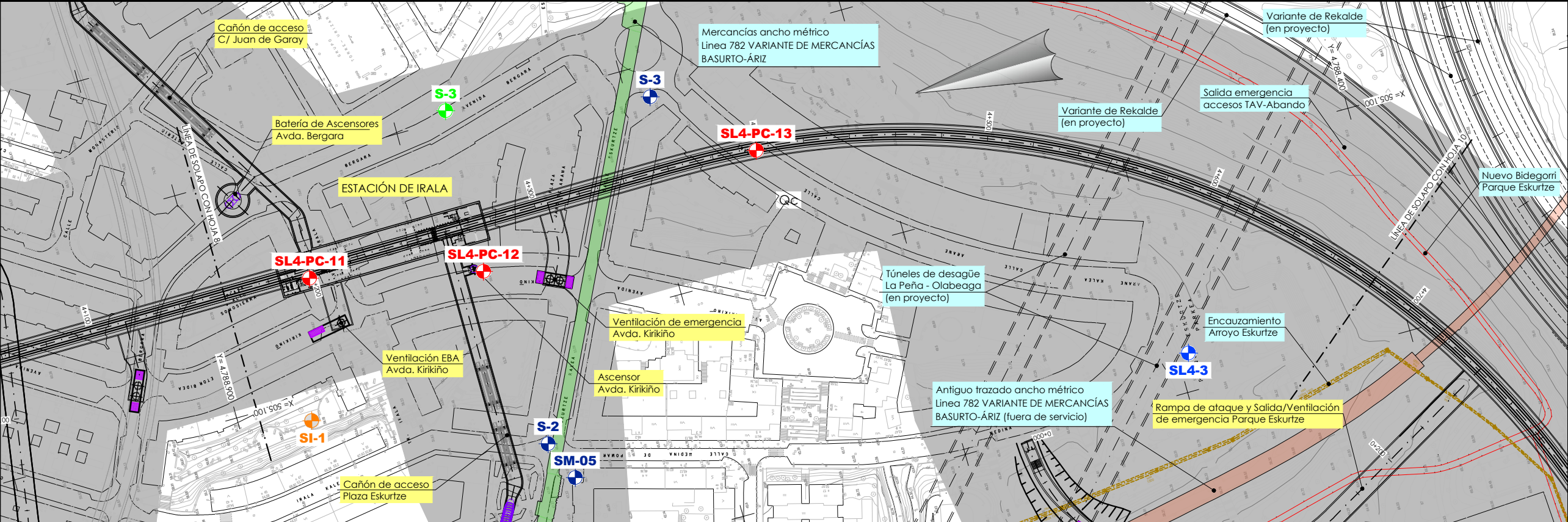
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

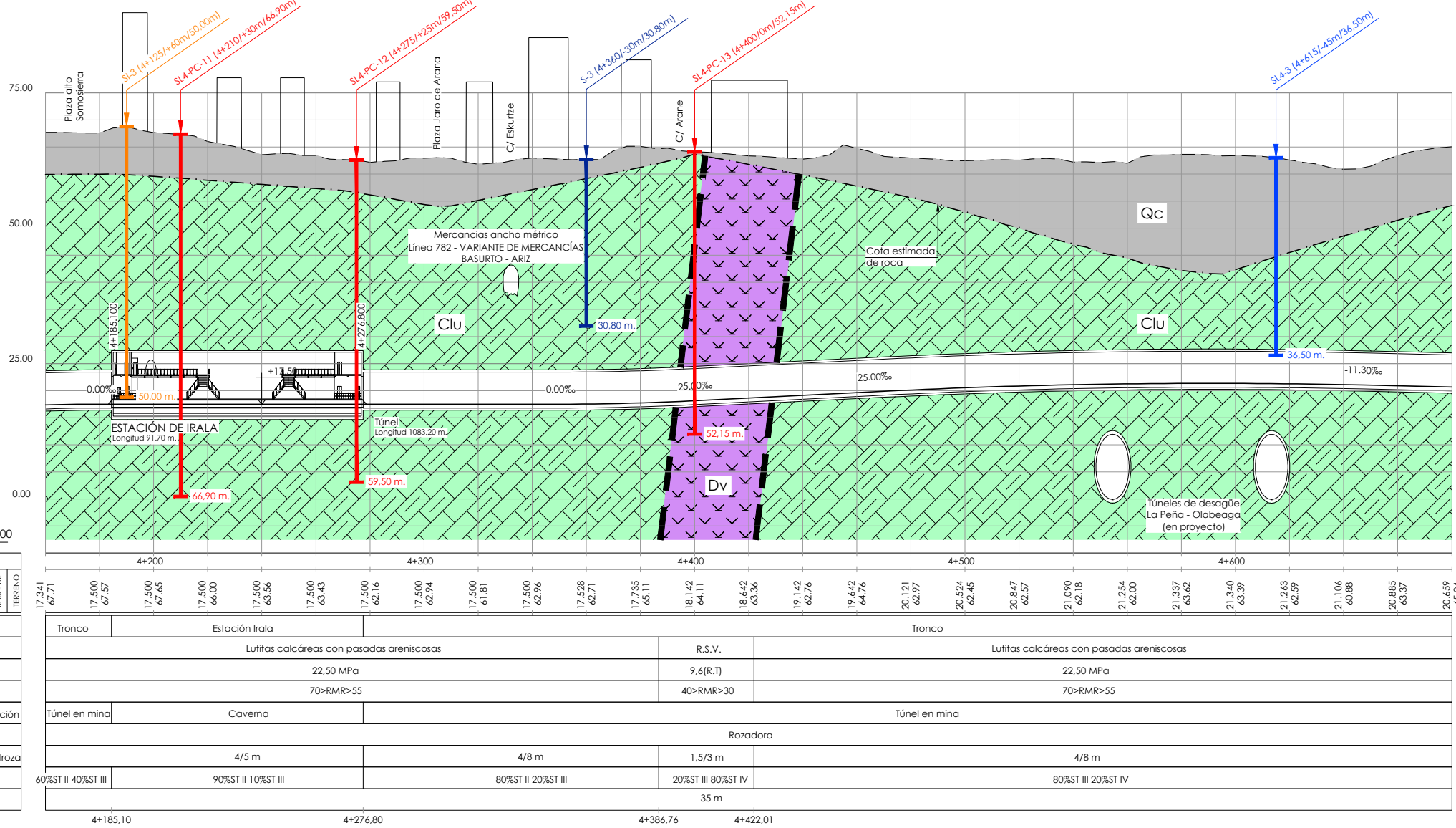
Contacto litológico discordante

Contacto litológico

Contacto mecánico



Planta
Escala: 1/1000



Tramo	Litología	RCS (MPa)	RMR	Geometría sección	Excavación	L. Avance/Destroza	Sostenimiento	Cobertera
Tronco	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	22,50 MPa	70>RMR>55	Túnel en mina	Caverna	4/5 m	60%ST II 40%ST III	
Tronco	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	22,50 MPa	70>RMR>55	Túnel en mina	Rozadora	4/8 m	80%ST II 20%ST III	
Tronco	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	22,50 MPa	70>RMR>55	Túnel en mina	Rozadora	4/8 m	80%ST III 20%ST IV	
Tronco	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	22,50 MPa	70>RMR>55	Túnel en mina	Rozadora	4/8 m	80%ST III 20%ST IV	

OHARRAK :
NOTAS :

