

PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA CONGESTIÓN Y DE LA VULNERABILIDAD EN LA RED BÁSICA TRANSEUROPEA (TEN-T), EN LOS ACCESOS A LOS ELEMENTOS Y NODOS DEL CORREDOR ATLÁNTICO EN BILBAO Y EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BIZKAIA: MALLADO DE LA RED MEDIANTE LA CONEXIÓN BI-637 CON A-8, VSM/E-70 Y BI-628 ENTRE MÁRGENES



Anejo 08. Túnel

Registro de cambios

Control de firmas				
Realizado	Revisado	Supervisor de la Disciplina	Supervisor General	Aprobado
Alfonso Navarro (SENER)	José Ramos (SENER)			ER (SENER)
Fecha y Firma	Fecha y Firma	Fecha y Firma	Fecha y Firma	Fecha y Firma
No precisa firma si está aprobado electrónicamente mediante ruta				

Información del Documento	
Código Documento	TSL-TU-DB-01-01-AN-00008
Revisión	00

[illegible]

INDICE	
1	INTRODUCCIÓN 5
2	GEOTECNIA DE TÚNELES 5
2.1	Modelo geológico 3D desarrollado con Leapfrog 5
2.2	Tramificación geológico-geotécnica 6
3	SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA 7
3.1	Consideraciones generales 7
3.2	Método de excavación 8
3.2.1	Aspectos generales..... 8
3.2.2	Análisis del tipo de excavación más adecuado 9
3.2.3	Rendimientos de excavación 11
4	SECCIONES TIPO 11
4.1	Túnel principal 11
4.1.1	Sección de dos carriles o sección estándar (ST2C)..... 11
4.1.2	Sección de tres carriles (ST3C) 14
4.1.3	Cavernas de bifurcación (STC) 15
4.1.4	Sección Multimodal 16
4.2	Ramales de conexión 17
4.3	Galerías auxiliares 18
4.3.1	Galerías peatonales de evacuación 18
4.3.2	Galerías de comunicación e instalaciones..... 19
5	SOSTENIMIENTOS Y REVESTIMIENTOS 20
5.1	Conceptos generales 20
5.1.1	Sostenimientos 20
5.1.2	Revestimientos. Concepto del diseño del túnel a largo plazo. 20
5.2	Túnel principal 21
5.3	Ramales de conexión 23
5.4	Galerías auxiliares 23
5.5	Tramificación de los sostenimientos 24
5.5.1	Túnel principal (tubo sentido Artaza) 27
5.5.2	Túnel principal (tubo sentido Ballonti) 28
5.5.3	Galerías auxiliares 29
5.5.4	Ramales de conexión en Artaza..... 31
5.5.5	Resumen de la tramificación de sostenimientos 32
6	FASES CONSTRUCTIVAS 34
7	IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE 37
8	EMBOQUILLES DEL TÚNEL PRINCIPAL Y RAMALES DE CONEXIÓN..... 37
8.1	Emboquilles lado Artaza 37

8.2	Emboquille lado Ballonti 40
9	TRATAMIENTOS ESPECIALES..... 41
9.1	Tratamientos de impermeabilización 41
9.2	Otros tratamientos..... 42
10	AUSCULTACIÓN Y SEGUIMIENTO GEOTÉCNICO..... 43
10.1	Inspección de frentes y hastiales de excavación 43
10.2	Parámetros de control 44
10.3	Secciones de control 44
10.3.1	Sección de control normal..... 44
10.3.2	Sección de control intensivo 45

FIGURAS

Figura 1:	Vista general del modelo geológico 3D de Leapfrog. 6
Figura 2:	Vista 3D y planta general de los sondeos incluidos en el modelo (rojos-campaña actual, blancos-información previa de otros proyectos y azul-puntos contacto suelo-roca de información previa) 6
Figura 3:	Túnel excavado en la extensión de la L2 del Metro de Montreal 8
Figura 4:	Ejemplo de secuencia de NATM 9
Figura 5:	Clasificación de los terrenos respecto de la excavabilidad mecánica en túneles, Romana 1994..... 10
Figura 6:	Extracto del Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles para dos carriles 11
Figura 7:	Sección transversal de dos carriles o estándar (ST2C) con solera plana 12
Figura 8:	Sección transversal de dos carriles o estándar (ST2C) con contrabóveda 12
Figura 9:	Sección transversal de dos carriles ampliada con solera plana (Artaza tubo sentido Ballonti) 13
Figura 10:	Sección transversal de dos carriles ampliada con contrabóveda (Artaza tubo sentido Ballonti) 13
Figura 11:	Sección transversal de dos carriles estanca (con contrabóveda) bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako 14
Figura 12:	Extracto del Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles para tres carriles. 14
Figura 13:	Sección transversal de tres carriles (ST3C) con solera plana 14
Figura 14:	Sección transversal de tres carriles (ST3C) con contrabóveda..... 15
Figura 15:	Sección en caverna de bifurcación (STC) con solera plana 15
Figura 16:	Sección en caverna de bifurcación (STC) con contrabóveda 16
Figura 17:	Sección multimodal de línea autopropulsada a un lado de la sección con solera plana 16
Figura 18:	Sección multimodal de línea autopropulsada a un lado de la sección con contrabóveda 16
Figura 19:	Sección multimodal de línea autopropulsada bajo la calzada 17
Figura 20:	Sección transversal de los ramales en mina con solera plana..... 17
Figura 21:	Sección transversal de los ramales en mina con contrabóveda 18
Figura 22:	Sección de las galerías peatonales de evacuación 18

Figura 23: Esquema en planta de las galerías de comunicación (transversal a los 2 tubos del túnel principal) e instalaciones (paralela a los tubos del túnel principal)	19
Figura 24: Sección de las galerías de comunicación	19
Figura 25: Sección de las galerías de comunicación con contrabóveda (estanca)	19
Figura 26: Sección de las galerías de instalaciones	20
Figura 27: Modelo numérico 3D del macizo rocoso con la estimación del $RMR_{básico}$	24
Figura 28: Longitudinal Tubo Sentido Artaza ($RMR_{básico}$ y unidades litológicas)	24
Figura 29: Longitudinal Tubo Sentido Ballonti ($RMR_{básico}$ y unidades litológicas)	25
Figura 30: Vista 3D de la ubicación de los perfiles transversales de las cavernas	25
Figura 31: Vista 3D ubicación de las galerías auxiliares de conexión y su perfil transversal asociado	30
Figura 32: Vista 3D con ubicación de los ramales de Artaza	31
Figura 33: Longitudinal del ramal Avanzada-Subfluvial	32
Figura 34: Longitudinal del ramal Subfluvial-Avanzada	32
Figura 35: Fases constructivas sección 2 carriles o estándar (ST2C) con contrabóveda	34
Figura 36: Fases constructivas sección 3 carriles (ST3C) con contrabóveda	34
Figura 37: Fases constructivas sección ramales de conexión.....	35
Figura 38: Fases constructivas galerías auxiliares	35
Figura 39: Fases constructivas galerías auxiliares	35
Figura 40: Esquema del pozo de ataque en Artaza ejecutado entre pantallas.....	37
Figura 41: Vista 3D con ubicación de los transversales de los puntos de emboquille lado Artaza	38
Figura 42: Longitudinal del emboquille lado Artaza (tubo sentido Ballonti).....	39
Figura 43: Longitudinal del emboquille lado Artaza (tubo sentido Artaza)	39
Figura 44: Planta del emboquille lado Ballonti.....	40
Figura 45: Transversal del emboquille lado Ballonti.....	40
Figura 46: Longitudinal del emboquille lado Ballonti (tubo sentido Artaza).....	41
Figura 47: Ejemplo de disposición de sondeos de reconocimiento.	41
Figura 48: Sección de control normal	45
Figura 49: Sección de control intensivo	46

TABLAS

Tabla 1: Listado de túneles subacuáticos noruegos.....	7
Tabla 2: Métodos de excavación	10
Tabla 3: Rendimientos estimados para el túnel principal	11
Tabla 4: Galerías auxiliares.....	18
Tabla 5: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 2 carriles o estándar (ST2C) en túnel drenado	22
Tabla 6: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 2 carriles o estándar en túnel estanco (ST2CE)	22

Tabla 7: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 3 carriles (ST3C)	22
Tabla 8: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal sección caverna y multimodal (STC)	22
Tabla 9: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para los ramales de conexión (STR)	23
Tabla 10: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para las galerías de emergencia peatonales.....	23
Tabla 11: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para las galerías de comunicación e instalaciones ...	23
Tabla 12: Transversales de la caverna de bifurcación del túnel sentido Artaza obtenidos cada 15 m del modelo de Leapfrog	26
Tabla 13: Transversales de la caverna de bifurcación del túnel sentido Ballonti obtenidos cada 15 m del modelo de Leapfrog	27
Tabla 14: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR en tubo sentido Artaza	28
Tabla 15: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR en tubo sentido Artaza	29
Tabla 16: Transversales de las galerías auxiliares de conexión obtenidos del modelo de Leapfrog	31
Tabla 17: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR de las galerías auxiliares de conexión .	31
Tabla 18: Tramificación de los sostenimientos tipo según RMR del ramal Subfluvial-Avanzada.....	32
Tabla 19: Tramificación de los sostenimientos tipo según RMR del ramal Avanzada-Subfluvial.....	32
Tabla 20: Resumen tramificación de la sección estándar de 2 carriles en tubo sentido Artaza.....	32
Tabla 21: Resumen tramificación de la sección de 3 carriles en tubo sentido Artaza	33
Tabla 22: Resumen tramificación de caverna de bifurcación en tubo sentido Artaza	33
Tabla 23: Resumen tramificación de la sección estándar de 2 carriles en tubo sentido Ballonti	33
Tabla 24: Resumen tramificación de la sección de 3 carriles en tubo sentido Ballonti.....	33
Tabla 25: Resumen tramificación de caverna de bifurcación en tubo sentido Ballonti.....	33
Tabla 26: Resumen tramificación galerías de conexión.....	33
Tabla 27: Resumen tramificación Ramal Subfluvial-Avanzada	33
Tabla 28: Resumen tramificación Ramal Avanzada-Subfluvial	33
Tabla 29: Resumen Proceso Constructivo Sección de 2 y 3 carriles.....	36
Tabla 30: Transversales de los puntos de emboquille lado Artaza obtenidos del modelo de Leapfrog	38

1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se incluyen las consideraciones relacionadas con la definición y procedimientos constructivos del tramo en mina del túnel Subfluvial de Lamiako que se ejecutará con el método NATM.

Se trata de un túnel bitubo que atraviesa la ría de Bilbao y cuyo tramo en mina tiene una longitud de aproximadamente 3,2 km. El inicio del túnel principal ejecutado en mina está situado entre los siguientes PKs:

- Tubo sentido Artaza: Inicio en PK 0+443,19 (eje 31) y final en PK 0+085 (eje 33), lo que equivaldría al PK 3+685,40 del eje 31. Longitud del túnel 3.242,21 m.
- Tubo sentido Ballonti: Inicio en PK 0+365 (eje 37), lo que equivaldría al PK 0+376,21 del eje 30, y final en PK 3+586,23 (eje 30). Longitud del túnel 3.210 m.

Además del túnel principal, en este anejo también se incluye la definición y diseño del resto de las obras subterráneas del proyecto que se deberán ejecutar en mina (NATM), que serán dos pequeños tramos de los ramales de conexión en la zona de Artaza y las distintas galerías auxiliares que conectarán los dos tubos del túnel principal (galerías peatonales de evacuación y galerías de comunicación e instalaciones).

La información geológico-geotécnica de partida que se utilizará para la elaboración del presente anejo procede del anejo de Geología-Geotecnia de este Proyecto, donde se ha incluido una descripción detallada de todos los reconocimientos geotécnicos realizados y una caracterización geotécnica y geomecánica de las formaciones rocosas afectadas por las distintas obras proyectadas.

La sección del túnel principal será variable y constará de diferentes tipologías a lo largo de su trazado. Estas secciones tipo son las siguientes:

- Sección de 2 carriles o sección estándar (drenada o estanca)
- Sección de 3 carriles
- Sección de cavernas de bifurcación

El túnel se excavará por métodos convencionales (método NATM), por lo que para garantizar su seguridad constructiva, sobre todo en su tramo bajo la ría de Bilbao, se ha buscado que su trazado siempre discurra en el sustrato rocoso con un recubrimiento mínimo de roca sobre la clave de al menos 1 diámetro (aproximadamente entre 8 y 11 m).

Este recubrimiento mínimo de roca sobre la clave del túnel se encuentra localizado en un tramo de la zona de Lamiako cuya longitud varía según el tubo:

- Tubo sentido Artaza: tramo de 127 m entre el P.K. 2+318 y el P.K. 2+445
- Tubo sentido Ballonti: tramo de 100 m entre el P.K. 1+580 y el P.K. 1+680

El recubrimiento máximo sobre la clave del túnel es de unos 80 m en margen izquierda y de unos 100 m en margen derecha.

Debido a que actualmente hay una carencia de conexiones transversales entre ambas márgenes de la ría, tanto viario como de transporte público, en este anejo también se incluirá un breve análisis sobre la sección del túnel que resultaría si hubiera que ejecutar una solución multimodal de transporte para el túnel Subfluvial. De esta forma, la sección de uno de los dos tubos del túnel principal tendría que ser compartida con un sistema público de transporte a lo largo de la parte de su trazado que discurre bajo la ría, lo que daría lugar a dos nuevas secciones tipo en el túnel:

- Sección multimodal en uno de los tubos
- Sección de cavernas de conexión entre el trazado del transporte público y el tubo del túnel principal con la sección multimodal

2 GEOTECNIA DE TÚNELES

Para la caracterización geotécnica y geomecánica de los materiales que afectan al tramo en mina del túnel Subfluvial se ha partido de la información procedente del Anejo de Geología-Geotecnia de este mismo Proyecto, por lo que en este apartado tan sólo se hará una breve referencia sobre lo indicado en el mismo.

Cabe recordar que aún se está ejecutando parte de la campaña de campo prevista, por lo que la información geológica y geotécnica debe considerarse preliminar y podrá ser objeto de cambios cuando se disponga de los resultados finales de dicha campaña.

Por todo ello, las propuestas constructivas analizadas en este documento y sus respectivas tramificaciones y presupuestos también deben considerarse preliminares pues se han definido en función de unas características geológicas y geotécnicas en estudio y que aún no pueden asumirse como definitivas.

Dentro de la campaña de campo que se está desarrollando para el Proyecto de Construcción del túnel Subfluvial de Lamiako durante 2021-2022, para el diseño del tramo en mina del túnel Subfluvial se cuenta con la información proporcionada por 35 sondeos con recuperación continua de testigos, ensayos in situ en los sondeos, ensayos de laboratorio sobre las muestras recogidas en los sondeos y levantamiento de estaciones geomecánicas. También se han realizado perfiles geofísicos de tomografía eléctrica. En el Anejo de Geología y Geotecnia se realiza una descripción detallada de todos estos reconocimientos, así como de la situación y resultados de los mismos.

2.1 Modelo geológico 3D desarrollado con Leapfrog

Con objeto de facilitar el análisis de la extensa información geotécnica disponible, así como de interpretarla en su conjunto y en el contexto espacial de las obras subterráneas proyectadas, se ha desarrollado un modelo geológico-geotécnico tridimensional con el software Leapfrog Works.

Para la generación de dicho modelo ha sido necesario desarrollar una base de datos digital a partir de la información más relevante del proyecto. En particular se ha incorporado la siguiente información en el modelo 3D:

- Información de sondeos (293 sondeos, de los cuales 189 se han incluido con la testificación completa y 104 únicamente con el contacto suelo-roca por ser más antiguos y no disponer del registro completo)
 - Localización espacial de todos los sondeos
 - Identificación de litologías por profundidad
 - Distribución de valores de RMR a lo largo de cada sondeo
 - Información adicional: niveles piezométricos, agrupación por zonas, etc.
- Mallas 3D de topografía y lámina de agua de la ría
- Modelo 3D de obra subterránea del túnel Subfluvial
- Cartografía y planos
 - Mapas geológicos de la zona
 - Planta de prospecciones del proyecto
 - Ortofotos y otros planos para la ubicación de sondeos antiguos cuyas coordenadas eran desconocidas

A partir de esta información de base, se ha efectuado el análisis espacial de la información geotécnica y se han obtenido modelos geológicos, numéricos y estadísticos del entorno del túnel y las principales litologías.

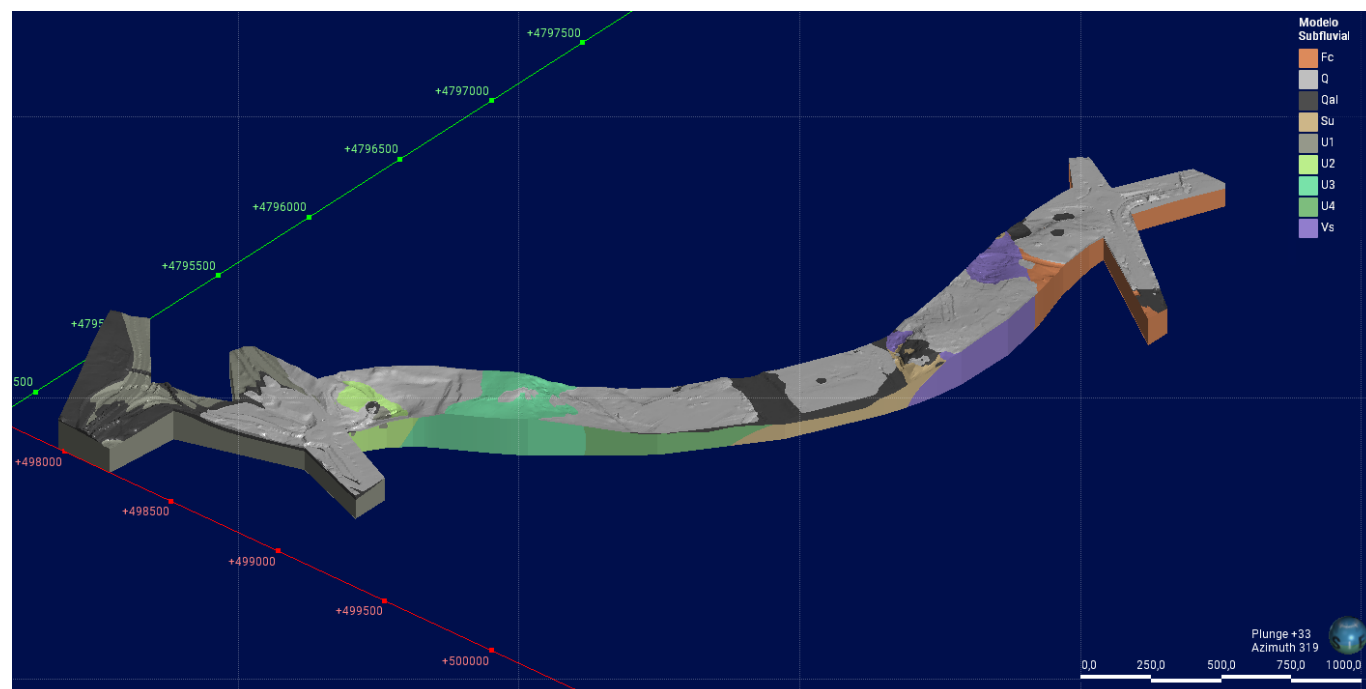


Figura 1: Vista general del modelo geológico 3D de Leapfrog.

2.2 Tramificación geológico-geotécnica

De forma muy resumida, a continuación, se enumeran las unidades geotécnicas diferenciadas a lo largo del trazado del túnel Subfluvial a cota de túnel. Si se recorre de sur a norte el trazado se van atravesando formaciones de más antigua a más joven, comenzando por el Cretácico Inferior (Complejo Urganiano) y terminando en el Cretácico Superior (Flysch Calcáreo).

- Complejo Urganiano
 - U₁: Lutitas calcáreas con pasadas de areniscas.
 - U₂: Margas con intercalaciones de margocalizas.
 - U₃: Calizas arenosas con intercalaciones de margas.
 - U₄: Margas arenosas con intercalaciones de calizas arenosas.
- Complejo Supraurgoniano
 - S_U: Lutitas con intercalaciones de areniscas y limolitas.
- Complejo Volcánico
 - V_s: Coladas básicas masivas y rocas volcanoclásticas.
- Flysch Calcáreo:
 - F_C: Limolitas calcáreas con intercalaciones de calizas arenosas.

La serie urgoniana engloba un conjunto sedimentario muy complejo de origen mixto calcáreo-detritico que tiene como principal característica y elemento diferenciador la presencia casi constante de cemento calcáreo, que se engloban dentro de la denominada Unidad Oiz, Sector Durango.

Se han cartografiado 4 niveles pertenecientes a este Complejo Urganiano: U₁, U₂, U₃, U₄. Las transiciones entre unidades son progresivas con un aumento del cemento calcáreo por lo que no hay un plano que se pueda considerar como el cambio de unidad. Estas características definen a todos los contactos entre las unidades de este Complejo Sedimentario.

El complejo supraurgoniano (S_U) es la unidad es la que ha sido más investigada al constituir el sustrato bajo la ría de Bilbao y el paleocauce de Lamiako, el tramo más crítico del túnel con recubrimientos en roca que algunos casos llegan a ser de tan sólo un diámetro, aproximadamente.

La orientación estructural del macizo rocoso en el corredor es sensiblemente homogénea y ortogonal al eje del trazado. Además, el buzamiento de los estratos es subvertical en la mayor parte del trazado.

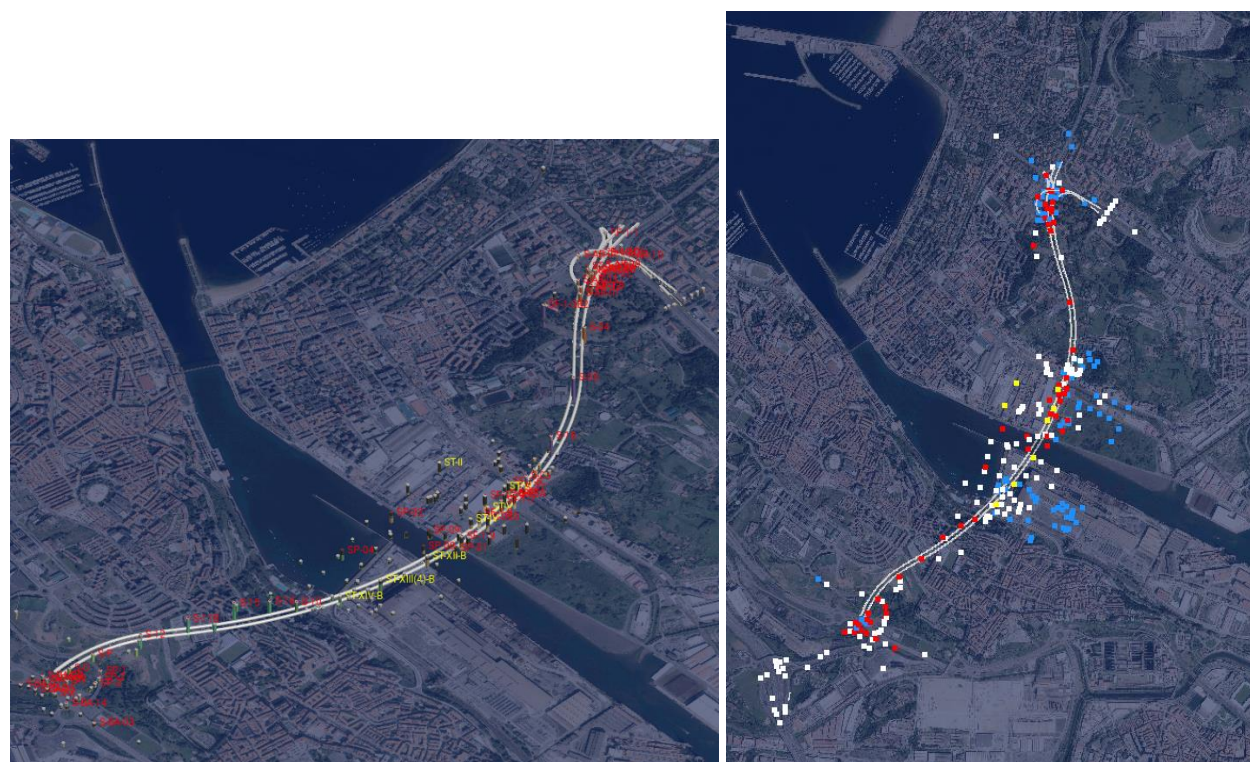


Figura 2: Vista 3D y planta general de los sondeos incluidos en el modelo (rojos-campaña actual, blancos-información previa de otros proyectos y azul-puntos contacto suelo-roca de información previa)

3 SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

El presente apartado tiene por objeto describir la estrategia constructiva que se seguirá para la ejecución del tramo en mina del túnel Subfluvial de Lamiako.

3.1 Consideraciones generales

Se trata de un túnel en un ámbito urbano que será ejecutado por métodos convencionales (NATM). El principal condicionante de este túnel es que deberá atravesar la ría de Bilbao, lo que, dada la singularidad de esta problemática, ha supuesto que en primer lugar se haya realizado un análisis de otros túneles ejecutados en circunstancias similares.

En este sentido, el empleo de métodos convencionales en pasos bajo agua tiene su expresión más espectacular en los túneles bajo el mar excavados en los países nórdicos. La siguiente tabla resume las características de estos túneles carreteros:

	Project	Year open	Main rock types	Cross section, m2	Total length, km	Min. rock cover, m	Low point, m b.s.l.
1	Vardø	1982	Shale, sand-stone	53	2.6	28	88
2	Ellingsøy	1987	Gneiss	68	3.5	42	140
3	Valderøy	1987	Gneiss	68	4.2	34	145
4	Kvalsund	1988	Gneiss	43	1.6	23	56
5	Godøy	1989	Gneiss	52	3.8	33	153
6	Hvaler	1989	Gneiss	45	3.8	35	121
7	Flekkerøy	1989	Gneiss	46	2.3	29	101
8	Nappstraumen	1990	Gneiss	55	1.8	27	63
9	Fannefjord	1991	Gneiss	54	2.7	28	101
10	Maurisund	1991	Gneiss	43	2.1	20	92
11	Byfjord	1992	Phyllite	70	5.9	34	223
12	Mastrafjord	1992	Gneiss	70	4.4	40	133
13	Freifjord	1992	Gneiss	70	5.2	30	130
14	Hitra	1994	Gneiss	70	5.6	38	264
15	Tromsøysund	1994	Gneiss	2 x 60	3.4	45	102
16	Bjørøy	1996	Gneiss	53	2.0	35	88
17	Sløverfjord	1997	Gneiss	55	3.3	40	112
18	North Cape	1999	Shale, sand-stone	50	6.8	49	212
19	Oslofjord	2000	Gneiss	79	7.3	32	134
20	Frøya	2000	Gneiss	52	5.3	41	164
21	Ibestad	2000	Mica schist, granite	46	3.4	30	112
22	Bømlafjord	2000	Greenstone, gneiss, phyllite	74	7.9	35	262
23	Skatestraumen	2002	Gneiss	52	1.9	40	91
24	Melkøysund (priv)	2003	Gneiss	50	2.3	36	63
26	Halsnøy	2008	Gneiss	50	4.1	45	135
27	Eiksund	2008	Gneiss, gabbro, limestone	71	7.8	50	287
28	Atlantic Ocean	2009	Gneiss	85	5.8	45	250
29	Finnøy	2009	Gneiss	62	5.7	50	200
30	Rya	2011	Garnet-mica schist/gneiss	67	2.7	24	87
31	Karmøy	2013	Gneiss, greenstone/-schist, phyllite, meta-sandstone	92	8.9	45	139
32	Knappe	2015	Gneiss	2 x 85	6.4	13	29
33	Kvernsund	2017	Gneiss	62	3,3	50	127
34	Hundvåg	(2019)	Gneiss, phyllite	2 x 67	5,6	45	95
35	Ryfylke	(2019)	Gneiss, phyllite	2 x 62	14	43	291
36	Rogfast (planned)		Ophiolite, phyllite, gneiss, granite, greenstone	2 x 75	27	50	392

Tabla 1: Listado de túneles subacuáticos noruegos

Como se puede observar en la tabla anterior, se trata de túneles excavados en rocas resistentes y cuyo recubrimiento mínimo en roca es de 13 metros, aunque en general siempre presentan un recubrimiento en roca de más de 20 m.

Un ejemplo más ajustado en cuanto al espesor de roca sobre clave data de 2002 en la línea 2 del Metro de Montreal, en la extensión entre la estación de Henri Bourassa y Laval. El lote C01 pasa la “Rivière de Prairies”, de unos 350 m de anchura de lámina de agua, con un recubrimiento de roca mínimo de 9 metros y una anchura máxima del túnel 16 m. El túnel se realizó con una rozadora análoga a las empleadas en Bilbao. La roca es de tipo calizo con una resistencia a compresión simple de 70 a 100 MPa y calidad geotécnica elevada (RMR > 70). La fotografía siguiente muestra una imagen correspondiente esta obra.



Figura 3: Túnel excavado en la extensión de la L2 del Metro de Montreal

Por otro lado, cabe destacar que en los últimos decenios se han realizado en Bizkaia un gran número de túneles con NATM para el mismo cometido del Subfluvial, por lo que el método es suficientemente conocido. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios en la inmensa mayoría de los casos, a pesar de la calidad variable de la roca en algunos tramos.

La mayoría de los túneles urbanos, sobre todo los asociados al Metro, se han construido con rozadora, sin empleo de explosivos, y con un sostenimiento primario simultáneo a la excavación a base de bulones, cerchas y hormigón proyectado. Para asegurar la funcionalidad y durabilidad a largo plazo, en dichos túneles se colocó un revestimiento de hormigón en masa y, en ocasiones, armado.

Una vez analizados los casos anteriormente expuestos, se ha concluido que es seguro excavar el túnel Subfluvial con el método NATM siempre y cuando se garantice un recubrimiento mínimo en roca sobre la clave de al menos 1 diámetro (8-11 m). De esta forma, de cara a garantizar una construcción segura se ha planteado un trazado que siempre discurre en el sustrato rocoso y evite los niveles más superficiales de depósitos cuaternarios que se encuentran en las proximidades de la ría.

Este recubrimiento mínimo de roca sobre la clave del túnel se encuentra localizado en un tramo de la zona de Lamiako cuya longitud varía según el tubo considerado:

- Tubo sentido Artaza: tramo de 127 m entre el P.K. 2+318 y el P.K. 2+445
- Tubo sentido Ballonti: tramo de 100 m entre el P.K. 1+580 y el P.K. 1+680

Para mejorar el plazo de ejecución de la obra, se plantea el ataque del túnel principal desde sus cuatro puntos de emboquille (uno por cada tubo), es decir 2 en el lado Ballonti y 2 en el lado Artaza. Para ello, en cada una de estas zonas se deberá disponer lo siguiente:

- Zona Artaza: Se ejecutará un único pozo de ataque excavado entre pantallas que servirá para iniciar la excavación en mina tanto de los 2 tubos del túnel principal como del ramal de conexión de la Subfluvial-Avanzada.

Para el ramal de conexión Avanzada-Subfluvial el pozo de ataque será la propia sección del ramal excavada previamente entre pantallas.

El acceso y salida de materiales y personas a estos pozos podrá realizarse en vertical o también a través de las rampas de los ramales de conexión que habrán sido previamente ejecutadas.

- Zona Ballonti:

Antes de inicial la excavación del túnel, se deberá ejecutar un paso superior que permita restituir la carretera existente BI-628. El ataque de los túneles se realizará por debajo de esta estructura.

En cualquier caso, la definición en detalle y distribución final de estas zonas de ataque correrá a cargo del Contratista en función de las necesidades y requerimientos propios que mejor se ajusten a su metodología y planificación de la obra.

El túnel se excavará con una pendiente del 4% tanto desde el lado Ballonti como desde el lado Artaza, encontrándose el punto bajo en el PK 2+248,7 (tubo sentido Artaza) y en el PK 1+776,8 (tubo sentido Ballonti).

Por tanto, la excavación se realizará a favor de la pendiente, lo cual resultará en la necesidad de que se disponga de los medios suficientes para la extracción del agua de infiltración que se encuentre durante la construcción del túnel.

3.2 Método de excavación

3.2.1 Aspectos generales

Como ya se ha indicado con anterioridad, el método constructivo elegido para la excavación de todos los tramos en mina del túnel principal, ramales y galerías auxiliares es el método convencional denominado NATM.

En el NATM la medida y control de las convergencias forman parte del proceso. El revestimiento se ejecuta sólo cuando el avance y destroza han terminado, de manera que el alivio de tensiones es apreciable en este sistema. Así la estructura definitiva toma, en la mayoría de los casos, menores cargas.

Dada la variabilidad y flexibilidad del método NATM, no es fácil una única descripción del mismo. A continuación, se muestra un ejemplo de fases del método constructivo.

1. Excavación del avance, de unos 6 metros de altura para facilitar el empleo de maquinaria de rendimientos adecuados y la carga, en longitudes de 1 a 4 metros en función de la calidad geotécnica del terreno.
2. En caso de inestabilidad de terreno, se refuerza la corona con un paraguas de tubos, empquetado con barras de acero u otros sistemas ejecutados desde el frente que deben solaparse sucesivamente.
3. En caso de inestabilidad del frente, se refuerza éste con bulones de fibra de vidrio o poliéster (GPR) ejecutados desde el frente que deben solaparse sucesivamente. Otros métodos de estabilización del frente son el drenaje y las aureolas de inyecciones para mejorar la impermeabilidad del terreno.
4. Tras completar el pase de excavación se comprueba topográficamente la sección y se construye el sostenimiento que, en función de la calidad del terreno estará compuesto por bulones, cerchas y hormigón proyectado reforzado con mallas electrosoldadas o fibras (metálicas o sintéticas).
5. Excavación de la destroza o banco inferior. Salvo si el terreno es de mala calidad, el frente de excavación del banco se retrasa para no entorpecer el avance. Sin embargo, en terrenos de baja calidad puede ser conveniente cerrar la sección lo antes posible. La destroza se puede hacer en una sola fase en terrenos de buena calidad, pero se suele partir en fases cuando el avance está sostenido con cerchas para evitar su descalce.
6. Una vez excavado el pase, se construye el sostenimiento de la destroza que habitualmente es una prolongación de el del avance.
7. En terrenos de baja calidad o bajo el nivel freático, se excava una contrabóveda curva y se refuerza con hormigón. Esta contrabóveda, en suelos, puede ser necesario llevarla cerca del frente. Si por estabilidad, esto no es necesario, se construye inmediatamente antes del revestimiento.

