

ANEJO N° 9

Túneles y obras subterráneas

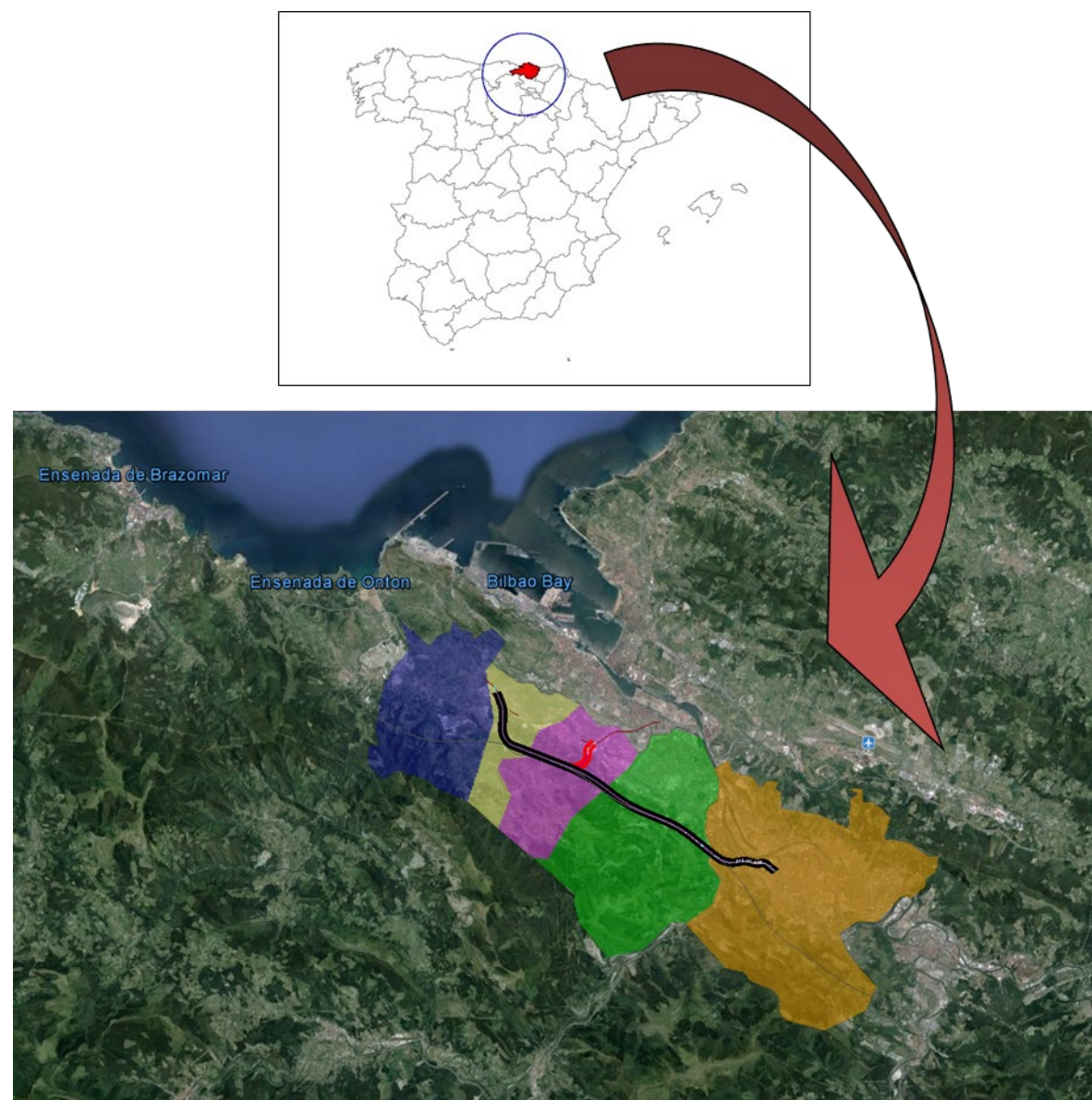
Índice

1 Introducción	1		
2 Descripción de las conexiones	1		
2.1 Alternativa A	2		
2.1.1 Alternativa A	3		
2.2 Alternativa B	4		
3 Recorrido geológico-geotécnico por la traza	6		
3.1 Unidades Litoestratigráficas	6		
3.1.1 UNIDAD ArL. Areniscas de grano fino y limolitas calcáreas. Formación Ereza	6		
3.1.2 UNIDAD L. Lutitas (limolitas) con pasadas areniscosas	6		
3.1.3 UNIDAD C. Calizas de Arraiz y C-1Calizas Impuras	7		
3.1.4 Unidad D. Dique Silicificado	7		
3.1.5 UNIDADES Qtac y Qtan. Terrazas aluviales antigua y actual	7		
4 Secciones tipo	8		
4.1.1 Sección libre	8		
4.1.2 Sección geométrica	8		
4.1.3 Drenaje	10		
5 Procedimiento constructivo	11		
5.1 Excavación mediante rozadora	11		
5.2 Excavación mediante Perforación y Voladura	12		
5.3 Fases de excavación método convencional	12		
5.3.1 Ciclos de trabajo	12		
6 Secciones tipo de sostenimiento	14		
6.1 Predimensionamiento según el índice Q de Barton	15		
6.2 Predimensionamiento según el índice RMR de Bieniawski	16		
6.3 Sostenimientos propuestos	17		
7 Tratamientos especiales	18		
7.1 Tratamientos de estabilidad en bóveda y frente	18		
8 Impermeabilización y drenaje	19		
9 Revestimiento	20		
10 Salidas de emergencia	21		
11 Emboquilles	22		
11.1 Emboquille Ramal Serantes-Tronco	22		
11.1.1 Alternativas A1 y A2	22		
11.1.2 Alternativa B	22		
12 Auscultación	23		
12.1 Magnitudes a controlar e instrumentos	23		
		12.2 Secciones de instrumentación	23
		12.2.1 Túnel convencional N.A.T.M.	23
		12.2.2 Pantalla de pilotes en emboquilles	24
		12.2.3 Edificios y estructuras existentes	24
		12.3 Definición de umbrales y frecuencias	24
		12.4 Medidas de actuación	24
		12.5 Tratamiento de la información y elaboración de informes	24
		13 Seguridad en túneles	25
		13.1 Prevención de acceso no autorizado	25
		13.2 Resistencia al fuego y protección frente a incendios	25
		13.3 Evacuación, Zonas seguras y de rescate	26
		13.4 Trazado y sección transversal	29
		14 Tramificación	31
		14.1 Alternativa A1y A2	31
		14.2 Alternativa B	31
		14.3 Tronco	32
		15 Rendimientos	33
		15.1 Alternativa A1-A2	33
		15.1.1 Ramal Serantes Tronco	33
		15.1.2 Conexión Serantes 1	33
		15.1.3 Conexión Serantes 2	34
		15.2 Alternativa B	34
		15.2.1 Ramal Serantes Tronco	34
		15.2.2 Conexión Serantes 1	34
		15.2.3 Conexión Serantes 2	35
		15.3 Tronco VSF	35
		15.4 Conclusiones	36

1 Introducción

El presente anejo, extracta y complementa al “Estudio Informativo de la Variante Sur ferroviaria de Bilbao. Fase 1” redactado por FULCRUM en 2019, y tiene por objeto analizar los túneles y obras subterráneas de las diferentes alternativas de conexión del Túnel del Serantes con el tronco de la VSF en el ámbito de Ortuella.