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

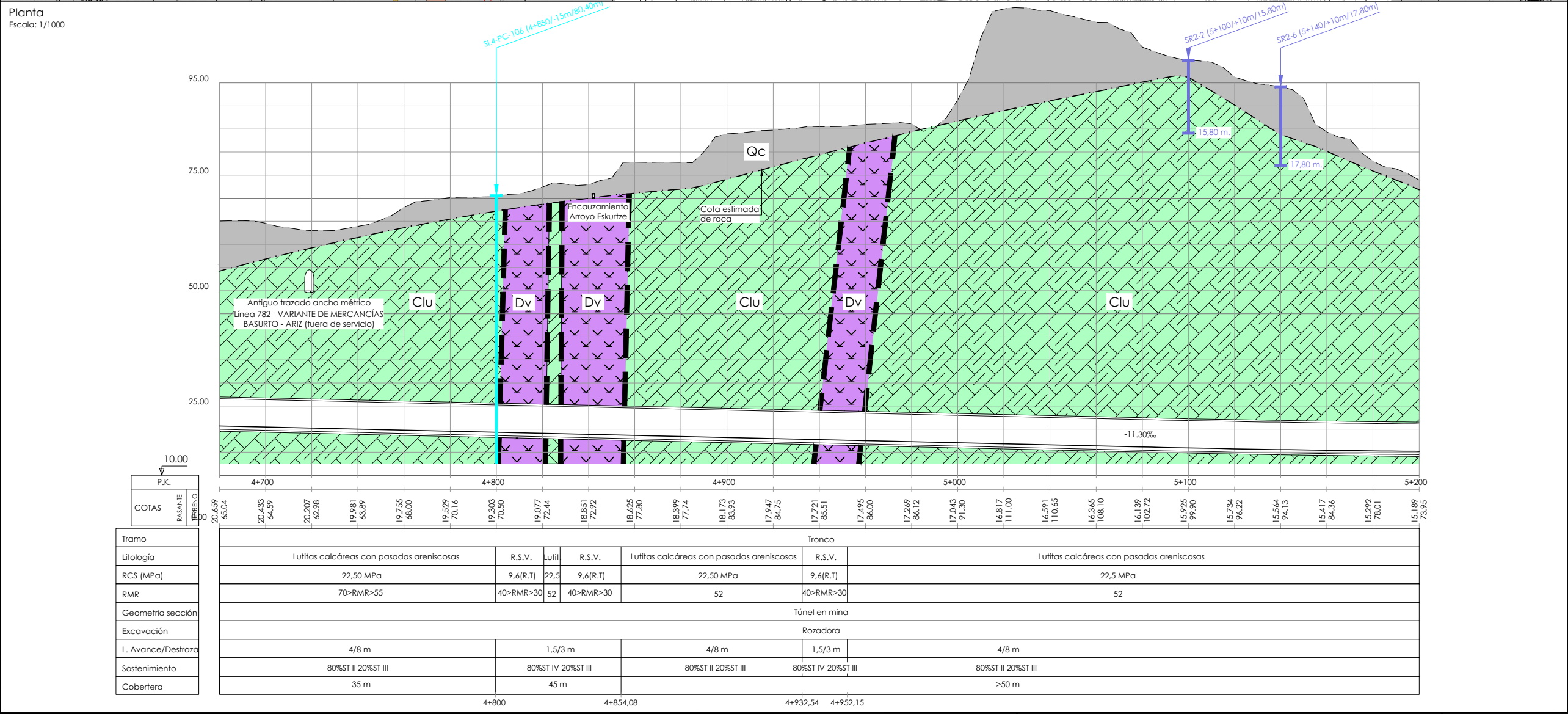
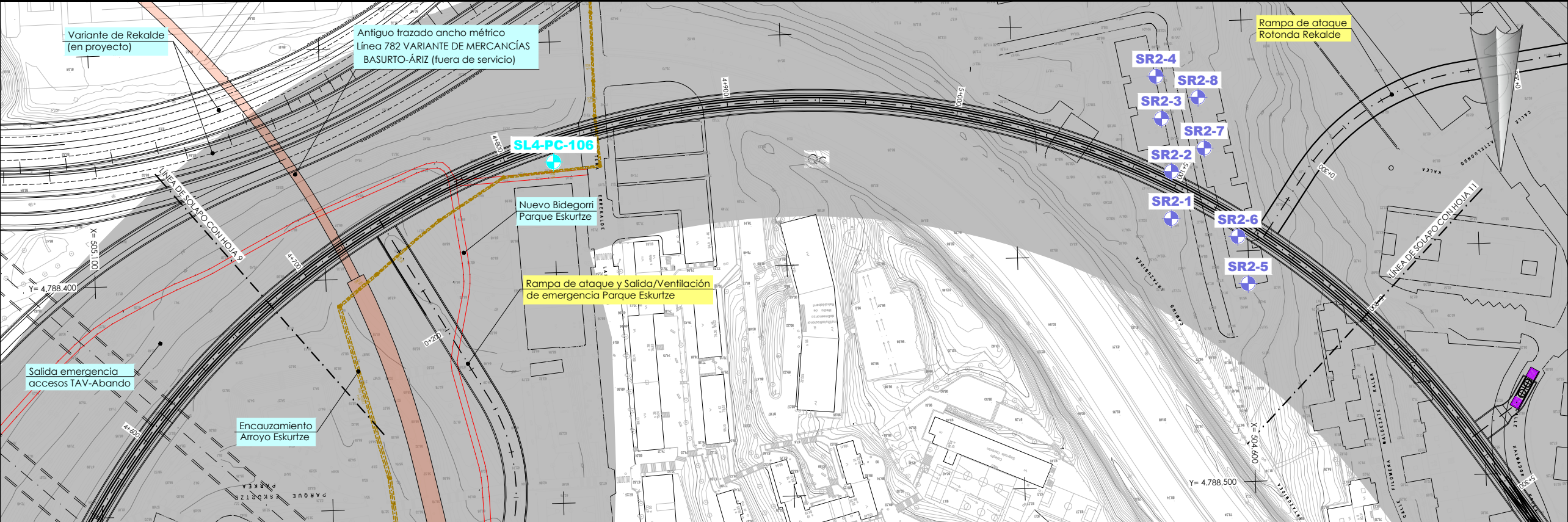
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

Contacto litológico discordante

Contacto litológico

Contacto mecánico



OHARRAK :
NOTAS :

Litología

Cuaternario

Qc Cuaternario indiferenciado

Cretácico inferior

Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas

Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas

Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales

Dq Filones de cuarzo

Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología

TRABAJO

S-1 (0+595/ +25/ 17,60)

P.K.

DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)

PROFUNDIDAD

Contacto litológico discordante

Contacto litológico

Contacto mecánico

REV.	PROYECTO	Oct-25	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES						
AHOLKULARIA CONSULTOR			INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR			
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR			ERREFERENTZIA REFERENCIA			

EUSKO JAURLARITZA

MUGIKORTASUN JASANGARRIAREN SAILA

GOBIERNO VASCO

DEPARTAMENTO DE MOVILIDAD SOSTENIBLE

PROIEKTUAREN IKUSKAPENA ETA ZUZENDARITZA

INSPECCION Y DIRECCION DEL PROYECTO

ESKALA ORIGINAL

ESCALA ORIGINAL

V 1:500

H 1:1000

EN DIN A1

PROIEKTUAREN IZENBURUA

TITULO DEL PROYECTO

ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA 4 DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE BILBAO