Anejo 08. Túnel

8. El revestimiento suele ser de hormigón encofrado. Es habitual el empleo de hormigón en masa y un espesor de 30 cm mínimo, aunque depende del diámetro del túnel. Sin embargo, puede haber solicitaciones que requieran su armado con armaduras, mallas electrosoldadas o fibras, así como contrabóveda curva.
9. Entre el sostenimiento y el revestimiento, se suele aplicar una lámina de PVC con geotextil para la protección del revestimiento y la impermeabilización de la sección.

En la mayoría de los túneles diseñados con la filosofía del NATM, el sostenimiento estabiliza las cargas del terreno y el revestimiento no es más que una protección que debe asumir las cargas a largo plazo y el agua. En otros casos, el diseño desprecia el sostenimiento por su posibilidad de degeneración y sólo confía la estabilidad a largo plazo al revestimiento.

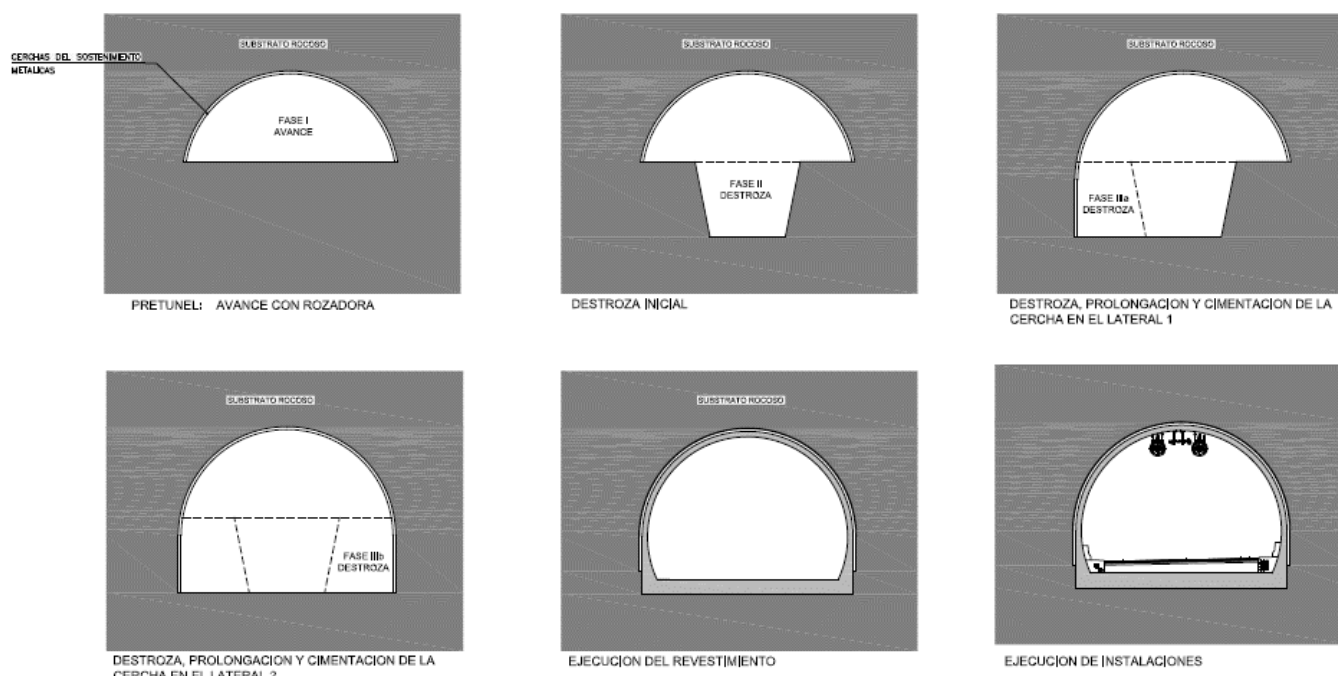
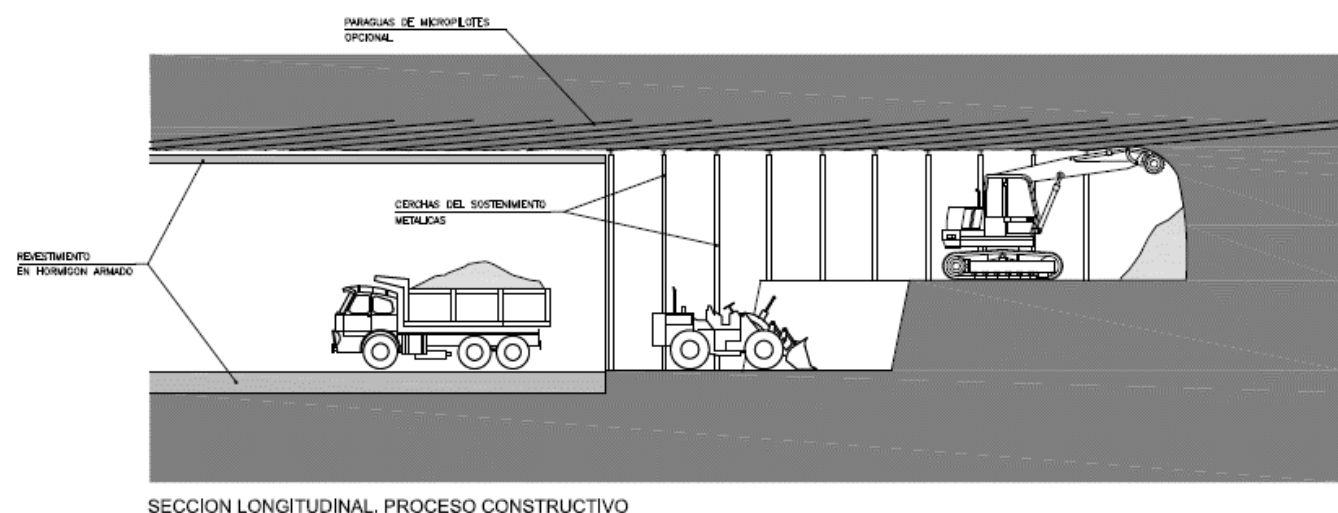


Figura 4: Ejemplo de secuencia de NATM

3.2.2 Análisis del tipo de excavación más adecuado

La correcta elección del método de excavación es el punto clave de todo proyecto de obra subterránea. Los posibles métodos de excavación convencional que se han analizado para la ejecución del túnel en mina (NATM) son los siguientes:

- Perforación y voladura
- Martillo rompedor
- Rozadora de ataque puntual

Como ya se ha comentado anteriormente, la experiencia en la mayoría de los túneles urbanos en Bilbao, sobre todo los asociados al Metro, es que hayan sido construidos con rozadora y sin empleo de explosivos.

En cualquier caso, a continuación se analizan las características más destacadas de cada uno de los posibles métodos de excavación.

PERFORACIÓN Y VOLADURA

Las ventajas que presenta este método son la versatilidad en cuanto a tipos de terreno y secciones de excavación, adaptabilidad de los equipos a otros trabajos y reducida inversión inicial.

El arranque con explosivos presenta sus mayores ventajas en los terrenos más competentes y altamente abrasivos, pues en ellos las rozadoras pueden ser insuficientes o presentar desgastes excesivos en las picas. Con el empleo de jumbos robotizados pueden alcanzarse elevados rendimientos.

Los principales inconvenientes que presenta el método es que los perfiles de excavación son más irregulares y la alteración del macizo rocoso circundante puede ser intensa si las voladuras no se realizan con técnicas de control en el perímetro. Ambos aspectos inciden negativamente sobre los costes del sostenimiento. También hay que tener en cuenta las vibraciones que producen las voladuras en el entorno y la afección de éstas a edificios o estructuras cercanos.

También es posible emplear voladuras de afloje previas a la excavación mecánica en las zonas de más resistencia. Estas voladuras son de mucha menor entidad que las voladuras de producción, por lo que sus efectos negativos (vibraciones y alteración del macizo rocoso) disminuyen de forma muy considerable.

MARTILLO ROMPEDOR

Este método consiste en el empleo de un martillo hidráulico soportado por una retroexcavadora que incide puntualmente sobre el frente de excavación. Resulta altamente adecuado para terrenos rocosos fracturados y como complemento al método anterior de perforación y voladura. Puede emplearse en terrenos competentes sanos, pero su rendimiento baja enormemente si no existen planos previos de debilidad.

Los perfiles de excavación son muy regulares y la afección al macizo es mínima. Esta técnica resulta inadecuada en terrenos muy blandos con cohesión, pues en ellos el martillo disipa su energía sin conseguir el arranque del terreno.

ROZADORAS

Son máquinas excavadoras que realizan su trabajo mediante una cabeza giratoria provista de herramientas de corte que inciden sobre la roca y que va montada sobre un brazo monobloque o articulado. Poseen un sistema de recogida y transporte del material que lo evacua desde el frente de arranque hacia la parte posterior de la máquina. Todo el conjunto va montado sobre un chasis móvil de orugas.

Frente a la voladura presentan la ventaja de conseguir un exacto perfilado de excavación con una afección nula a la roca remanente. Además, no afectan a estructuras próximas por la ausencia de vibraciones importantes.

Su aplicación es ideal en terrenos rocosos de calidad media, teniendo un límite habitual en macizos con 100 MPa de resistencia a compresión simple, aunque los rendimientos se pueden ver muy disminuidos a partir de los 50 MPa. También hay que tener en cuenta la sección del túnel, pues tan sólo en grandes secciones se pueden emplear las

máquinas de gran potencia necesarias para rozar materiales de resistencias muy elevadas. En terrenos muy abrasivos no es adecuado este método, tanto por economía como por rendimiento.

CONCLUSIÓN

En función de la información existente (ensayos de abrasividad y resistencia) y de la calidad geomecánica del macizo excavado, en el siguiente cuadro se indica la idoneidad de cada uno de los métodos de excavación analizados para el tramo en mina del túnel Subfluvial.

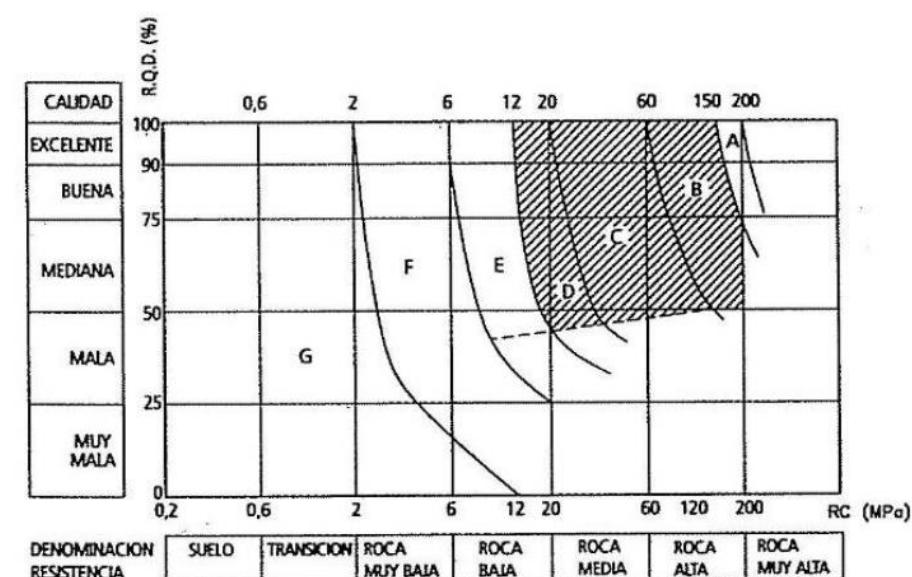
Método de excavación	Ideoneidad	Observaciones
Perforación y Voladura	No válido	Técnicamente posible en combinación con el martillo, pero descartado por tratarse de una obra urbana y la necesidad de evitar dañar el macizo rocoso aledaño al perfil de excavación. Además, en Bilbao no se cuenta con experiencias en túneles de similares características excavados con voladuras.
Martillo	Válido	Adecuado como complemento de otro método.
Rozadora	Válido	Adecuado y además es el método habitualmente empleado en Bilbao en túneles de similares características.

Tabla 2: Métodos de excavación

Por tanto, en el caso del túnel Subfluvial de Lamiako se ha decidido que la excavación se realizará con rozadora y sin el empleo de voladuras.

Potencia de la rozadora

Para determinar la potencia que debe tener la máquina rozadora, una primera aproximación se puede realizar a través del criterio propuesto por Romana (1994) que establece de forma orientativa el medio mecánico de excavación más apropiado en función de una sencilla clasificación de los macizos rocosos según su resistencia a compresión simple y el valor del RQD.



ZONA	TOPO		ROZADORA			MARTILLO	PALA
	> 25 t	< 25 t	> 80 t	50 - 80 t	< 50 t		
A	Posible ?						
B	Adecuado	Posible ?	Posible ?				
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado			
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?	*
E	Posible	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?
F				Posible	Adecuado	Adecuado	Posible
G					Posible	Posible ?	Adecuado

Figura 5: Clasificación de los terrenos respecto de la excavabilidad mecánica en túneles, Romana 1994

La unidad geotécnica que condicionará la potencia de la máquina rozadora será la de las calizas y margas (U3), que se encuentra en la margen izquierda a lo largo de casi 700 m de longitud del túnel y presenta las mayores resistencias a compresión simple de todo el trazado.

En función de la información geotécnica disponible, la resistencia a compresión simple media de esta unidad es de 47 MPa, con un valor máximo de 116 MPa. El RQD a cota de túnel registrado en los sondeos es muy alto y siempre en el entorno de RQD ~ 100%.

Con estos valores y siguiendo el criterio de Romana, la máquina debería tener una potencia de:

- rozadora de más de 50 t si se considera la RCS media (47 MPa) => zona C
- rozadora de más de 80 t si se considera la RCS máxima (116 MPa) => zona B

Para un cálculo más detallado también se puede emplear la expresión que estima la potencia mínima instalada que será necesaria en la cabeza de corte:

$$POT (kW) = 0,87 \times RCS^{1,18}$$

Posteriormente, se puede relacionar la potencia de corte y el peso de la rozadora mediante:

$$P (kW) = 2-4 \times \text{Peso (t)}$$

Anejo 08. Túnel

Según la bibliografía, este valor suele estar comprendido entre 3 y 4, aunque de forma conservadora se adopta un valor de 3, de forma que:

$$\text{Peso (t)} = P \text{ (kW)} / 3$$

Por tanto, siguiendo estas formulaciones se obtendrían los siguientes resultados según se considere el valor medio o el máximo de la RCS:

- Para la RCS media (47 MPa)

$$\text{POT} = 0,87 \times 93,99 = 82 \text{ kW}$$

$$\text{Peso} = 27,3 \text{ t}$$

- Para la RCS máxima (116 MPa)

$$\text{POT} = 0,87 \times 273 = 237 \text{ kW}$$

$$\text{Peso} = 79 \text{ t}$$

Por tanto, como conclusión final indicar que el túnel Subfluvial se podrá excavar por medios mecánicos mediante el empleo de máquinas rozadoras pesadas cuya potencia máxima sea de unas 80 t.

3.2.3 Rendimientos de excavación

De cara a estimar unos tiempos de ejecución aproximados para la obra civil de los túneles principales con sección estándar, que supone más del 92% del trazado, se han asumido los siguientes rendimientos.

Sostenimiento	RENDIMIENTO ESTIMADO
ST2C-I, STC2C-II y ST2C-III	2 m/día con turnos de 7 días/24 horas
ST2C-IV + ST2C-V	1 m/día con turnos de 7 días/24 horas
ST2C-IV + PRE-INYECCIÓN	0.6 m/día con turnos de 7 días/24 horas

Tabla 3: Rendimientos estimados para el túnel principal

Los rendimientos para el resto de las secciones tipo del túnel principal (sección de 3 carriles y cavernas de bifurcación) será menores dado que el tamaño de las mismas es sustancialmente mayor.

4 SECCIONES TIPO

Para el diseño de las secciones tipo del túnel Subfluvial de Lamaiko se ha aplicado el Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles.

La definición de los detalles de las distintas secciones tipo, así como de los espesores de sostenimiento y revestimiento que se van a presentar a continuación, deben considerarse como preliminares y podrán requerir actualizaciones o modificaciones en fases posteriores en el proyecto constructivo cuando se disponga de toda la información geotécnica y se realicen los correspondientes cálculos de comprobación.

4.1 Túnel principal

El túnel principal constará de las siguientes secciones tipo a lo largo de su trazado:

- Sección de 2 carriles o sección estándar (ST2C)
- Sección de 3 carriles (ST3C)
- Sección de caverna de bifurcación (STC)

Cada una de estas secciones se ha definido con objeto de garantizar una sección funcional suficiente para albergar los gálipos de circulación, los equipos e instalaciones necesarios y los espacios de seguridad requeridos. Asimismo, para la definición de la forma de las secciones se parte de la consideración de que los túneles se ejecutan por métodos convencionales (NATM).

4.1.1 Sección de dos carriles o sección estándar (ST2C)

La sección de dos carriles constituye la sección fundamental del proyecto al tratarse de la sección predominante en el trazado (se aplica aproximadamente en el 92% del trazado). Su definición se ha llevado a cabo en conformidad con las indicaciones del Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles, que indica lo siguiente:

4.5.4. Sección transversal

4.5.4.1. Carreteras con calzadas separadas

CALZADA CON DOS CARRILES SIN PREVISIÓN DE AMPLIACIÓN

La sección tipo estará formada por:

$$\text{Arcén } 1,0 \text{ m} + 2 \text{ carriles de } 3,5 \text{ m} \\ + \text{ arcén } 2,5 \text{ m} = 10,5 \text{ m}$$

En caso de túneles con velocidad limitada o controlada con señalización variable, con tráfico poco intenso, o en terrenos geológicamente desfavorables, se podrá justificar la reducción a una sección más estricta no inferior a:

$$\text{Arcén } 0,5 \text{ m} + 2 \text{ carriles de } 3,5 \text{ m} \\ + \text{ arcén } 1,0 \text{ m} = 8,5 \text{ m}$$

A ambos lados se dispondrá una acera elevada de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho mínimo.

Figura 6: Extracto del Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles para dos carriles

Por ello, se ha ajustado la sección para alojar una plataforma de 10,5 m de anchura, una acera de 75 cm a cada lado de la calzada y las barreras de hormigón sobre las que apoyarían los paneles reflectantes. Por otro lado, en altura se ha ajustado la forma de la sección para mantener un gálibo de 5 m y alojar los equipos de los sistemas de ventilación y señalización.

Cuando el terreno presenta mala calidad, el cierre inferior de la sección se ha efectuado mediante una contrabóveda, cuya curvatura deberá ser calculada y verificada en una fase posterior del proyecto.

Anejo 08. Túnel

En la siguiente figura se muestra la sección transversal definida para los tramos con dos carriles y el caso de pendiente transversal máxima del 8%. Tal y como se observa en la figura, se ha mantenido un único radio de curvatura en toda la sección con objeto de mejorar el comportamiento estructural de la excavación.

Esta sección tiene un área de excavación de 106,7 m² (sección con solera plana) y 124 m² (sección con contrabóveda).

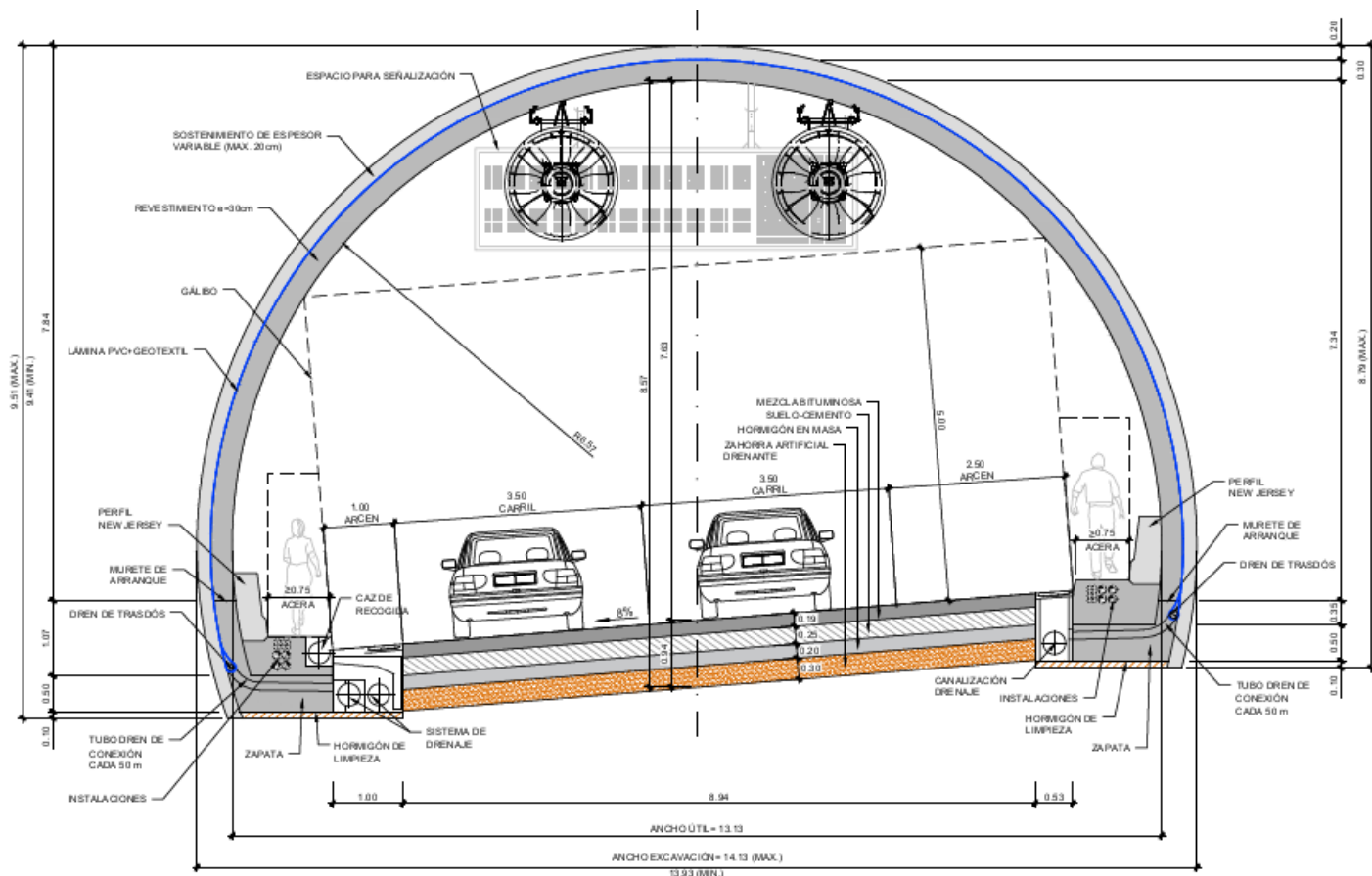


Figura 7: Sección transversal de dos carriles o estándar (ST2C) con solera plana

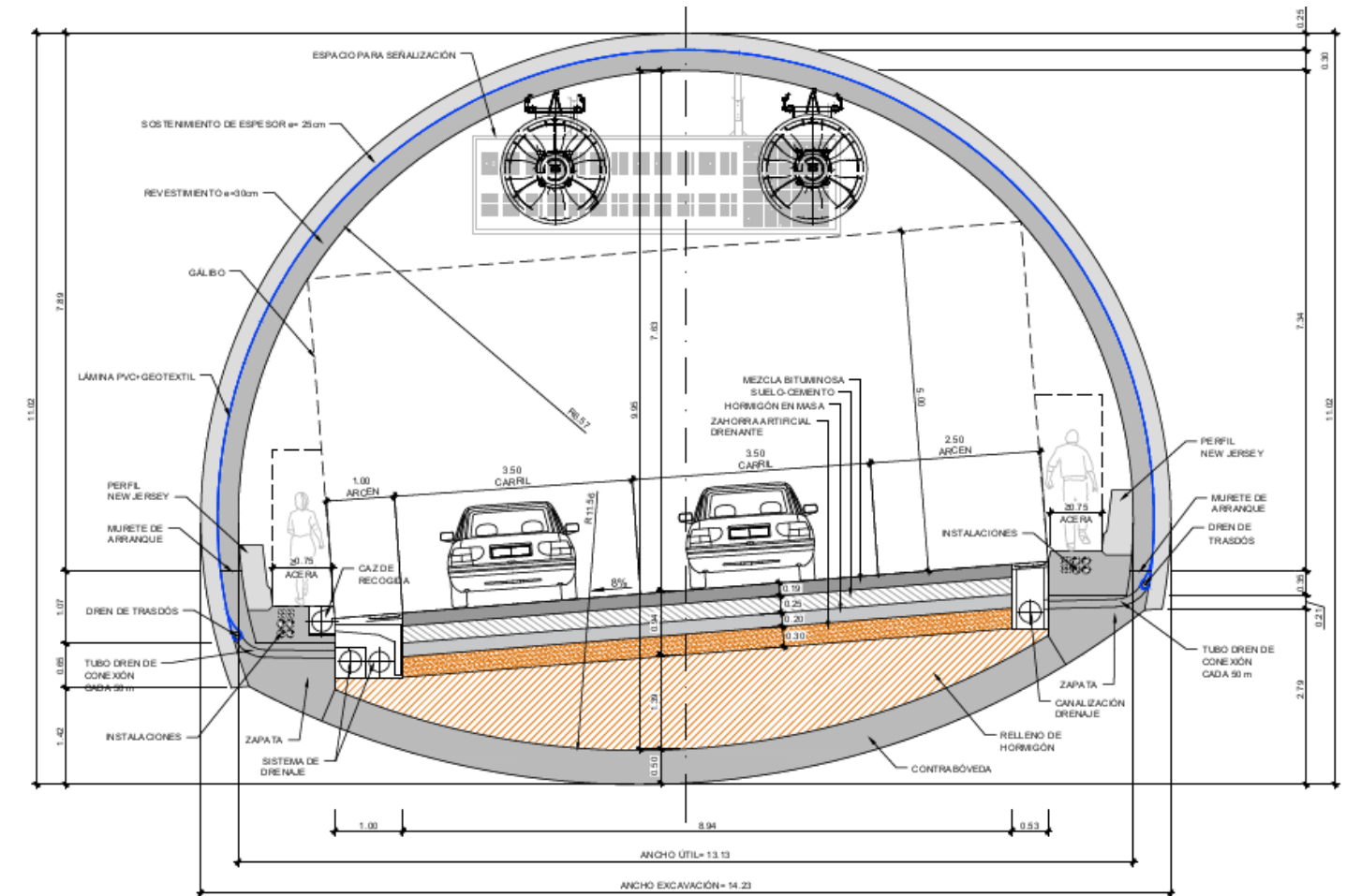


Figura 8: Sección transversal de dos carriles o estándar (ST2C) con contrabóveda

En el tubo sentido Ballonti, en la zona más próxima a su punto de emboquille lado Artaza, hay un tramo de 106,8 m entre el PK 0+376,21 (eje 30), lo que equivale al PK 0+365 (eje 37), y el PK 0+483 (eje 30), en el que por requerimientos de ventilación se ha tenido que aumentar ligeramente la sección estándar.

Esta sección tiene un área de excavación de 114,26 m² (sección con solera plana) y 132 m² (sección con contrabóveda). A continuación, se muestra dicha sección.

Anejo 08. Túnel

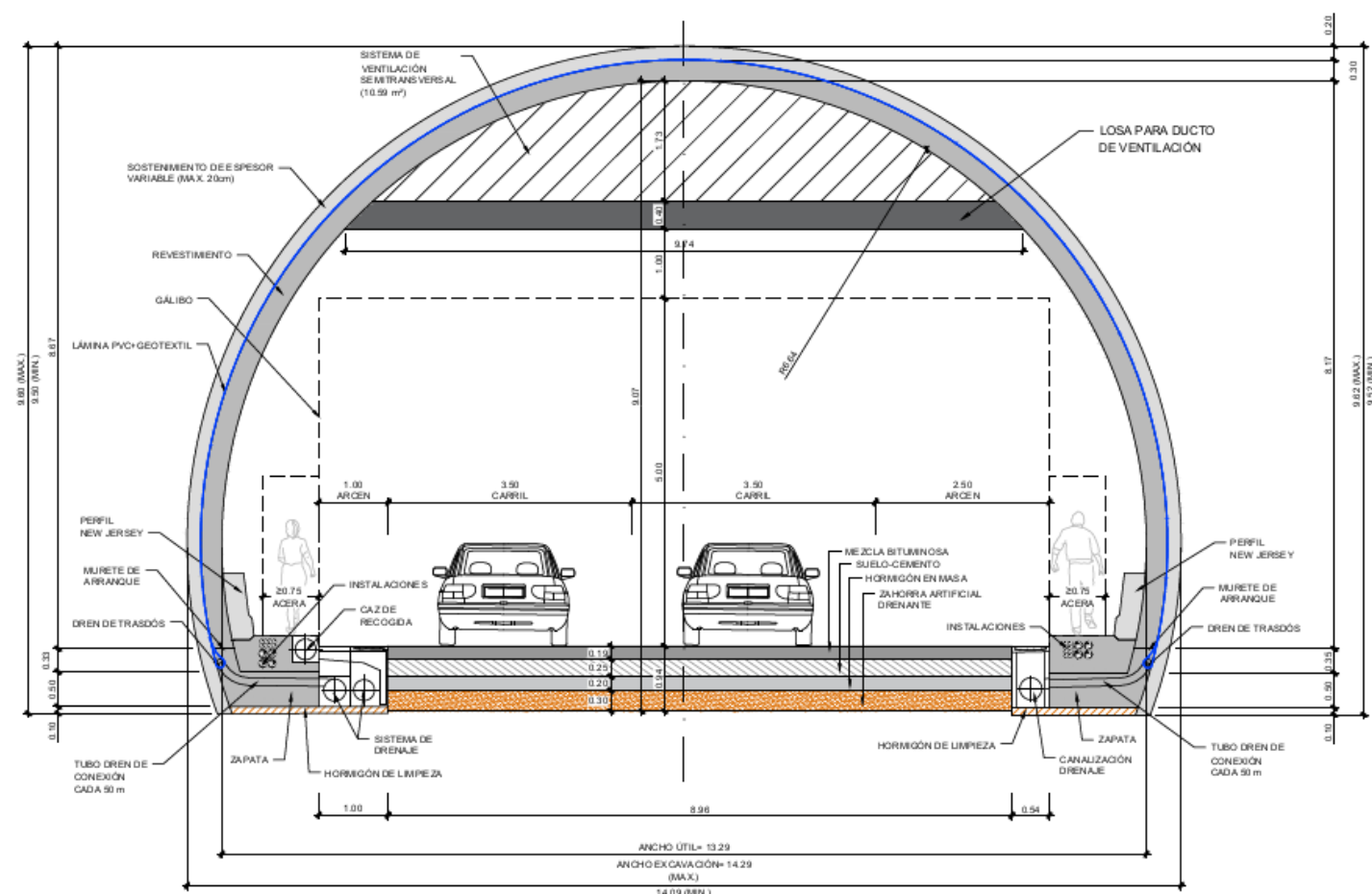


Figura 9: Sección transversal de dos carriles ampliada con solera plana (Artaza tubo sentido Ballonti)

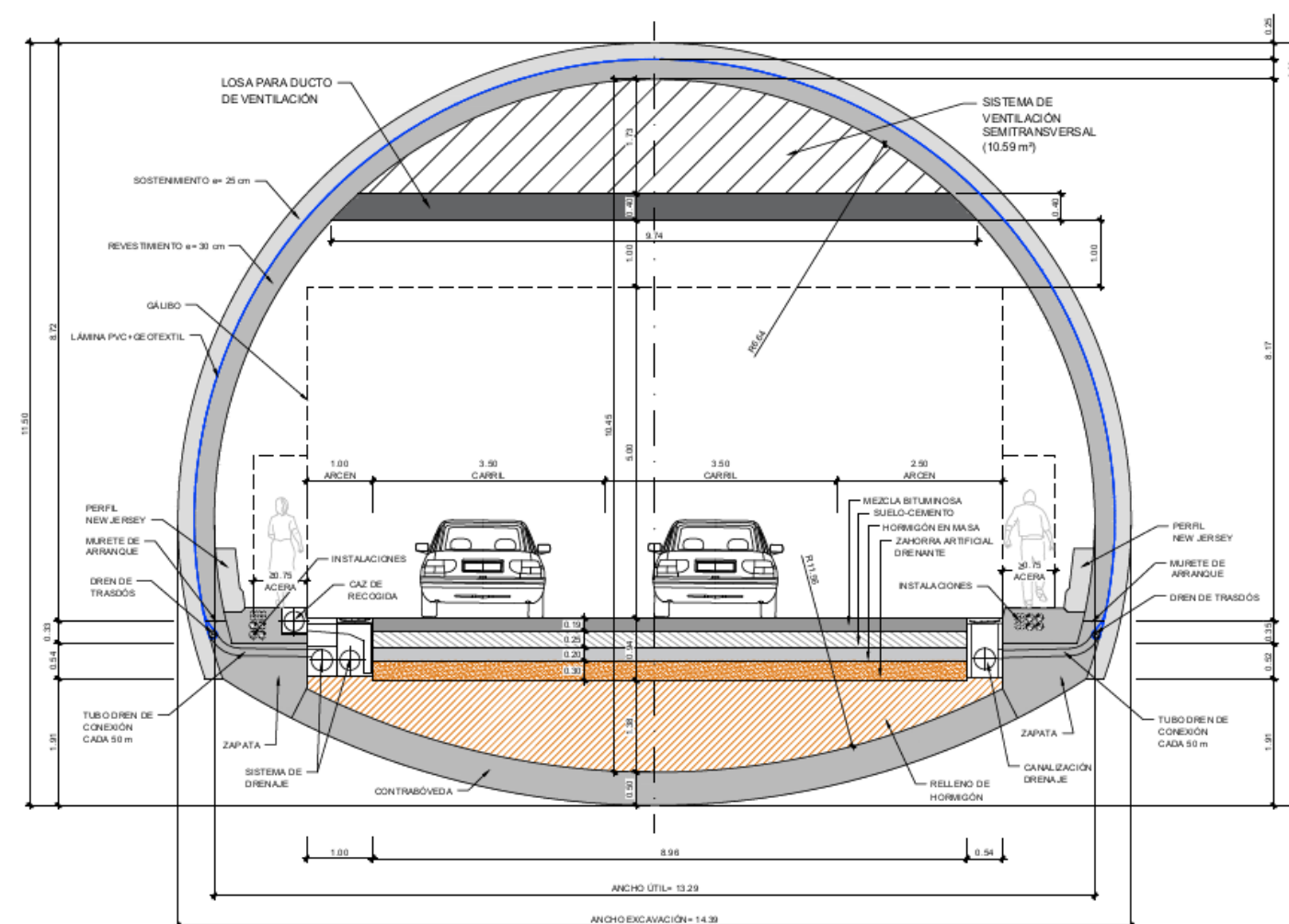


Figura 10: Sección transversal de dos carriles ampliada con contrabóveda (Artaza tubo sentido Ballonti)

Dentro de la sección de 2 carriles o estándar, también habrá un tramo bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako en el que el túnel deberá ser estanco y se tendrá que ejecutar con contrabóveda para poder resistir adecuadamente las altas cargas hidrostáticas a las que se verá sometido. Este tramo se sitúa entre el PK 1+866 y el PK 2+490 (tubo sentido Artaza). A continuación, se muestra dicha sección.