La zona de actuación del Estudio original abarcaba las comarcas de Abanto y Ciérvana, Ortuella, Valle de Trápaga-Trapagaran, Barakaldo y Bilbao, tal y como se muestra en las siguientes figuras:



El actual documento se ciñe a las obras del Ramal de conexión entre la VSF y el túnel del Serantes, limitándose a los Términos Municipales de Ortuella y Abanto-Ziérbenas.

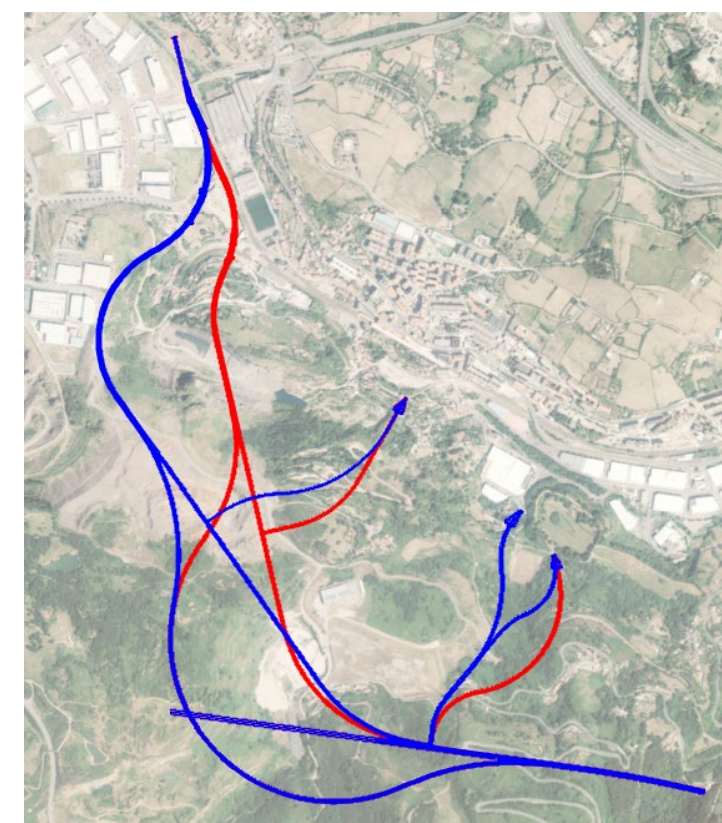
El objeto es determinar la mejor opción para la puesta en servicio del túnel de Serantes a corto plazo, túnel que ya se encuentra ejecutado y que permitiría un itinerario alternativo a las mercancías ferroviarias del Puerto de Bilbao. Así pues las alternativas propuestas tienen como inicio la conexión con el túnel de Serantes, y será la longitud, ubicación y final de conexión de las trazas lo que diferencie cada una de ellas.

2 Descripción de las conexiones

De entre todas las alternativas analizadas, el presente documento desarrolla las dos que se considera se ajustan mejor al objetivo perseguido. Estas alternativas se denominan Alternativa A y Alternativa B.

En el marco del presente contrato se han encajado y analizado múltiples alternativas de trazado, todas ellas basadas en la Conexión Olabeaga recogida en el Estudio Informativo previo.

De entre todas las alternativas analizadas, el presente documento desarrolla las dos que se considera se ajustan mejor al objetivo perseguido. Ambas alternativas son idénticas en su primera mitad, desde la conexión con la infraestructura ya construida de acceso al Puerto bajo el Monte Serantes hasta aproximadamente el PK 4+250 del tronco de la VSF, dentro ya del Municipio de Barakaldo, donde ambas alternativas se separan.



Alternativa A

Alternativa B

El trazado en planta entre este punto y el PK 6+500 es similar en ambas, con una distancia máxima de 30 metros entre los ejes de ambas alternativas. Es a partir del PK 6+500 donde ambas alternativas desarrollan trazados en planta divergentes que vuelven a converger ya en el tramo Kadagua-Olabeaga.

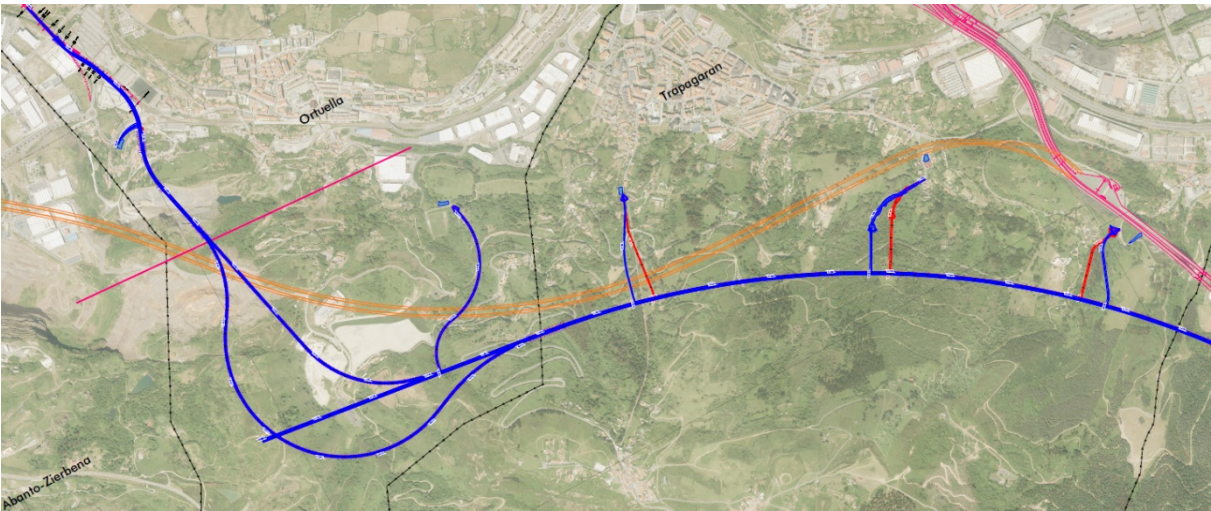
En perfil longitudinal de ambas alternativas es diametralmente opuesto en este tramo, ya que la Alternativa 1 cruza el Valle del Castaños en viaducto, mientras que la Alternativa 2 cruzaría bajo el cauce en falso túnel.

Esta diferencia de cotas en el tronco de la VSF al paso por el Valle del Castaños marca la diferencia entre ambas alternativas.

2.1 Alternativa A

En el marco del presente contrato se han encajado y analizado múltiples alternativas de trazado, todas ellas basadas en la traza recogida en el Estudio Informativo previo.

Esta alternativa presenta dos variantes denominadas Alternativa A1 y Alternativa A2. Ambas alternativas son idénticas en su primera mitad, desde la conexión con la infraestructura ya construida de acceso al Puerto bajo el Monte Serantes hasta aproximadamente el PK 4+250 del tronco de la VSF, dentro ya del Municipio de Barakaldo, donde ambas alternativas se separan.