PLANOAREN IZENBURUA

TITULO DEL PLANO

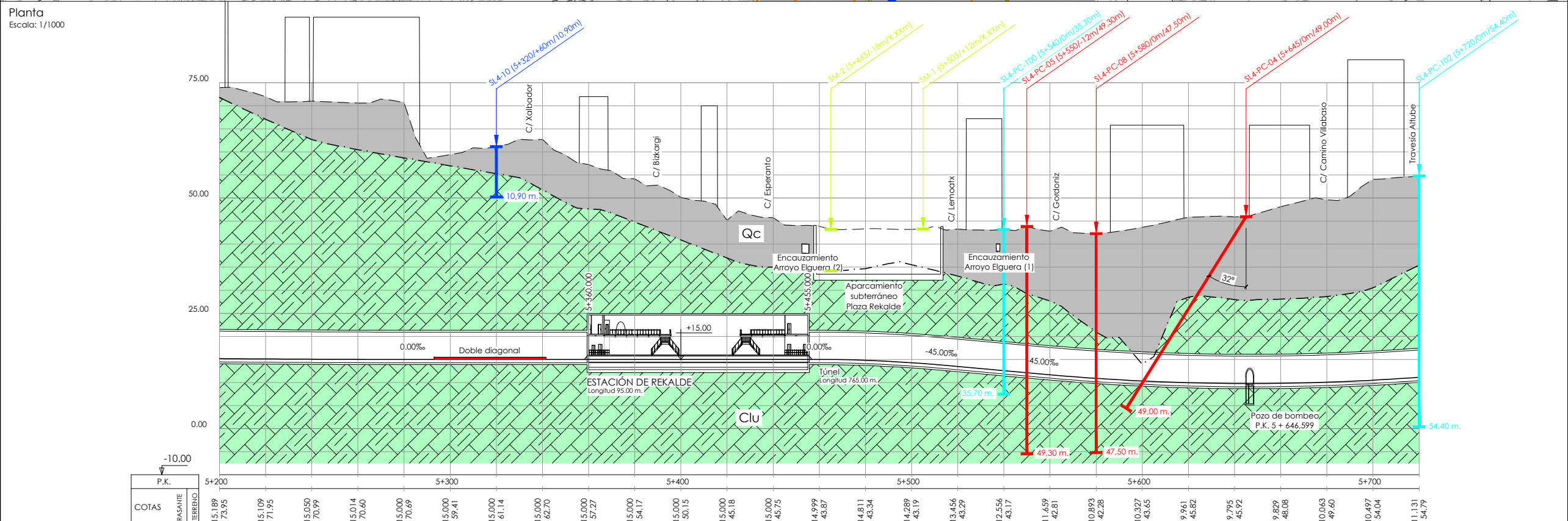
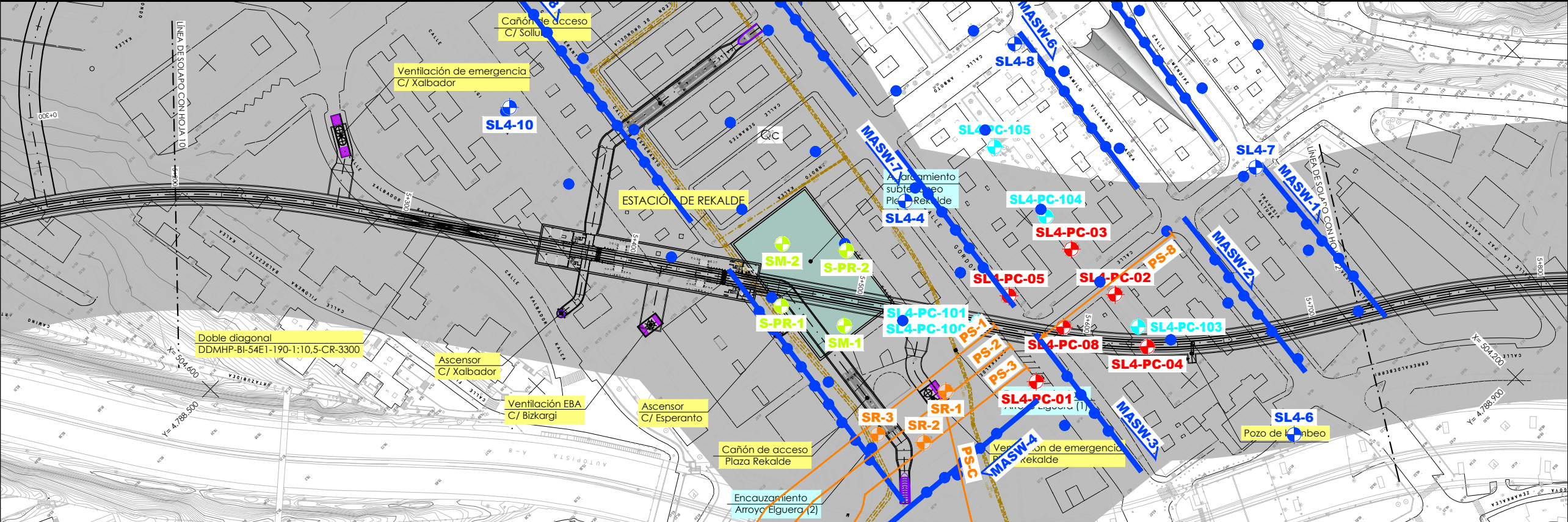
TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS PLANTA Y PERFIL LONGITUDINAL HOJA 10

PLANO ZK. / N. PLANO

A09.1

ORRIA / HOJA

11 Sigue 12

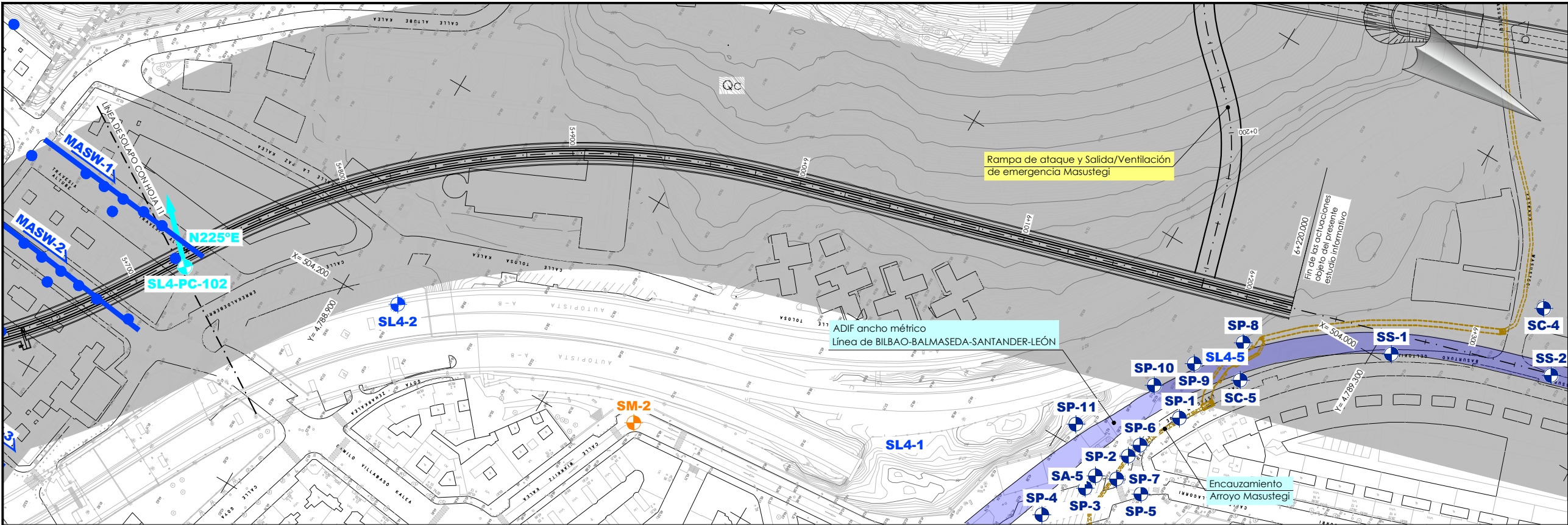


Tramo	Tronco	Estación Rekalde	Tronco	Tronco
Litología	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	Lutitas / Cuaternario	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas	Lutitas calcáreas con pasadas areniscosas
RCS (MPa)	22.5 MPa	0 - 22.5 MPa	22.5 MPa	22.5 MPa
RMR	70>RMR>55	55>RMR>0	70>RMR>55	70>RMR>55
Geometría sección	Túnel en mina	Caverna	Túnel en mina	Túnel en mina
Excavación	4/8 m	4/5 m	4/8 m	4/8 m
L. Avance/Destroza	80%ST II 20%ST III	100%ST V	80%ST II 20%ST III	80%ST II 20%ST III
Sostenimiento	>50 m	25 m	10 m	25 m
Cobertera	>50 m	25 m	10 m	30 m