Anejo 08. Túnel

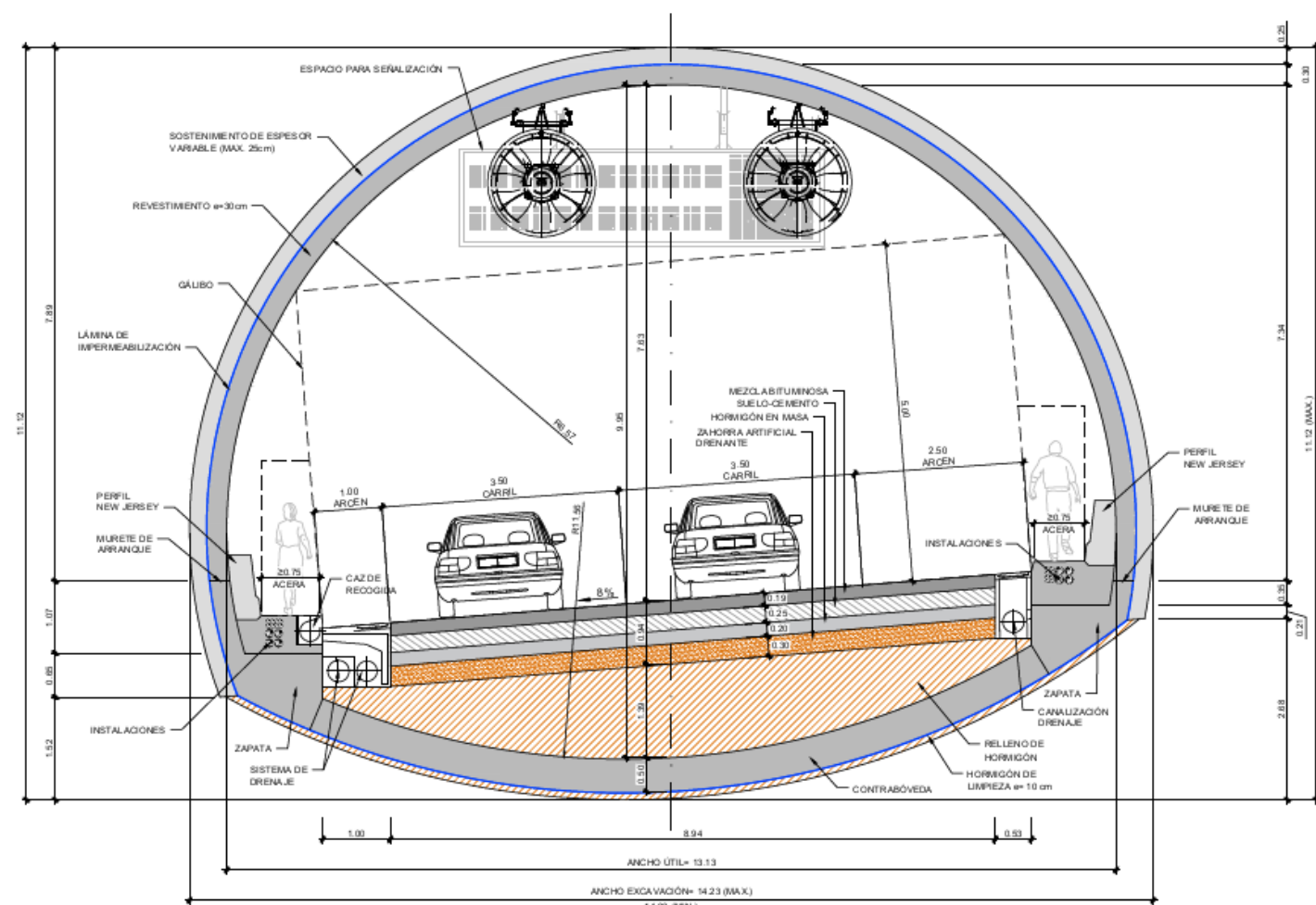


Figura 11: Sección transversal de dos carriles estanca (con contrabóveda) bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako

4.1.2 Sección de tres carriles (ST3C)

Para secciones de tres carriles el Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles indica lo siguiente:

Calzada con tres carriles.
La sección tipo una será:
Arcén 1,0 m + 3 carriles de 3,5 m + arcén 1,0 m = 12,5 m.
A ambos lados se dispondrá una acera elevada de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho mínimo.

Figura 12: Extracto del Artículo 4.5.4 del Decreto Foral de Bizkaia 91/2012 de Seguridad de Túneles para tres carriles.

En este caso, se ha ajustado la sección para alojar una plataforma de 12,5 m de anchura, una acera de 75 cm a cada lado de la calzada y las barreras de hormigón sobre las que apoyarían los paneles reflectantes. Por otro lado, en altura se ha ajustado la forma de la sección para mantener un gálibo de 5 m y alojar los equipos de los sistemas de ventilación y señalización.

Cuando el terreno presenta mala calidad, el cierre inferior de la sección se ha efectuado mediante una contrabóveda, cuya curvatura deberá ser calculada y verificada en una fase posterior del proyecto.

Esta sección tipo se aplica en una longitud de 214 m en el tubo sentido Ballonti y 176 m en el tubo sentido Artaza.

En la siguiente figura se muestra la sección transversal definida para los tramos con dos carriles y el caso de pendiente transversal máxima del 8%. Al igual que para la sección de dos carriles, se ha mantenido un único radio de curvatura en hastiales y bóveda.

Esta sección tiene un área de excavación de 130,65 m² (sección con solera plana) y 156 m² (sección con contrabóveda).

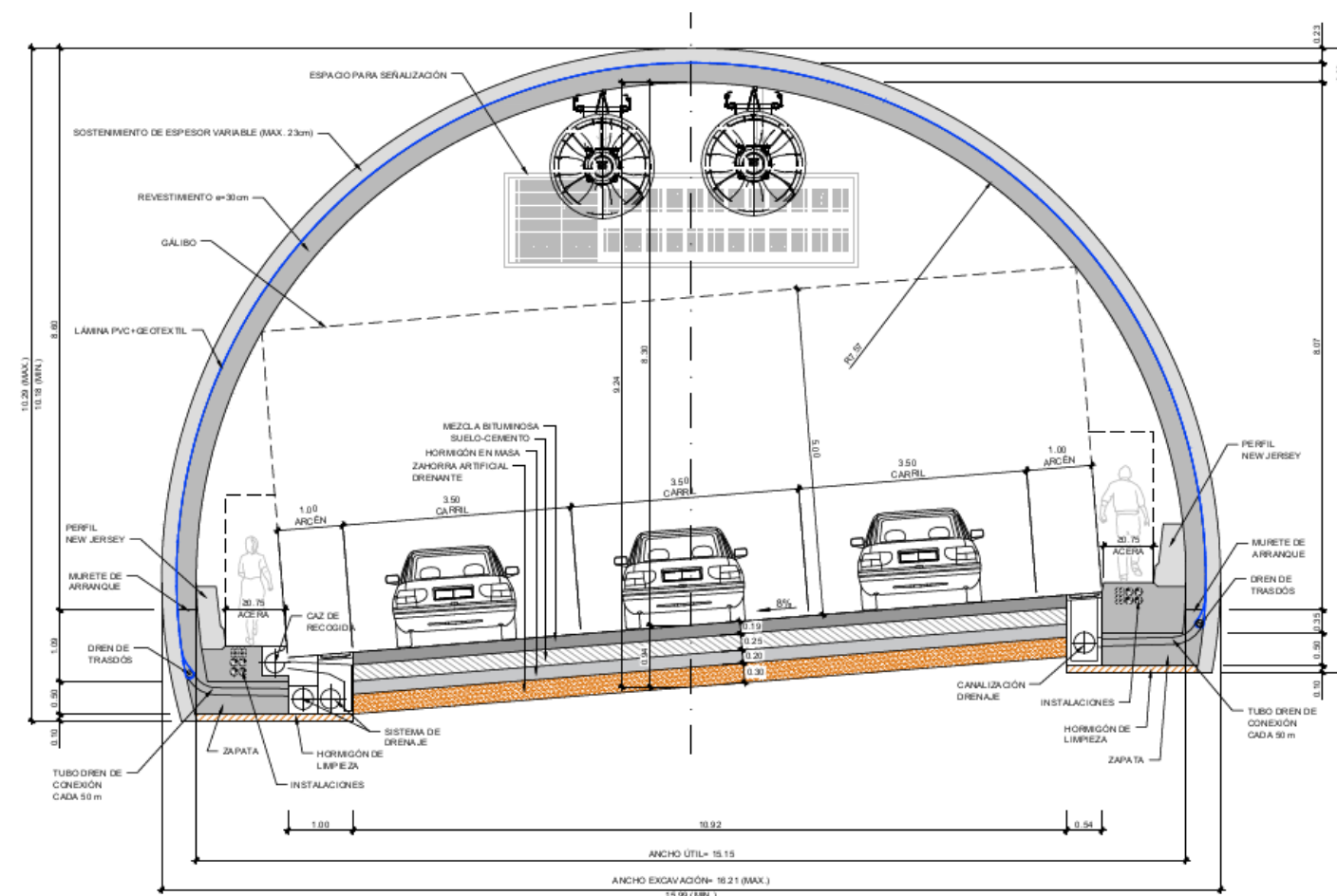


Figura 13: Sección transversal de tres carriles (ST3C) con solera plana

Anejo 08. Túnel

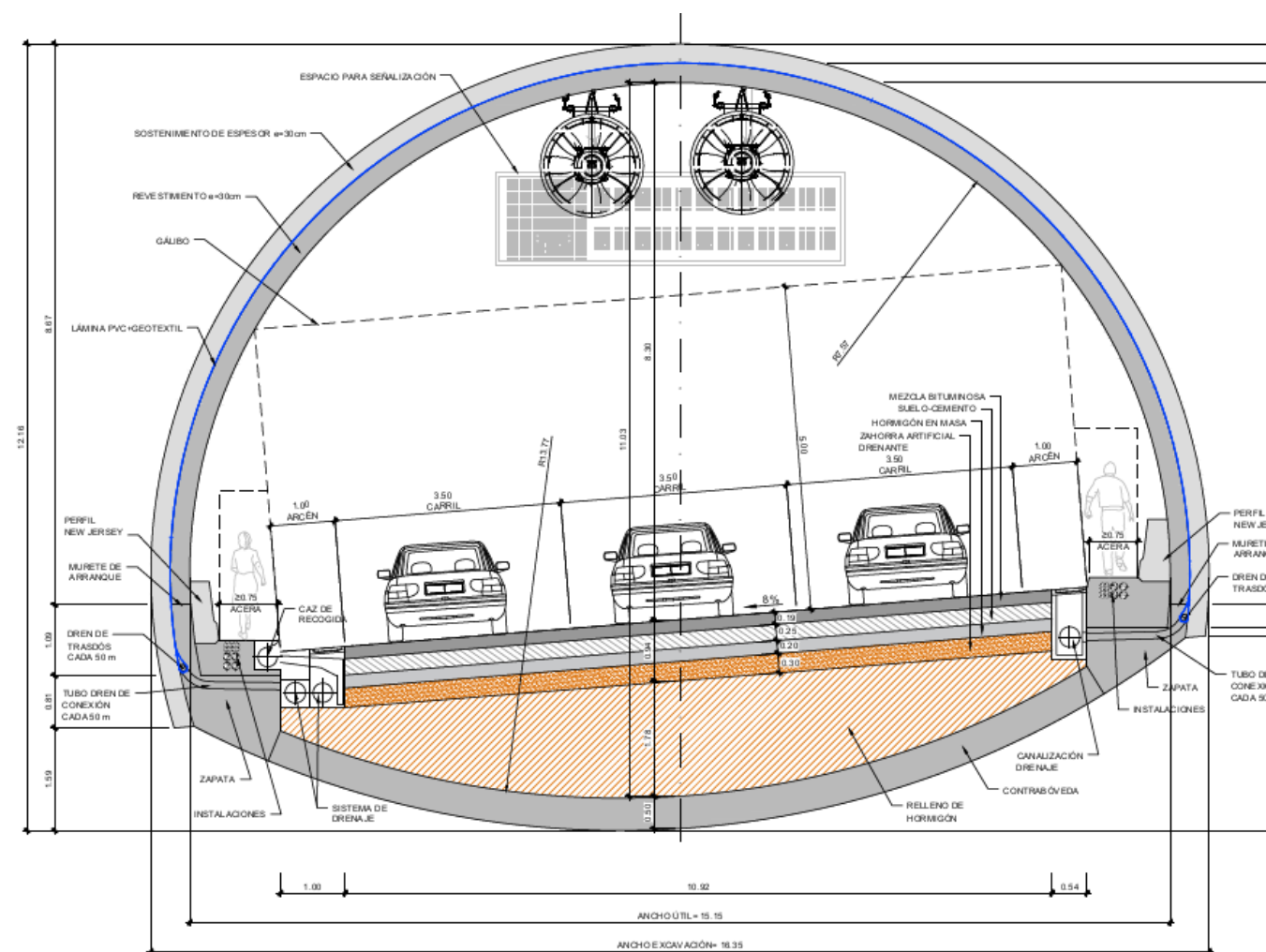


Figura 14: Sección transversal de tres carriles (ST3C) con contrabóveda

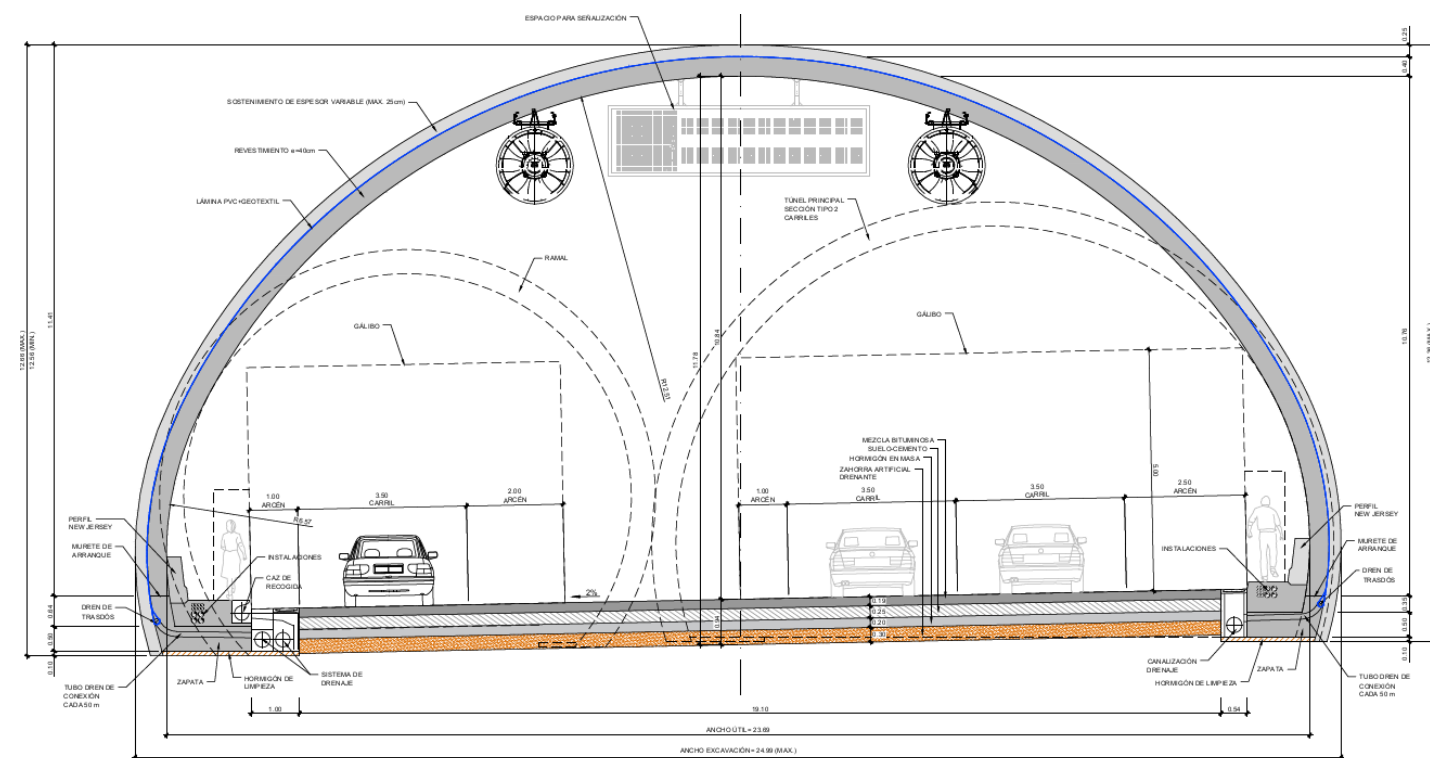


Figura 15: Sección en caverna de bifurcación (STC) con solera plana

4.1.3 Cavernas de bifurcación (STC)

En los puntos del trazado en los que se produce la intersección entre los ramales anteriores y los túneles principales resulta necesario ampliar la sección de excavación de los túneles debido a la progresiva separación de carriles que permita el acuerdo entre una sección de 3 carriles y las dos secciones en que se descompone posteriormente a la intersección. Por ello, a partir de la sección de ramal y la de dos carriles de circulación, se ha definido una sección en caverna que abarque ambas secciones funcionales.

Tal y como se muestra en la siguiente figura, esta sección constituye la sección de mayor tamaño necesaria en el punto de mayor bifurcación de los carriles, previo a la ejecución independiente de los dos túneles resultantes. No obstante, con objeto de optimizar la caverna resultante, se evaluará en una fase posterior del diseño la división en planta del tramo en caverna en dos tramos de diferente sección.

Esta sección tipo se aplica en una longitud de 46 m en el tubo sentido Ballonti y 64 m en el tubo sentido Artaza y supone un área de excavación de 250 m² (sección con solera plana) y 314 m² (sección con contrabóveda).

Anejo 08. Túnel

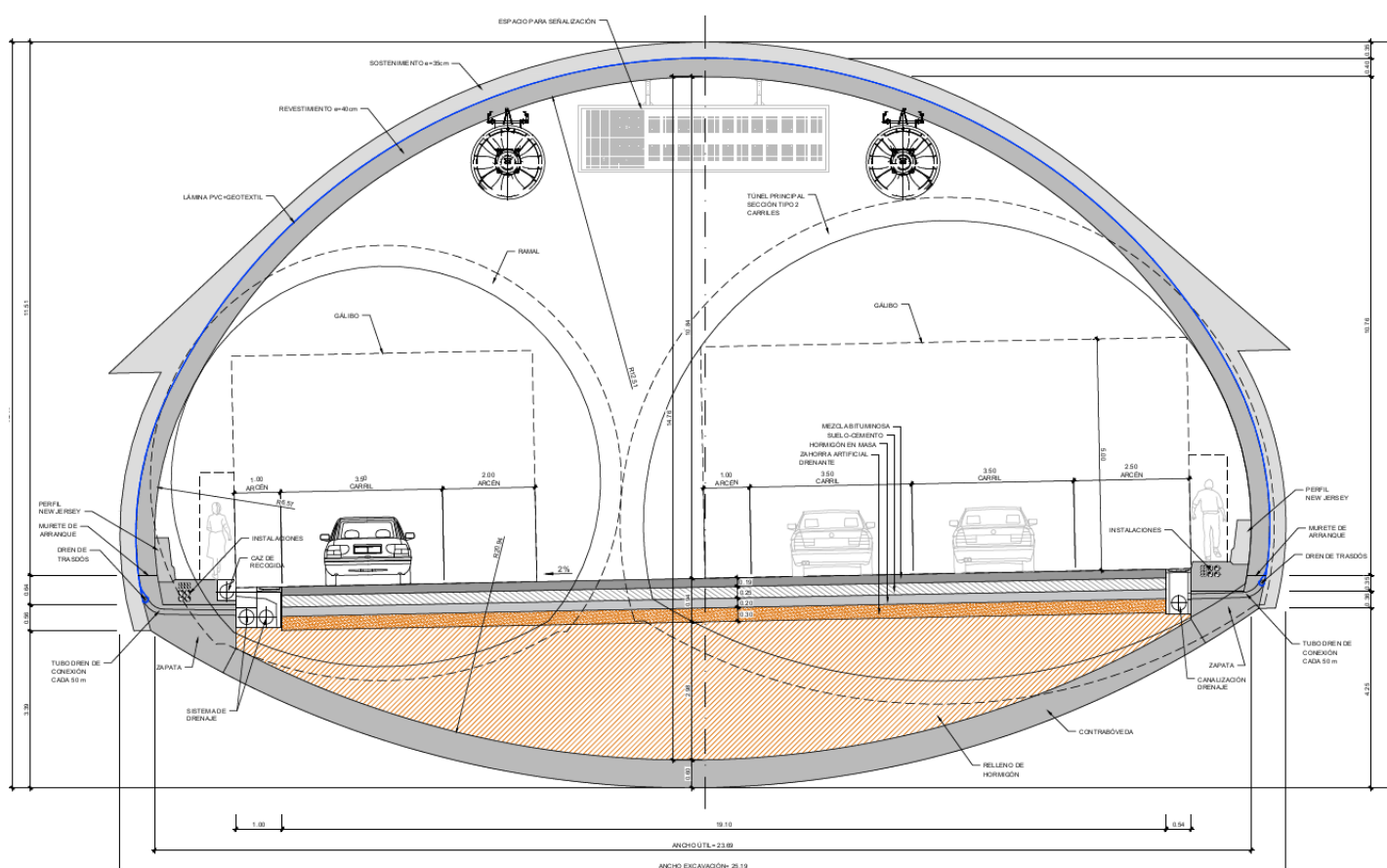


Figura 16: Sección en caverna de bifurcación (STC) con contrabóveda

4.1.4 Sección Multimodal

De cara a mejorar la actual carencia de conexiones transversales entre ambas márgenes de la ría, se ha evaluado la posibilidad de incorporar en el mismo trazado del túnel carretero del Subfluvial una línea de transporte de personas o “people mover” autopropulsada. De esta forma, la sección de uno de los dos tubos del túnel principal tendría que ser compartida con un sistema público de transporte a lo largo de la parte de su trazado que discurre bajo la ría.

Se ha efectuado una comparativa entre una solución multimodal con la línea de transporte de personas a un lado de la calzada o una solución multimodal en la que la línea de transporte se sitúe en la parte inferior de la sección del túnel, bajo la calzada de tráfico rodado.

En las siguientes figuras se muestran las secciones definidas para las dos hipótesis de ubicación relativa de calzada y “people mover” consideradas.

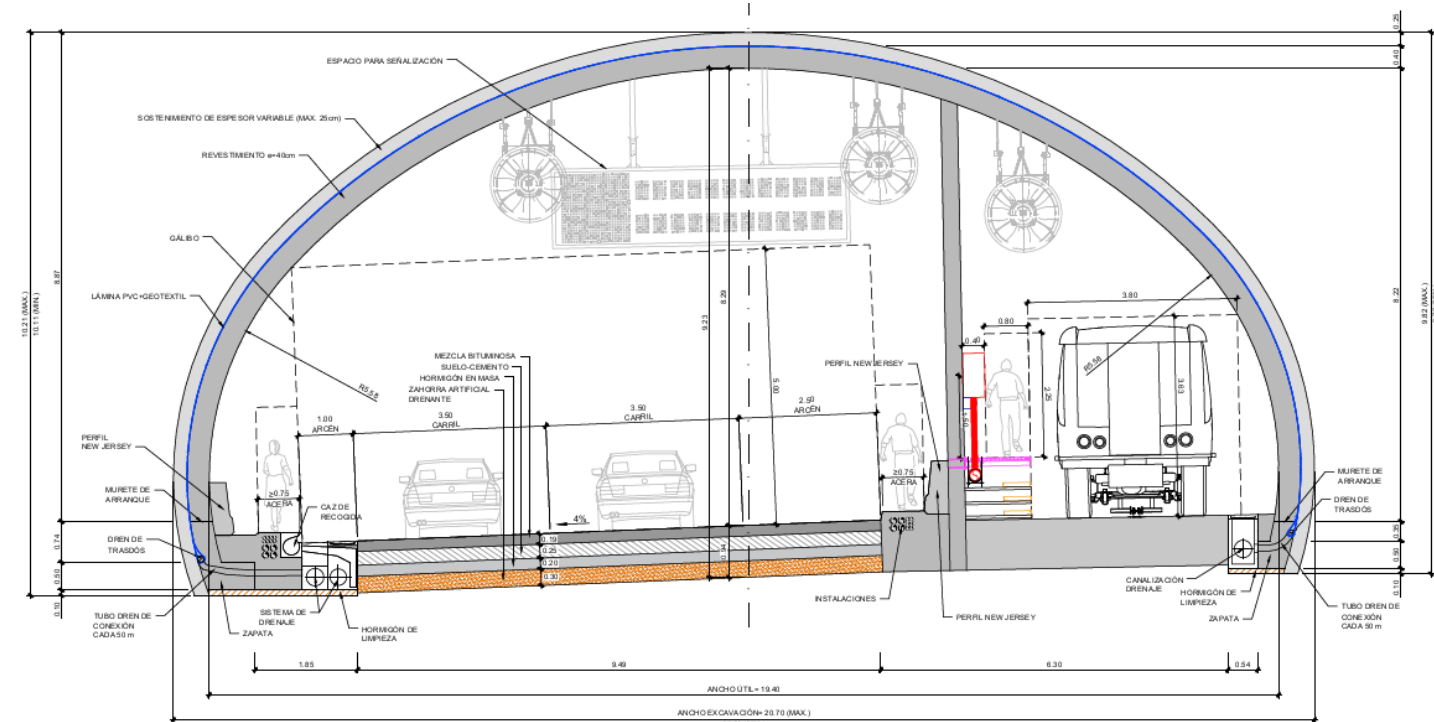


Figura 17: Sección multimodal de línea autopropulsada a un lado de la sección con solera plana

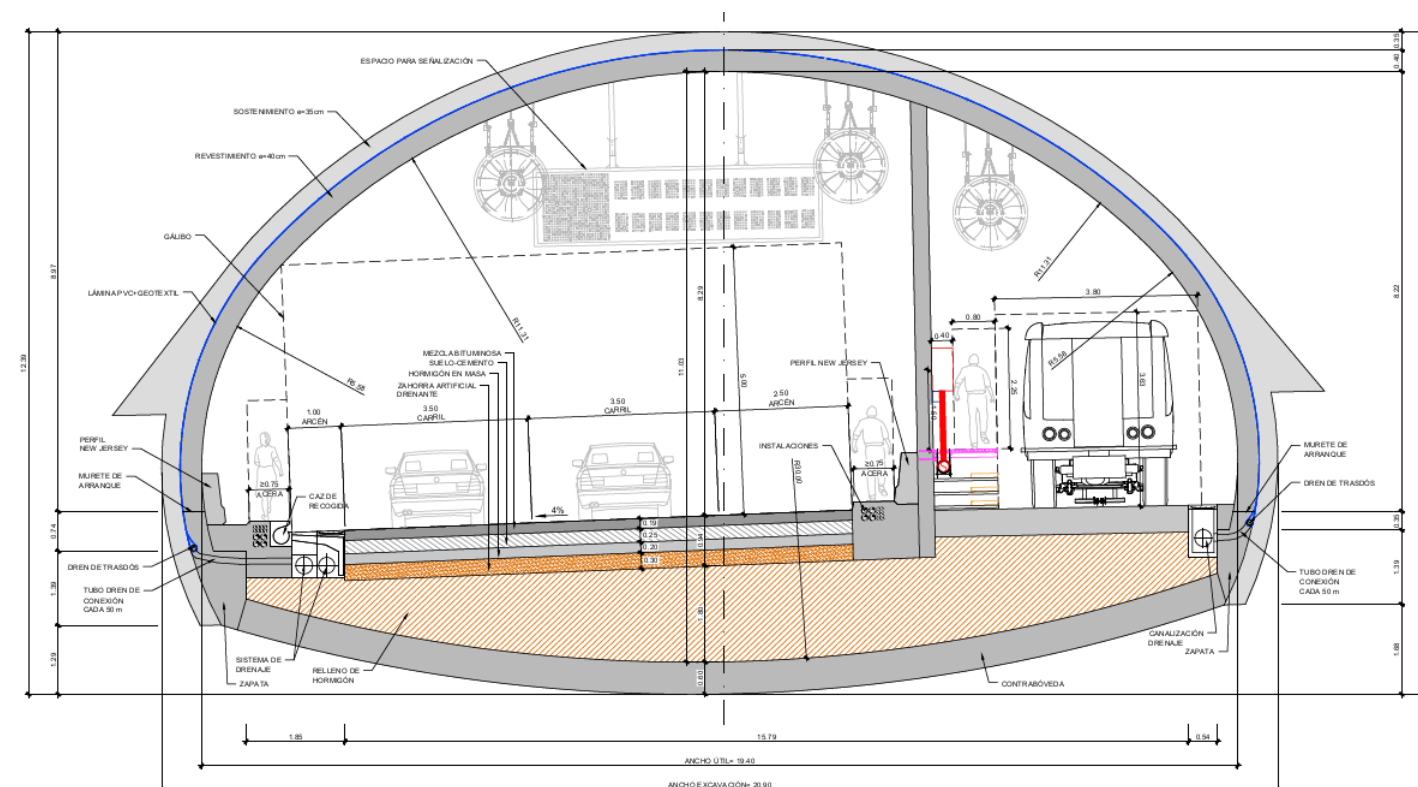


Figura 18: Sección multimodal de línea autopropulsada a un lado de la sección con contrabóveda

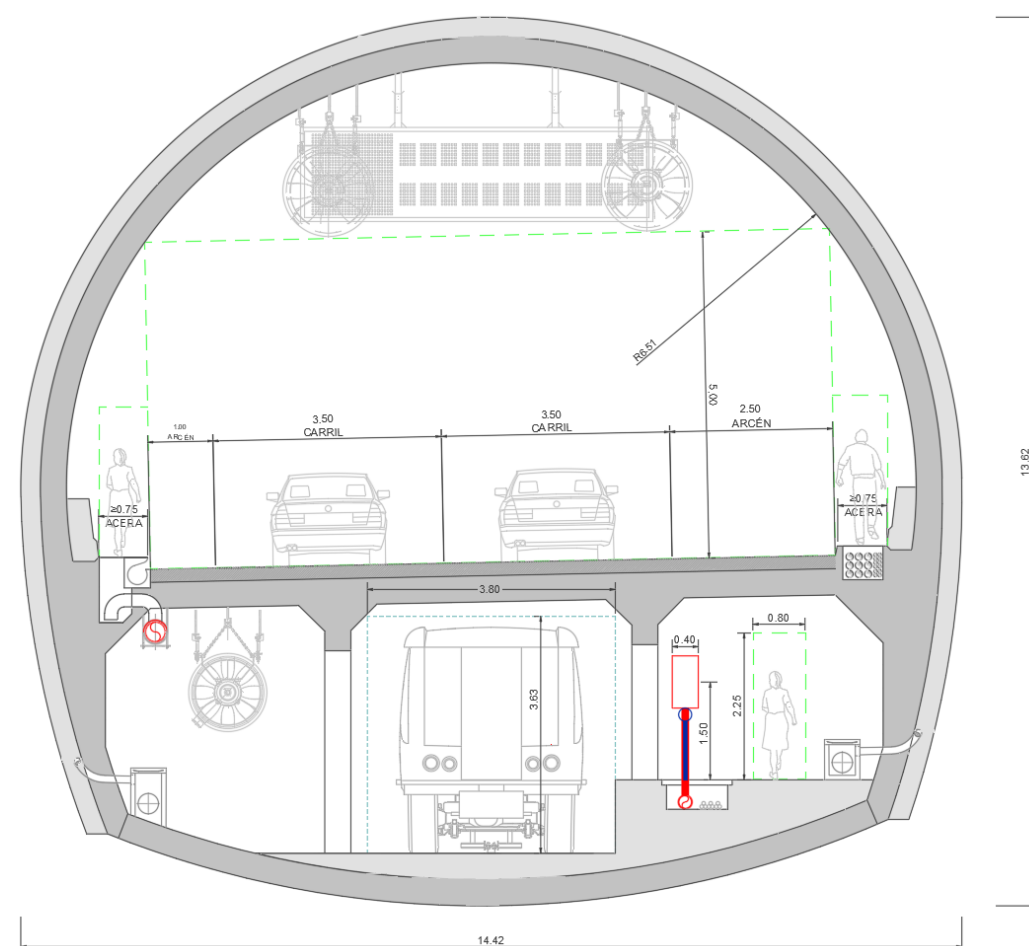


Figura 19: Sección multimodal de línea autopulsada bajo la calzada

En la sección multimodal con la calzada y la vía al mismo nivel, se ha propuesto una sección de tres radios para optimizar la altura de la sección y así evitar que el recubrimiento de roca disminuya respecto a la sección del túnel estándar de 2 carriles.

En la otra alternativa de sección con “people mover” bajo la calzada, se ha mantenido una curvatura constante con radio único en la bóveda, mientras que el acuerdo en zona de hastiales se finaliza con una transición de mayor radio hasta el encuentro con la contrabóveda.

A modo de comparativa, la superficie de excavación obtenida para el encaje con el “people mover” situado a un lado (mismo nivel) de la sección es de 168 m² con solera plana y de 209,5 m² con contrabóveda, mientras que para la solución con doble altura es de 163 m².