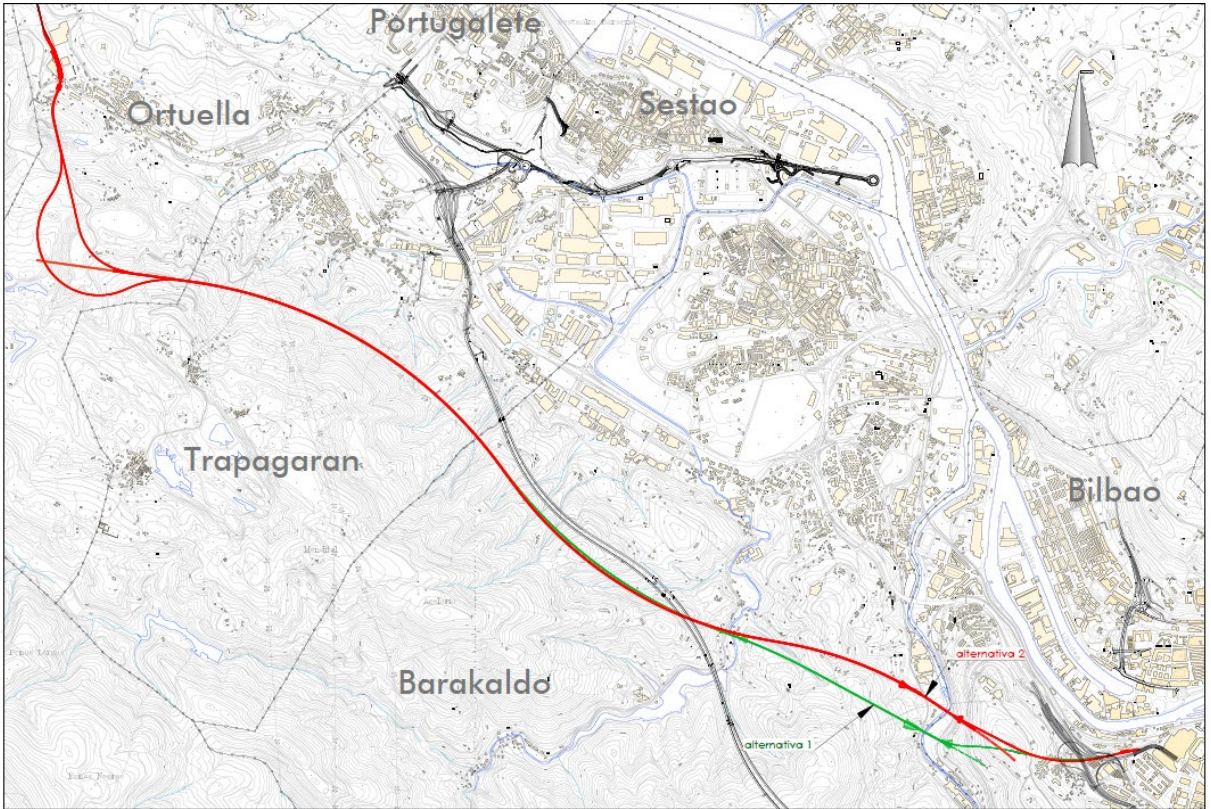


Alternativa A1 Alternativa A2

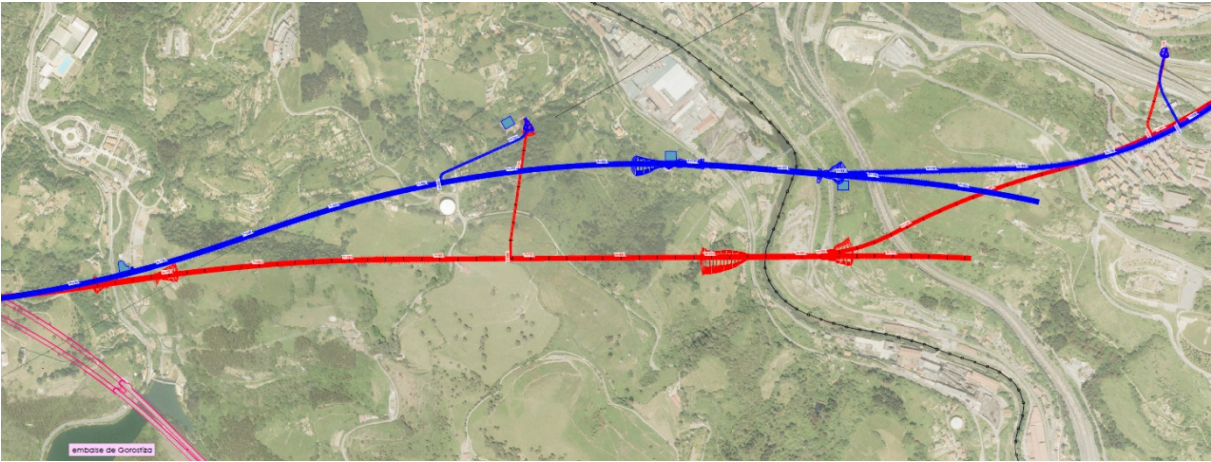
El trazado en planta entre este punto y el PK 6+500 es similar en ambas, con una distancia máxima de 30 metros entre los ejes de ambas alternativas. Es a partir del PK 6+500 donde ambas alternativas desarrollan trazados en planta divergentes que vuelven a converger ya en el tramo Kadagua-Olabeaga.

En perfil longitudinal de ambas alternativas es diametralmente opuesto en este tramo, ya que la Alternativa 1 cruza el Valle del Castaños en viaducto, mientras que la Alternativa 2 cruzaría bajo el cauce en falso túnel.

Esta diferencia de cotas en el tronco de la VSF al paso por el Valle del Castaños marca la diferencia entre ambas alternativas.



Vista general de ambas alternativas (Alternativa A1 en verde y Alternativa A2 en rojo)



Detalle del cruce del Castaños: Alternativa 1 en rojo y Alternativa 2 en azul

En ambas alternativas el trazado se desarrolla soterrado en la mayor parte de su longitud, ya sea en túnel en mina o en falso túnel (atendiendo en la medida de lo posible las alegaciones presentadas en la fase de Información Pública del Estudio Informativo previo. La Alternativa 1 sale a superficie únicamente en el cruce de los valles del Castaños y el Kadagua, que cruza en viaducto, mientras que la Alternativa 2 limita a la zona del Valle del Kadagua su trazado a cielo abierto.

El trazado se ha dividido en tres grandes ejes o zonas:

- Tronco de proyecto: Se trata del eje de mayor longitud, trazado con parámetros aptos para una Vp de 250 km/h y vía doble, que coincide con el tramo de VSF que a futuro podría integrar un trazado de

altas prestaciones que uniría la red de alta velocidad del País Vasco con Cantabria. Se diseña para tráfico mixto y doble ancho (1.435 mm-1668 mm)

- Ramal Serantes-Tronco: Se trata del trazado que conecta el anterior tronco con las obras ejecutadas ya del acceso al Puerto de Bilbao bajo el Monte Serantes. Sus parámetros de trazado son mucho más limitados, pensados para circulación únicamente de mercancías, con una velocidad máxima de 120 km/h. El ramal se desarrolla en vía doble, si bien, en su conexión al tronco de proyecto cuenta con dos ramales de vía única que articulan el “salto de carnero” que evita el cizallamiento. Se diseña en doble ancho también (1.435 mm-1668 mm).
- Ramal de Conexión Olabeaga: Se denomina así el tramo final de trazado, entre el viaducto del Kadagua y el soterramiento ferroviario ejecutado en Olabeaga, conectando así el tronco de altas prestaciones con las instalaciones ferroviarias existentes en Olabeaga. Está pensado para el tráfico de mercancías con velocidades inferiores a 120 km/h. La conexión se produce en el viaducto del Kadagua cizallando, para lo cual se incorporan los correspondientes aparatos de vía en el viaducto.