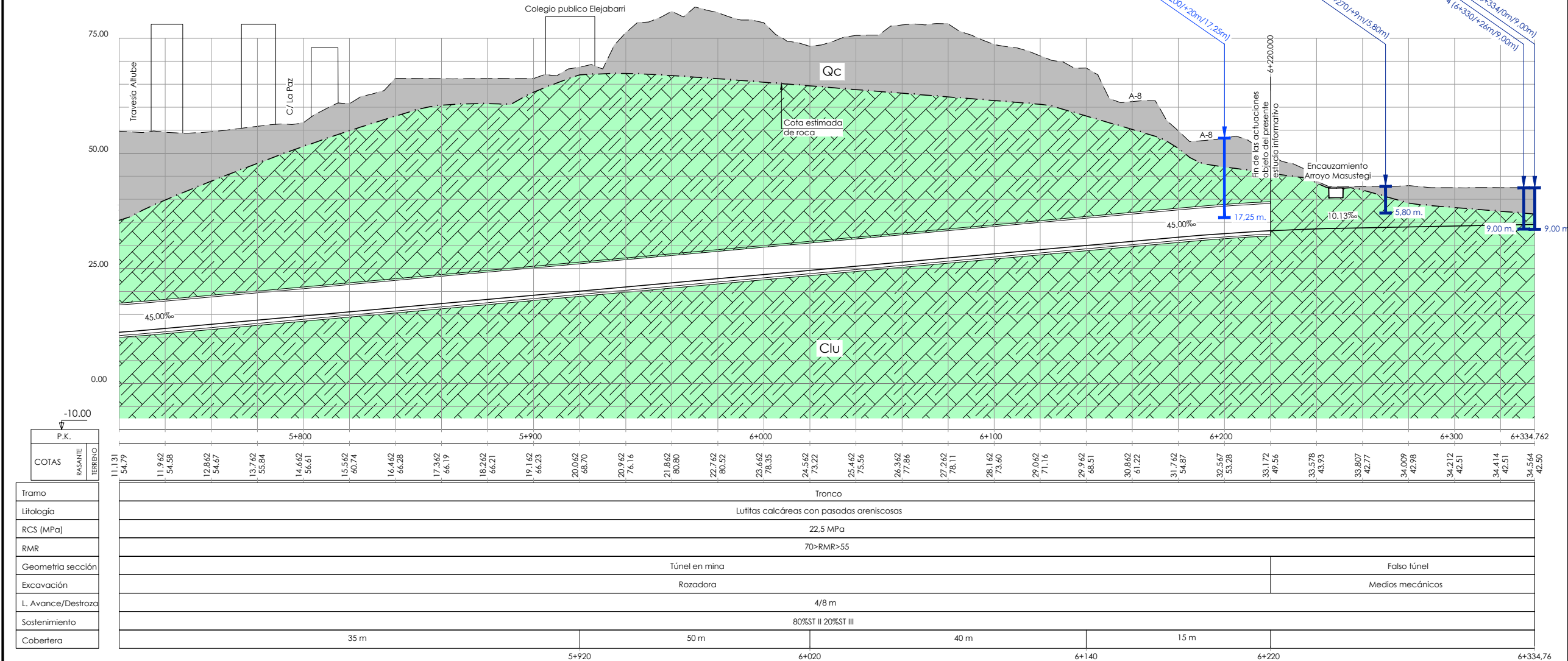
OHARRAK :
NOTAS :

Litología
Cuaternario
Qc Cuaternario indiferenciado
Cretácico inferior
Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas
Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas
Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales
Dq Filones de cuarzo
Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología
TRABAJO
S-1 (0+595/ +25/ 17.60)
P.K.
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Izq.)
PROFUNDIDAD
Contacto litológico discordante
Contacto litológico
Contacto mecánico



Planta
Escala: 1/1000



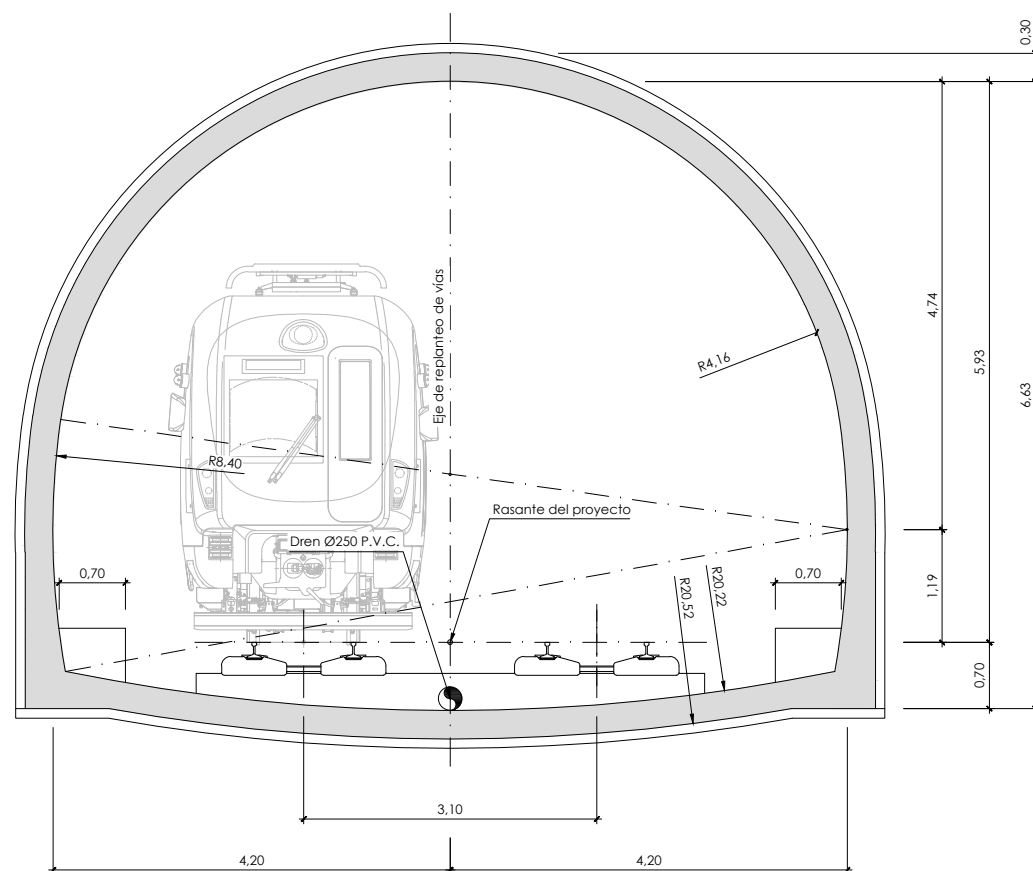
COTAS	P.K.	5+800	5+900	6+000	6+100	6+200	6+300	6+334.762
RAIANTE	11.131	54.79	54.92	54.58	54.62	54.67	55.84	55.84
TERRENO	11.131	54.79	54.92	54.58	54.62	54.67	55.84	55.84
Tramo								
Litología								
RCS (MPa)								
RMR								
Geometría sección								
Excavación								
L. Avance/Destroza								
Sostenimiento								
Cobertera								

OHARRAK :
NOTAS :