Desde el punto de vista funcional y de ejecución, la mejor alternativa es la opción multimodal con calzada y vía al mismo nivel, de cara a facilitar los entronques y zonas de bifurcación del ramal de people mover con el túnel principal del Subfluvial.

4.2 Ramales de conexión

En las inmediaciones de los accesos desde el lado del Palacio de Artaza se han previsto dos ramales de conexión en mina cuya sección transversal presenta un único carril de circulación.

Para la definición de la sección transversal de estos ramales se ha seguido el mismo criterio que para el resto de secciones, manteniendo en este caso una geometría de un único radio y una forma circular en la práctica totalidad de la sección, a excepción de un ligero quiebro en el arranque de la contrabóveda.

Las secciones definidas para los ramales de conexión son las siguientes:

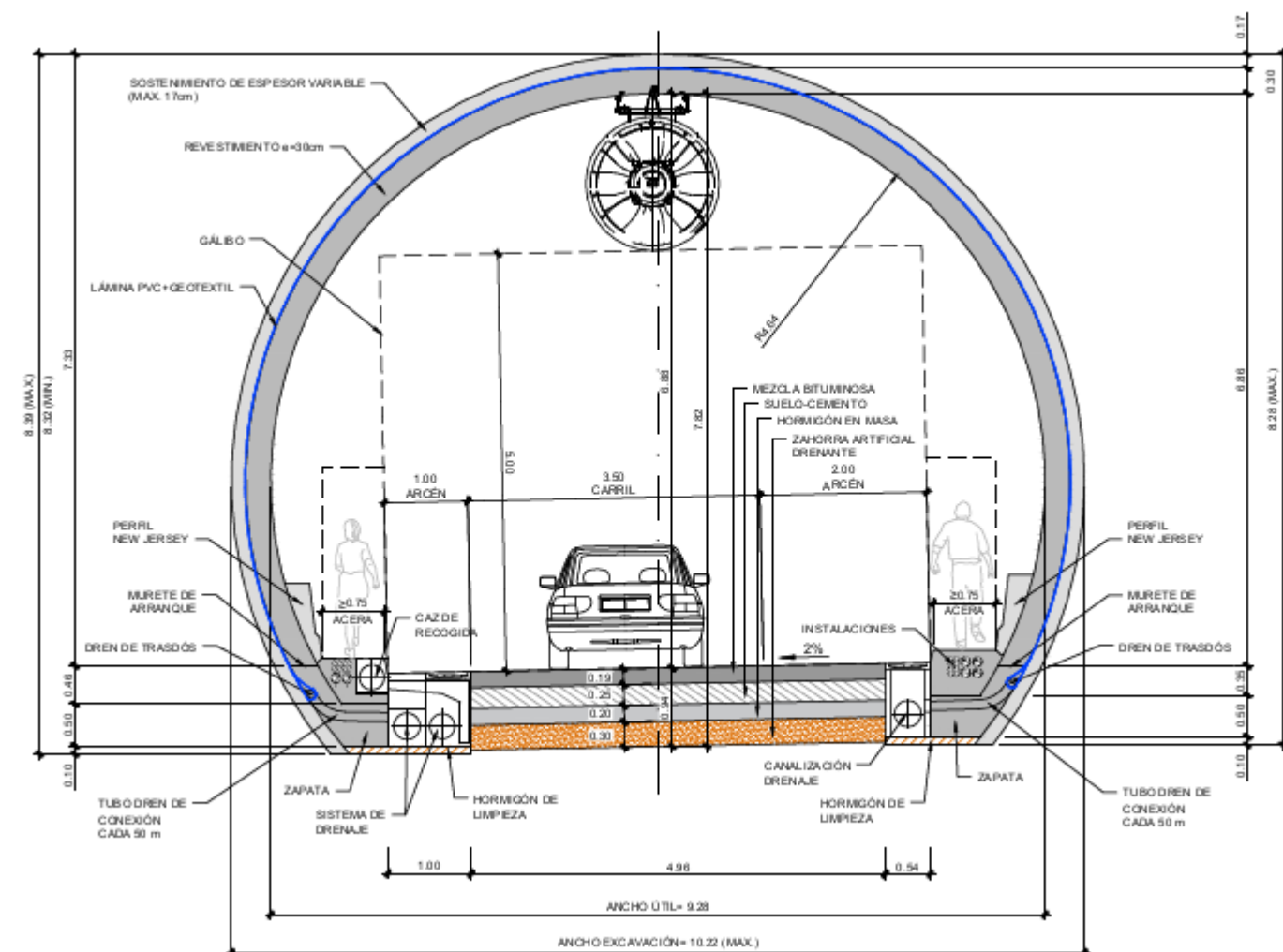


Figura 20: Sección transversal de los ramales en mina con solera plana

Esta sección presenta un área de excavación de 71,4 m² y se aplica en una longitud de 35 m en el ramal Avanzada-Subfluvial.

Anejo 08. Túnel

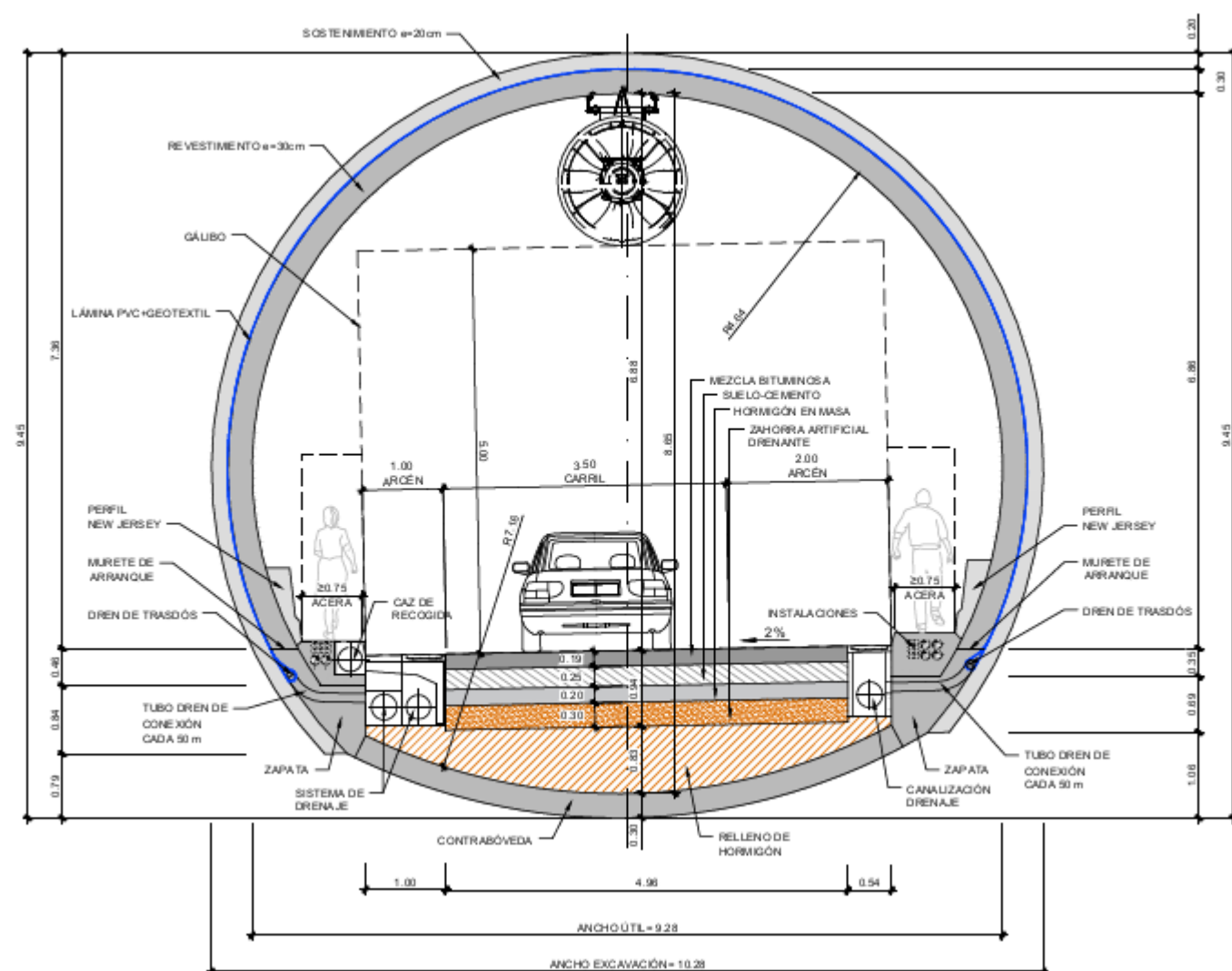


Figura 21: Sección transversal de los ramales en mina con contrabóveda

Esta sección presenta un área de excavación de 78 m² y se aplica en una longitud de 36 m en el ramal Subfluvial-Avanzada.

4.3 Galerías auxiliares

Se han definido una serie de galerías auxiliares cuya ubicación y principales características se presentan en la siguiente tabla:

Galería	Pk (sentido Artaza)	Vehículo Emergencia	Cuarto Técnico	Bombeo	Sección tipo	Interdistancia entre galerías
Emboquille	0+440	NO	-	-	Peatonal	255
SE1	0+695	NO	-	-	Peatonal	255
SE2	0+950	NO	-	-	Peatonal	255
SE3	1+205	NO	-	-	Peatonal	255
SE4	1+460	SÍ	CT2	-	Comunicación/Instalaciones	255
SE5	1+715	NO	-	-	Peatonal	255
SE6	1+970	SÍ	-	-	Comunicación	280
SE7	2+250	NO	-	Sí / Punto bajo	Comunicación	270
SE8	2+520	NO	-	-	Peatonal	260
SE9	2+780	SÍ	CT3	-	Comunicación/Instalaciones	200
SE10	2+980	NO	-	-	Peatonal	250
SE11	3+230	NO	-	-	Peatonal	250
SE12	3+480	SÍ	-	-	Comunicación	

Tabla 4: Galerías auxiliares

4.3.1 Galerías peatonales de evacuación

Con objeto de permitir la evacuación de personas entre los dos túneles paralelos del Subfluvial se han dispuesto galerías peatonales de evacuación. Estas galerías tienen asociada un área de excavación de 10 m².

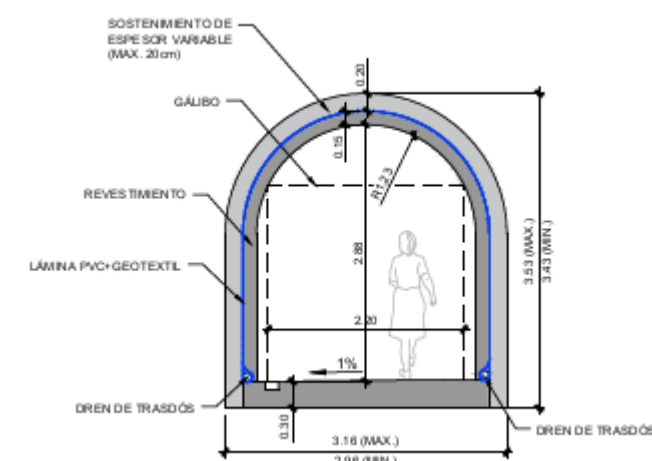


Figura 22: Sección de las galerías peatonales de evacuación

4.3.2 Galerías de comunicación e instalaciones

Con objeto de permitir la conexión vehicular entre los dos túneles paralelos del Subfluvial se han dispuesto galerías de comunicación en puntos intermedios del trazado. Además, estas galerías pueden incorporar a su vez ramales en fondo de saco con el objetivo de alojar los equipos necesarios. Las secciones transversales de ambas galerías se han definido con el objetivo de garantizar una sección funcional suficiente para permitir el paso de vehículos y albergar los equipos.

Estas secciones se muestran en las siguientes figuras.

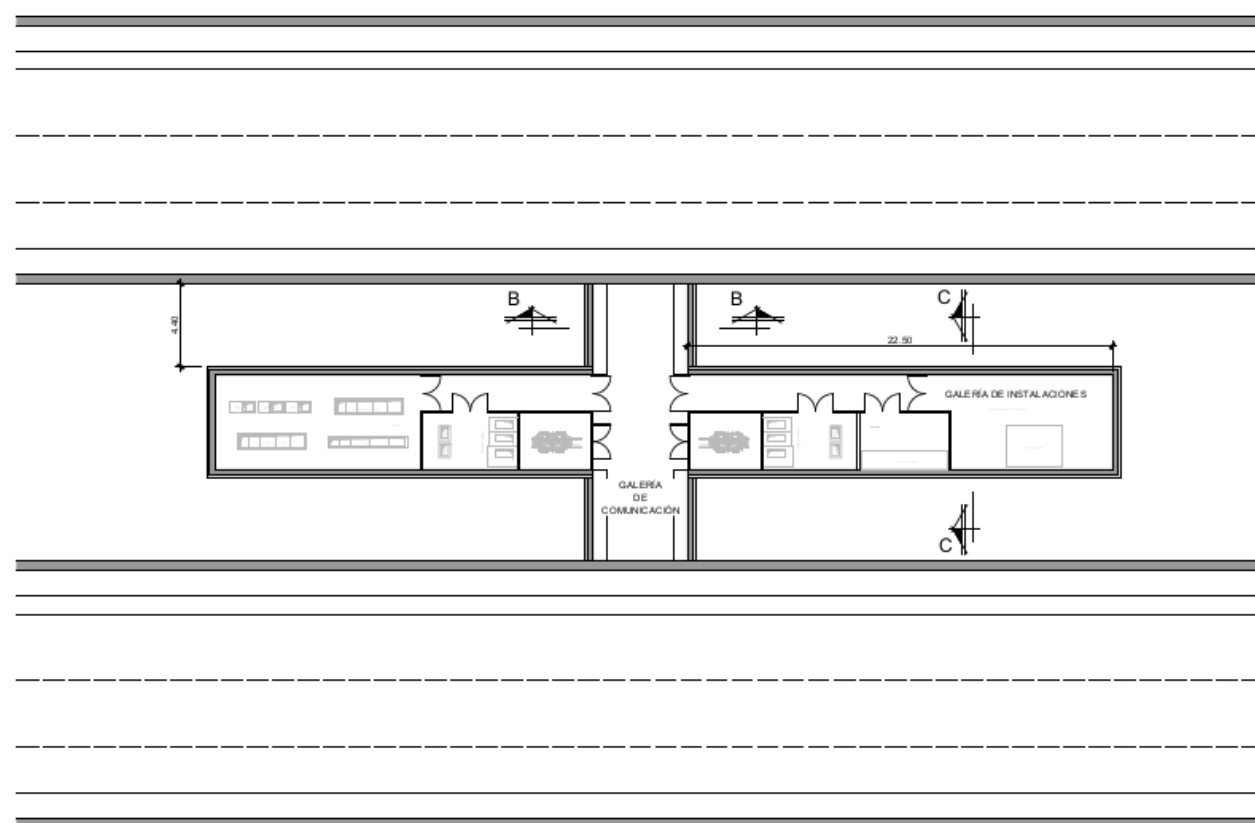


Figura 23: Esquema en planta de las galerías de comunicación (transversal a los 2 tubos del túnel principal) e instalaciones (paralela a los tubos del túnel principal)

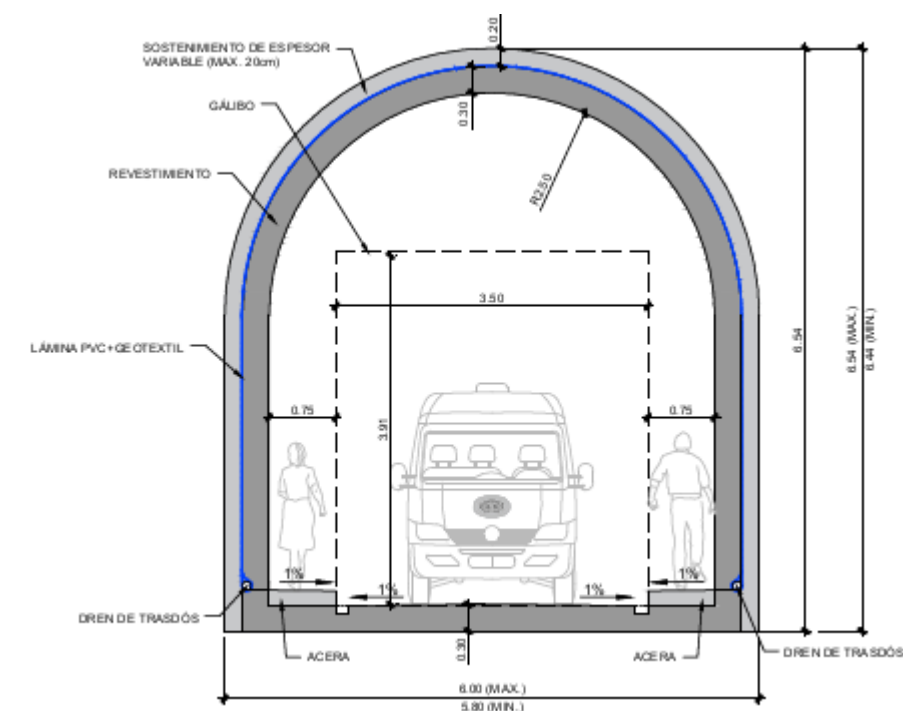


Figura 24: Sección de las galerías de comunicación

La galería de comunicación para vehículos con solera plana tiene una sección de excavación de 36,5 m².

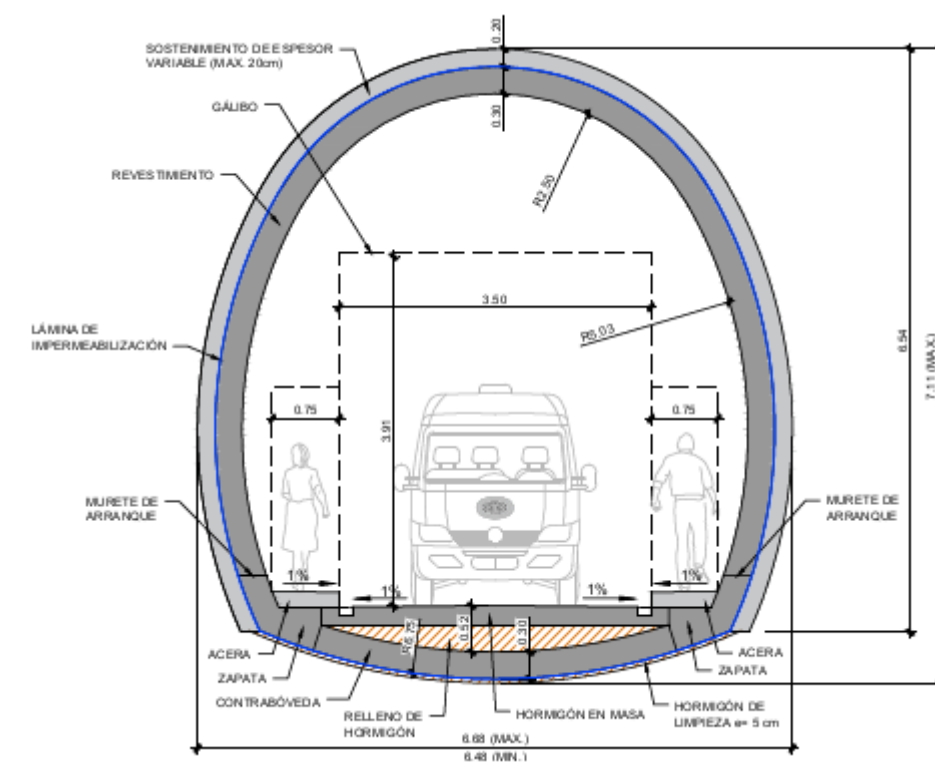


Figura 25: Sección de las galerías de comunicación con contrabóveda (estanca)

La galería de comunicación para vehículos con contrabóveda (sección estanca) tiene una sección de excavación de 39,2 m².

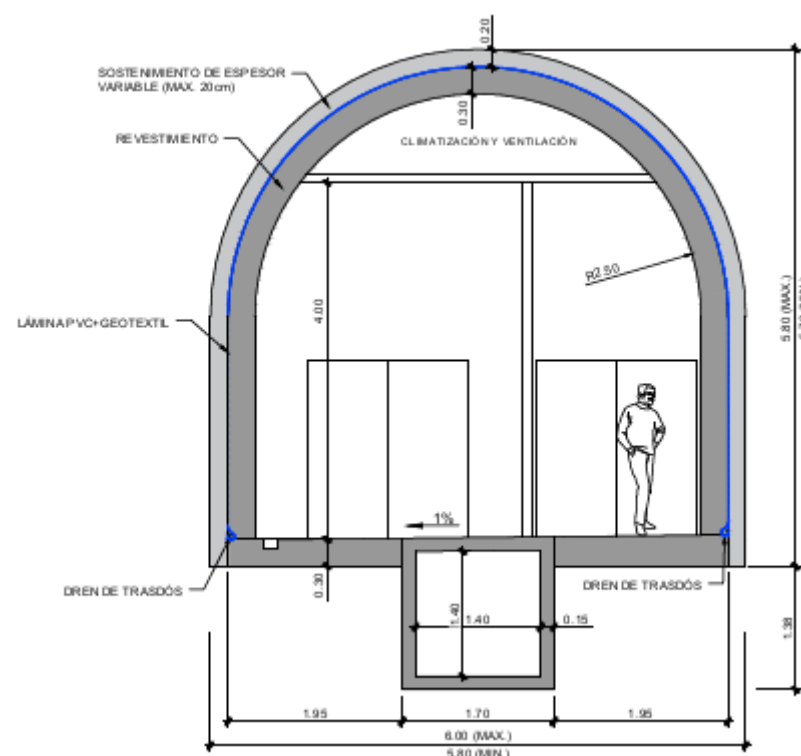


Figura 26: Sección de las galerías de instalaciones

La galería de instalaciones tiene una sección de excavación de 33,3 m².

5 SOSTENIMIENTOS Y REVESTIMIENTOS

En este apartado se presenta el diseño de los sostenimientos de los tramos en mina del túnel Subfluvial de Lamiako.

5.1 Conceptos generales

Como ya se ha comentado anteriormente, todos los tramos en mina se excavarán en materiales de naturaleza rocosa, por lo que en la fase actual del proyecto se considera válido realizar el diseño de los sostenimientos a partir de la aplicación de criterios empíricos basados en la experiencia en obras similares y en la propuesta de sostenimientos realizada por las diferentes clasificaciones geomecánicas.

Cuando en fases posteriores del proyecto se disponga de toda la información geológico-geotécnica, se deberá comprobar el actual diseño mediante los correspondientes cálculos numéricos, analizando tanto el comportamiento tensodeformacional de las secciones que se consideren más representativas como la posible formación de cuñas y bloques inestables.

5.1.1 Sostenimientos

Los elementos de sostenimiento que se emplearán serán los siguientes:

- Hormigón proyectado: El hormigón proyectado tiene dos efectos principales. Por un lado, sella la superficie de la roca cerrando las juntas, evitando la descompresión y la alteración de la roca. De este modo, el terreno puede mantener, en gran medida, sus características iniciales. Por otro lado, 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.
- Bulones: Los bulones tienen igualmente dos efectos básicos sobre la roca. El bulonado cose las juntas de roca impidiendo que cuñas y bloques puedan deslizar a favor de las fracturas. Hay que tener en cuenta que 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 las armaduras lo hacen dentro del hormigón. Gracias a este efecto se consiguen absorber las tracciones que aparecen en el terreno e impedir la formación de zonas descomprimidas.
- Fibras y mallas metálicas: Tienen una misión secundaria que es la de dotar al hormigón proyectado de la suficiente resistencia a tracción para soportar los esfuerzos de este signo.
- Cerchas: Las cerchas tienen una función resistente trabajando como un arco y colaborando con el hormigón proyectado. Tienen la ventaja sobre éste de que su resistencia inicial ya es la definitiva, mientras que en el hormigón las resistencias se desarrollan con el tiempo. Otra función de las cerchas es definir claramente la geometría del túnel, lo que ayuda a conseguir los espesores adecuados de hormigón proyectado y a evitar sobreexcavaciones o zonas dentro de gálibo.
- Paraguas de micropilotes: Los paraguas son elementos lineales de refuerzo previo colocado paralelamente al túnel por delante del frente y situados por encima de la línea de excavación. Mediante la acción de los paraguas se puede conseguir atravesar una zona de mala calidad de roca sin que se produzcan desprendimientos en clave, siendo especialmente indicados en los emboquilles.

5.1.2 Revestimientos. Concepto del diseño del túnel a largo plazo.

En los túneles ejecutados con NATM, una vez terminada la excavación y el sostenimiento quede estabilizado, habitualmente se completa la construcción instalando la impermeabilización, el drenaje y el revestimiento.

Los revestimientos pueden ser estructurales o no, dependiendo de la tipología del túnel y de las consideraciones que se adopten para los cálculos a largo plazo.

Anejo 08. Túnel

En el caso de que los revestimientos no sean estructurales, su dimensionamiento no se incluye en los cálculos que se realicen del túnel, ya que obedecería a otro tipo de consideraciones. En estos casos la colocación del revestimiento se rige por criterios como los que se enumeran a continuación:

- Sirve de sistema de protección de la lámina de impermeabilización.
- Se mejora el aspecto estético de la superficie del túnel.
- El revestimiento aumenta el factor de seguridad de la estructura, además de ser capaz de absorber los esfuerzos que con el tiempo pudieran derivarse de una posible pérdida de propiedades del terreno circundante a la excavación o del propio sostenimiento.

En el caso de que los revestimientos sí deban considerarse como elementos estructurales a largo plazo, para determinar de manera adecuada su dimensionamiento previamente hay que dilucidar dos cuestiones conceptuales sobre el diseño del túnel:

- 1) Se debe definir si se va a tratar de un túnel drenado o no drenado, ya que dependiendo de esta condición la funcionalidad del revestimiento será diferente.
 - Túnel drenado: cuenta con un sistema de drenaje específico que permite disipar las presiones de agua, por lo que no se considera presión de agua alrededor de la excavación en el cálculo del revestimiento a largo plazo.
 - Túnel no drenado (estanco): no dispone de un sistema de drenaje específico y, por tanto, se debe considerar presión de agua alrededor de la excavación en el cálculo del revestimiento a largo plazo. El valor numérico de dicha presión se tendrá que determinar a partir de los datos hidrogeológicos.
- 2) Se debe establecer si se puede producir una degradación de las propiedades del sostenimiento a largo plazo (total o parcial).

Se trata de determinar qué elementos del sostenimiento pueden garantizar que sus propiedades resistentes se mantienen íntegras a largo plazo y cuáles pueden tener un deterioro con el tiempo que invalide total o parcialmente su capacidad resistente. Esta degradación con el tiempo puede venir motivada por varias causas, como por ejemplo la circulación de agua o una posible fatiga de los materiales en función de los esfuerzos a los que están sometidos.

En caso de que se considere que hay elementos del sostenimiento que se pueden degradar con el tiempo, será necesario eliminarlos de los cálculos a largo plazo para que sea el revestimiento final quien asuma sus esfuerzos.

Como conclusión de todo lo anterior, para la fase actual de diseño del túnel Subfluvial se van a adoptar las siguientes consideraciones:

- El túnel será drenado excepto en su tramo bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako en el que será no drenado (estanco).

Este tramo no drenado (estanco) se sitúa entre el PK 1+866 y el PK 2+490 (tubo sentido Artaza), y entre el PK 1+536 y el PK 2+162 (tubo sentido Ballonti), y se excava en su totalidad en la formación S_u de lutitas con intercalaciones de areniscas.

El motivo para ejecutar este tramo estanco es que las pruebas hidrogeológicas realizadas han mostrado que existe una conexión hidráulica entre el sustrato rocoso de esta zona y la ría de Bilbao, por lo que será necesario evitar el riesgo de una posible entrada de agua en el túnel.

- Se va a considerar que no se puede garantizar que los elementos del sostenimiento mantengan sus propiedades íntegras a largo plazo.

Por este motivo, cuando en las fases posteriores de diseño de este proyecto se realicen los correspondientes cálculos, en la fase final se deberá eliminar el sostenimiento y contar con toda la carga hidráulica existente. Estas cargas procedentes de la eliminación del sostenimiento y del agua deberán ser asumidas por el revestimiento final del túnel.

De esta forma, los revestimientos definidos son los siguientes para los distintos tramos en mina del túnel Subfluvial, ramales de conexión y galerías auxiliares:

- Túnel principal drenado y ramales de conexión: 30 cm de HAF-30 + 35 kg/m³ fibras de acero
- Túnel principal estanco: 30 cm HA-30 (cuantía de 120 kg/m³)
- Cavernas de bifurcación: 40 cm HAF-30 + 35 kg/m³ fibras acero
- Galerías auxiliares de comunicación e instalaciones drenadas: 30 cm HAF-30 + 35 kg/m³ fibras acero
- Galerías auxiliares de comunicación e instalaciones estancas: 30 cm HA-30 (cuantía de 120 kg/m³)
- Galerías auxiliares peatonales: 15 cm HAF-30 + 35 kg/m³ fibras acero

Todos los revestimientos llevarán además 2 kg/m³ de microfibras para el fuego.

5.2 Túnel principal

El sostenimiento primario está constituido por una combinación de bulones, hormigón proyectado y cerchas metálicas. La resistencia del hormigón, tanto proyectado como de revestimiento, será de 30 MPa. El espesor del sostenimiento dependerá de la calidad del terreno.

En las peores condiciones del terreno, serán además necesarias medidas complementarias como paraguas y/o mejora del terreno para impermeabilidad del frente de excavación mediante pre-inyecciones de microcemento.

En las siguientes tablas se indican los sostenimientos que se han considerado para el túnel principal ejecutado con NATM y que, de forma preliminar, se han definido a partir de los sostenimientos recomendados por las clasificaciones geomecánicas.

Como ya se ha comentado anteriormente, estos sostenimientos se deberán comprobar en fases posteriores del proyecto mediante los correspondientes cálculos numéricos, analizando tanto el comportamiento tensodeformacional de las secciones que se consideren más representativas como la posible formación de cuñas y bloques inestables.

Anejo 08. Túnel

SOSTENIMIENTOS SECCIÓN 2 CARRILES (ESTÁNDAR) PARA TÚNEL DRENADO							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Paraguas micropilotes	Avance / Destroza (m)
ST2C-I	> 60	5+5	2,0 x 2,0	-	-	-	4 / 6
ST2C-II	51-60	5+10	1,5 x 1,0	-	-	-	3 / 5
ST2C-III	41-50	5+15	1,5 x 1,0	TH-29 a 1,0 m	-	-	2 / 4
ST2C-IV	31-40	5+20	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	-	1 / 2
ST2C-V	RMR ≤ 30 y emboquilles	5+20	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	Micropilotes de 101.6 mm (e = 10 mm) y espaciados c/0,50 m entre ejes	1 / 2
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Sección drenada: Bulones de 5 metros de longitud y de 25 mm de diámetro							

Tabla 5: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 2 carriles o estándar (ST2C) en túnel drenado

SOSTENIMIENTOS SECCIÓN 2 CARRILES (ESTÁNDAR) PARA TÚNEL ESTANCO							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Paraguas micropilotes	Avance / Destroza (m)
ST2CE-I	> 60	5+5	2,0 x 2,0	-	-	-	4 / 6
ST2CE-II	51-60	5+10	1,5 x 1,0	-	-	-	3 / 5
ST2CE-III	41-50	5+15	1,5 x 1,0	TH-29 a 1,0 m	-	-	2 / 4
ST2CE-IV	31-40	5+20	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	-	1 / 2
ST2CE-V	RMR ≤ 30 y emboquilles	5+20	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	Micropilotes de 101.6 mm (e = 10 mm) y espaciados c/0,50 m entre ejes	1 / 2
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Sección estanca: Bulones de 3 metros de longitud y de 25 mm de diámetro							

Tabla 6: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 2 carriles o estándar en túnel estanco (ST2CE)

SOSTENIMIENTOS SECCIÓN 3 CARRILES							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Paraguas micropilotes	Avance / Destroza (m)
ST3C-I	> 60	5+7	2,0 x 2,0	-	-	-	4 / 6
ST3C-II	51-60	5+12	1,5 x 1,0	-	-	-	3 / 5
ST3C-III	41-50	5+18	1,5 x 1,0-	TH-29 a 1,0 m	-	-	2 / 4
ST3C-IV	31-40	5+25	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	-	1 / 2
ST3C-V	RMR ≤ 30 y emboquilles	5+25	-	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo	Micropilotes de 101.6 mm (e = 10 mm) y espaciados c/0,50 m entre ejes	1 / 2
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Bulones de 6 metros de longitud y de 25 mm de diámetro							

Tabla 7: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal de 3 carriles (ST3C)

SOSTENIMIENTOS SECCIÓN CAVERNA Y MULTIMODAL					
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm
STC-I	> 60	5+10	1,5 x 2,0**	-	-
STC-II	41-60	5+20	1,0 x 1,5**	TH-29 a 1,5 m	-
STC-III	RMR ≤ 40	5+30	1,0 x 1,0***	HEB-180 a 1,0 m	Doble mallazo
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Bulones de 6 metros de longitud y de 25 mm de diámetro *** Bulones de 6 metros de longitud y de 32 mm de diámetro					

Tabla 8: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para el túnel principal sección caverna y multimodal (STC)

5.3 Ramales de conexión

En el proyecto los únicos ramales de conexión a ejecutar en mina están ubicados en el enlace de Artaza. Ambos ramales de acceso al túnel principal se realizan de manera independiente y la conexión con los tubos principales se realiza mediante la ejecución de una caverna de bifurcación.

Los sostenimientos definidos para estos ramales son los mostramos en la siguiente tabla resumen.

SOSTENIMIENTOS RAMALES DE CONEXIÓN							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Paraguas micropilotes	Avance/ Destroza (m)
STR-I	> 60	5+5	2,0 x 2,0	-	-	-	4 / 6
STR-II	41-60	5+12	1,5 x 1,0	TH-21 a 1,0 m	-		2 / 4
STR-III	RMR ≤ 40 y emboquilles	5+15	-	HEB-120 a 1,0 m	Mallazo Sencillo	Micropilotes de 101.6 mm (e = 10 mm) y espaciados c/0,50 m entre ejes	1 / 2
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Bulones de 4 metros de longitud y de 25 mm de diámetro							

Tabla 9: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para los ramales de conexión (STR)

5.4 Galerías auxiliares

Los sostenimientos de las diferentes galerías auxiliares ubicadas a lo largo del túnel en mina se han definido en las siguientes tablas para cada tipo de galería.