2.1.1 Alternativa A

Los puntos kilométricos singulares de esta alternativa se recogen a continuación:

RAMAL SERANTES. TRONCO	
Inicio de trazado (falso túnel existente)	0+000,000
Final falso túnel existente e Inicio falso túnel Serantes	0+206,778
Salida de emergencia peatonal 1	0+710,05
Final falso túnel Serantes e inicio túnel en mina	0+728,50
Final trazado (túnel)	1+181.479
EJE CONEXIÓN SERANTES 1	
Inicio trazado (túnel)	0+000,000
Final túnel vía doble	0+137,884
Final trazado (túnel)	1+266,380
EJE CONEXIÓN SERANTES 2	
Inicio trazado (túnel)	0+000,000
Final túnel vía doble	0+138,000
Final trazado (túnel)	2+194,479
TRONCO SERANTES - OLABEAGA	
Inicio trazado (túnel)	0+000,000
Salida de emergencia 2. Galería de ataque	0+800,000
APV conexión Serantes 1	0+774,501
APV conexión Serantes 2	1+166,440
Salida de emergencia peatonal 3	1+750,000
Salida de emergencia 4. Galería de ataque	2+750,000
Salida de emergencia 5. Galería de ataque	3+550,000
Salida de emergencia peatonal 6	4+550,000
Salida de emergencia 7. Galería de ataque	5+550,725
Final túnel e inicio de falso túnel	6+545,000
Inicio viaducto Castaños	6+582,000

RAMAL SERANTES. TRONCO	
Final viaducto Castaños	6+706,000 / 6+712,000 (según tipología viaducto)
Final sección falso túnel e inicio de túnel en mina	6+770,000
Salida de emergencia peatonal 8	7+700,000
Final túnel en mina e inicio de falso túnel	8+225,000
Inicio viaducto Kadagua	8+351,000
Final viaducto Kadagua	8+550,000 8+559,000 (según tipología viaducto)
Final sección falso túnel e inicio de túnel en mina	8+635,000
Final trazado (túnel)	8+965,665

RAMAL OLABEAGA	
Inicio trazado (sección cielo abierto)	0+000,000
Final sección falso túnel e inicio túnel en mina	0+084,000
Salida de emergencia Peatonal 9	0+975,000
Final túnel e inicio falso túnel	1+480,000
Inicio falso túnel existente	1+161,804
Final trazado (sección cielo abierto)	1+633,337

Por lo que se refiere a la sección tipo, el trazado se dividiría en los siguientes tramos:

PK inicio	PK final	Tipología	Sección tipo
0+000 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	0+206,778 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel existente	Vía doble (ee=4,10)
0+206,778 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	0+715 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel	Vía doble (ee=4.10)
0+715 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	1+171,479 (Eje 19 Ramal Serantes-Tronco)	Túnel en mina	Vía doble (ee=4.10)
0+137,884 (Eje 57 Ramal Serantes 1)	0+137,884 (Eje 57 Ramal Serantes 1) 2+056,869 (Eje 56 Ramal Serantes 2)	Túnel en mina	Transición 1-2 túneles
0+137,884 (Eje 57 Ramal Serantes 1)	1+163.814 (Eje 57 Ramal Serantes 1)	Túnel en mina	Vía única
2+056,869 (Eje 56 Ramal Serantes 2)	0+111,253 (Eje 56 Ramal Serantes 2)	Túnel en mina	Vía única
0+650 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	6+545 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	Túnel en mina	Vía doble
6+545 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	6+582 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	Falso túnel	Vía doble
6+582 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	6+712 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	Viaducto	Vía doble
6+712 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	6+770 (Eje 3 Tronco Serantes-Olabeaga)	Falso túnel	Vía doble

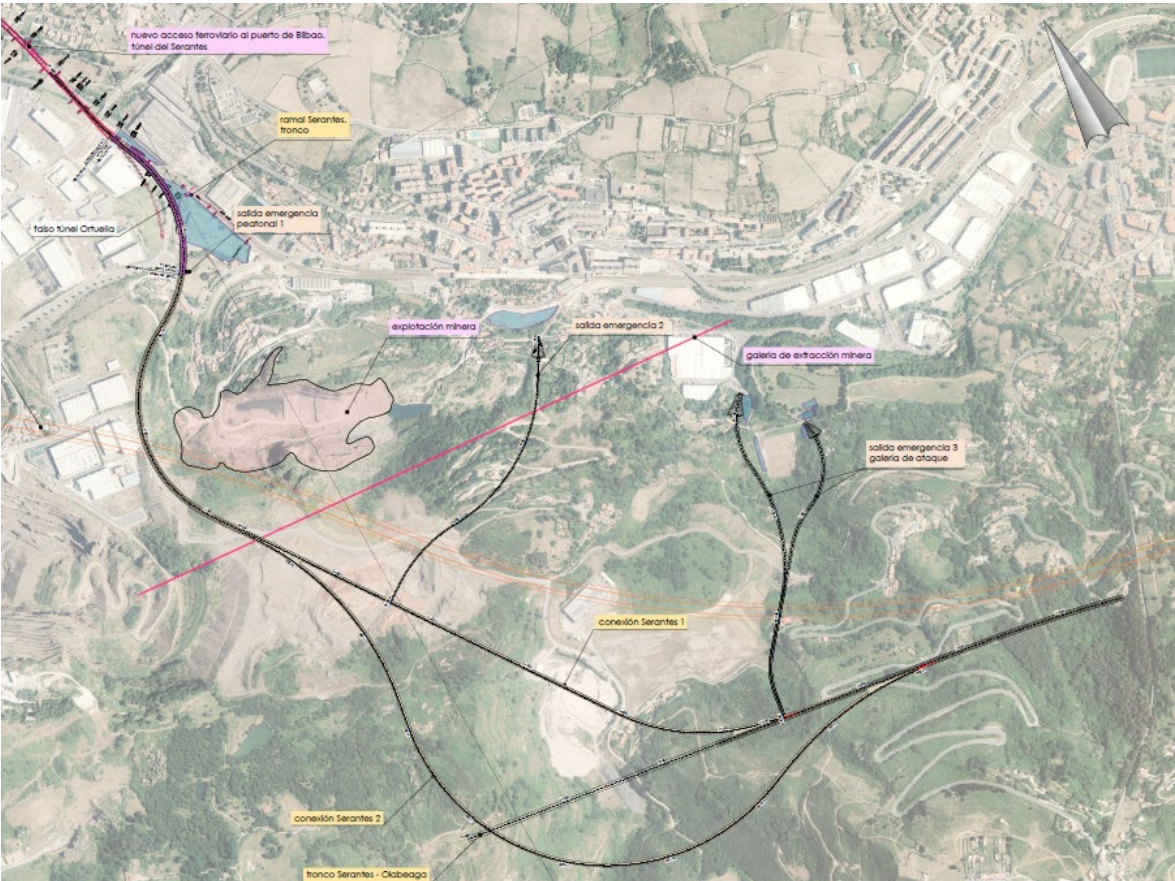
RAMAL SERANTES. TRONCO	
Inicio de trazado (falso túnel existente)	0+000,000
Final falso túnel existente e Inicio falso túnel Serantes	0+206,788
Salida de emergencia peatonal 1	0+707,00
Final falso túnel Serantes e inicio túnel en mina	0+727,253
Final trazado (túnel)	1+162.499
EJE CONEXIÓN SERANTES 1	
Inicio trazado túnel vía doble (entronque con Serantes 2)	0+000,000
Final túnel vía doble	0+135,000
Salida de emergencia 2	0+400,868
Final trazado ramal vía única (túnel)	1+180,000
Final trazado ramal (aparato)	1+313,781
EJE CONEXIÓN SERANTES 2	
Inicio trazado túnel tronco VSF	0+000,000
Inicio túnel vía única	0+125,000
Final túnel vía única (entronque con Serantes 1)	2+064.416
Final trazado vía doble	2+199,416
TRONCO SERANTES - OLABEAGA	
Inicio trazado (túnel)	0+000,000
Inicio tramo objeto del presente E.I.	0+630,000
Salida de emergencia 3. Galería de ataque	0+800,000
APV conexión Serantes 1	0+812,99
APV conexión Serantes 2	1+164,21
Final trazado E.I. variante en ortuella	1+250,000