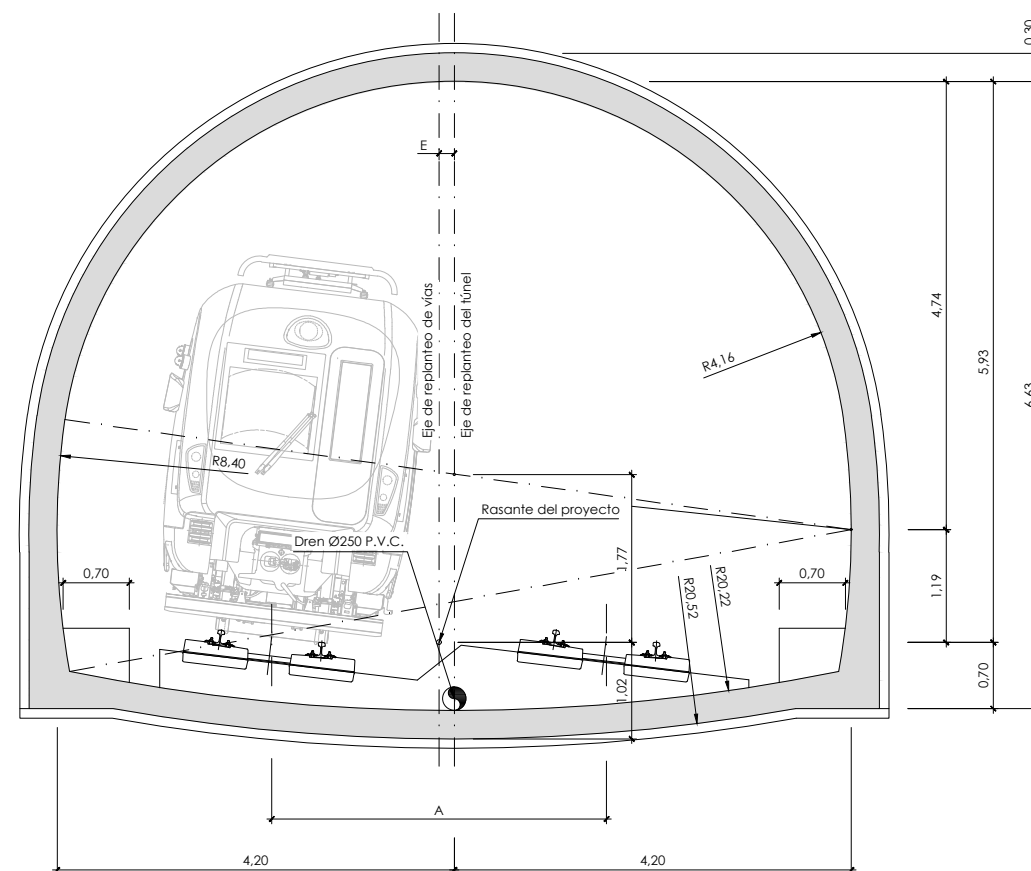
Litología
Cuaternario
Qc Cuaternario indiferenciado
Cretácico inferior
Cmg Margas, margocalizas y calcarenitas
Clu Lutitas calcáreas con pasadas areniscas
Cca Calizas en bancos métricos con rudistas y corales
Dq Filones de cuarzo
Dv Diques de rocas subvolcánica

Simbología
TRABAJO
S-1 (0+595/ +25/ 17.60)
P.K.
DISTANCIA AL EJE (+ Dcha. y - Iza.)
PROFUNDIDAD
Contacto litológico discordante
Contacto litológico
Contacto mecánico

OHARRAK :
NOTAS :

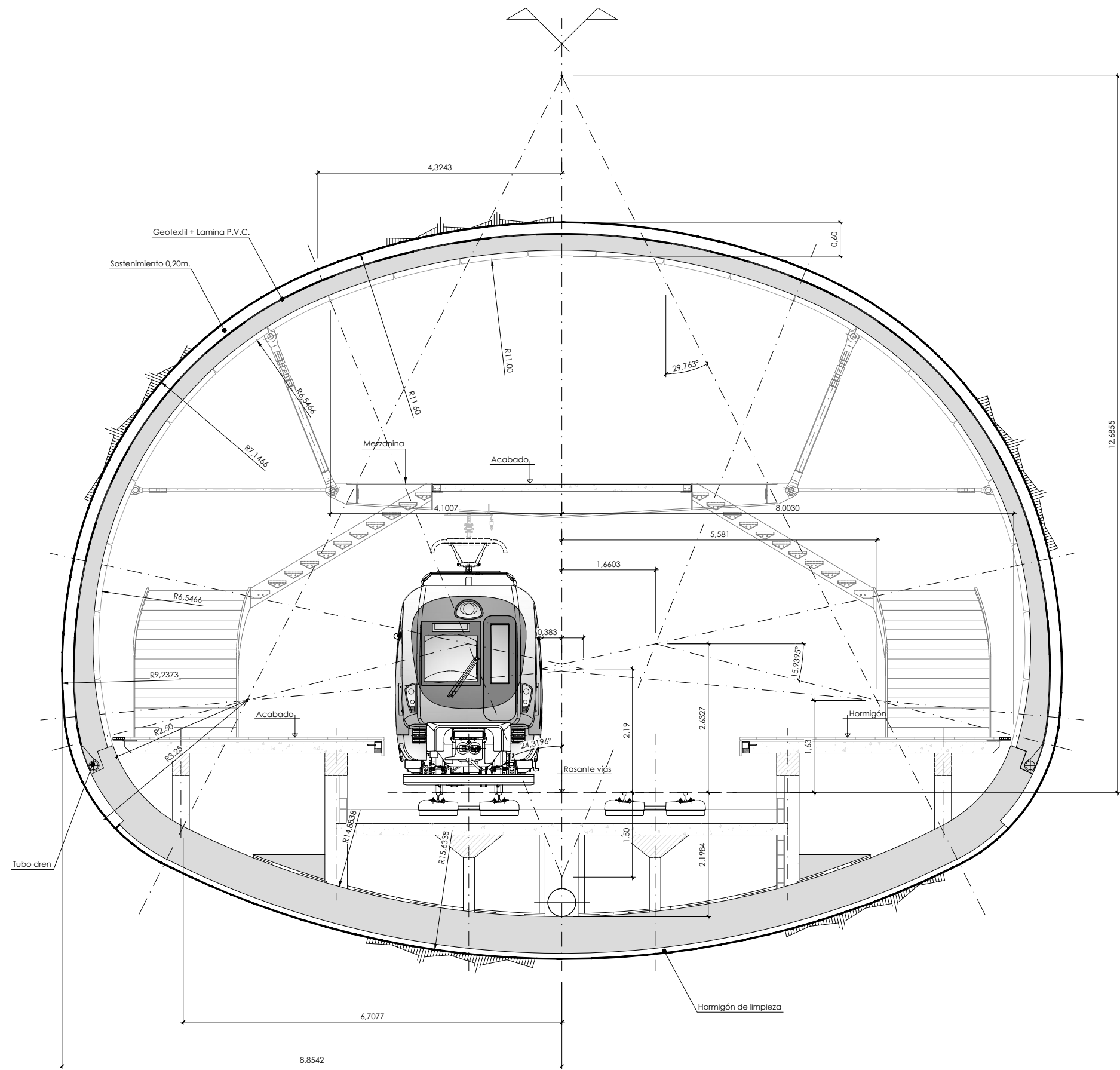


Sección tipo túnel en mina (en recta)
Escala: 1/40



Sección tipo túnel en mina (en curva)
Escala: 1/40

A	PROYECTO	Oct-25							
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA				
BERRIKUSPENAK / REVISIONES									
AHOLKULARIA CONSULTOR		INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR  Ana Isabel Robles Posa / Patricia Rodriguez Lanzaoparta I.C.C.P. COLEG. Nº 16.860 / 24.097							
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR		ERREFERENTZIA REFERENCIA							



Sección tipo en caverna
Escala: 1/40

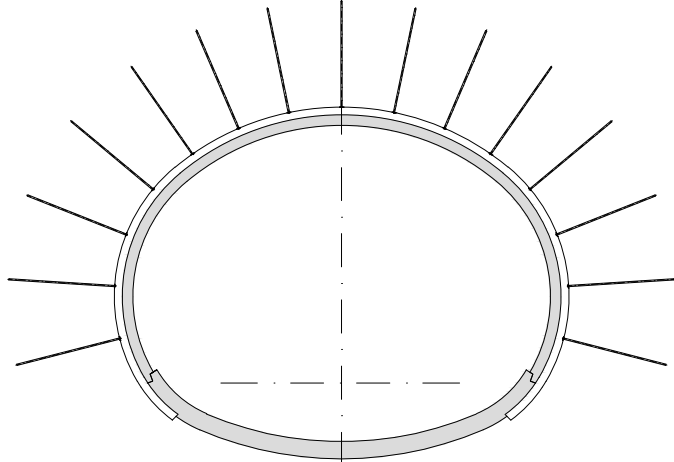
OHARRAK :
NOTAS :

A		PROYECTO	Oct-25			
REV.		CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES						
AHOLKULARIA CONSULTOR			INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR			
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR			ERREFERENTZIA REFERENCIA			