- Galería Peatonal

SOSTENIMIENTOS GALERÍAS PEATONALES							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Paraguas micropilotes	Pase (m)
STGP-I	> 50	5+5	1,5 x 2,0	-	-	-	2,0
STGP-II	RMR ≤ 50	5+15	1,5 x 1,0	HEB-120 a 1,0 m	Mallazo Sencillo	Micropilotes de 88.9 mm (e=10 mm) desde cada entronque a lo largo de toda la galería (se deja 1 m intermedio sin paraguas)	1,0
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Bulones de 3 metros de longitud y de 25 mm de diámetro Todas las secciones se excavan a sección completa							

Tabla 10: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para las galerías de emergencia peatonales

- Galerías de comunicaciones e instalaciones

SOSTENIMIENTOS GALERÍAS COMUNICACIONES E INSTALACIONES							
SECCIÓN TIPO	RMR	Hormigón Proyectado* (cm)	Malla bulonado** (l _{trans} m x l _{long} m)	Cerchas	Mallazo Φ 6 mm 150x150 mm	Enfilaje/Paraguas micropilotes	Pase (m)
STGI-I	> 60	5+5	2,0 x 2,0	-	-	-	3,0
STGI-II	41-60	5+10	1,0 x 1,5	-	-	Enfilaje Φ25 mm cada 0,50 m desde cada entronque (L = 6 m)	1,5
STGI-III	RMR ≤ 40	5+15	1,0 x 1,0	HEB-120 a 1,0 m	Mallazo Sencillo	Micropilotes de 88.9 mm (e=10 mm) desde cada entronque a lo largo de toda la galería (se deja 1 m intermedio sin paraguas)	1,0
* Gunita con 35 kg/m ³ de fibras de acero ** Bulones de 3 metros de longitud y de 25mm de diámetro Todas las secciones se excavan a sección completa							

Tabla 11: Secciones tipo de los sostenimientos consideradas para las galerías de comunicación e instalaciones

5.5 Tramificación de los sostenimientos

De cara a poder realizar la tramificación de los sostenimientos, en primer lugar, se ha realizado un análisis con el programa Leapfrog para determinar la calidad del macizo rocoso a lo largo del trazado del túnel Subfluvial en función de la información geotécnica disponible.

Como resultado de este análisis, se han obtenido unos perfiles longitudinales de cada uno de los dos tubos del túnel con la correspondiente tramificación según las calidades geomecánicas ($RMR_{Básico}$) que presenta el macizo rocoso.

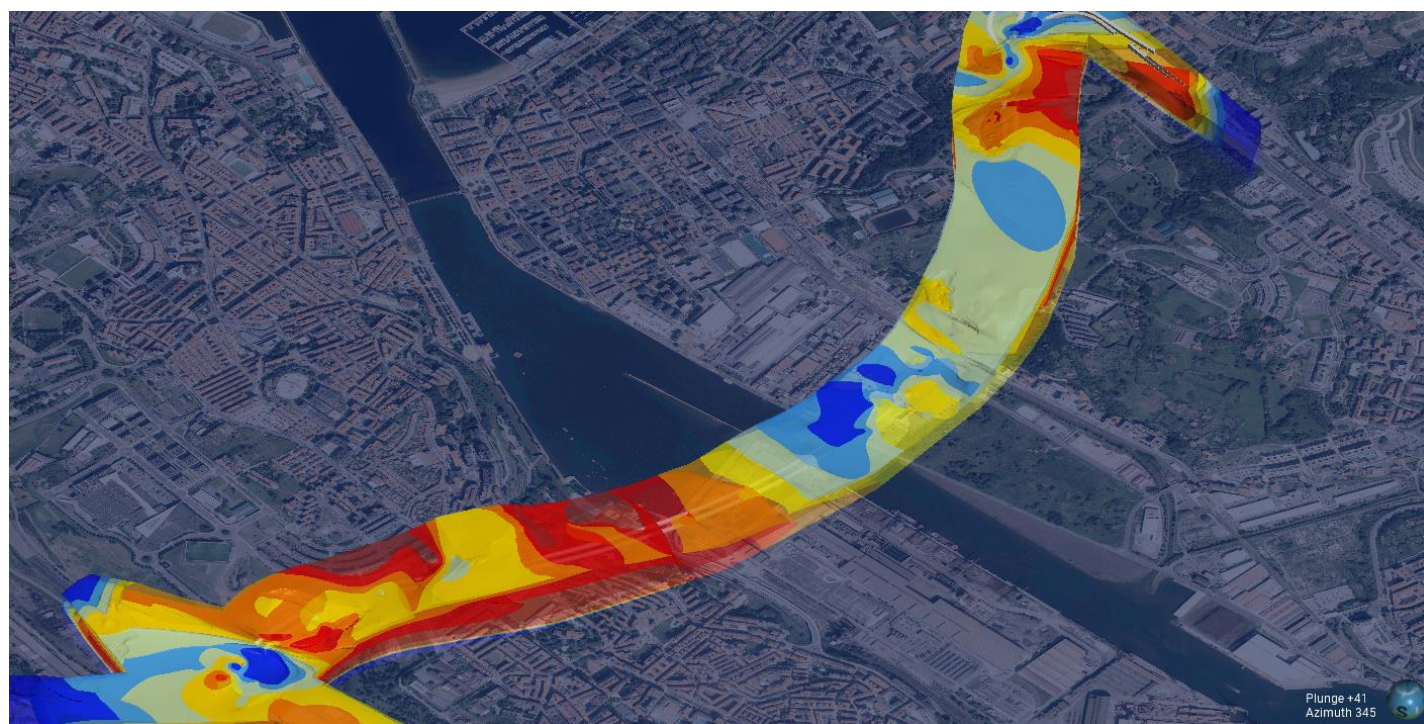


Figura 27: Modelo numérico 3D del macizo rocoso con la estimación del $RMR_{Básico}$

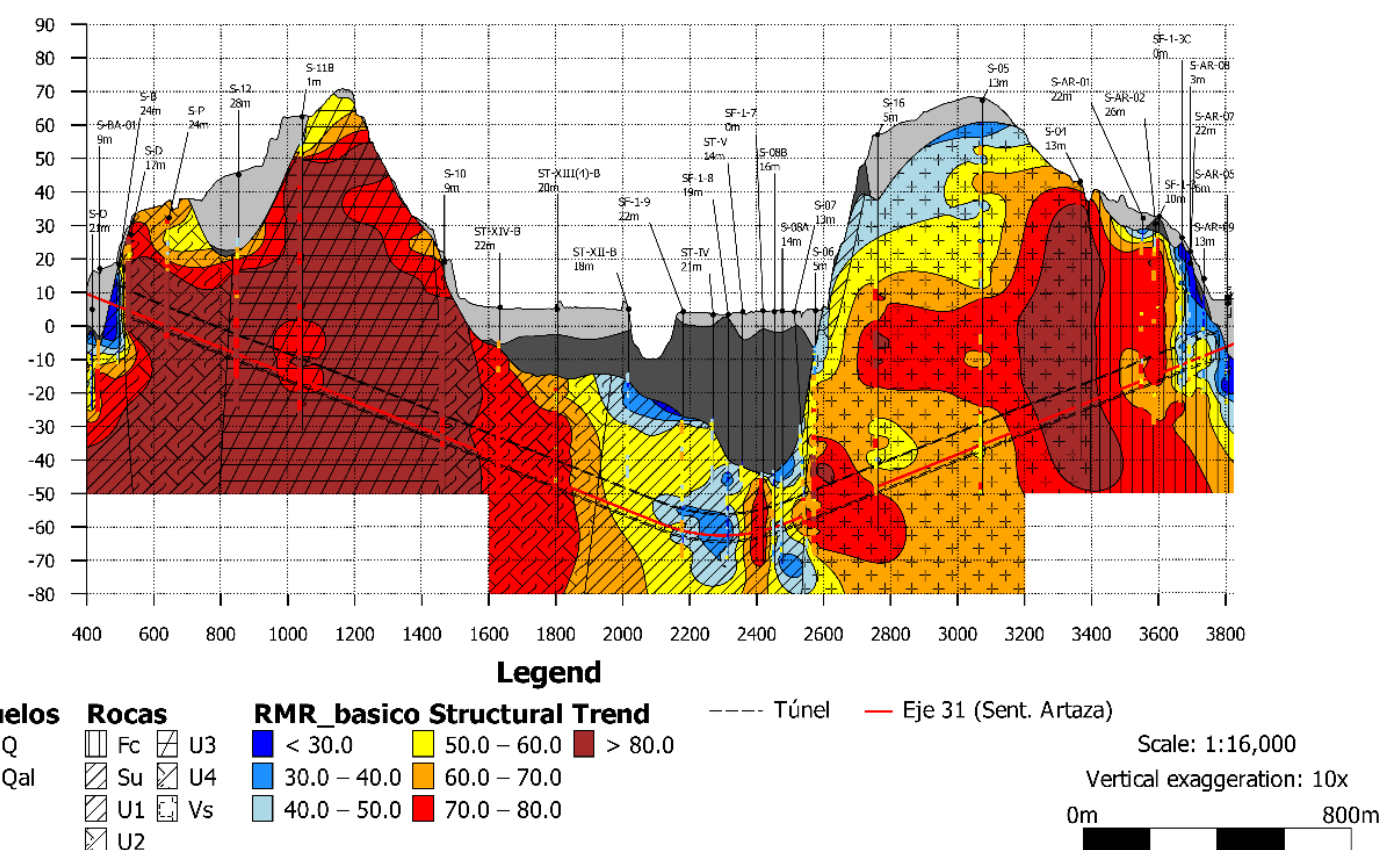


Figura 28: Longitudinal Tubo Sentido Artaza ($RMR_{Básico}$ y unidades litológicas)

Anejo 08. Túnel

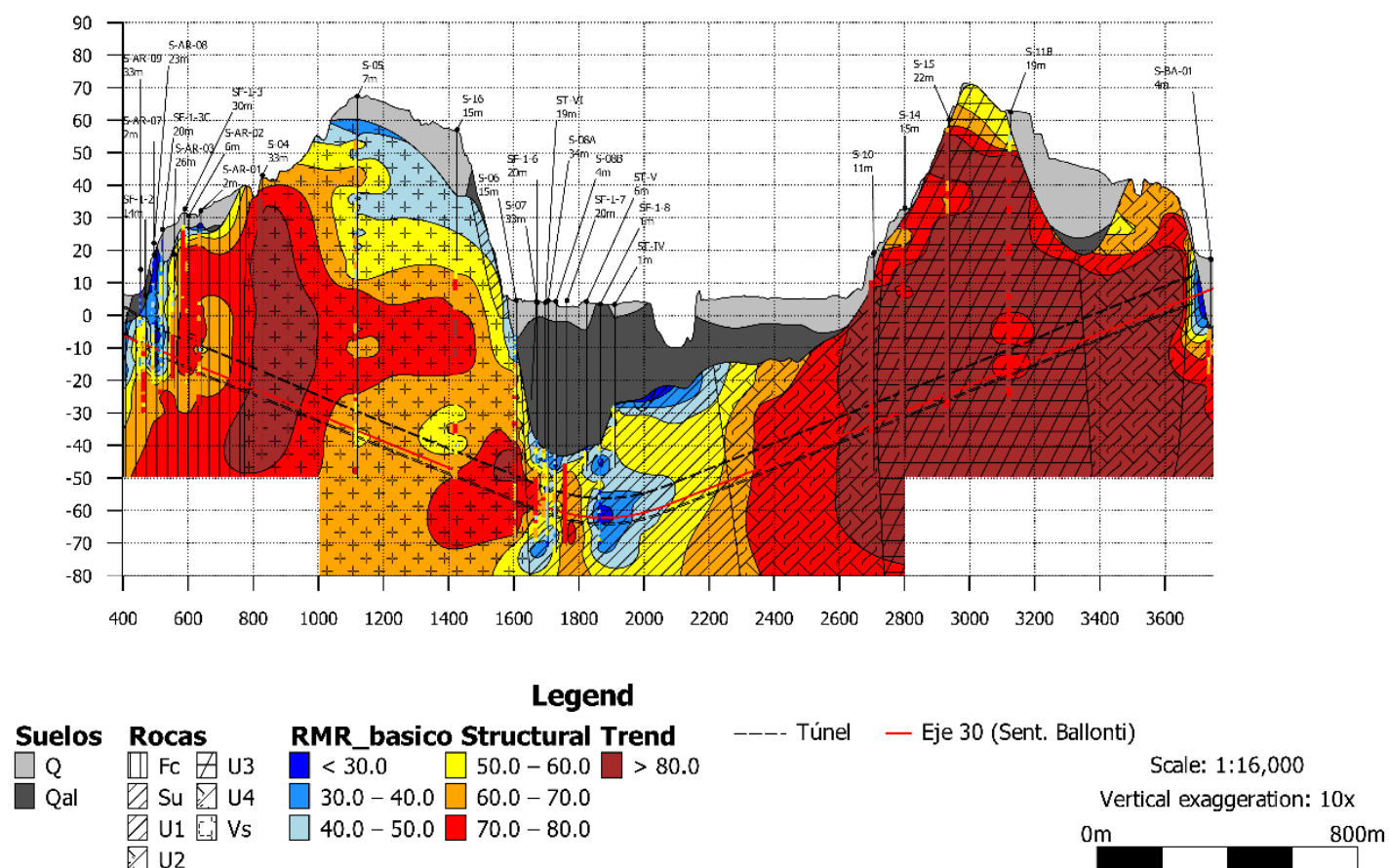


Figura 29: Longitudinal Tubo Sentido Ballonti (RMRBásico y unidades litológicas)

Después de realizar el análisis anterior y de considerar todos los factores restantes que pueden incidir en la determinación de los sostenimientos del túnel, se ha realizado una tramificación de los sostenimientos a lo largo de los dos tubos del túnel principal cuyos resultados se presentan en los siguientes subapartados.

Hay que señalar que para la fase actual del proyecto se ha trabajado con valores del $RMR_{Básico}$, es decir sin tener en cuenta la corrección que se debe aplicar al valor del RMR por la orientación de las juntas respecto al eje del trazado del túnel.

Dada la singularidad y relevancia que suponen las cavernas de bifurcación dentro del túnel Subfluvial, a continuación, también se incluyen unos perfiles de detalle de estas cavernas que permiten observar la calidad geomecánica del macizo rocoso en el que deben ser excavadas.

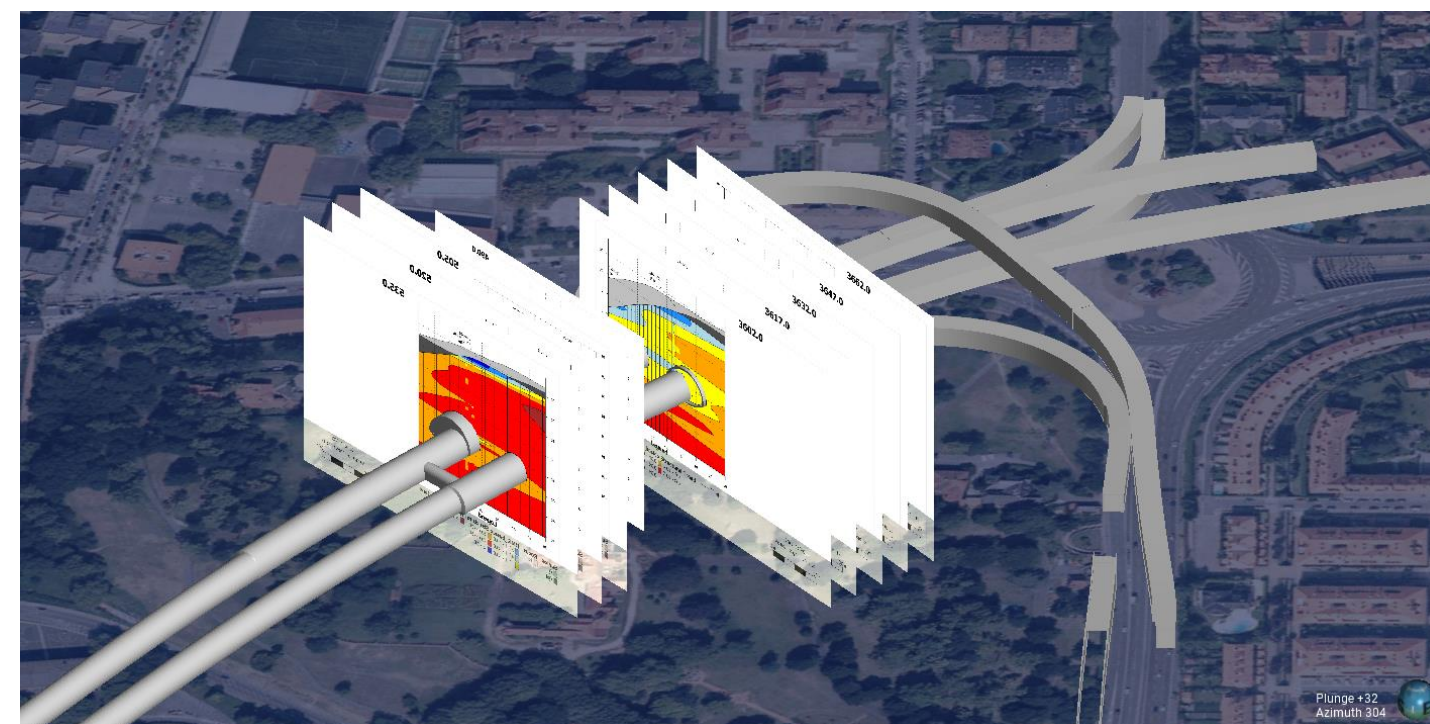


Figura 30: Vista 3D de la ubicación de los perfiles transversales de las cavernas

Anejo 08. Túnel

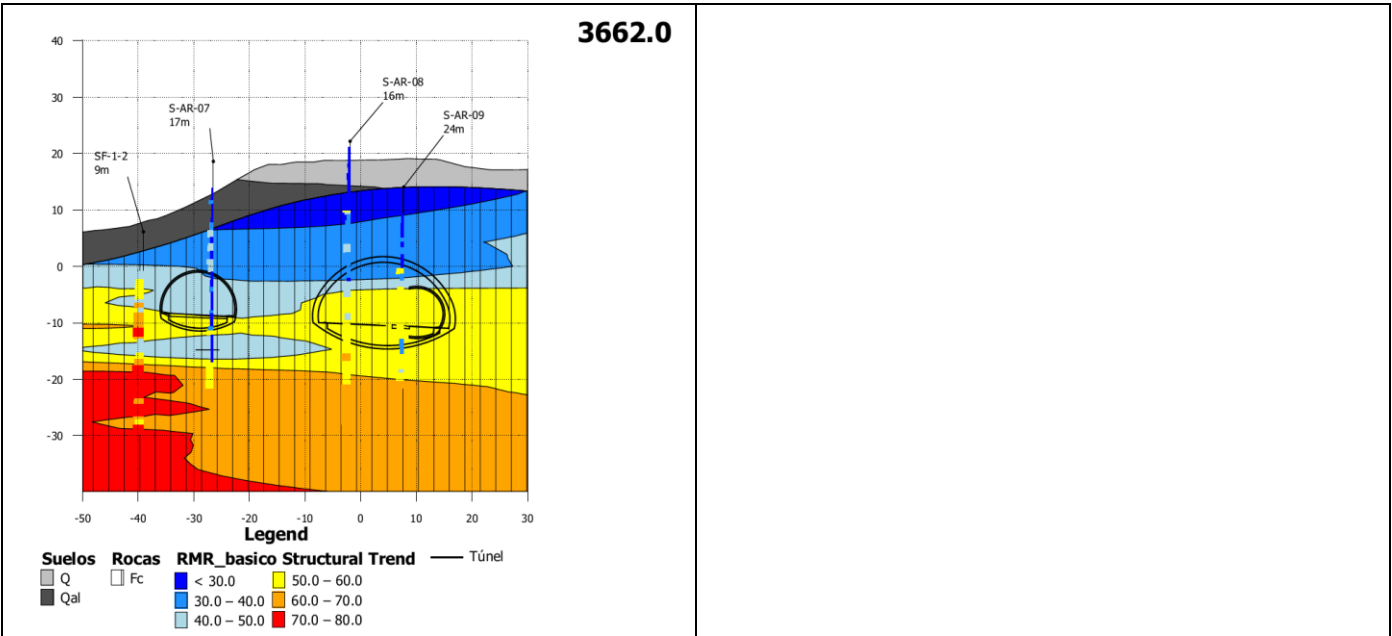
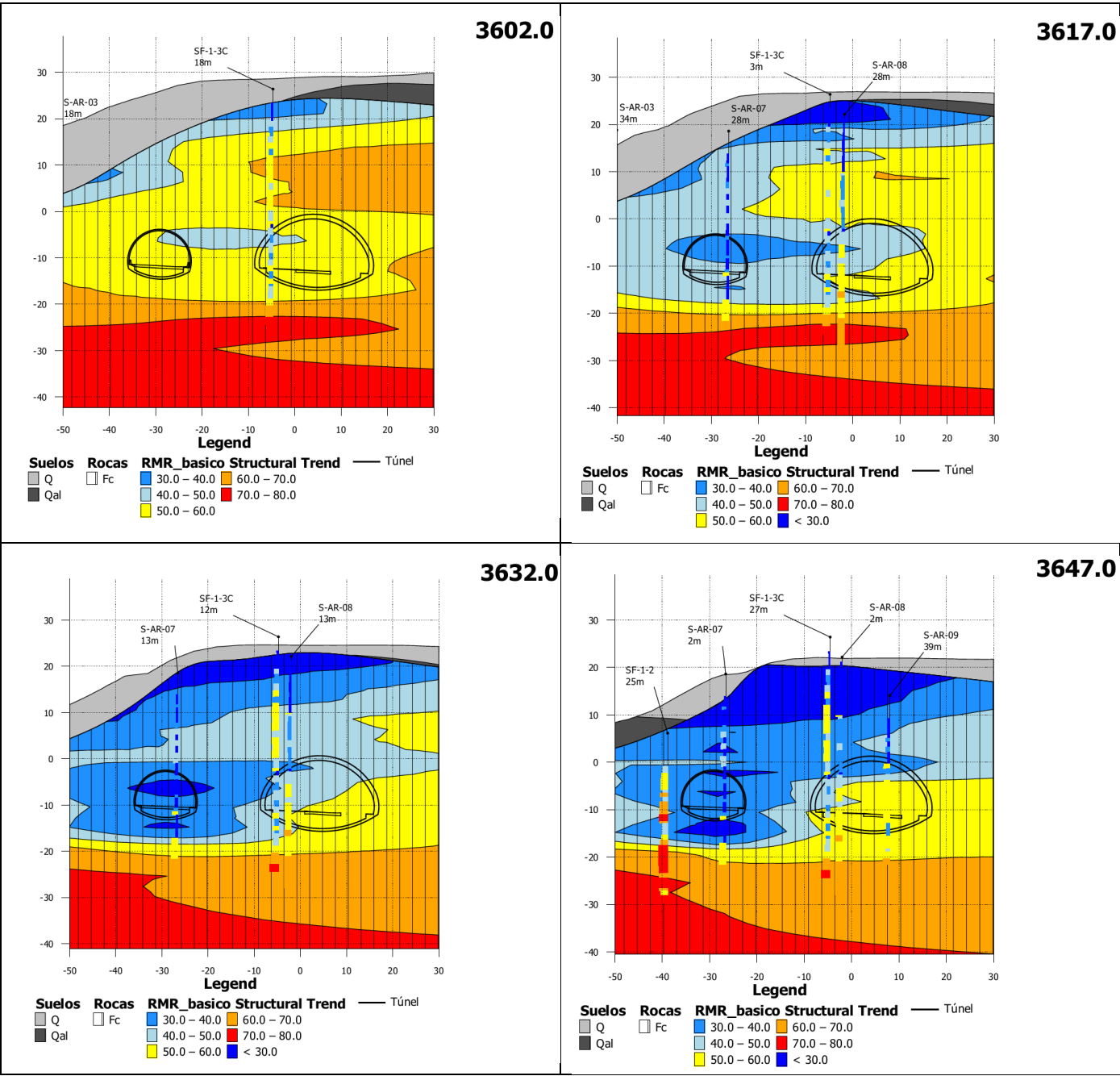


Tabla 12: Transversales de la caverna de bifurcación del túnel sentido Artaza obtenidos cada 15 m del modelo de Leapfrog

Anejo 08. Túnel

Los perfiles obtenidos del modelo de Leapfrog permiten comprobar que la caverna de bifurcación del túnel sentido Artaza se excavará en el Flysch detrítico calcáreo (Fc) de calidad geomecánica media-mala, con valores que pueden variar entre RMR = 50-60 en los mejores casos hasta RMR = 30-40 en los peores tramos.

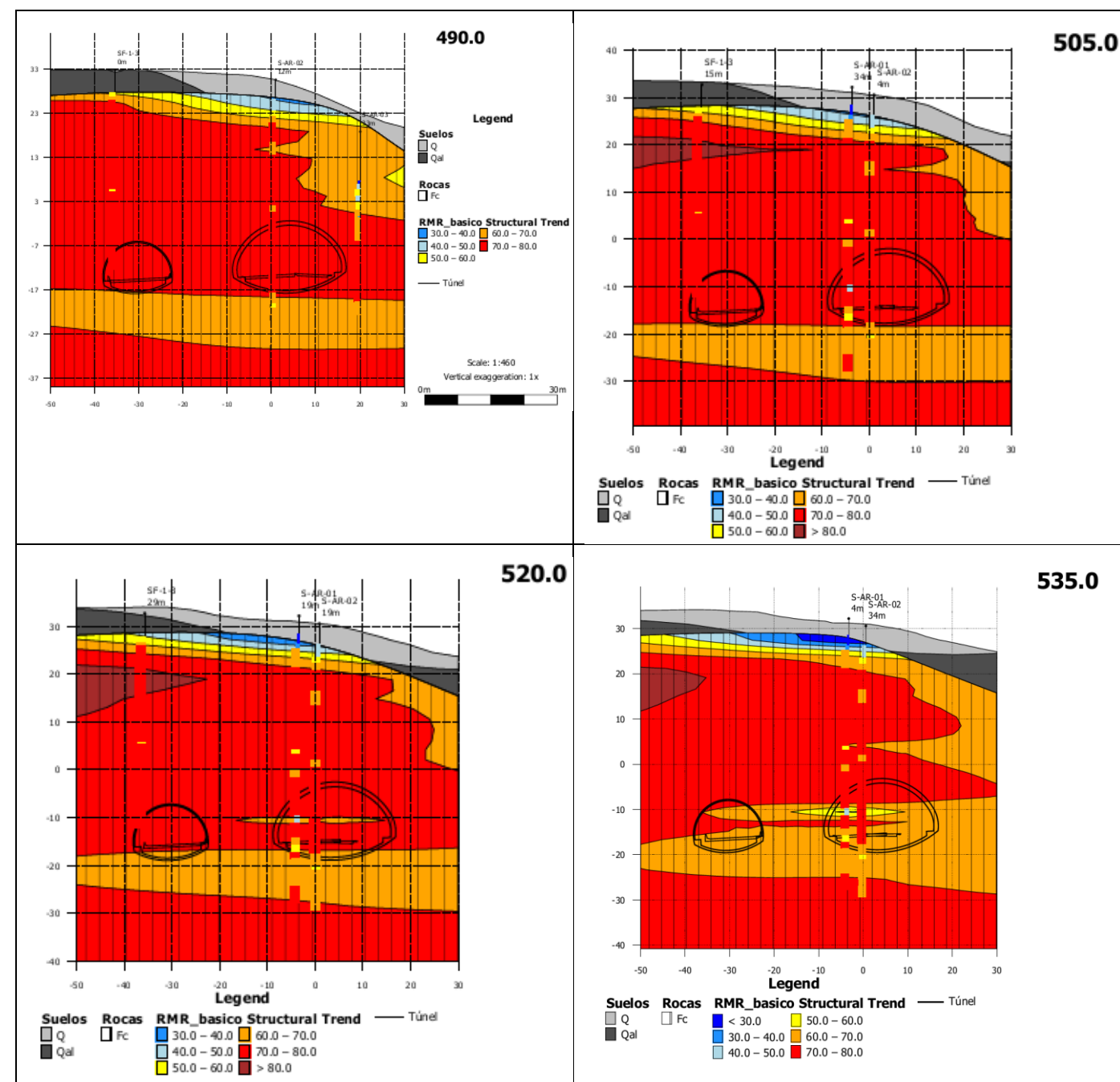


Tabla 13: Transversales de la caverna de bifurcación del túnel sentido Ballonti obtenidos cada 15 m del modelo de Leapfrog

Como se puede observar, la caverna de bifurcación del túnel sentido Ballonti se excavará en el Flysch detrítico calcáreo (Fc) de buena calidad geomecánica, con valores que prácticamente siempre estarán por encima de RMR > 60 e incluso en muchas ocasiones por encima de RMR > 70.

Por tanto, a pesar de la cercanía entre ambas cavernas, se comprueba que se excavarán en materiales rocosos pertenecientes al mismo Flysch detrítico calcáreo (Fc) pero de diferente calidad geomecánica, lo que dará lugar a un sostenimiento más pesado para la caverna de bifurcación del túnel sentido Artaza.

A continuación, se muestran unas tablas con la tramificación completa del sostenimiento de los dos tubos del túnel principal.