Las secciones tipo que se suceden a lo largo del trazado son las siguientes:

PK inicio	PK final	Tipología	Sección tipo
0+000 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	0+206,788 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel existente	Vía doble (ee=4,10)
0+206,788 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	0+727,253 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel	Vía doble (ee=4,10)
0+727,253 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	1+162,499 (Eje 29 Ramal Serantes-Tronco)	Túnel en mina	Vía doble (ee=4,10)
0+000,000 (Eje 13 R. Serantes 1) 2+199,416 (Eje 12 R. Serantes 2)	0+135,000 (Eje 13 R. Serantes 1) 2+064,416 (Eje 12 R. Serantes 2)	Túnel en mina	Pantalón entronque
0+135,000 (Ej 13 Ramal Serantes 1)	1+180,000 (Eje 13 Ramal Serantes 1)	Túnel en mina	Vía única
2+064,416 (Eje 12 Ramal Serantes 2)	0+125,000 (Eje 12 Ramal Serantes 2)	Túnel en mina	Vía única
0+650 (Eje 34 Tronco Serantes-Olabeaga)	1+250 (Eje 34 Tronco Serantes-Olabeaga)	Túnel en mina	Vía doble

2.2 Alternativa B

Esta alternativa difiere de la Alternativa A en el trazado del Ramal Serantes-Tronco, así como en los ejes Conexión Serantes 1 y Conexión Serantes 2. El tronco de la VSF es idéntico en ambas alternativas.



Vista General de la Alternativa B

Los puntos kilométricos singulares de esta alternativa se recogen a continuación:

RAMAL SERANTES. TRONCO	
Inicio de trazado (falso túnel existente)	0+000,000
Final falso túnel existente e Inicio falso túnel Serantes	0+206,788
Salida de emergencia peatonal 1	0+592,00
Final falso túnel Serantes e inicio túnel en mina	0+600,000
Final trazado (túnel)	1+338.888
EJE CONEXIÓN SERANTES 1	
Inicio trazado túnel vía doble (entronque con Serantes 2)	0+000,000
Salida de emergencia 2	0+158,845
Final túnel vía doble	0+160,000
Final trazado ramal vía única (túnel)	1+265,000
Final trazado ramal (aparato)	1+376,461

EJE CONEXIÓN SERANTES 2	
Inicio trazado túnel tronco VSF	0+000,000
Inicio túnel vía única	0+125,000
Final túnel vía única (entronque con Serantes 1)	1+972,207
Final trazado vía doble	2+132,207
TRONCO SERANTES - OLABEAGA	
Inicio trazado	0+000,000
Inicio tramo objeto del presente E.I.	0+630,000
Salida de emergencia 3. Galería de ataque	0+800,000
APV conexión Serantes 1	0+812,99
APV conexión Serantes 2	1+164,21
Final trazado E.I. Variante en Ortuella	1+250,000

El trazado del tronco Serantes-Olabeaga es común para ambas alternativas y ya se encuentra descrito en el apartado anterior.

PK inicio	PK final	Tipología	Sección tipo
0+000 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	0+206,788 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel existente	Vía doble (ee=4,10)
0+206,788 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	0+600,000 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	Falso túnel	Vía doble (ee=4.10)
0+600,000 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	1+338,888 (Eje 15 Ramal Serantes-Tronco)	Túnel en mina	Vía doble (ee=4.10)
0+000,000 (Eje 17 R. Serantes 1) 2+132,207 (Eje 16 R. Serantes 2)	0+160,000 (Eje 17 R. Serantes 1) 1+972.,207 (Eje 16 R. Serantes 2)	Túnel en mina	Pantalón entronque
0+160,000 (Ej 17 Ramal Serantes 1)	1+265,000 (Eje 17 Ramal Serantes 1)	Túnel en mina	Vía única
1+972,207 (Eje 16 Ramal Serantes 2)	0+125,000 (Eje 16 Ramal Serantes 2)	Túnel en mina	Vía única
0+650 (Eje 34 Tronco Serantes-Olabeaga)	1+250 (Eje 34 Tronco Serantes-Olabeaga)	Túnel en mina	Vía doble

3 Recorrido geológico-geotécnico por la traza

Los trazados de las Conexiones de Valle de Trápaga y Olabeaga se enmarcan en su mayoría dentro de la denominada Unidad de Yurre, si bien las zonas iniciales y finales se emplazan en materiales pertenecientes a la Unidad de Oiz. Ambas unidades se encuentran separadas por la *Falla de Bilbao – Alsua*, de dirección NO-SE y que constituye el principal accidente tectónico de la región.

No se conservan rocas de emplazamiento posterior a éstas, aunque sí se han reconocido en la zona depósitos cuaternarios de origen fundamentalmente aluvial y coluvial.

Es de reseñar también, la existencia de importantes acumulaciones de rellenos antrópicos, tanto de vías de comunicación, como de urbanizaciones, y de distintos tipos de vertidos, entre los que se incluyen los de procedencia minera, que pueden alcanzar espesores decamétricos.

Hidrogeológicamente, se debe destacar, por una parte las formaciones superficiales que conforman acuíferos detríticos, si bien de escasa entidad, salvo los aluviales y terrazas localizados en Trápaga y Olabeaga. Por otra, es preciso considerar los materiales mesozoicos impermeables (o muy poco permeables) por porosidad efectiva, pero semipermeables por fracturación; en ellos se ha llegado a observar desarrollo kárstico de más o menos entidad. Se cuenta con los resultados de una serie de ensayos de tipo Lugeon, efectuados en las campañas de campo llevadas a cabo para estudios anteriores a éste con el objeto de conocer la permeabilidad de los macizos rocosos atravesados.

Dentro de las problemáticas geotécnicas esperables a nivel general, se pueden destacar las relacionadas con la estabilidad de los taludes de emboquilles del túnel y de las galerías de emergencia; así como la presencia de cavidades cársticas que se puedan intersectar durante la ejecución de las obras subterráneas. Además, son de especial consideración algunas zonas de rellenos antrópicos y/o fluviales en las zonas más someras de los túneles y en zonas de emboquille.

Otra posible problemática geotécnica que se puede presentar es la existencia de galerías mineras no inventariadas. Debido a ello, durante el diseño de la traza se ha evitado emplazar el trazado cerca de las zonas mineras de Ortuella y Trápaga, así como de las más próximas a Bilbao en las zonas de Miribilla y Castrejana.

Parte de la problemática geotécnica que se puede presentar es la existencia de galerías mineras no inventariadas. En el marco de la presente actualización del Estudio Informativo se han recopilado los trazados de varias galerías mineras, obtenidas gracias a la colaboración del Museo de la Minería del País Vasco ubicado en Gallarta. Estas galerías se han reflejado en las plantas y perfiles longitudinales incluidas en el tomo de planos. Una de ellas ha condicionado especialmente el trazado de los dos ramales que conectan el tronco de la VSF con el túnel del Serantes.

Se trata de una galería de extracción minera que se utiliza actualmente para la extracción de agua de las minas a cielo abierto hasta el Río Granada en Ortuella. La galería condiciona el trazado en alzado de los ramales de conexión, dificultando encajar un perfil sin puntos bajos intermedios que impliquen la disposición de bombeos en el interior de los ramales.



Otro aspecto a tener en cuenta es el cruce del túnel en mina de la VSF con la Variante Sur metropolitana ya ejecutada, descrita en el apartado de “Otras infraestructuras de transporte”, la presencia de esta infraestructura obliga a adoptar una distancia de seguridad suficiente entre tubos, condicionando así el desarrollo en alzado del trazado ferroviario.