	SOSTENIMIENTO TIPO I RMR> 70	SOSTENIMIENTO TIPO II 70 > RMR > 55	SOSTENIMIENTO TIPO III 55 > RMR > 40	SOSTENIMIENTO TIPO IV 40 > RMR > 30	SOSTENIMIENTO TIPO V 30 > RMR > 20
GRUPO 1	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4,5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - CERCHAS HEB-180 c/1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 1R	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4,5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 2	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/10 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/8 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 20 cm - ARMADO: FIBRA O MALLAZO 6 x 150 x 150 (*) - CERCHAS TH-21 c/ 1,5 m - BULONES TIPO SWELEX MN16 (***) L = 4,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 25 cm - ARMADO: MALLAZO 6 x 150 x 150 - CERCHAS TH-29 c/ 1,0 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m - PRESOSTENIMIENTO: PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL. - AVANCE CON BULONES TIPO SWELEX L = 4,0 m. Sxd = 1 x 1 m OCASIONAL (**)
GRUPO 3	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 4 m		- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 3 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - CERCHAS TH-21 c/ 1,5 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 3 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - CERCHAS HEB-140 c/ 1 m - AVANCE = 1 m Y DESTROZA Y CONTRABOVEDA - PRESOSTENIMIENTO PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL.
GRUPO 4	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 5 cm. SECCIÓN COMPLETA				

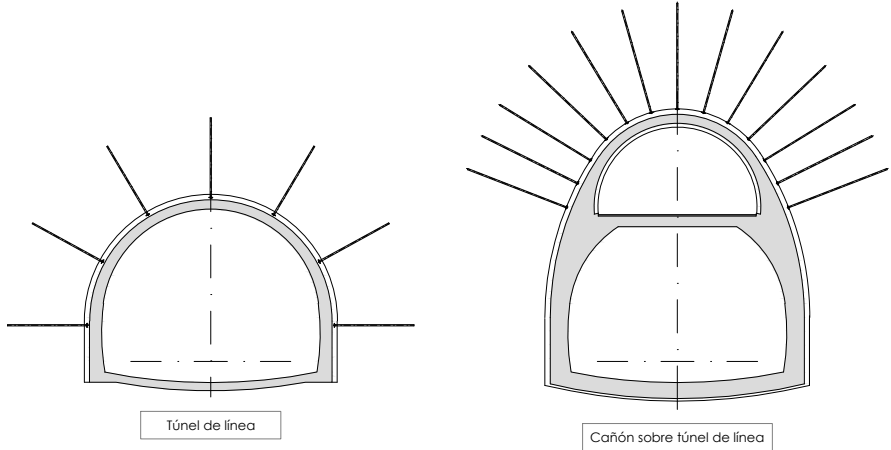
NOTAS: (*) Se colocará fibra de PP o Malla a discreción de la dirección de la dirección de obra.
(**) Se colocarán los Bulones en los hastiales del avance a discreción de la dirección de obra.
(***) Los Bulones descritos podrán ser modificados a criterio de la dirección de obra, la calidad de la roca y las características geomecánicas.

GRUPO 1. Excavaciones con dimensión superior a 10 metros.



Caverna y Sección estación

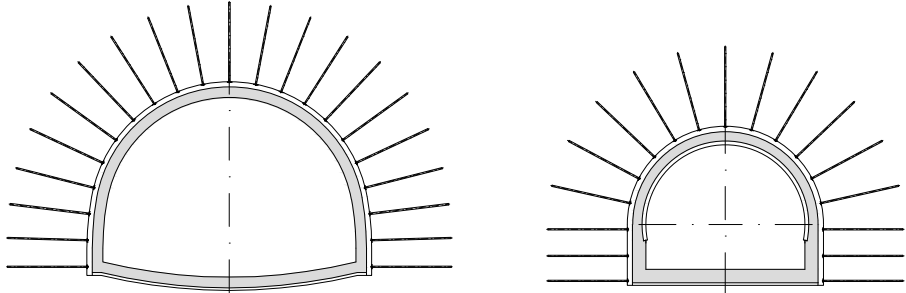
GRUPO 2. Excavaciones con dimensión equivalente entre 7 y 10 metros.



Túnel de línea

Cañón sobre túnel de línea

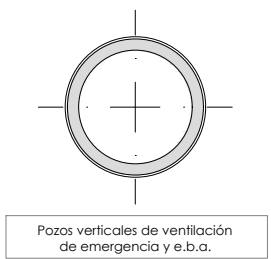
GRUPO 3. Excavaciones con dimensión equivalente comprendida entre 4 y 7 metros.



Galerías de ventilación

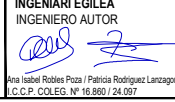
Cañones de acceso

GRUPO 4. Dimensión equivalente menos de 4 metros.



Pozos verticales de ventilación de emergencia y e.b.a.

OHARRAK :
NOTAS :

A	PROYECTO	Oct-25			
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES					
AHOLKULARIA/ CONSULTOR		INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR			
		 Aria Isabel Robles Piza / Patricia Rodríguez Lencastre I.C.C.P. COLEG. Nº 16.860 / 24.087			
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR		ERREFERENTZIA REFERENCIA			

EUSKO JAURLARITZA
MUGIKORTASUN
JASANGARRIAREN SAILA



GOBIERNO VASCO
DEPARTAMENTO DE
MOVILIDAD SOSTENIBLE



PROIEKTUAREN IKUSKAPENA ETA ZUZENDARITZA
INSPECCIÓN Y DIRECCIÓN DEL PROYECTO

ESKALA ORIGINALA
ESCALA ORIGINAL

EN DIN A1

PROIEKTUAREN IZENBURUA
TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA 4
DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE BILBAO

ESKALA GRAFIKOA
ESCALA GRAFICA

PLANOAREN IZENBURUA
TÍTULO DEL PLANO

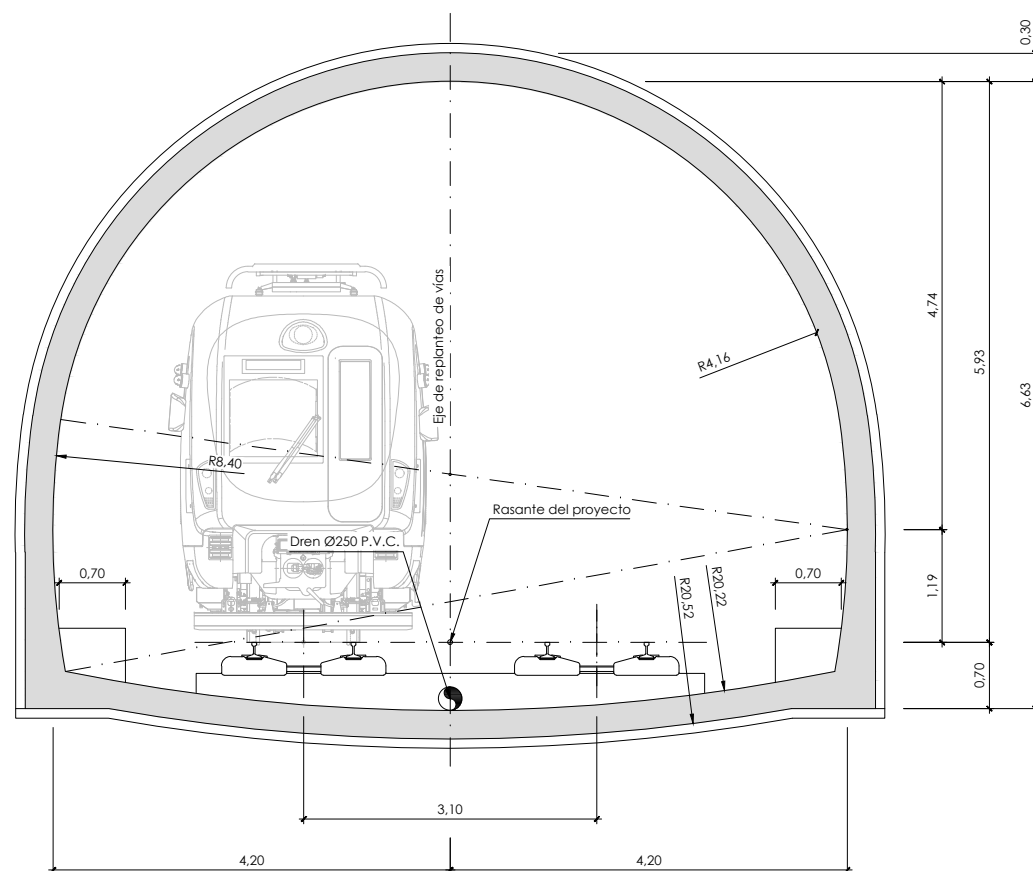
TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS
SECCIONES TIPO
SOSTENIMIENTO