5.5.1 Túnel principal (tubo sentido Artaza)

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
0+443,19	0+447,00	3,8	U1	<30	3 carriles	ST3C-V	Paraguas desde emboquille	
0+447,00	0+456,00	9,0	U1	30-40	3 carriles	ST3C-V	Paraguas desde emboquille	
0+456,00	0+465,00	9,0	U2	40-50	3 carriles	ST3C-III		
0+465,00	0+491,00	26,0	U2	>60	3 carriles	ST3C-I		
0+491,00	0+767,00	276,0	U2	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo Acceso a Centro Comercial Ballonti (Pk 0+600 a 0+625) Hclave = 27 m en roca
0+767,00	0+850,00	83,0	U3	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
0+850,00	0+890,00	40,0	U3	>60	Estándar	ST2C-III	Paraguas	Cruce bajo Túnel de la Benedicta (Pk 0+850 a 0+890) Hclave = 10 m en roca a rasante del túnel de la Benedicta
0+890,00	1+409,00	519,0	U3	>60	Estándar	ST-I (80%) ST-II (10%) ST-III (5%) ST-IV (5%)		Cruce bajo la Línea 2 (Pk 1+075+1+100) Hclave > 40 m en roca a solera del túnel L2
1+409,00	1+866,00	457,0	U4	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo Polideportivo (Pk 1+460 a 1+540) Hclave = 27 m en roca
1+866,00	1+886,00	20,0	U4/Su	30-40	Estándar Estanca	ST2CE-IV	Pre-Inyecciones de microcemento	Contacto mecánico U4-Su (Pk 1+860)
1+886,00	2+035,00	149,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	Cruce bajo la Ria (Pk 1+970 a 2+115) Hclave = 40 m (Hclave = 28 m en roca)
2+035,00	2+105,00	70,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	Cruce bajo la Ria (Pk 1+970 a 2+115) Hclave = 40 m (Hclave = 28 m en roca)

Anejo 08. Túnel

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
2+105,00	2+283,00	178,0	Su	30-40	Estándar Estanca	ST2CE-IV	Pre-Inyecciones de microcemento	Cruce bajo la Ria (Pk 1+970 a 2+115) Hclave = 40 m (Hclave = 28 m en roca)
2+283,00	2+298,00	15,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	
2+298,00	2+318,00	20,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	
2+318,00	2+390,00	72,0	Su	>60	Estándar Estanca	ST2CE-I	Pre-Inyecciones de microcemento	Recubrimiento sobre clave en roca ≈1D (8-11 m) entre Pk 2+318 a 2+445)
2+390,00	2+405,00	15,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	Recubrimiento sobre clave en roca ≈1D (8-11 m) entre Pk 2+318 a 2+445)
2+405,00	2+445,00	40,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	Recubrimiento sobre clave en roca ≈1D (8-11 m) entre Pk 2+318 a 2+445)
2+445,00	2+460,00	15,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	
2+460,00	2+490,00	30,0	Su	>60	Estándar Estanca	ST2CE-I	Pre-Inyecciones de microcemento	Cruce bajo el río Gobelas y Estacion Lamiako (Pk 2+480 a 2+520) Hclave = 53 m (Hclave = 25 m en roca)
2+490,00	2+677,00	187,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
2+677,00	2+830,00	153,0	Vs	50-60	Estándar	ST2C-II		
2+830,00	2+985,00	155,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
2+985,00	3+030,00	45,0	Vs	50-60	Estándar	ST2C-II		
3+030,00	3+316,00	286,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
3+316,00	3+471,80	155,8	Fc	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
3+471,80	3+585,00	113,2	Fc	>60	3 carriles	ST3C-I (80%) ST3C-II (10%) ST3C-III (5%) ST3C-IV (5%)		
3+585,00	3+600,40	15,4	Fc	50-60	3 carriles	ST3C-II		
3+600,40	3+611,00	10,6	Fc	40-50	Caverna	STC-III		
3+611,00	3+626,00	15,0	Fc	<30	Caverna			Falla Artaza (Pk 3+615 a 3+625)
3+626,00	3+664,40	38,4	Fc	30-40	Caverna			
3+664,40	3+685,40	21,0	Fc	30-40	Estándar	ST2C-V	Paraguas desde emboquille	

Tabla 14: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR en tubo sentido Artaza

5.5.2 Túnel principal (tubo sentido Ballonti)

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
0+376,21	0+390,00	13,8	Fc	30-40	Estándar Ampliada	ST2C-V	Paraguas desde emboquille	
0+390,00	0+414,00	24,0	Fc	<30	Estándar Ampliada	ST2C-V	Paraguas desde emboquille	Falla Artaza (Pk 0+390 a 0+410)
0+414,00	0+428,00	14,0	Fc	30-40	Estándar Ampliada	ST2C-IV		
0+428,00	0+440,00	12,0	Fc	40-50	Estándar Ampliada	ST2C-III		
0+440,00	0+451,00	11,0	Fc	50-60	Estándar Ampliada	ST2C-II		
0+451,00	0+483,00	32,0	Fc	>60	Estándar Ampliada	ST2C-I		
0+483,00	0+540,86	57,9	Fc	>60	Caverna	STC-I (80%) STC-II (20%)		
0+540,86	0+667,30	126,4	Fc	>60	3 carriles	ST3C-I (80%) ST3C-II (10%) ST3C-III (5%) ST3C-IV (5%)		

Anejo 08. Túnel

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
0+667,30	0+702,00	34,7	Fc	>60	Estándar	ST3C-I (80%) ST3C-II (10%) ST3C-III (5%) ST3C-IV (5%)		
0+702,00	1+003,00	301,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
1+003,00	1+062,00	59,0	Vs	50-60	Estándar	ST2C-II		
1+062,00	1+204,00	142,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
1+204,00	1+357,00	153,0	Vs	50-60	Estándar	ST2C-II		
1+357,00	1+536,00	179,0	Vs	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo el río Gobelas y Estacion Lamiako (Pk 1+520 a 1+560) Hclave = 53 m (Hclave = 27 m en roca)
1+536,00	1+558,00	22,0	Su	>60	Estándar Estanca	ST2CE-I	Pre-Inyecciones de microcemento	
1+558,00	1+580,00	22,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	
1+580,00	1+636,00	56,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	Recubrimiento sobre clave en roca ≈1D (9-11 m) entre Pk 1+580 a 1+680)
1+636,00	1+702,00	66,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	Recubrimiento sobre clave en roca ≈1D (9-11 m) entre Pk 1+580 a 1+680)
1+702,00	1+738,00	36,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	
1+738,00	1+895,00	157,0	Su	30-40	Estándar Estanca	ST2CE-IV	Pre-Inyecciones de microcemento	
1+895,00	1+998,00	103,0	Su	40-50	Estándar Estanca	ST2CE-III	Pre-Inyecciones de microcemento	Cruce bajo la Ria (Pk 1+920 a 2+060) Hclave = 40 m (Hclave = 25 m en roca)
1+998,00	2+142,00	144,0	Su	50-60	Estándar Estanca	ST2CE-II	Pre-Inyecciones de microcemento	

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos	Problemática
2+142,00	2+162,00	20,0	U4/Su	30-40	Estándar Estanca	ST2CE-IV	Pre-Inyecciones de microcemento	Contacto mecánico U4-Su (Pk 2+157)
2+162,00	2+616,00	454,0	U4	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo Polideportivo (Pk 2+470 a 2+570) Hclave = 24 m en roca
2+616,00	3+100,00	484,0	U3	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo la Línea 2 (Pk 2+920 a 2+945) Hclave > 40 m en roca a solera del túnel L2
3+100,00	3+140,00	40,0	U3	>60	Estándar	ST2C-III	Paraguas	Cruce bajo Túnel de la Benedicta (Pk 3+100 a 3+140) Hclave = 9 m en roca a rasante del túnel de la Benedicta
3+140,00	3+260,00	120,0	U3	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		
3+260,00	3+499,00	239,0	U2	>60	Estándar	ST2C-I (80%) ST2C-II (10%) ST2C-III (5%) ST2C-IV (5%)		Cruce bajo Acceso a Centro Comercial Ballonti (Pk 3+405 a 3+430) Hclave = 29 m en roca
3+499,00	3+568,00	69,0	U2	>60	3 carriles	ST3C-I (80%) ST3C-II (10%) ST3C-III (5%) ST3C-IV (5%)		
3+568,00	3+574,00	6,0	U1	>60	3 carriles	ST3C-I		
3+574,00	3+583,00	9,0	U1	50-60	3 carriles	ST3C-V	Paraguas desde emboquille	
3+583,00	3+586,23	3,2	U1	40-50	3 carriles	ST3C-V	Paraguas desde emboquille	

Tabla 15: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR en tubo sentido Artaza

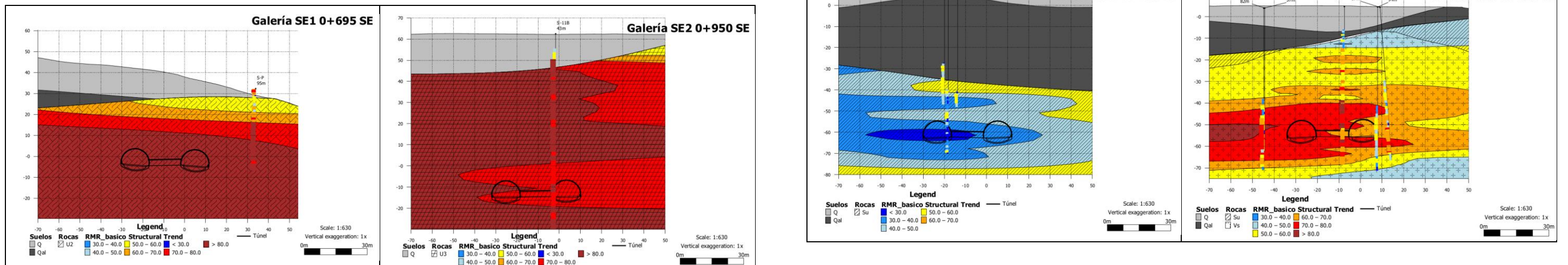
5.5.3 Galerías auxiliares

Al igual que en el caso anterior del túnel principal, se ha realizado un análisis con el programa Leapfrog para determinar la calidad del macizo rocoso en cada una de las galerías auxiliares a partir de la información geotécnica disponible. Como resultado de este análisis se han obtenido los siguientes perfiles trasversales de cada una de las galerías.

Anejo 08. Túnel



Figura 31: Vista 3D ubicación de las galerías auxiliares de conexión y su perfil transversal asociado



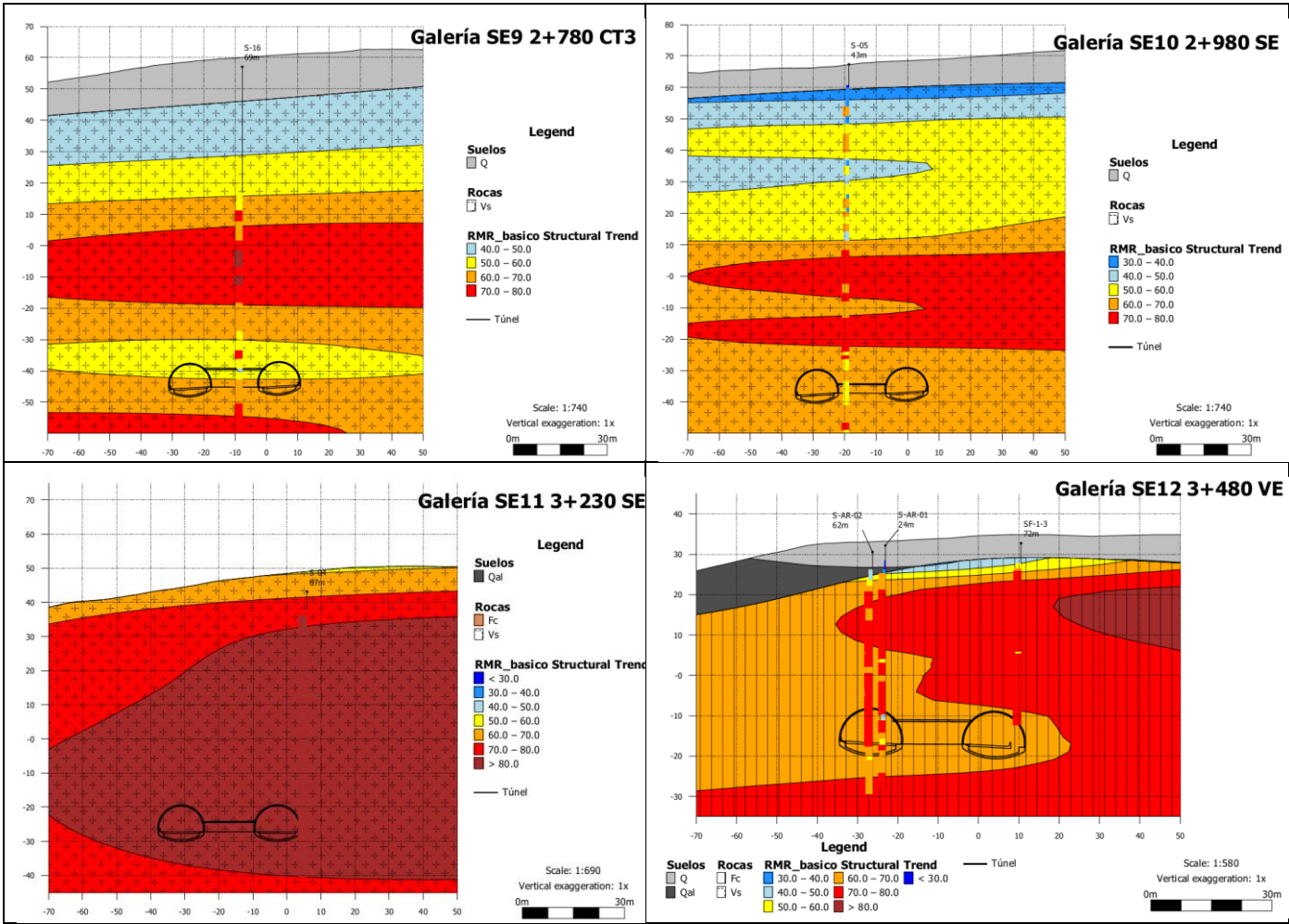


Tabla 16: Transversales de las galerías auxiliares de conexión obtenidos del modelo de Leapfrog

Como se puede observar, la mayoría de las galerías (9 de las 12) se excavarán en un macizo rocoso que presenta buena calidad geomecánica ($RMR > 60$) y que no debería ofrecer problemas.

Otras 2 galerías (SE6 y SE9) se excavarán en un macizo con una calidad media ($RMR = 50-60$) y, tan solo una galería (SE7) se excavará en un macizo de mala calidad con $RMR < 30$. En este caso se trata de la galería de bombeo situada en el punto bajo del túnel, por lo que no es posible cambiar su ubicación.

Por otro lado, las 2 galerías situadas en la vega de Lamiako (SE6 y SE7) deberán ser estancas y llevar un tratamiento previo de impermeabilización.

Como conclusión del análisis anterior, para las galerías auxiliares de conexión se ha propuesto la siguiente tramificación de sostenimientos en función de las características geotécnicas previstas en cada una de ellas.

Galería	PK (sentido Artaza)	Tipología galería	Cuarto Técnico	Bombeo	Formación / RMR	Sostenimiento	Tratamientos
SE1	0+695	Peatones	-	-	$U_2 / RMR > 60$	STGP-I	
SE2	0+950	Peatones	-	-	$U_3 / RMR > 60$	STGP-I	
SE3	1+205	Peatones	-	-	$U_3 / RMR > 60$	STGP-I	
SE4	1+460	Comunicaciones e instalaciones	CT2	-	$U_4 / RMR > 60$	STGI-I	
SE5	1+715	Peatones	-	-	$U_4 / RMR > 60$	STGP-I	
SE6	1+970	Comunicaciones Estanca	-	-	$S_u / RMR = 50-60$	STGIE-II	Pre-Inyecciones de microcemento
SE7	2+250	Bombeo Estanca	-	Sí (Punto bajo)	$S_u / RMR < 30$	STGIE-III	Pre-Inyecciones de microcemento
SE8	2+520	Peatones	-	-	$V_s / RMR > 60$	STGP-I	
SE9	2+780	Comunicaciones e instalaciones	CT3	-	$V_s / RMR = 50-60$	STGI-II	
SE10	2+980	Peatones	-	-	$V_s / RMR > 60$	STGP-I	
SE11	3+230	Peatones	-	-	$V_s / RMR > 60$	STGP-I	
SE12	3+480	Comunicaciones	-	-	$F_c / RMR > 60$	STGI-I	

Tabla 17: Tramificación de las secciones tipo y sostenimientos según RMR de las galerías auxiliares de conexión

5.5.4 Ramales de conexión en Artaza

Para los dos tramos en mina de los ramales de conexión de la zona de Artaza también se ha realizado el análisis con el programa Leapfrog para determinar la calidad del macizo rocoso en cada uno de ellos a partir de la información geotécnica disponible. Como resultado de este análisis se han obtenido los siguientes perfiles.

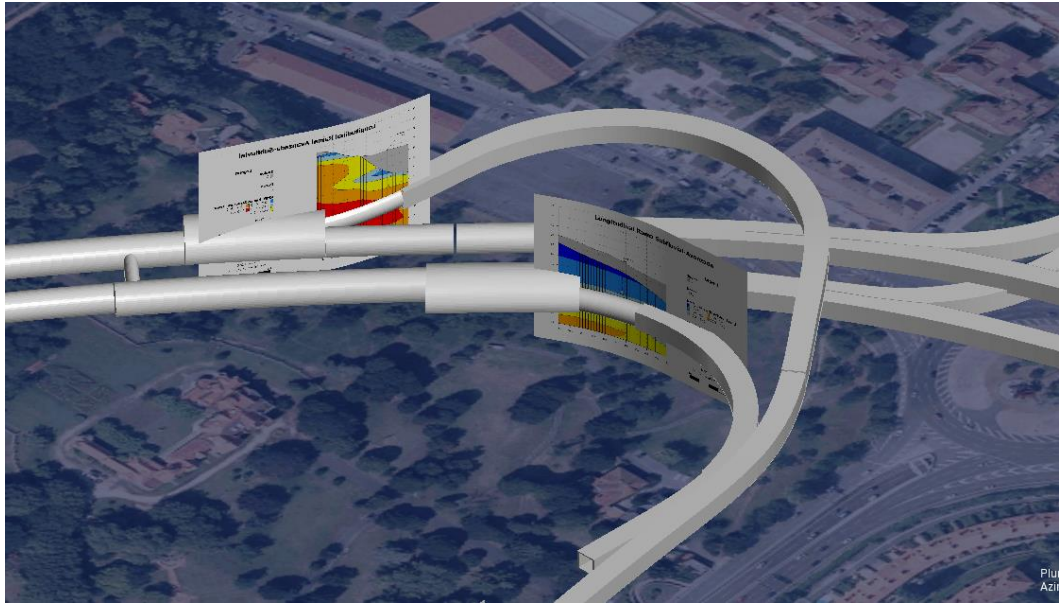


Figura 32: Vista 3D con ubicación de los ramales de Artaza

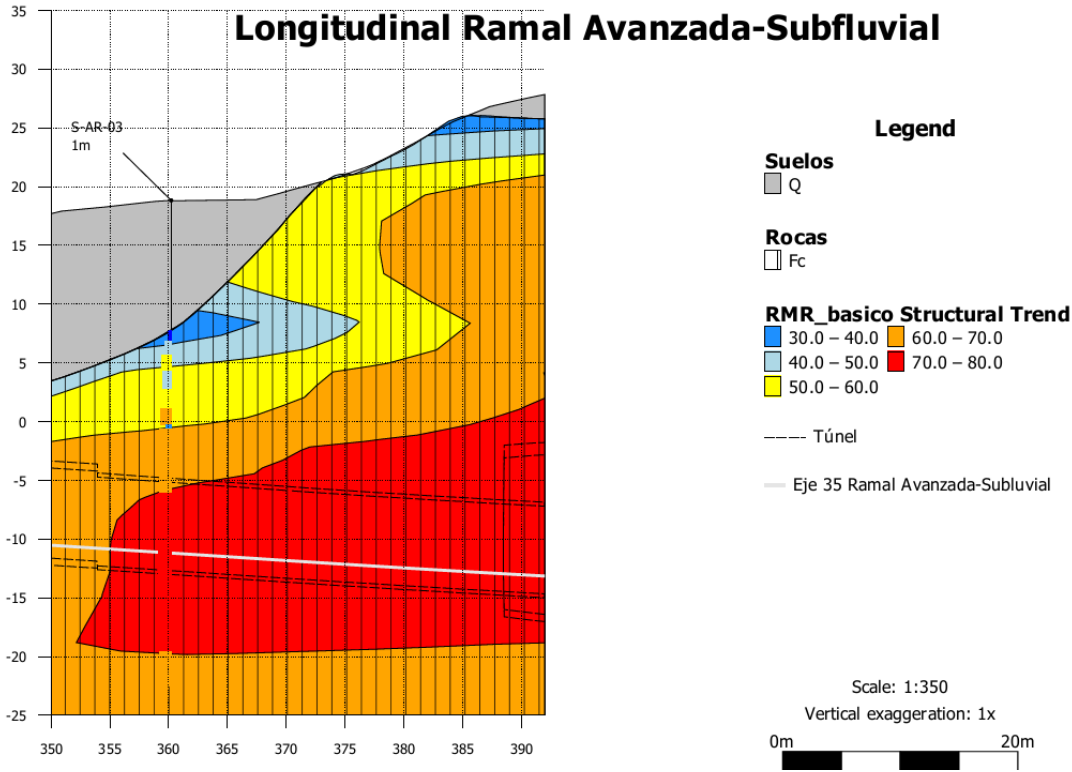


Figura 33: Longitudinal del ramal Avanzada-Subfluvial

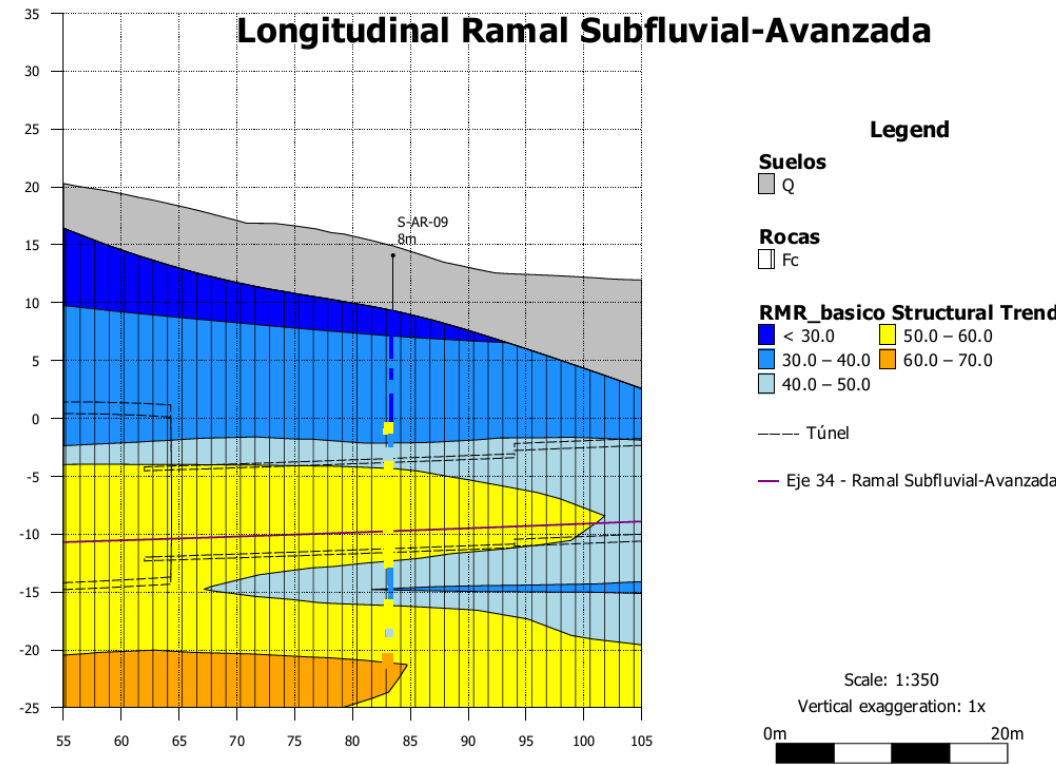


Figura 34: Longitudinal del ramal Subfluvial-Avanzada

Como se puede observar, hay bastante diferencia en la calidad geomecánica prevista para cada uno de los ramales, siendo muy buena ($RMR > 60$) en el Avanzada-Subfluvial y media ($RMR = 40 - 60$) en el de Subfluvial-Avanzada.

Como conclusión del análisis anterior, para los ramales se ha propuesto la siguiente tramificación de sostenimientos.

– Ramal Subfluvial-Avanzada

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos
0+064,00	0+084,00	18,0	Fc	41-60	Ramal	STR-II	-
0+084,00	0+094,00	12,0	Fc	41-60	Ramal	STR-II	Paraguas desde emboquille

Tabla 18: Tramificación de los sostenimientos tipo según RMR del ramal Subfluvial-Avanzada

– Ramal Avanzada-Subfluvial

P.K. Inicio	P.K. Final	L (m)	Unidad	RMR básico	Sección tipo	Sostenimiento tipo asignado	Tratamientos
0+773,95	0+785,95	12,0	Fc	> 60	Ramal	STR-I	Paraguas desde emboquille
0+785,95	0+808,55	22,6	Fc	> 60	Ramal	STR-I	-

Tabla 19: Tramificación de los sostenimientos tipo según RMR del ramal Avanzada-Subfluvial

5.5.5 Resumen de la tramificación de sostenimientos

A continuación, se incluyen unas tablas con los porcentajes y longitudes de aplicación de cada uno de los sostenimientos definidos a lo largo del trazado de los túneles principales, las galerías auxiliares y los tramos en mina de los ramales de conexión.

TÚNEL PRINCIPAL (TUBO SENTIDO ARTAZA)		
Estándar - 2 carriles		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
ST2C-I	1695,0	52,3%
ST2C-II	409,9	12,6%
ST2C-III	145,9	4,5%
ST2C-IV	105,9	3,3%
ST2C-V	21,0	0,6%
ST2CE-I	102,0	3,1%
ST2CE-II	184,0	5,7%
ST2CE-III	125,0	3,9%
ST2CE-IV	213,0	6,6%
ST2CE-V	0,0	0,0%

Tabla 20: Resumen tramificación de la sección estándar de 2 carriles en tubo sentido Artaza

3 carriles		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
ST3C-I	116,6	3,6%
ST3C-II	26,7	0,8%
ST3C-III	14,7	0,5%
ST3C-IV	5,7	0,2%
ST3C-V	12,8	0,4%

Tabla 21: Resumen tramificación de la sección de 3 carriles en tubo sentido Artaza

Caverna		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
STC-I	0,0	0,0%
STC-II	0,0	0,0%
STC-III	64,0	2,0%

Tabla 22: Resumen tramificación de caverna de bifurcación en tubo sentido Artaza

TÚNEL PRINCIPAL (TUBO SENTIDO BALLONTI)

Estándar - 2 carriles		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
ST2C-I	1595,0	49,7%
ST2C-II	418,4	13,0%
ST2C-III	149,7	4,7%
ST2C-IV	111,7	3,5%
ST2C-V	37,8	1,2%
ST2CE-I	22,0	0,7%
ST2CE-II	232,0	7,2%
ST2CE-III	195,0	6,1%
ST2CE-IV	177,0	5,5%
ST2CE-V	0	0,0%

Tabla 23: Resumen tramificación de la sección estándar de 2 carriles en tubo sentido Ballonti

3 carriles		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
ST3C-I	162,4	5,1%
ST3C-II	19,5	0,6%
ST3C-III	9,8	0,3%
ST3C-IV	9,8	0,3%
ST3C-V	12,2	0,4%

Tabla 24: Resumen tramificación de la sección de 3 carriles en tubo sentido Ballonti

Caverna		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
STC-I	46,3	1,4%
STC-II	11,6	0,4%
STC-III	0,00	0,0%

Tabla 25: Resumen tramificación de caverna de bifurcación en tubo sentido Ballonti

GALERIAS DE CONEXIÓN

Galerías de Conexión			
Sección tipo	SOST. TIPO	Longitud (m)	%
Peatonal	STGP-I	108,5	39,3%
	STGP-II	0,0	0,0%
Comunicaciones	STGI-I	31,0	11,2%
	STGI-II	15,5	5,6%
	STGI-III	0,0	0,0%
Comunicaciones / Bombeo (Estancas)	STGIE-I	0,0	0,0%
	STGIE-II	15,5	5,6%
	STGIE-III	15,5	5,6%
Instalaciones	STGI-I	45,0	16,3%
	STGI-II	45,0	16,3%
	STGI-III	0,0	0,0%

Tabla 26: Resumen tramificación galerías de conexión

RAMALES ARTAZA

Ramal Subfluvial-Avanzada		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
STR-II	30,0	100,0

Tabla 27: Resumen tramificación Ramal Subfluvial-Avanzada

Ramal Subfluvial-Avanzada		
SOST. TIPO	Longitud (m)	%
STR-I	34,6	100,0

Tabla 28: Resumen tramificación Ramal Avanzada-Subfluvial

6 FASES CONSTRUCTIVAS

La ejecución de la excavación, sostenimiento, impermeabilización y revestimiento de todas las obras subterráneas ejecutadas en mina se realizará de acuerdo a procesos cíclicos.

En la primera etapa de ejecución tendrá lugar la excavación y el sostenimiento. La excavación se desarrollará empleando medios mecánicos y la longitud de los pases de excavación dependerá de la calidad del terreno.

Una vez finalizado el pase de excavación, se procederá a sanear el frente. A continuación, se colocará un sellado de gunita y el sostenimiento previsto. El ciclo finalizará con el replanteo del siguiente pase de excavación. Mediante este proceso cíclico se excavarán tanto las fases de Avance como las de la Destroza y, si es necesario, la contrabóveda del túnel principal y los ramales de conexión en Artaza. Las galerías auxiliares se excavarán a sección completa gracias a sus reducidas dimensiones.

Como ya se ha comentado, el túnel principal se excavará por fases. Los motivos técnicos de ejecutar la excavación por fases se resumen en los siguientes puntos:

- Un túnel de una dimensión menor presenta menos problemas de estabilidad del terreno que otro con mayor dimensión. Por lo tanto, si se excava una primera fase de menores dimensiones, los problemas que pueden tener que enfrentarse suelen ser menores y más fáciles de solucionar. Además, en el momento de excavar las restantes fases ya se habrán localizado todas las zonas problemáticas del macizo rocoso, por lo que se podrán poner los medios adecuados para atravesarlas.
- El alcance de la maquinaria normal (palas, jumbos, rozadoras) está limitado a unos 6-8 metros de altura, aunque existen modelos especiales que alcanzan mayores dimensiones. La sección prevista para el túnel principal y los ramales de conexión es de mucha altura, lo cual dificultaría enormemente las labores de excavación y, sobre todo, de sostenimiento: gunitado, colocación de cerchas, bulonado, etc.
- Mediante la excavación por fases pueden conseguirse mayores rendimientos, ya que distintos equipos pueden trabajar simultáneamente en fases distintas a una cierta distancia si la programación lo requiriese, logrando avances superiores a los que se conseguirían a sección completa.

El desfase entre una fase y la siguiente dependerá tanto de criterios constructivos (movimiento de las máquinas, rampas) como de criterios geotécnicos. En principio está previsto ejecutar las fases de Avance hasta completar toda la longitud del túnel. Una vez finalizado el Avance, se comenzaría con las fases de Destroza y Contrabóveda.

Cada uno de los tipos de sostenimientos definidos se colocará de acuerdo a las fases generales anteriormente indicadas y según los pases de longitud prefijados. En las figuras presentadas a continuación se muestran las distintas fases de excavación previstas para el túnel principal y para los ramales de conexión.

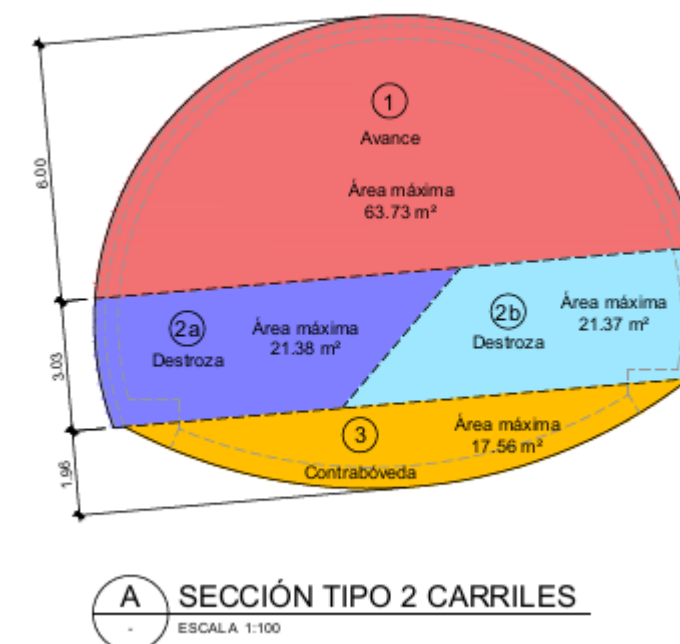


Figura 35: Fases constructivas sección 2 carriles o estándar (ST2C) con contrabóveda

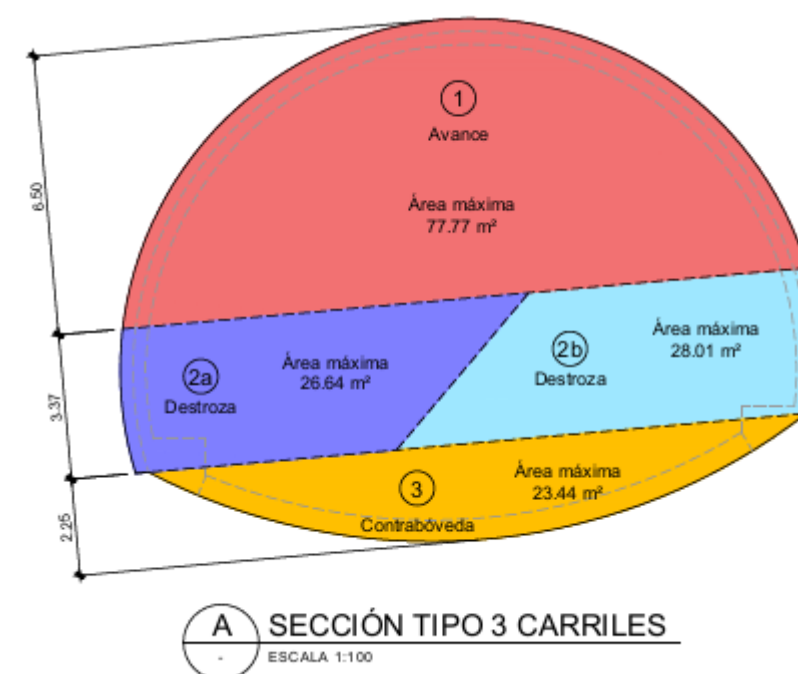


Figura 36: Fases constructivas sección 3 carriles (ST3C) con contrabóveda

Anejo 08. Túnel

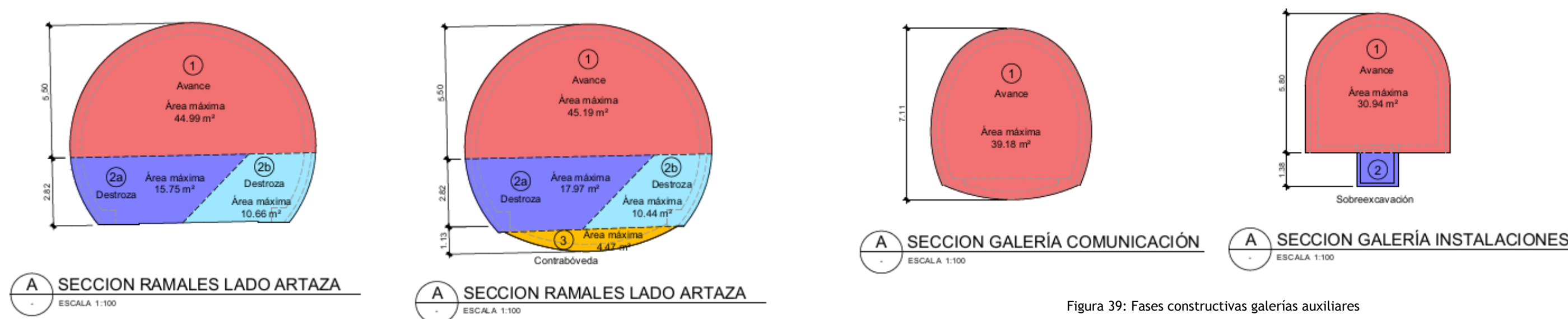


Figura 37: Fases constructivas sección ramales de conexión

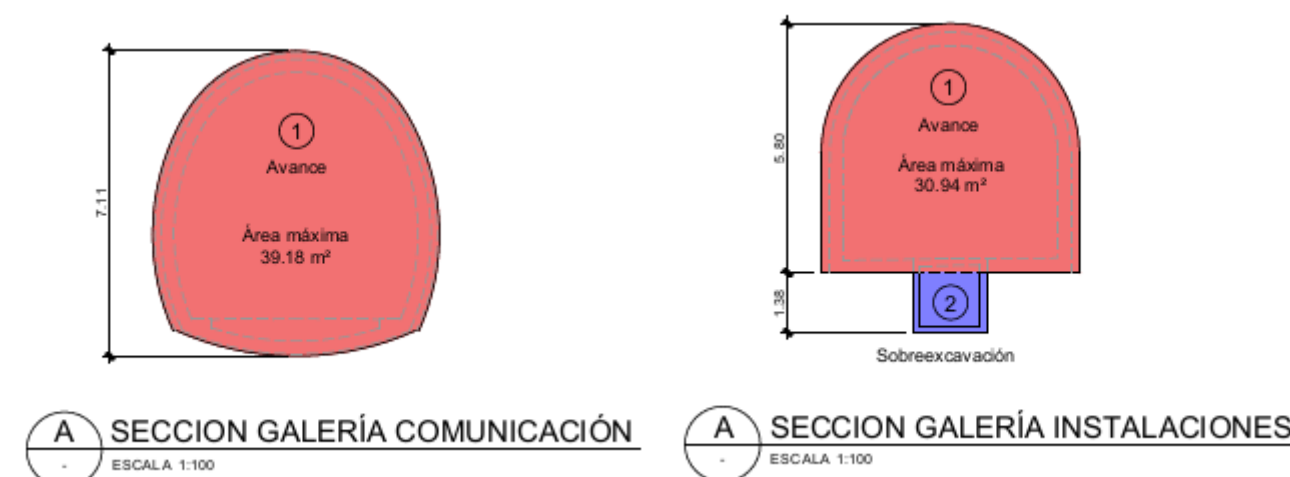


Figura 39: Fases constructivas galerías auxiliares

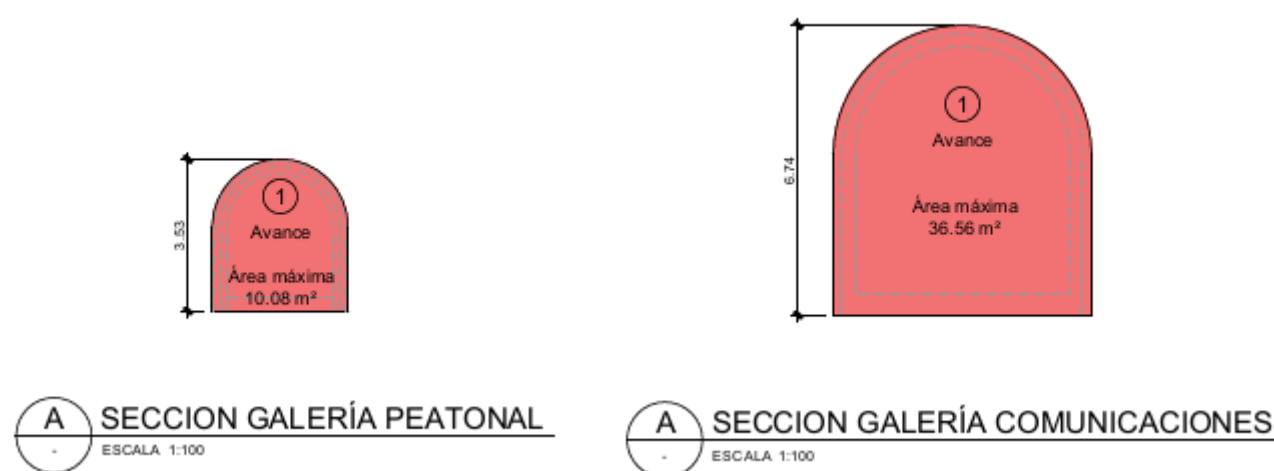


Figura 38: Fases constructivas galerías auxiliares

Anejo 08. Túnel

En el cuadro que se presenta a continuación se indican las longitudes de pase para cada una de las fases de excavación previstas. Dadas las características del terreno, se ha considerado que se realizará todo el Avance del túnel antes de realizar la Destroza y las zonas de Contrabóveda.