3.1 Unidades Litoestratigráficas

3.1.1 UNIDAD ArL. Areniscas de grano fino y limolitas calcáreas. Formación Ereza

Nos hallamos ante un conjunto detrítico formado por alternancias de limolitas calcáreas más o menos laminadas con areniscas también calcáreas de tonalidades marrones a grisáceas que presentan abundante bioturbación producida por la actividad orgánica que llega a obliterar la laminación original.

La mayor parte de los túneles proyectados dentro de las Conexiones Valle de Trápaga y Olabeaga (salvo las zonas de emboquilles de entrada y salida) se desarrolla esta formación.

3.1.2 UNIDAD L. Lutitas (limolitas) con pasadas areniscosas

Se trata fundamentalmente de argilitas y limolitas calcáreas oscuras, muy compactas, con finas intercalaciones de areniscas en niveles milimétricos a decimétricos, que marcan la estratificación. Se organizan generalmente en tramos de potencia métrica.

Únicamente la Conexión en Ortuella se desarrolla íntegramente en estos materiales. De las otras dos Conexiones estudiadas, sólo los emboquilles de las estructuras subterráneas se emplazan en ellos. En la mayor parte de la zona de estudio estos materiales se encuentran vinculados a la *Unidad de Oiz*.

En el sector de Olabeaga, esta formación corresponde a la denominada **Formación Tejera**.

3.1.3 UNIDAD C. Calizas de Arraiz y C-1 Calizas Impuras

Formada por calizas de aspecto masivo que se presentan en biostromos métricos. Presentan muy poca contaminación terrígena, en contraposición a la unidad C-1. Como macizo es susceptible de presentar karstificación, cualidad reconocida en sondeos de la zona, si bien presenta un carácter local y reducido sin la aparición de grandes cavidades, aún así, la presencia de karstificación condiciona el comportamiento hidrogeológico del conjunto.

La unidad C-1, está formada por calizas arenosas y margosas con cantidades variables de micas.

3.1.4 Unidad D. Dique Silicificado

Se trata de diques a menudo asociados a la formación Ereza, con origen hidrotermal y potencias de varios metros. Están acompañados de fuerte silicificación y tectonización de la roca encajante con venas de cuarzo de potencia milimétrica o decimétrica.

3.1.5 UNIDADES Qtac y Qtan. Terrazas aluviales antigua y actual

Estos materiales han sido identificados exclusivamente en el sector de Olabeaga, y se encuentran afectados únicamente por el final de la Conexión homónima. Son depósitos antiguos de origen fluvial que se depositan discordantes por encima del sustrato cretácico.

Está constituida por fragmentos redondeados (cantos y bloques), hasta de tamaño decimétrico, dentro de una matriz arenoso-limosa. Los bolos tienen un carácter eminentemente carbonatado, aunque existen bolos de naturaleza areniscosa.

Las terrazas actuales (**UNIDAD Qtac**) corresponden a formaciones que tapizan el sustrato rocoso en la zona baja de las vaguadas. Estos suelos corresponden en su mayoría a limos arenosos con proporciones variables de arcillas de color marrón. La potencia de estos depósitos aluviales es variable, estando generalmente comprendidas entre los 2 y 10 m. Ocasionalmente aparecen niveles de arenas de grano medio a fino con algo de limo y color amarillo.

Los niveles de terraza más antiguos (**UNIDAD Qtan**) o terrazas altas son los situados por encima del "fondo de los valles", no encontrándose en contacto con la actual cuenca fluvial. Son fácilmente diferenciables en cartografía por originar rasas muy visibles en fotografía aérea. Están localizadas en cotas de antigua acción fluvial y presentan características similares a las descritas para las terrazas actuales, aunque la proporción de finos que presentan suele ser menor, llegando los cantos a apoyarse unos sobre otros. La potencia oscila entre 1 y 6 metros. A la altura del Barrio de Santa Ana aparece una terraza "colgada."

4 Secciones tipo

La VSF de Bilbao conectará las instalaciones del Puerto de Bilbao con la infraestructura ferroviaria existente en el entorno de Olabeaga en primera fase. En segunda fase permitiría conectar con la línea Bilbao-Miranda de mercancías y con el ramal del TAV Bilbao-Vitoria.

Por ello, la sección tipo adoptada para el tronco de la VSF está marcada por el tráfico mixto mercancías-viajeros y el ancho doble, ancho ibérico y ancho internacional. Se diseña en doble vía.

La parte de infraestructura ya construida, conocida como Túnel del Serantes, cuenta también con doble vía y tiene ya implantada en buena parte de su longitud una superestructura de vía y electrificación compatible con los tráficos de mercancías en ancho ibérico e internacional. Por tanto, el ramal que conecta el tronco con el túnel del Serantes deberá plantearse también en doble ancho.

En el extremo contrario, el punto de conexión previsto en Olabeaga para la VSF dispone de una sola vía y, en principio, conecta con plataforma de único ancho. Se preveía por tanto una sección de vía única y ancho RENFE. En el presente Estudio Informativo se contempla una sección de vía única, pero con tercer hilo, en previsión de situaciones operacionales provisionales que pudieran darse en el marco de la implantación de futuras infraestructuras.

De acuerdo con todo ello, y atendiendo a la "Norma Adif Plataforma (NAP) Túneles 2-3-1.0+M1 (Junio 2018), al tratarse de una línea nueva de ancho mixto (1.435 mm-1668 mm) los gálibos de implantación de obstáculos a tener en cuenta son los recogidos en las secciones contempladas en dicho documento y los gálibos GC y GEC 16 de la Instrucción Ferroviaria de Gálibos (Orden FOM/1630/2015), son coherentes con la norma de gálibos UNE-EN 15273:2011.

Un segundo condicionante a tener en cuenta en el tronco susceptible de recibir a futuro circulaciones en alta velocidad de hasta 250 km/h es el cumplimiento de las Recomendaciones del Ministerio de Fomento para "dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros", a este respecto, para una velocidad de 250 km/h y un túnel en vía doble, la sección mínima de túnel (m^2) para una variación máxima de presión durante el periodo de tránsito del tren en el túnel, $Dp(t)$, de 10 KPa es de $75m^2$.

Las secciones adoptadas en el presente estudio, y recogidas en el Documento de Planos respetan estas condiciones

4.1.1 Sección libre

La sección libre del túnel debe justificarse partiendo de las condiciones de salud y confort según criterios aerodinámicos y dependiendo de la velocidad máxima de circulación admisible según la geometría de trazado.

La velocidad máxima admisible para este proyecto depende del tramo considerado, siendo la más baja de 80 km/h en el tramo inicial de conexión con el túnel de Serantes, y de 130 km/h para la circulación de trenes de mercancías en el resto del túnel. Atendiendo a dicha velocidad, y según la normativa vigente, no se considera necesario realizar cálculos aerodinámicos de salud y confort.

A pesar de ello, en ambas alternativas, hay un tramo que en un futuro será común con la Variante Sur Ferroviaria. Si se toma en consideración solo este tramo por el que circularán trenes de Alta Velocidad, según criterios aerodinámicos podrían circular trenes con velocidades mínimas de 300 km/h.

Sin embargo, ese tramo de túnel está integrado en uno de mayor longitud en el cual existen cambios de secciones de vía doble a vía única, que condiciona el cálculo aerodinámico del túnel. Atendiendo a estos condicionantes será necesario realizar en fases posteriores a este Estudio Informativo un estudio detallado empleando un programa específico tipo Thermotun o algún otro de similares características.