PLANO ZK. / N. PLANO
A09.3

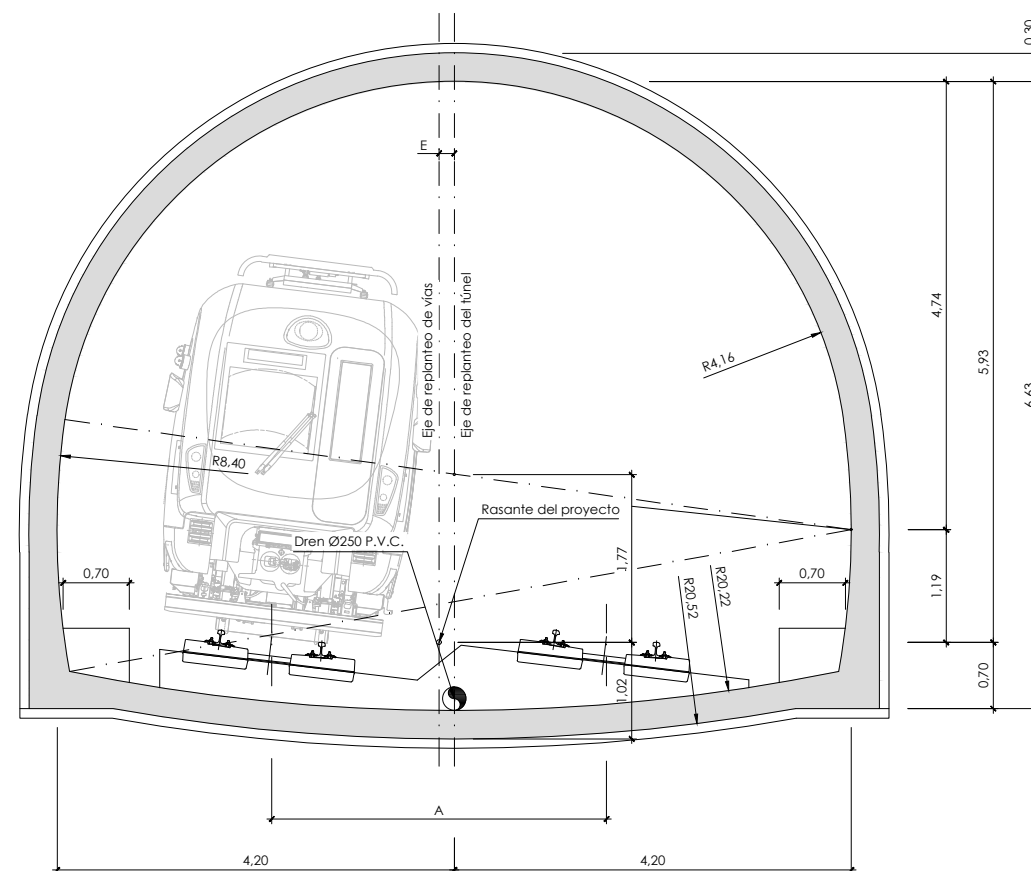
ORRIA / HOJA
1. Sigue FIN

Geometría de las secciones

OHARRAK :
NOTAS :

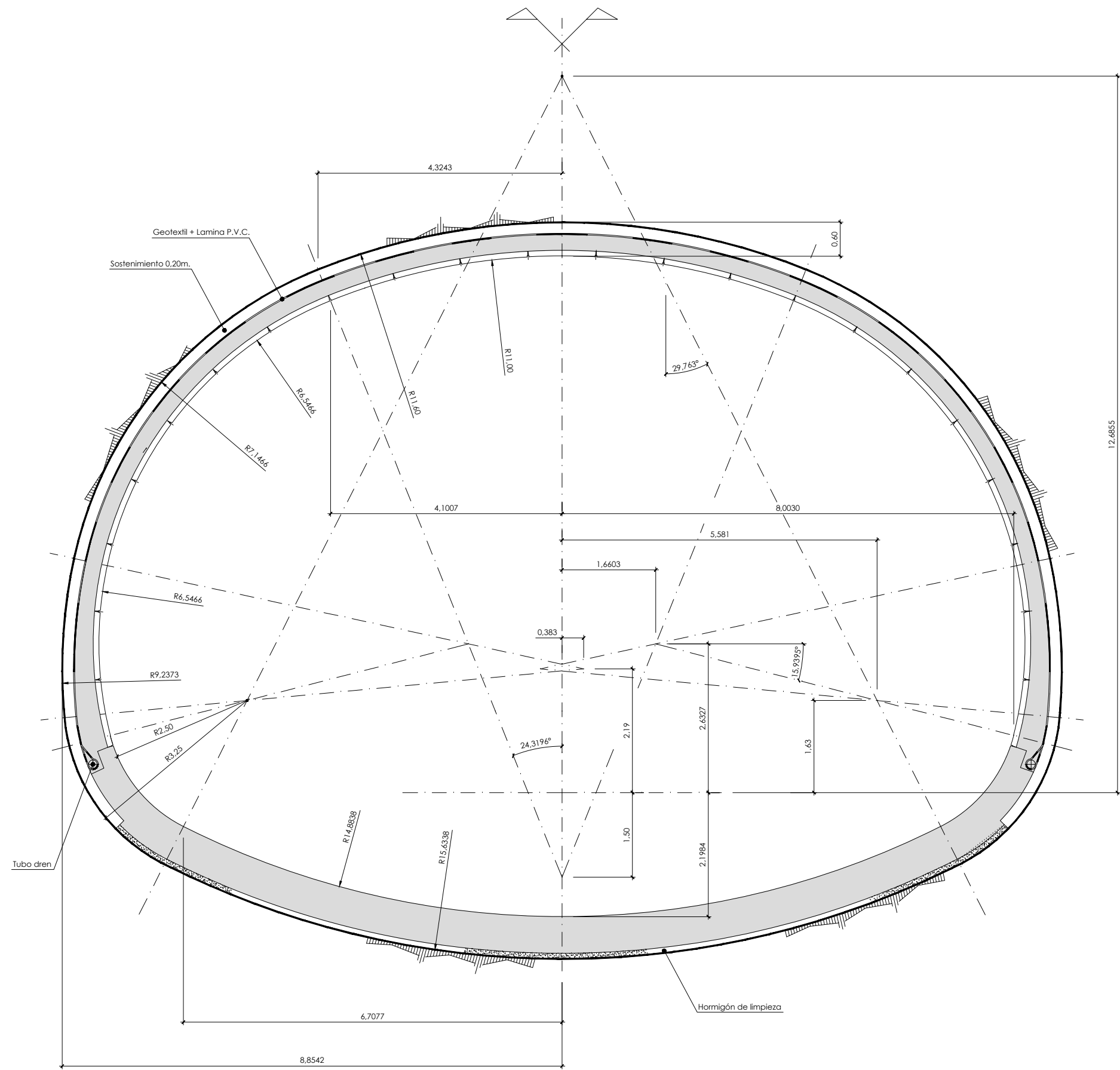


Sección tipo túnel en mina (en recta)
Escala: 1/40



Sección tipo túnel en mina (en curva)
Escala: 1/40

A	PROYECTO	Oct-25							
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA				
BERRIKUSPENAK / REVISIONES									
AHOLKULARIA CONSULTOR		INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR  Ana Isabel Robles Posa / Patricia Rodriguez Lanzagorta I.C.C.P. COLEG. Nº 16.860 / 24.097							
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR		ERREFERENTZIA REFERENCIA							



Sección tipo en caverna
Escala: 1/40

OHARRAK :
NOTAS :