Proceso Constructivo Sección de 2 y 3 carriles y Sección Ramales Artaza		
Fases	Descripción	Observaciones
Paraguas	Ejecución de paraguas de micropilotes de $\Phi=101.6\text{mm}$ y espesor de 10 mm, con una longitud de 15 metros y un solape en el caso de hacer varias secciones de al menos 3 metros.	Se realizarán únicamente en las secciones de terreno de baja calidad y en la zona de emboquilles cuando el recubrimiento de roca es menor a un diámetro.
Tratamiento del frente	Ejecución de pre-inyecciones en el frente de excavación realizando una aureola de tratamiento de un espesor de 6 m alrededor del túnel,	Se realizará en las secciones bajo la ría y en la vega de Lamiako).
Avance (fase 1)	- Excavación de una sección de altura máxima de 6 metros. - Sostenimiento variable realizando siempre un sellado de gunita de 5 cm. - Ejecución de bulones y/o cerchas en función de la calidad de la roca - Se completa el espesor de gunita según la sección tipo de sostenimiento a aplicar.	Se realizará la excavación de todo el avance del túnel antes de comenzar con la excavación de la destroza.-
Destroza	Fase 2a - Excavación del batache del lateral izquierdo de la destroza - Sostenimiento del batache variable realizando siempre un sellado de gunita de 5 cm. - Ejecución de bulones y/o cerchas en función de la calidad de la roca - Se completa el espesor de gunita según la sección tipo de sostenimiento a aplicar	Una vez finalizado el avance de todo el túnel se iniciará la fase de destroza. La destroza se ejecutará por bataches en pases variables según la calidad del macizo rocoso hasta completar módulos de 12 m. No se podrá iniciar un nuevo módulo hasta que el anterior no haya sido completado con la excavación y hormigonado de la losa o contrabóveda, según la sección tipo de sostenimiento aplicada.-
	Fase 2b - Excavación del batache del lateral derecho de la destroza - Sostenimiento del batache variable realizando siempre un sellado de gunita de 5 cm. - Ejecución de bulones y/o cerchas en función de la calidad de la roca - Se completa el espesor de gunita según la sección tipo de sostenimiento a aplicar	
Contrabóveda	- Excavación y hormigonado de los dados laterales donde apoyar el carro de encofrado para ejecutar el revestimiento interno. - Excavación de la contrabóveda - Hormigonado de la contrabóveda	Esta fase solo aplica a las secciones tipo de sostenimiento cuando la calidad del macizo rocoso tenga un $\text{RMR} \leq 40$. En el resto de casos la sección se cierra con una solera plana. Los dados y la contrabóveda se ejecutarán en módulos de 12 m.

Tabla 29: Resumen Proceso Constructivo Sección de 2 y 3 carriles

En la segunda etapa de la ejecución del túnel tiene lugar la colocación de la impermeabilización y del revestimiento. El proceso constructivo del revestimiento constará de las siguientes fases:

- En primer lugar, se comprobarán las secciones transversales del túnel para verificar que se dispone de espacio suficiente para obtener el canto mínimo de revestimiento. Para ello, se hará circular por el túnel un carro comprobador de gálibos que marcará todos los puntos de la periferia del sostenimiento que queden dentro de la sección de revestimiento. A continuación, se picarán y regularizarán localmente dichos puntos, si en algún caso quedasen por dentro de la sección de hormigón prevista.
- Posteriormente, se colocará la impermeabilización en todo el túnel (parcial o completa, según se trate de sección del túnel drenado o estanco).

A la vez y con cierto desfase espacial, se hormigonará un muro-zapata hasta la altura correspondiente al arranque de la bóveda. En la parte superior del muro se dejan embebidas unas roscas para el posterior atornillado de las sujeciones de los faldones del carro de encofrado. La misión de los muros - zapata es múltiple: transmisión a la base de los esfuerzos del revestimiento, apoyo y sujeción del encofrado de la bóveda e incluso son parte del propio revestimiento estructural del túnel.

A su vez, a cierta distancia, se posicionará el carro de encofrado y se hormigonará el revestimiento (se estima realizarlo en módulos de 12 m).

Por último, se inyectará en el trasdós de clave con lechada de cemento para rellenar los huecos que hayan podido quedar en esta zona durante el hormigonado. Para ello, previamente se habrán dejado unos tubos para poder realizar dicha inyección del trasdós.

Estas tres fases últimas se realizarán de forma conjunta limitando así el tiempo total de trabajo.

7 IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE

Como se ha comentado anteriormente, el túnel Subfluvial será drenado excepto en su tramo bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako en el que será no drenado (estanco). Este tramo no drenado se sitúa entre el PK 1+866 y el PK 2+490 en el tubo sentido Artaza y se excava en su totalidad en la formación Su de lutitas con intercalaciones de areniscas. El motivo es que las pruebas hidrogeológicas realizadas han mostrado que existe una conexión hidráulica entre este sustrato rocoso y la ría, por lo que en esta zona será necesario evitar el riesgo de una posible entrada de agua en el túnel.

Este mismo criterio se aplicará también a las galerías auxiliares que conectan los dos tubos principales, de forma que dos de ellas (SE6 y SE7) caerán dentro del tramo de la vega de Lamiako y, por tanto, deberán ser estancas. En cambio, el resto de las galerías auxiliares y los dos tramos en mina de los ramales de conexión de la zona de Artaza serán drenados.

Por todo lo anterior, para el sistema de impermeabilización habrá dos opciones diferentes según se trate del tramo de túnel drenado o no drenado:

- Sistema de impermeabilización para los tramos de túnel drenado: Los sistemas de impermeabilización drenados reducen las cargas de agua sobre la estructura, permitiendo revestimientos más ligeros y menos reforzados. Por otro lado, los macizos rocosos fracturados permiten que las entradas de agua subterránea ingresen al túnel siendo necesario aumentar las inspecciones y el mantenimiento durante la vida útil de la infraestructura.

En el caso del túnel drenado, cuando se termine la excavación y el sostenimiento será necesario completar su construcción instalando la impermeabilización, el drenaje y el revestimiento.

Con la impermeabilización se tratará de evitar que las aguas de filtración provenientes del macizo entren en el interior del túnel y de las galerías, lo que sería perjudicial para el hormigón y el acero del sostenimiento y revestimiento que con el tiempo pueden llegar a quedar parcialmente destruidos.

En cuanto a la impermeabilización del túnel y de las galerías, cabe señalar que en realidad no es tal ya que permitirá entrar agua por los lugares prefijados y conducirla y canalizarla a través del sistema de drenaje longitudinal hasta el exterior de la obra subterránea. Esta metodología tiene varias ventajas frente a un sistema de impermeabilización completa que impida totalmente la entrada de agua, ya que en primer lugar se evitan las cargas hidrostáticas sobre el revestimiento y, por otro lado, se consigue un menor coste de la obra.

Se ha previsto la colocación de una lámina de impermeabilización (geotextil y PVC) entre el sostenimiento y el revestimiento del túnel y de las galerías a lo largo de toda su longitud. La lámina de plástico (PVC de 1,5 mm) realizará la función impermeabilizadora y el geotextil (500 g/m²) tendrá por misión conducir el agua y proteger al PVC. El geotextil se conectará en su base con unos tubos colectores de pequeño diámetro (uno por cada hastial). En el túnel estos tubos de pequeño diámetro (ϕ 150 mm) irán unidos cada 50 m a un dren colector $\square$ 300 mm (habrá un dren colector en cada hastial del túnel).

- Sistema de impermeabilización para los tramos de túnel no drenado (estanco): En este caso, la impermeabilización será completa y no se dispone de un sistema de drenaje específico. Por tanto, se debe considerar presión de agua alrededor de la excavación en el cálculo del revestimiento a largo plazo. El valor numérico de dicha presión se tendrá que determinar a partir de los datos hidrogeológicos.

8 EMBOQUILLES DEL TÚNEL PRINCIPAL Y RAMALES DE CONEXIÓN

En este apartado se desarrolla el diseño de los puntos de emboquille de los túneles principales y los ramales de conexión en Artaza.

En este sentido, hay que comentar que en realidad no se trata de emboquilles como tales ya que los túneles se comenzarán a excavar desde pozos de ataque ejecutados entre pantallas en lado Artaza. En el caso del lado Ballonti, antes de iniciar la excavación del túnel se deberá ejecutar un paso superior que permita restituir la carretera existente BI-628 y el ataque de los túneles se realizará por debajo de esta estructura.

8.1 Emboquilles lado Artaza

Como se acaba de mencionar, para el ataque de los túneles principales en la zona de Artaza se ejecutará un único pozo de ataque excavado entre pantallas que permitirá iniciar la excavación en mina tanto de los 2 tubos del túnel principal como del ramal de conexión de la Subfluvial-Avanzada.

Para el ramal de conexión Avanzada-Subfluvial el pozo de ataque será la propia sección del ramal excavada previamente entre pantallas.

El acceso y salida de materiales y personas a estos pozos podrá realizarse en vertical o también a través de las rampas de los ramales de conexión que habrán sido previamente ejecutadas.

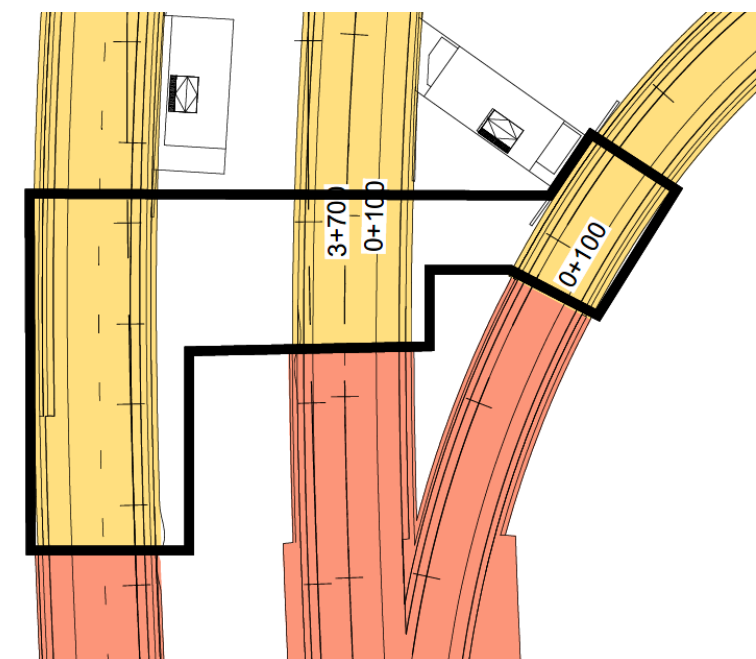


Figura 40: Esquema del pozo de ataque en Artaza ejecutado entre pantallas

Para definir el punto adecuado de emboquille se ha realizado un análisis con el programa Leapfrog que permite determinar la calidad del macizo rocoso en estas zonas a partir de la información geotécnica disponible. Como resultado de este análisis, se han obtenido unos perfiles transversales de los puntos de emboquille en los que se puede observar la calidad geomecánica ($RMR_{Básico}$) que presenta el macizo rocoso y los recubrimientos existentes.

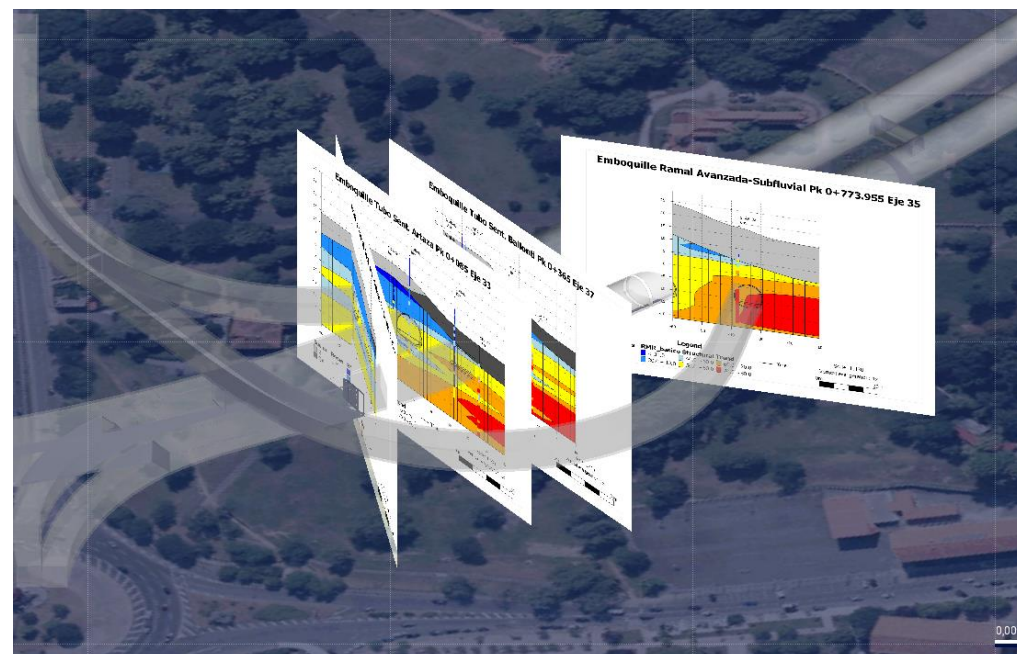


Figura 41: Vista 3D con ubicación de los transversales de los puntos de emboquille lado Artaza

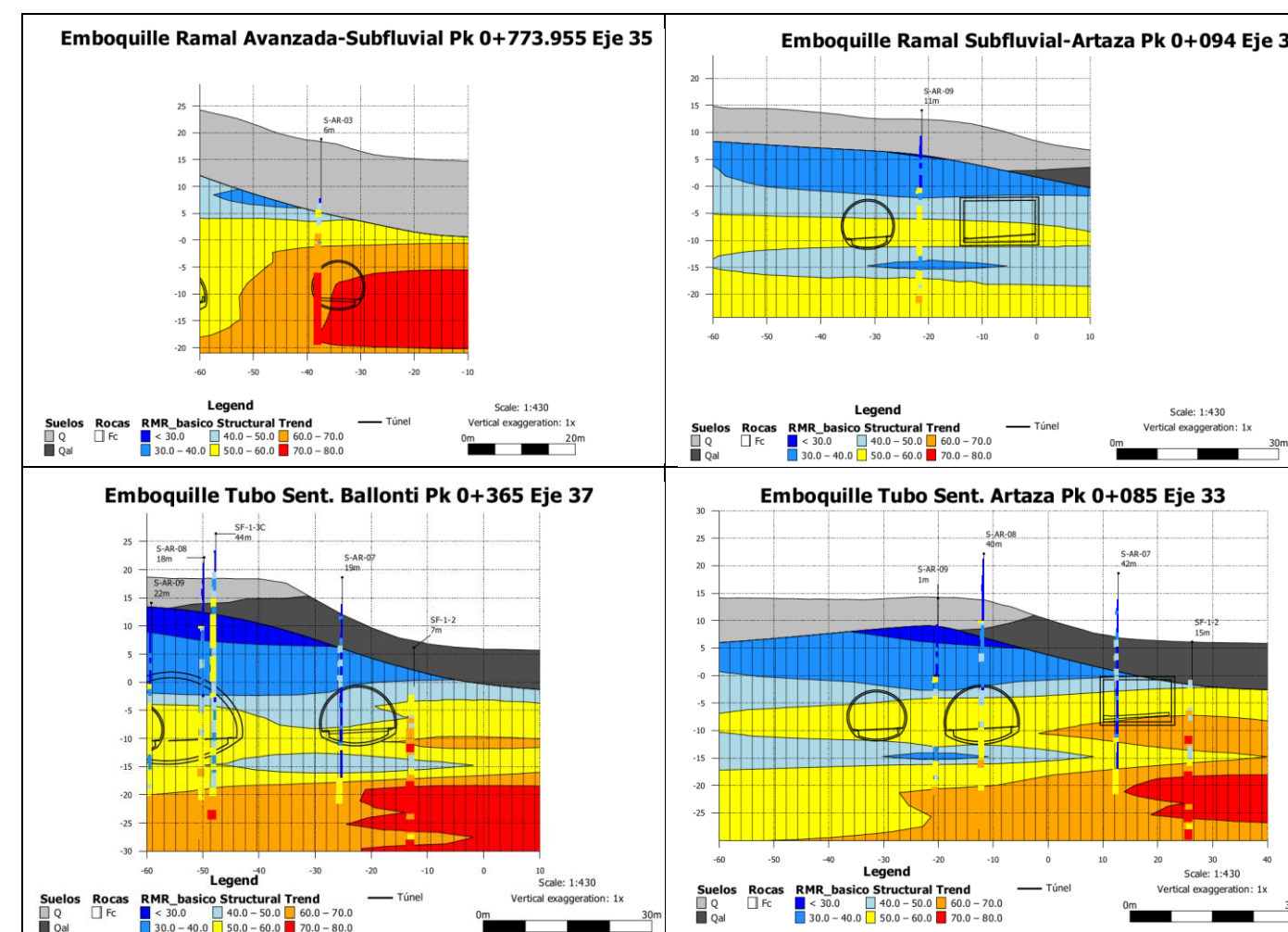


Tabla 30: Transversales de los puntos de emboquille lado Artaza obtenidos del modelo de Leapfrog

Los perfiles transversales obtenidos del modelo de Leapfrog permiten comprobar lo siguiente:

- El punto de emboquille del tubo sentido Ballonti es el que presenta mayores dificultades ya que se excavará fundamentalmente en rocas de calidad media -mala (RMR = 40 -50 en la mitad superior de la sección y RMR < 40 sobre la clave del túnel), con un recubrimiento mínimo en este tipo de roca de tan solo 5 metros en el hombro derecho y eje del túnel. En cambio, en el hombro izquierdo el recubrimiento mínimo en roca aumenta hasta los 10 metros.
- El punto de emboquille del tubo sentido Artaza presenta mejores características ya que se excavará fundamentalmente en rocas de calidad media en la mayor parte de la sección (RMR = 50 -60), aunque en la parte superior y en la clave la calidad de la roca bajará hasta RMR = 40 - 50 en la parte superior y RMR = 30 - 40 por encima de la clave. El recubrimiento mínimo en roca es de unos 8 m en el hombro derecho.
- En el ramal Subfluvial-Artaza se emboquilla con un recubrimiento de algo más de 1 diámetro en roca de calidad media-mala (RMR 40 - 50 en la mitad superior de la sección y RMR = 30 - 40 por encima de la clave).
- En el ramal Avanzada-Subfluvial se emboquilla con prácticamente 1 diámetro de recubrimiento en roca de buena calidad (RMR > 60).

Anejo 08. Túnel

Para el caso del punto de emboquille del tubo sentido Ballonti, que como se ha visto es el que presenta peores características geomecánicas y de recubrimiento en roca, se incluye a continuación un perfil longitudinal con la calidad de la roca esperable en los primeros metros de excavación del túnel.

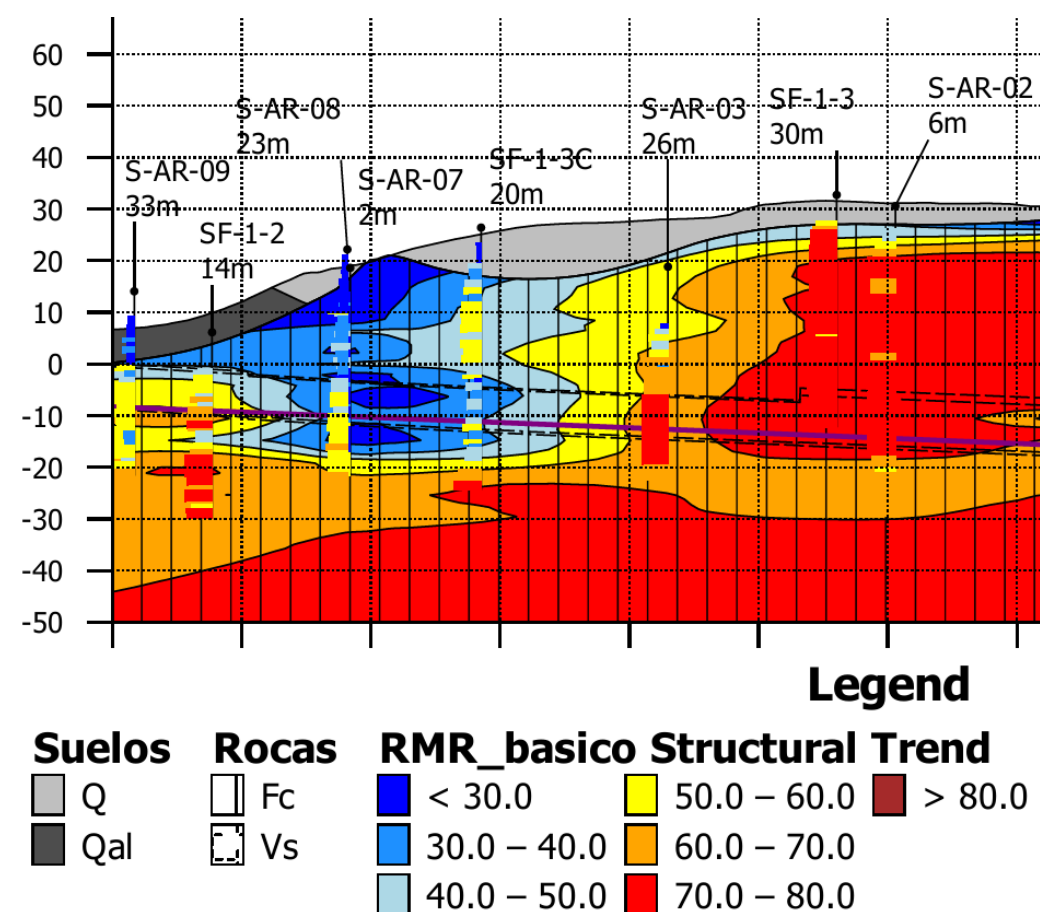


Figura 42: Longitudinal del emboquille lado Artaza (tubo sentido Ballonti)

Tal y como se observa en este perfil, el túnel se perforará desde su punto de emboquille durante bastantes metros en una roca de calidad mala. Hay que tener en cuenta que muy próximo al punto de emboquille se ha detectado una falla en el sondeo S-AR-07. Es por ello que los 34 metros iniciales del túnel se deberán ejecutar con el sostenimiento más pesado (ST2C-V) y bajo la protección continua de paraguas de micropilotes.

En cuanto al emboquille del tubo sentido Artaza, se incluye a continuación el perfil longitudinal con la calidad de la roca esperable en los primeros metros de excavación del túnel.

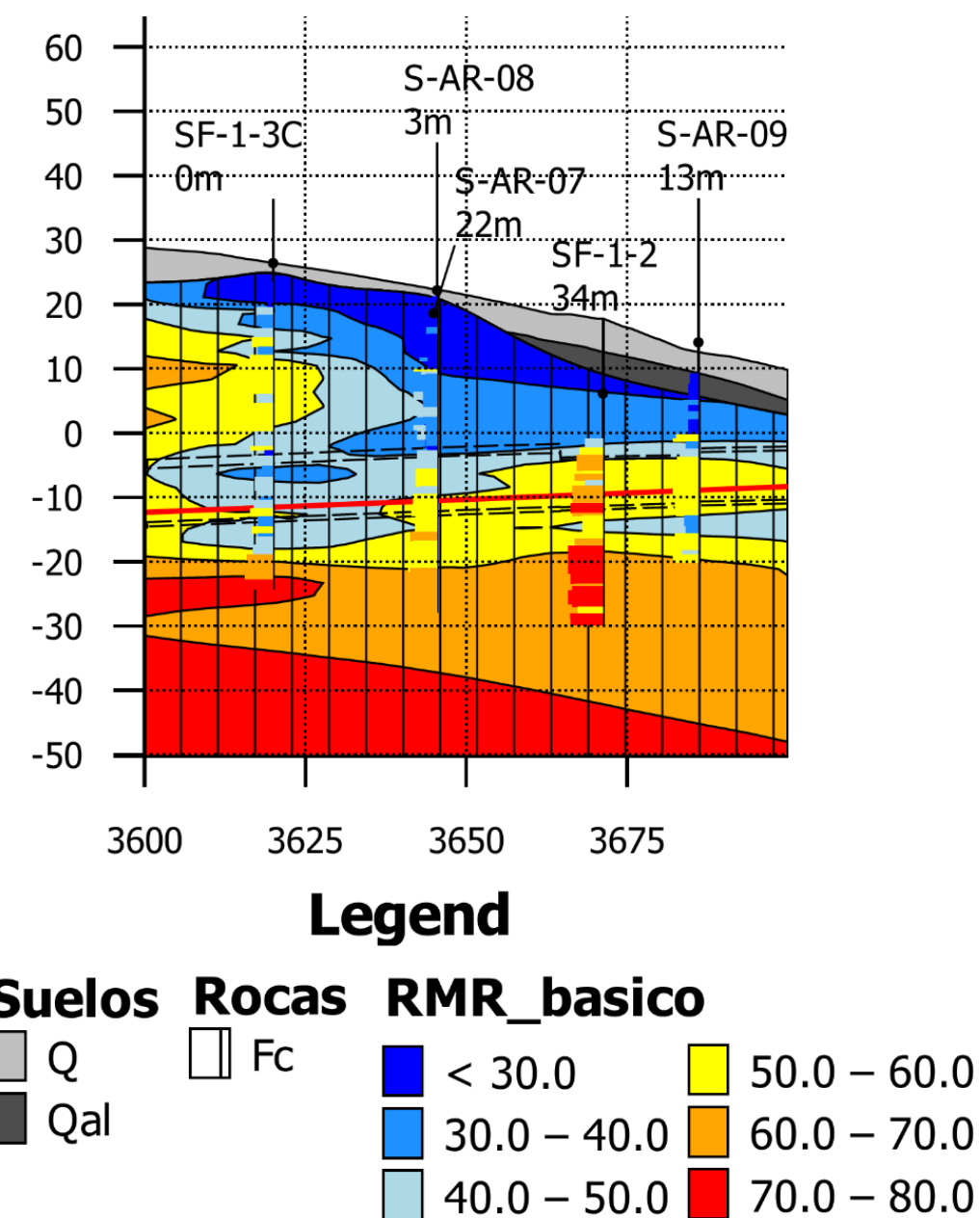


Figura 43: Longitudinal del emboquille lado Artaza (tubo sentido Artaza)

8.2 Emboquille lado Ballonti

En el caso del lado Ballonti, antes de comenzar con la excavación del túnel se deberá ejecutar una estructura (paso superior) que restituya la carretera existente BI-628 que cruza justo perpendicularmente al punto de emboquille. Posteriormente, el ataque de los túneles se realizará por debajo de esta estructura.

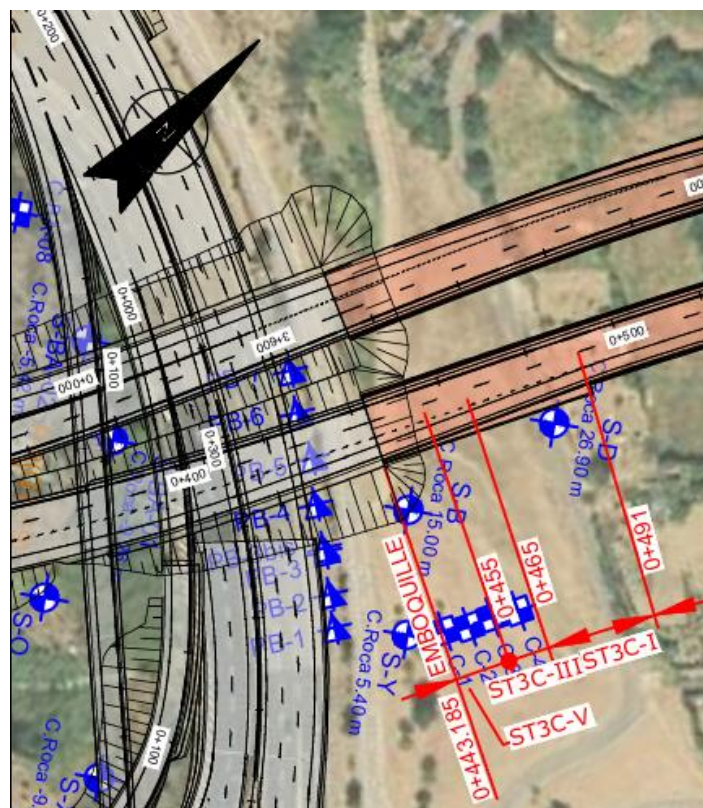


Figura 44: Planta del emboquille lado Ballonti

Para definir el punto adecuado de emboquille se ha realizado el correspondiente análisis con el programa Leapfrog a partir de la información geotécnica disponible. Como resultado de este análisis, se ha obtenido un perfil transversal del punto de emboquille en el que se puede observar la calidad geomecánica ($RMR_{Básico}$) que presenta el macizo rocoso y los recubrimientos existentes.

Emboquille Tuneles Ballonti Pk 0+443.19 y 3+586.23

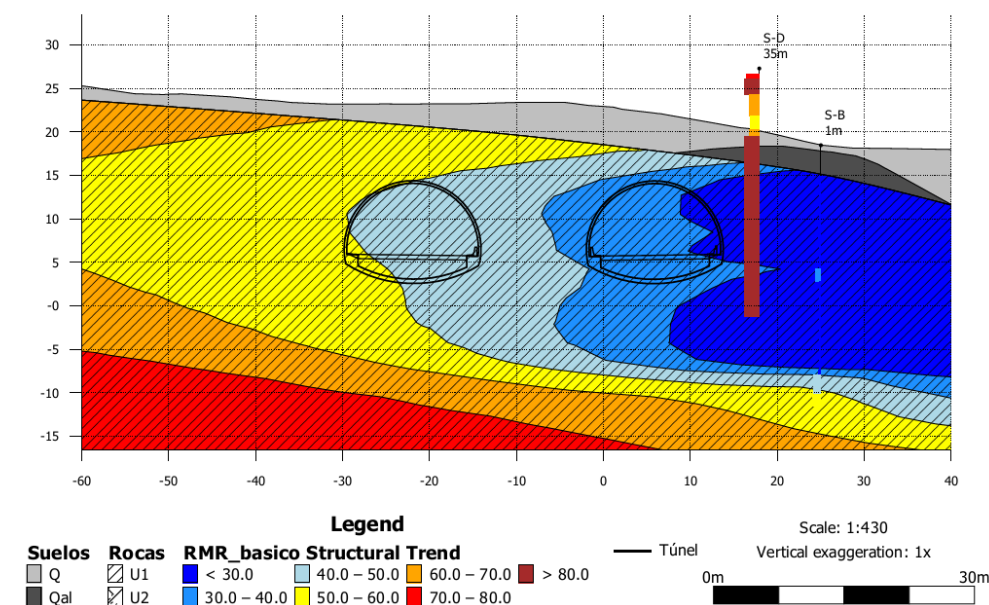


Figura 45: Transversal del emboquille lado Ballonti

En la figura anterior se comprueba que el punto de emboquille en Ballonti presenta un recubrimiento muy escaso de roca sobre la clave del túnel, tanto en el tubo sentido Artaza como en el de sentido Ballonti. El caso del tubo sentido Artaza será especialmente complicado geotécnicamente, pues el recubrimiento total sobre clave es de unos 8 m, de los cuales apenas 4 m serán en roca que, además, es de mala calidad ($RMR < 40$).

Dada la dificultad que presenta el tubo sentido Artaza, a continuación se presenta el perfil longitudinal de los primeros metros de este tubo.