A pesar de ello, para la definición de la sección libre del túnel se ha tenido en cuenta tanto cuestiones geométricas como de espacio para otros elementos e instalaciones. Se toma la recomendación de la NAP 2-3-1.0 +M1 de 2018, que dice que la sección libre mínima recomendada para una longitud de túnel de vía doble mayor de 4 km es de $85 m^2$.

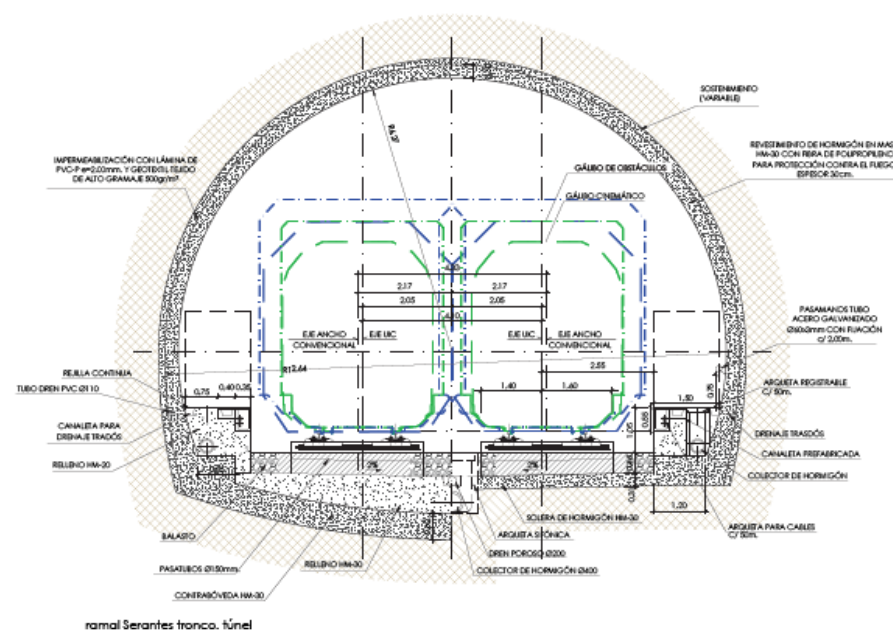
4.1.2 Sección geométrica

Para la definición geométrica de la sección tipo se han tomado los siguientes valores:

- Túnel de ancho mixto de triple hilo
- Gálibo uniforme GC y GEC16
- Distancia entre ejes de 4,7 m.
- Cota de centro de círculo a 2,8 m sobre la cabeza de carril.
- Nivel de paseo a 55 cm sobre la cota de carril del hilo bajo.
- Acera a ambos lados del túnel de vía doble, con ancho de acera total de 1,20 m en cada una de ellas, y en el caso de vía única acera a un lado de 1,95 de ancho y pasillo transitable en el otro lado de 1,75 m.
- Vía en placa.

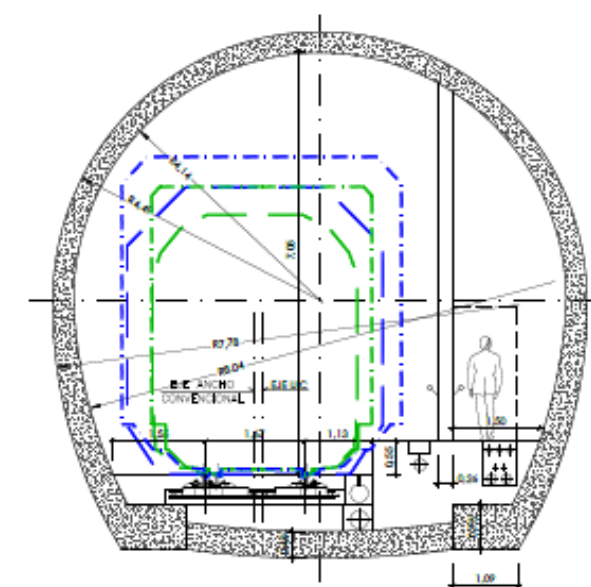
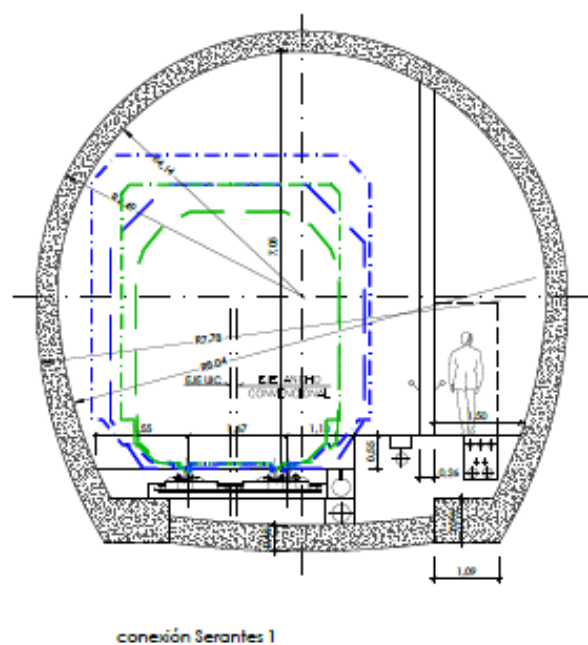
Cuando el terreno atravesado presente peores condiciones geotécnicas se ejecutará una contrabóveda con geometría semicircular. Si las condiciones geotécnicas son favorables, la solución planteada es una solera recta.

Las secciones de vía doble (con y sin contrabóveda), proyectadas para el Tronco se muestran a continuación)

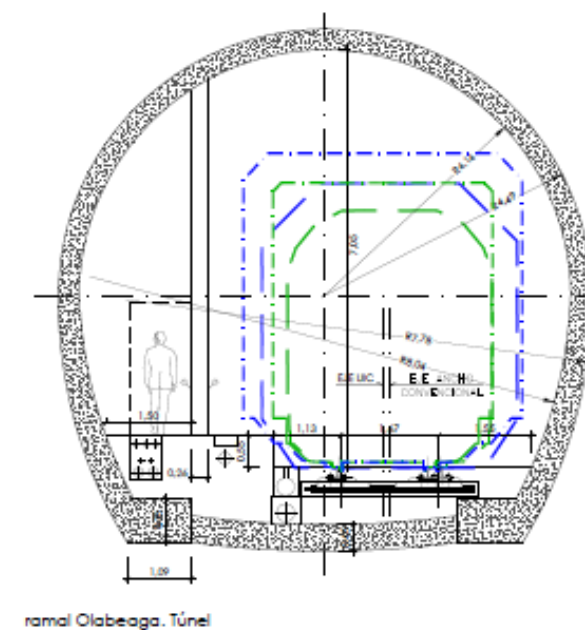


Sección tipo túnel vía doble con contrabóveda

Las secciones de vía única (con y sin contrabóveda) proyectadas para las Conexiones del Serantes y el Ramal Olabeaga se muestran a continuación:



conexión Serantes 2



ramal Olabeaga, Túnel

4.1.3 Drenaje

Para el túnel de doble vía, en el caso de agua de infiltración se incluye drenes transversales de 110 mm, canaletas laterales en cada acera de 30 cm de ancho con tapa y un colector central de 400 mm para infiltración, con arquetas cada 50 m y conexión a arquetas desde drenes de trasdós y canaletas con tubos de 110 m. En el caso del drenaje de vertidos, se han diseñado una media caña lateral en cada lado para la recogida y canalización de vertidos, cada 50 m se colocan arquetas sifónicas que se conectan con una arqueta central. El colector principal en este caso es de 400 mm, suficiente para evacuar 100 l/s.