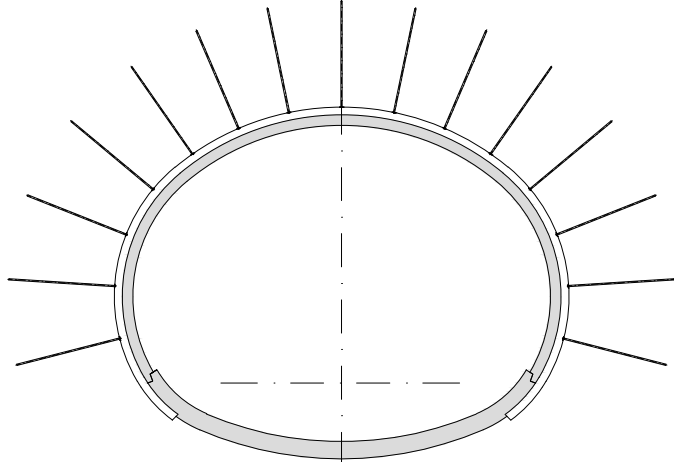
A		PROYECTO	Oct-25			
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP.	OBRA	
BERRIKUSPENAK / REVISIONES						
AHOLKULARIA CONSULTOR			INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR			
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR			ERREFERENTZIA REFERENCIA			

Criterios de sostenimiento

	SOSTENIMIENTO TIPO I RMR> 70	SOSTENIMIENTO TIPO II 70 > RMR > 55	SOSTENIMIENTO TIPO III 55 > RMR > 40	SOSTENIMIENTO TIPO IV 40 > RMR > 30	SOSTENIMIENTO TIPO V 30 > RMR > 20
GRUPO 1	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - CERCHAS TH-29 - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4,5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - CERCHAS HEB-180 c/1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 1R	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/4,5 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 30 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 6,0 m. Sxd = 1 x 1 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m	
GRUPO 2	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2,5 x 2,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 5/10 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 4/8 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 20 cm - ARMADO: FIBRA O MALLAZO 6 x 150 x 150 (*) - CERCHAS TH-21 c/ 1,5 m - BULONES TIPO SWELLEX MN16 (***) L = 4,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 3/6 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 25 cm - ARMADO: MALLAZO 6 x 150 x 150 - CERCHAS TH-29 c/ 1,0 m - PASE: AVANCE/DESTROZA: 1/2 m - PRESOSTENIMIENTO: PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL. - AVANCE CON BULONES TIPO SWELLEX L = 4,0 m. Sxd = 1 x 1 m OCASIONAL (**)
GRUPO 3	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 10 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 2 x 2 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 4 m		- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 15 cm. - BULONES TIPO SWELLEX MN16 L = 3,0 m. Sxd = 1,5 x 1,5 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 3 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 20 cm. - CERCHAS TH-21 c/ 1,5 m - PASE: SECCIÓN COMPLETA: AVANCE = 3 m	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE PP = 25 cm. - CERCHAS HEB-140 c/ 1 m - AVANCE = 1 m Y DESTROZA Y CONTRABOVEDA - PRESOSTENIMIENTO PARAGUAS DE MICROPILOTES OCASIONAL.
GRUPO 4	- ESPESOR HORMIGÓN PROYECTADO = 5 cm. SECCIÓN COMPLETA				

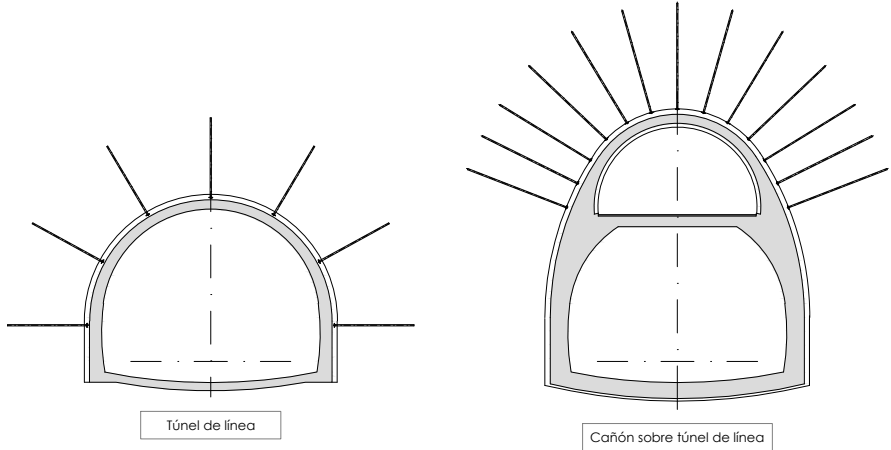
NOTAS: (*) Se colocará fibra de PP o Malla a discreción de la dirección de la dirección de obra.
(**) Se colocarán los Bulones en los hastiales del avance a discreción de la dirección de obra.
(***) Los Bulones descritos podrán ser modificados a criterio de la dirección de obra, la calidad de la roca y las características geomecánicas.

GRUPO 1. Excavaciones con dimensión superior a 10 metros.



Caverna y Sección estación

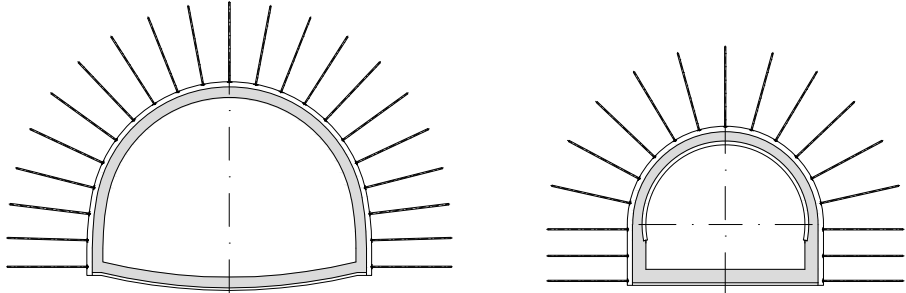
GRUPO 2. Excavaciones con dimensión equivalente entre 7 y 10 metros.



Túnel de línea

Cañón sobre túnel de línea

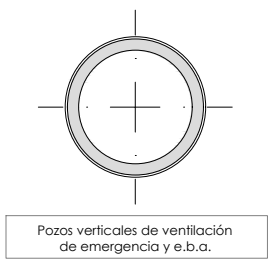
GRUPO 3. Excavaciones con dimensión equivalente comprendida entre 4 y 7 metros.



Galerías de ventilación

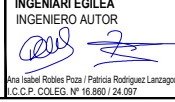
Cañones de acceso

GRUPO 4. Dimensión equivalente menos de 4 metros.



Pozos verticales de ventilación de emergencia y e.b.a.

OHARRAK :
NOTAS :

A	PROYECTO	Oct-25			
REV.	CLASE DE MODIFICACION	FECHA	NOMBRE	COMP	OBRA
BERRIKUSPENAK / REVISIONES					
AHOLKULARIA/ CONSULTOR		INGENIARI EGILEA INGENIERO AUTOR			
		 Ara Isabel Robles Piza / Patricia Rodríguez Lantagorta I.C.C.P. COLEG. Nº 16.860 / 24.087			
AHOLKULARIAREN ERREFERENTZIA REFERENCIA CONSULTOR		ERREFERENTZIA REFERENCIA			



EUSKO JAURLARITZA

MUGIKORTASUN
JASANGARRIAREN SAILA



GOBIERNO VASCO

DEPARTAMENTO DE
MOVILIDAD SOSTENIBLE



PROIEKTUAREN IKUSKAPENA ETA ZUZENDARITZA

INSPECCIÓN Y DIRECCIÓN DEL PROYECTO

ESKALA ORIGINAL
ESCALA ORIGINAL

EN DIN A1

ESKALA GRAFIKOA
ESCALA GRAFICA

PROIEKTUAREN IZENBURUA
TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA 4
DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE BILBAO

PLANOAREN IZENBURUA
TÍTULO DEL PLANO

TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS
SECCIONES TIPO
SOSTENIMIENTO

PLANO ZK. / N. PLANO
A09.3

ORRIA / HOJA
1. Sigue FIN