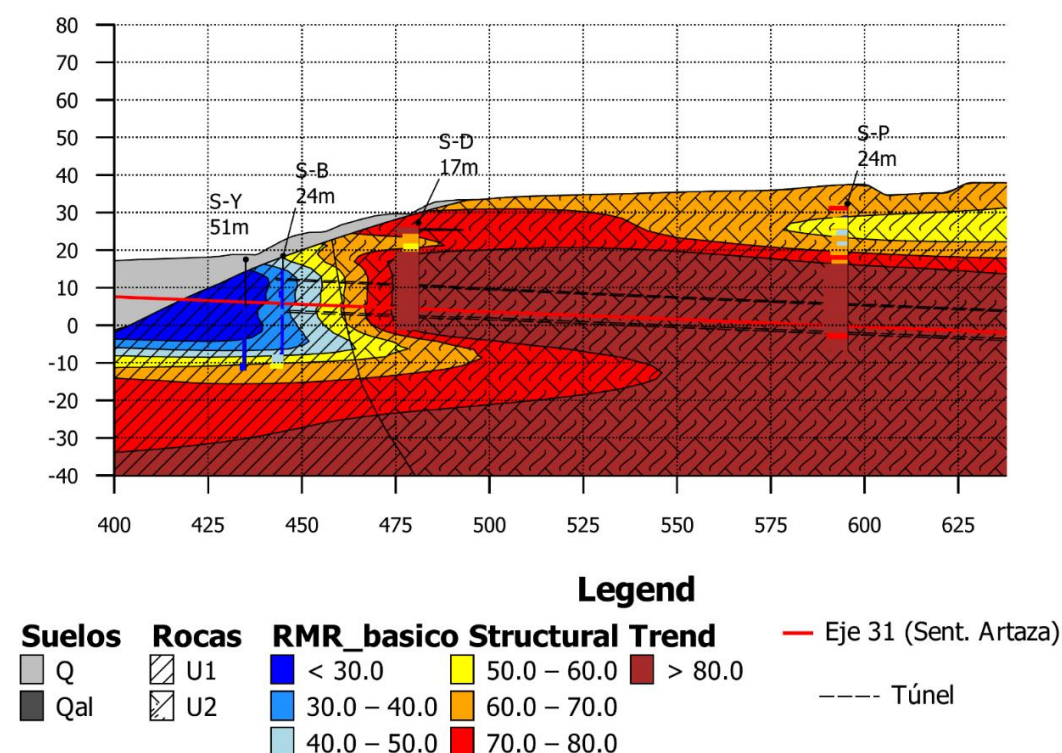


Figura 46: Longitudinal del emboquille lado Ballonti (tubo sentido Artaza)

Tal y como se observa en este perfil, parece que la roca de mala calidad se circunscribe a las inmediaciones más próximas al punto de emboquille, pasando en pocos metros a una roca que mejora rápidamente su calidad hasta alcanzar rápidamente valores de RMR > 60.

En este sentido, hay que indicar que parecería lógico tratar de retrasar unos metros el punto de emboquille adentrándose en el macizo rocoso para asegurar una mejor calidad del mismo y un mayor recubrimiento en roca, pero esta circunstancia no ha sido posible porque en ese caso se emboquillaría en una zona verde correspondiente a una parcela con protección urbanística. Es por ello que el punto de emboquille se ha debido fijar fuera de la mencionada parcela siendo necesario ejecutar una pantalla de pilotes como frente frontal de inicio de los túneles que evite una excavación con un talud cuyo derrame también se metería en la zona verde.

9 TRATAMIENTOS ESPECIALES

Para poder ejecutar el túnel Subfluvial de Lamiako con suficientes garantías será necesario aplicar tratamientos de mejora del terreno previos a la excavación en algunos tramos.

A continuación, se tratan los distintos problemas previsibles y las medidas especiales propuestas para cada uno de ellos, haciendo especial énfasis en los tratamientos de impermeabilización debido a su relevancia en el diseño del túnel en su paso bajo la ría de Bilbao.

9.1 Tratamientos de impermeabilización

La mayor experiencia en la ejecución de túneles convencionales con sistema NATM bajo cursos de agua o el mar se concentra en Noruega, país en el que durante los últimos 30 años se han construido más de 40 túneles de este tipo.

La mayoría de estos túneles se localizan en macizos rocosos de buena calidad, aunque en ocasiones se han tenido que atravesar terrenos de malas propiedades principalmente asociados a fallas. La principal característica de los túneles bajo el mar noruego es la impermeabilización por delante del frente de excavación de las posibles afluencias de agua, para lo que se realiza de forma sistemática un método de detección y sellado de agua que se ha ido desarrollando y perfeccionando a lo largo de los años.

Este método con tratamiento del macizo por delante del frente empleando inyecciones se denomina Técnica de Pre-Inyección (TPI) y permite impermeabilizar el túnel y mejorar la calidad geomecánica del terreno antes de realizar la excavación. El método noruego ha sido exportado y aplicado en otros países, como por ejemplo el túnel de Xiang'an (2010) en China.

En este método todos los elementos deben estar sometidos al mismo control de calidad y especificaciones y se debe asegurar la protección de los bulones y los elementos metálicos. La impermeabilización se confía fundamentalmente a la inyección de microcemento en aureolas por delante del frente. Esta inyección por un lado mejora el terreno y por otro impide el contacto del agua con el sostenimiento.

El método noruego está basado en un buen reconocimiento del terreno con sondeos direccionales que se orientan para asegurar el recubrimiento mínimo de roca, reconocimientos con sismica "hole-to bottom" y tomografía sísmica, así como sondeos a rotoperusión con el jumbo durante el avance desde el frente, como se aprecia en la siguiente figura:

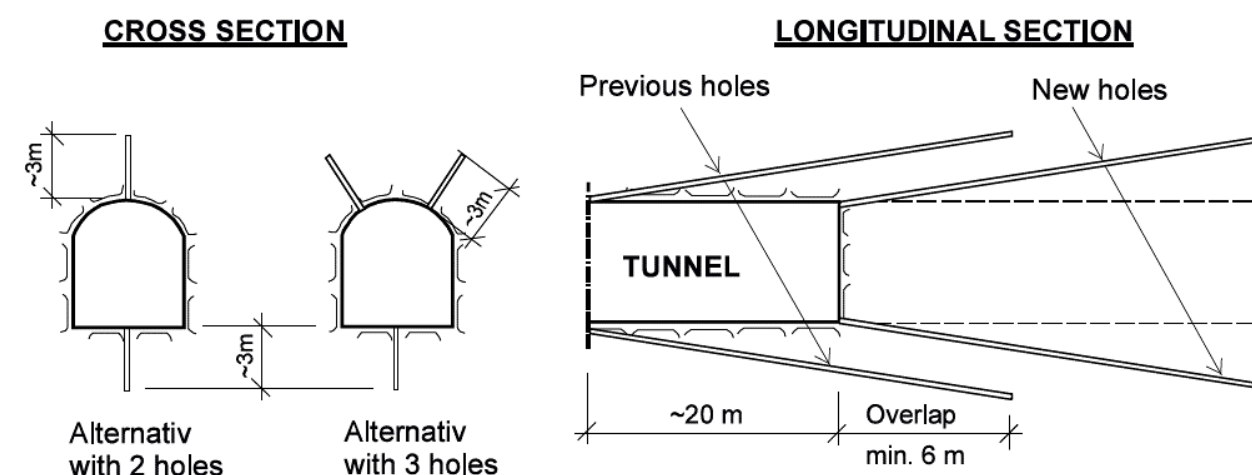


Figura 47: Ejemplo de disposición de sondeos de reconocimiento.

El punto crítico que debe ser considerado en este método es el riesgo de entrada de agua durante la construcción del túnel. En el caso de que los sondeos exploratorios den agua, se perfora una aureola de ellos y se inyectan a presión.

Para el caso del túnel Subfluvial, hay que tener en cuenta que un eventual accidente durante la construcción por entrada de agua y material bajo la ría de Bilbao o en la vega de Lamiako tendría probablemente consecuencias

Anejo 08. Túnel

catastróficas, por lo que la viabilidad de la pre-inyección y poder asegurar resultados satisfactorios serán los puntos clave en la ejecución del túnel.

A largo plazo, este factor tiene menos importancia, aunque debe ser asumido que se requerirá una impermeabilización total del túnel (diseño estanco) para reducir costes de operación y problemas de subsidencias diferidas.

En conclusión, será necesario pre-inyectar de forma sistemática desde dentro del túnel Subfluvial ejecutado con NATM en los tramos bajo la ría de Bilbao y la vega de Lamiako para evitar irrupciones incontroladas de agua y terreno. Hay que tener en cuenta que en parte del tramo bajo la vega de Lamiako el recubrimiento en roca sobre la clave del túnel apenas será de aproximadamente un diámetro y que la permeabilidad de la roca puede no ser suficiente para disminuir las infiltraciones de agua en el túnel.

En este sentido, indicar que los criterios de seguridad en Noruega han ido evolucionando y se aceptan recubrimientos de roca de menos de 20 m si las aguas no son demasiado profundas y el reconocimiento geotécnico es adecuado.

Por último, indicar que siempre se debe justificar que el arco de roca será capaz de resistir su peso y el del agua permitiendo el suficiente tiempo de maniobra para evacuar en caso necesario. Aun así, existe siempre un riesgo remanente que obliga a proceder con un control de riesgos exhaustivo, siendo recomendable que éste sea independiente del equipo de proyecto y construcción.

Para esta fase del proyecto se ha previsto un tratamiento de impermeabilización mediante una aureola pre-inyectada de 6 m de microcemento alrededor de toda la sección del túnel. En cualquier caso, en fases posteriores del proyecto se deberá realizar un cálculo detallado de las inyecciones de microcemento en función de los caudales de agua esperables y las permeabilidades del macizo rocoso en esta zona.

De acuerdo con las referencias noruegas, el coste de estos tratamientos para obtener infiltraciones por debajo de los 10 l/min/100 m, en comparación a un túnel NATM sin pre-inyección se incrementan del 50 al 70% y los ritmos de avance disminuyen del 10% al 60%.

9.2 Otros tratamientos

Además de los tratamientos de impermeabilización anteriormente definidos, a lo largo de la ejecución de las obras subterráneas podrá ser necesario aplicar otros tratamientos especiales en distintas zonas, tal y como se describe a continuación.

– Zonas de emboquille

Las zonas de emboquille suelen ser problemáticas por tratarse del inicio de las obras, tener una escasa cobertera y presentar un importante espesor de terreno alterado. En consecuencia, se suelen dimensionar unos tratamientos especiales o unos sostenimientos superiores a los del resto del túnel.

En el caso del túnel Subfluvial se ha previsto utilizar el sostenimiento tipo V en las zonas de los emboquilles, si bien no será necesario disponer la contrabóveda, aunque sí deberá ejecutarse bajo el amparo de paraguas de micropilotes.

Del mismo modo, en el emboquille de los ramales de conexión de la zona de Artaza también se aplicará el sostenimiento tipo más pesado (STR-III) con su correspondiente paraguas.

Los paraguas de micropilotes serán en todos los casos tubos de diámetro exterior de 101,6 mm y 10 mm de espesor introducidos en perforaciones de 150 mm. El espaciado entre los ejes de los tubos será de 0,5 m. Los paraguas serán de 15 m de longitud y se realizarán solapes de 3m cuando sea necesario emplear varios paraguas seguidos.

– Entronques de las galerías auxiliares con el túnel principal

El proceso constructivo que se seguirá en los entronques de las galerías auxiliares de conexión entre los dos tubos del túnel principal deberá contemplar lo siguiente:

– Galería Peatonal

- Si el $RMR \leq 50$ (STGP-II) se ejecutará desde cada uno de los dos tubos del túnel principal un paraguas de micropilotes (tubos de $\phi = 88.9$ mm y $e=10$ mm) a lo largo de toda la galería, dejando 1 m intermedio libre entre ambos paraguas.
- Anclaje de las cerchas del sostenimiento del túnel que posteriormente serán cortadas en la zona donde se creará el hueco del entroque. Este anclaje se realizará con bulones $\phi = 25$ de 3 m de longitud.
- Ejecución de la viga de atado de los micropilotes.
- Apertura del hueco del entronque y sostenimiento del mismo. El pase máximo será de 1 m.

– Galerías de comunicaciones e instalaciones

- Si el $RMR = 41 - 60$ (STGI-II) se ejecutará desde cada uno de los dos tubos del túnel principal un enfilaje de $\Phi 25$ mm cada 0,50 m desde cada entronque ($L = 6$ m).
- Si el $RMR \leq 40$ (STGI-III) se ejecutará desde cada uno de los dos tubos del túnel principal un paraguas de micropilotes (tubos de $\phi = 88.9$ mm y $e=10$ mm) a lo largo de toda la galería, dejando 1 m intermedio libre entre ambos paraguas.
- Anclaje de las cerchas del sostenimiento del túnel que posteriormente serán cortadas en la zona donde se creará el hueco del entroque. Este anclaje se realizará con bulones $\phi = 25$ de 3 m de longitud.
- Ejecución de la viga de atado de los micropilotes.
- Apertura del hueco del entronque y sostenimiento del mismo. El pase máximo será de 1 m.

– Sondeo de reconocimiento en el frente

Esta información puede ser básica para tener un conocimiento suficiente del terreno que se va a excavar en zonas especialmente conflictivas. El sondeo en el frente servirá para detectar con antelación las zonas de falla o de escasa calidad geotécnica así como zonas de circulación de agua, lo que permitirá poder tener los equipos necesarios preparados.

Dada la dificultad que supone este tipo de medidas, para ejecutar un sondeo de reconocimiento se podrán aprovechar las paradas de los fines de semana. Como consecuencia de ello, se deberá reconocer una longitud de terreno superior a la longitud estimada de avance para una semana.

Estos sondeos se harán con recuperación de testigo, aunque se podrá, a juicio de Dirección de Obra, sustituir el sondeo con recuperación de testigo por un sondeo destructivo con registro de parámetros de perforación.

El diámetro de perforación estará comprendido entre 86 mm y 101 mm para tener testigos de tamaño suficiente que puedan ser ensayados en caso de considerarse necesario.

El sondeo deberá de ser supervisado por un técnico especializado en Geología que será el encargado de la testificación e interpretación de las incidencias en la perforación. Todos estos datos se presentarán a la Dirección de Obra antes de iniciar los trabajos de avance correspondientes a la zona reconocida con el sondeo, salvo indicación contraria por parte de la Dirección de Obra.

Se prestará una especial atención a las llegadas de agua o pérdidas de agua de perforación.

– Sellado y bulonado del frente

En zonas de mala calidad del macizo puede haber inestabilidades del frente. En estas zonas se colocará un sellado de 5 cm de hormigón proyectado en el frente cuando haya paradas prolongadas no previstas y al iniciarse los fines de semana. Este último punto es fundamental si se va a realizar un sondeo de reconocimiento en el frente. Si fuera necesario también se utilizarán bulones de fibra de vidrio en el frente para mejorar la estabilidad del terreno.

Para las cuñas inestables que se podrían formar en el frente también habrá que tener previsto un tratamiento especial de bulonado y sellado del frente, sobre todo en el caso de que dicho frente deba permanecer un cierto tiempo abierto por alguna parada de obra.

– Paraguas de micropilotes

Con independencia de los paraguas previstos en los emboquilles y en los entronques del túnel principal con las galerías auxiliares, los paraguas de micropilotes también se deberán utilizar en otras situaciones diferentes, como las que detallan a continuación:

- Zonas especiales de paso bajo estructuras. En el caso del túnel Subfluvial, está previsto un tratamiento con paraguas en el paso bajo el túnel de La Benedicta, que se cruzará con apenas 1 diámetro de espesor de roca entre ambos túneles.
- Cuando haya problemas de estabilidad debido a la mala calidad del macizo rocoso (Sostenimiento tipo V en el túnel principal)
- En el caso de macizos de buena calidad geomecánica (Sostenimiento tipo I) en los que puedan formarse cuñas de gran tamaño imposibles de sostener con un bulonado.

El tipo de paraguas de micropilotes que se deberá ejecutar en estos casos será de tubos de diámetro exterior de 101,6 mm y 10 mm de espesor introducidos en perforaciones de 150 mm. El límite elástico del acero de los tubos será de 550 MPa. El espaciado entre los ejes de los tubos será de 0,5 m.

10 AUSCULTACIÓN Y SEGUIMIENTO GEOTÉCNICO

En el presente apartado se define la instrumentación y auscultación que se estima necesaria para el correcto control y seguimiento de la obra planteada. Su finalidad es establecer el control de los movimientos y esfuerzos que experimentarán los tramos en mina del túnel principal, los ramales de conexión y las galerías auxiliares, así como el comportamiento del terreno. Esta propuesta podrá ser modificada en función del comportamiento que se vaya observando a lo largo de la construcción de los túneles y bajo la aprobación de la Dirección de Obra.

Para cumplir los objetivos marcados se requiere la instalación de instrumentos y sistemas de auscultación que en cada momento informen de las reacciones con que el terreno y las estructuras responden a las distintas fases constructivas que se prevea llevar a cabo. La comparación de los valores previstos en ulteriores fases del proyecto de construcción con los que se obtengan durante la auscultación de las obras permitirá corregir y adecuar el diseño en caso de ser necesario.

En caso de observarse un comportamiento inadecuado se implementarán las medidas correctivas necesarias. Esto es especialmente relevante en el caso de utilizar el NATM, donde los datos aportados por la instrumentación influyen directamente en el sostenimiento que se coloca.

La tipología de la instrumentación propuesta será la misma en el túnel principal, ramales de conexión y las galerías auxiliares. Cambiará únicamente la ubicación de los puntos de instrumentación dentro de las secciones y la frecuencia de las secciones.

Bajo el término auscultación y control también se engloba a todo el conjunto de labores que pudieran ser necesarias para el control de los movimientos de superficie y estructuras anexas, así como la vigilancia de transiciones o accidentes geológicos particulares de la traza.

Al ser excavados el túnel y las galerías por métodos convencionales (NATM), los frentes de excavación serán directamente accesibles a la inspección geológica y geotécnica, que será constante a lo largo de todo su trazado. Los datos de instrumentación deberán estar correlacionados con estas observaciones geológicas de la excavación y el control de los parámetros de ejecución, siendo imprescindible la presencia de personal especializado responsable del seguimiento, evaluación e interpretación inmediata en la propia obra de todos los datos de auscultación. De esta forma, es posible la interpretación correcta de la auscultación y se agiliza la toma de decisiones y acciones correctivas necesarias.

Además de los citados trabajos de control, también será imprescindible el control geométrico de la excavación, que será realizado con el concurso de técnicas topográficas.

10.1 Inspección de frentes y hastiales de excavación

El control geotécnico de los frentes y hastiales en túneles convencionales tiene como objetivos:

- Valorar las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno, recopilando y registrando los datos obtenidos.
- Relacionar estos datos con los procedentes de la auscultación y ensayos realizados.
- Comprobar que el tipo de sostenimiento definido en el proyecto es el adecuado en función de la calidad geomecánica de la roca observada en el frente de excavación.

En el caso de los túneles efectuados con medios convencionales el especialista situado a pie de obra realizará en cada avance una inspección del frente y/o hastiales que le permitirá caracterizar el terreno que se excava. Con el fin de facilitar la labor del especialista y tener un seguimiento correcto del control geotécnico, la caracterización del macizo rocoso se recogerá en unas fichas en las que se indicará:

- La geología observada en el contorno de la excavación y en el frente
- El tipo de roca que se observa
- Su densidad aproximada
- Grado de meteorización
- Presencia de agua
- Orientación, espaciamiento y estado de discontinuidades
- Resistencia a compresión simple

– RQD

Sobre la base de estos datos se determinarán los índices de calidad geomecánica (Q, RMR y GSI), caracterizando de esta forma el macizo rocoso.

Finalmente, y tras la caracterización del macizo, en la misma ficha se adjuntará la proposición del avance a efectuar y del sostenimiento a colocar. Igualmente se registrarán todos los datos procedentes de la auscultación que, a juicio del especialista, resulten relevantes.

10.2 Parámetros de control

La función básica de la auscultación es medir las consecuencias de la excavación efectuada en términos de movimientos en el terreno y las tensiones que se producen en el sostenimiento y el revestimiento, centrándose en el control a lo largo del túnel de los siguientes parámetros:

- Desplazamientos en el contorno del túnel: medición de la deformación relativa entre puntos interiores de la sección excavada (convergencias). Se controlará tanto el valor de la deformación como la velocidad de deformación, instalándose a lo largo de los túneles una serie de estaciones de convergencia. Además, se intensificarán las medidas mediante métodos topográficos.
- Movimientos en el interior del terreno: control de la deformación en el trasdós de la excavación como respuesta a la relajación tensional del terreno o descompresión. Se instalarán extensómetros de varillas y, si fuera necesario, inclinómetros.
- Movimientos de propiedades colindantes: control de los movimientos mediante regletas y clavos de nivelación topográfica si hubiera edificios o estructuras afectados.
- Determinación de las tensiones en hormigón y armaduras: Medición de las presiones radiales y tangenciales ejercidas por el terreno sobre el sostenimiento. Se podrán emplear células de presión embebidas en el hormigón y extensómetros de cuerda vibrante en las armaduras para observar la variación de tensión en las mismas.

10.3 Secciones de control

La ubicación de las secciones de auscultación y de los instrumentos de medición que se proponen en este apartado son orientativas, siendo susceptibles de ser modificadas si así lo indicase el comportamiento que se vaya observando a lo largo de la ejecución del túnel o la Dirección de Obra.

Se han previsto dos tipos de secciones de auscultación: sección de control normal y sección de control intensivo.

10.3.1 Sección de control normal

Tienen por finalidad medir las convergencias en una sección. También se conocen como secciones de convergencia y están formadas por pernos de convergencia distribuidos en toda la sección. Todos los pernos de lectura de convergencia deberán ir provistos de dianas.

En el túnel principal estas secciones estarán formadas por cinco pernos de convergencia distribuidos en toda la sección de la siguiente forma:

- El primer perno de cada sección se situará en la clave del túnel y dos en los hastiales a una altura aproximada de 2 m sobre la cota de avance.
- Los otros dos pernos se colocarán en los hastiales a una altura aproximada de 1,5 m sobre la cota de solera, inmediatamente a la ejecución de destroza.

En el caso de las galerías auxiliares el número de pernos a instalar será de tres, colocándose el primer perno en la clave de dicha galería y uno en cada uno de los hastiales.

La medida de convergencias a realizar es la distancia entre los dos puntos de los hastiales y de cada uno de estos con la clave. El criterio de signos que se utilizará será el siguiente:

- Convergencia positiva: cierre de la sección.
- Convergencia negativa: apertura de la sección.

Se controlará tanto el valor de la deformación como la velocidad de deformación, instalándose a lo largo del túnel una serie de secciones de convergencia. Dicho control es suficiente, ya que realmente lo que se busca es conocer si la deformación se estabiliza y el tiempo que tarda en hacerlo.

En aquellas zonas especialmente conflictivas se podrá intensificar la medida mediante métodos topográficos de “Nivelación en clave”. Los resultados se representarán en una serie de curvas que muestren la convergencia y la velocidad de convergencia en función del tiempo y de la distancia al frente.

La sección de medida debe colocarse lo más rápidamente posible tras la excavación, ya que de lo contrario se perderían gran parte de las deformaciones producidas.

Las medidas de convergencia se reflejarán en un registro de toma de resultados en donde se indicarán los siguientes datos:

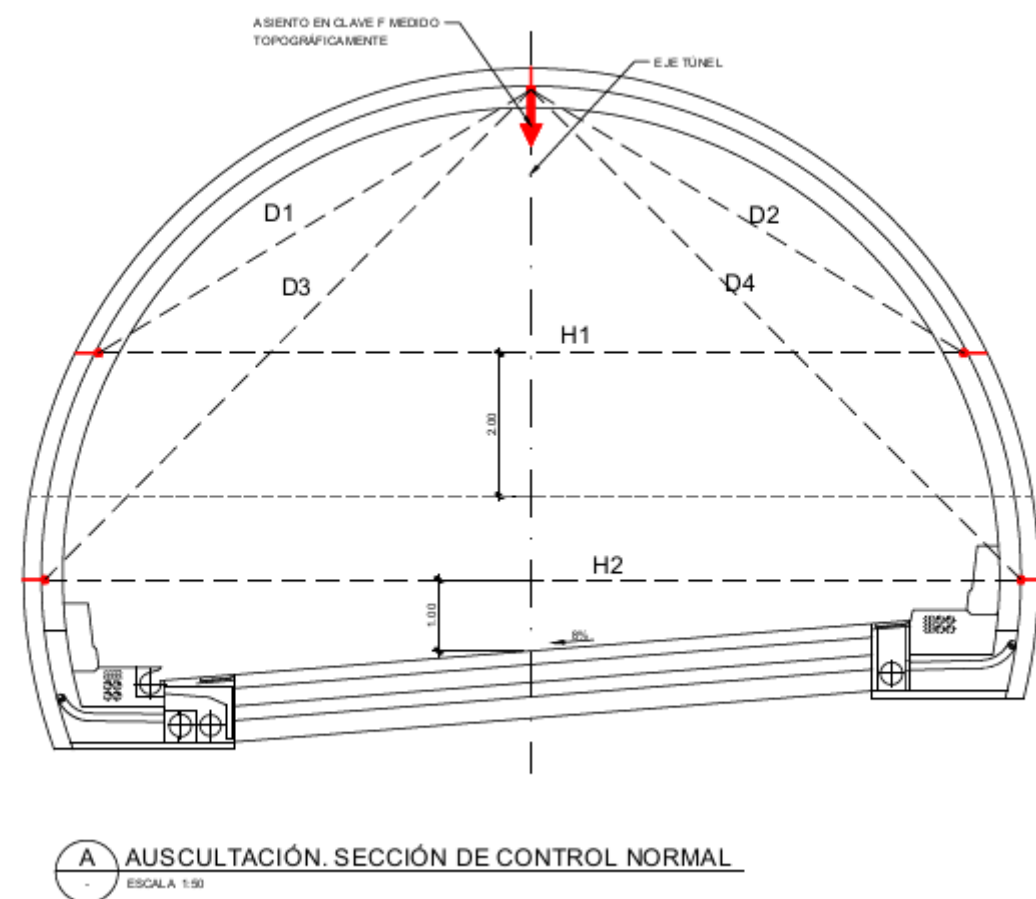
- Identificación del tajo
- Fecha de excavación
- Número de la sección instrumentada
- Punto kilométrico de la sección instrumentada
- Cobertera de la excavación
- Tipo de terreno excavado
- Calidad del macizo atravesado
- Sección tipo instalada
- Croquis de la sección con indicación de las lecturas a realizar
- Distancia al frente al realizar la primera lectura
- Fecha de la lectura realizada
- Lectura expresada en décimas de milímetros
- Fecha de la completa y correcta ejecución del sostenimiento

En el túnel principal las secciones de convergencia se colocarán sistemáticamente cada 25 m del túnel. A criterio de la Dirección de Obra, estas distancias pueden variar, pero en ningún caso, dicha distancia será superior a 40 m, pudiéndose reducir si fuera necesario hasta un mínimo de 10 m en aquellas zonas donde se prevean mayores dificultades como cavernas o zonas cercanas a fallas.

También se deberá instalar al menos una sección de medida en los 10 primeros metros de túnel con el fin de controlar los movimientos en la zona de emboquille.

En las galerías auxiliares y en los tramos en mina de los ramales de conexión se deberá colocar al menos 1 sección de convergencias por cada uno de estos elementos.

Las mediciones se empezarán a realizar a una distancia máxima del frente de 2 pases. En todo caso, las mediciones se realizarán dentro de las 24 h siguientes a la finalización del sostenimiento de dicha sección.



LEYENDA
H= CONVERGENCIA HORIZONTAL
D= CONVERGENCIA DIAGONAL
F= ASIENTO EN CLAVE

SIMBOLOGÍA		Nº Uds/Sección de control
Pc	↓	Normal
Dc	↓	5
	PERNO DE ANCLAJE PARA CONVERGENCIAS	5
	DIANA DE CONVERGENCIAS	5

Figura 48: Sección de control normal

10.3.2 Sección de control intensivo

Tienen por objetivo medir convergencias de la sección, deformaciones del terreno alrededor de la misma y la presión total en el sostenimiento. Estas secciones se instalarán complementariamente a las medidas de convergencia efectuadas mediante las secciones de control normal en aquellos puntos donde se necesite realizar un control más exhaustivo de la excavación.

En el túnel principal se instalarán 5 pernos de convergencia, 5 dianas ópticas, 6 células de carga de presión total y 3 extensómetros de varilla.

En las galerías auxiliares se instalarán 3 pernos de convergencia, 3 dianas ópticas, 4 células de presión total y 1 extensómetro de varillas.

En caso de considerarse necesario se podrán instalar piezómetros con manómetro tipo Bourdon. Mediante dichos piezómetros se medirá la presión del agua en la boca de un taladro.

Para las medidas de movimientos en el interior del macizo, el criterio de signos que se utilizará es el mismo que el adoptado en las secciones de control normal. Al igual que en dichas secciones, los resultados se representarán en una serie de curvas deformación - tiempo y deformación - distancia al frente.

La sección de medida debe colocarse lo más rápidamente posible tras la excavación, ya que de lo contrario se perderían gran parte de las deformaciones producidas.

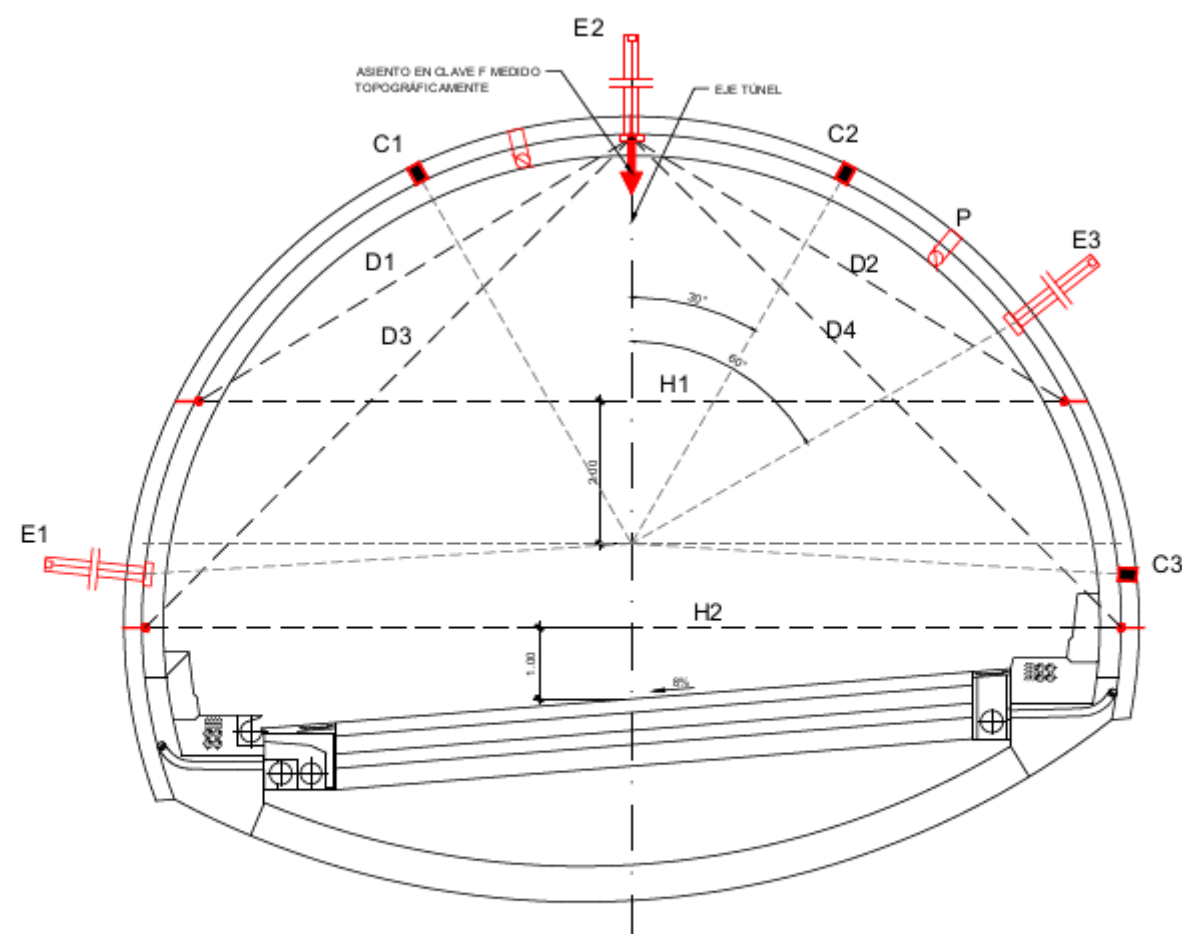
Las medidas efectuadas en las secciones de control intensivo se recogerán en un registro de lecturas, que además deberá contener los datos mencionados en el registro descrito anteriormente para las secciones de control normal.

En el túnel principal las secciones de control intensivo se colocarán cada 100 m. Asimismo, se colocarán este tipo de secciones en zonas donde se prevean mayores dificultades geotécnicas (fallas y cercanías a estructuras subterráneas), en los cambios de litología y, eventualmente, en otros puntos que la Dirección de Obra pudiera considerar de interés.

Cuando coincida una sección de control intensivo con una sección de control normal se colocará únicamente la primera, que a su vez incluye medidas de convergencia.

Las mediciones se empezarán a realizar a una distancia máxima del frente de 2 pases. En todo caso las mediciones se realizarán dentro de las 24 h siguientes a la finalización del sostenimiento de dicha sección.

La instalación de las células de carga se realizará al mismo tiempo que la ejecución del sostenimiento. Los extensómetros se instalarán a una distancia del frente situada entre medio y un diámetro de excavación (aprox. de 8 a 15 m) y, en todo caso, dentro de las 24 h siguientes a la finalización de la instalación del sostenimiento de dicha sección.



A AUSCULTACIÓN. SECCIÓN DE CONTROL INTENSIVO
ESCALA 1:50

LEYENDA	
H=	CONVERGENCIA HORIZONTAL
D=	CONVERGENCIA DIAGONAL
F=	ASIENTO EN CLAVE
E=	3 EXTENSÓMETROS DE VARILLAS (L=7.00, 5.00 Y 3.00m)
C=	CELULAS DE PRESIÓN RADIAL Y TANGENCIAL
P=	PIEZÓMETRO

SIMBOLOGÍA		Nº Uds/Sección de control
		Intensivo
Cp		CELULA DE PRESIÓN TOTAL DE CUERDA VIBRANTE
Ext		EXTENSÓMETRO DE VARILLA
Pb		PIEZÓMETRO TIPO BOURDON
Pc		PERNO DE ANCLAJE PARA CONVERGENCIAS
Dc		DIANA DE CONVERGENCIAS

NOTAS:
1.- CERCA DE LA UBICACIÓN DE LOS PERNOS DE ANCLAJE SE DEBERÁN INSTALAR TAMBIÉN DIANAS DE CONVERGENCIA PARA PODER REALIZAR UNA AUSCULTACIÓN ÓPTICA CON TOPOGRAFÍA DE PRECISIÓN.
2.- EN ZONAS DE BAJO RECUBRIMIENTO DE ROCA (VEGA DE LAMIAKO) SE INSTALARÁN 2 PIEZÓMETROS.

Figura 49: Sección de control intensivo