Para el túnel de vía única el drenaje del agua de infiltración es idéntico al de vía doble. Únicamente se ha modificado el drenaje de vertidos, que en este caso sólo incluye una media caña en un lateral, y el colector principal de vertidos es de 300 mm de diámetro interior.

Longitudinalmente, el agua de estos colectores discurre a lo largo del túnel en gravedad hasta las zonas de salida a superficie, es decir, en los viaductos. Existe una zona al inicio del túnel en mina en Ortuella donde se genera un punto bajo en la sección en falso túnel. Se acumula en este punto el agua procedente de ambos ramales (Conexión Serantes 1 y Conexión Serantes 2) y de la Salida de emergencia 1, por lo que será necesario realizar un bombeo desde este punto hasta el río ubicado al norte de la traza a unos 100 de distancia.

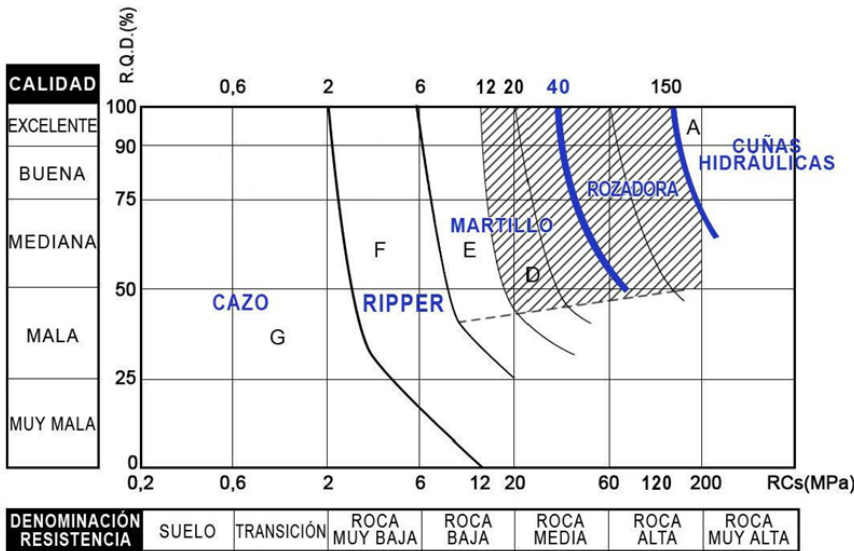
5 Procedimiento constructivo

Los túneles de ambas alternativas se excavarán en casi toda su longitud en areniscas de grano fino y limolitas calcáreas (ArL). Originalmente, en el primer Estudio Informativo se valoraba la alternativa de ejecutar las secciones de vía doble mediante una tuneladora. Esta sección en vía doble, comprendía tanto el tronco como uno de los ramales de conexión con el túnel del Serantes, por lo que era factible implantar la tuneladora en la zona inicial del trazado y acometer la excavación de los túneles desde ese punto. Con el trazado actual, los dos ramales de conexión con el Serantes se plantean en sección de vía única, con lo que la alternativa de la tuneladora queda descartada, al no existir longitud de túnel suficiente para amortizar el uso de tuneladora desde la conexión del Serantes, por lo que solamente se contempla la excavación mediante medios mecánicos convencionales.

Se plantea la construcción mediante métodos convencionales en toda la longitud de túnel, una vez descartada la opción del uso de tuneladoras. Los métodos convencionales de excavación propuestos son el uso de Perforación y Voladura y el uso de Rozadora. En ambos métodos el proceso de instalación de sostenimiento es similar y difieren solamente en el método de avance de la excavación.

5.1 Excavación mediante rozadora

La excavación de túneles con rozadoras o minadores se realiza generalmente en terrenos de resistencia media-blanda. En ocasiones, constituye un complemento adecuado a las máquinas de sección total, para conseguir secciones finales de determinadas obras, por ejemplo una caverna, imposibles de conseguir a sección completa por razones de coste. En el siguiente gráfico puede observar el ámbito de aplicación de las rozadoras en función del RQD y de la Resistencia a Compresión de la Roca. En el caso de los materiales afectados por la excavación de los túneles, en su mayoría, corresponde con la Unidad Litoestratigráfica Ar-L.



Abaco para la elección del método mecánico de excavación

Como características generales se puede señalar que las rozadoras son máquinas excavadoras que tienen un diseño modular, como consecuencia de que en muchos casos es preciso su montaje o reparación en espacios cerrados de dimensiones reducidas. Básicamente, 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. Además cuenta con un sistema de recogida y transporte de material que lo evacua desde el frente de arranque hacia la parte trasera de la máquina. Todo el conjunto va montado sobre un chasis móvil de orugas.

El gálibo del túnel o galería a excavar determina las dimensiones máximas de las rozadoras que se pueden emplear. Si la excavación se realiza en una sola fase, la rozadora deberá elegirse de modo que la altura máxima de corte sea igual o menor que la altura de la sección a excavar. No obstante, cuando la excavación se realiza por fases o a sección partida intervendrá en la elección el gálibo de la fase con sección mínima.

Para la elección del tipo de Rozadora a utilizar (tamaño, potencia, ...) es necesario llevar a cabo un estudio completo de las características de las rocas, con el fin de determinar su rozabilidad o facilidad del corte, y por lo tanto es preciso conocer los siguientes parámetros:

- Resistencia a compresión simple.
- Resistencia a tracción.
- Módulo de Young.
- Energía específica de rotura.
- Densidad.

Paralelamente es conveniente hacer un estudio petrográfico y evaluar la abrasividad del material.

Las ventajas que ofrece el empleo de rozadoras frente a las máquinas integrales de excavación (topos y escudos) presentan las siguientes ventajas:

- Flexibilidad y maniobrabilidad (pueden efectuar distintas secciones, cambios de trazado, excavaciones transversales a la principal, etc.).
- No se precisan grandes espacios para el montaje y desmontaje cuando finalizan la obra.
- Son más accesibles para el mantenimiento en el frente que una tuneladora.
- Menor coste de capital (tiene precios más razonables).
- El frente queda ventilado más rápidamente.
- El porcentaje de mano de obra especializada es menor.
- En rocas de mala calidad permite un mejor acceso al frente para efectuar los trabajos de sostenimiento
- Permite efectuar la excavación en fases, lo que es decisivo en terrenos de mala calidad.

5.2 Excavación mediante Perforación y Voladura

En este método, el avance del túnel se realiza mediante voladuras, en las que se perforan una serie de taladros en el frente del túnel, en los cuales se dispone material explosivo que se detona produciendo el arrancamiento de la sección perforada. Este método tiene la ventaja sobre las rozadoras que no se ve afectado por cambios en la dureza del material y la presencia de materiales de diferente dureza y resistencia no penalizan los rendimientos. La geometría de los taladros se puede adaptar a secciones de diferente tamaño y permite excavar secciones de reducidas dimensiones que con las rozadoras serían imposibles de excavar y también permite excavar grandes secciones en caverna en zonas de entronque de túneles, que con rozadora pueden ver limitado su tamaño.

5.3 Fases de excavación método convencional

El esquema habitual de excavación de túneles de estas dimensiones aconseja realizar la excavación por fases. El método constructivo propuesto, basado en la aplicación de métodos convencionales, define un esquema de ejecución en dos fases: avance y destroza. En las zonas de peores condiciones geotécnicas, se agregará una tercera fase, denominada contrabóveda. A continuación se exponen brevemente diversos aspectos relacionados con la excavación de cada una de estas fases:

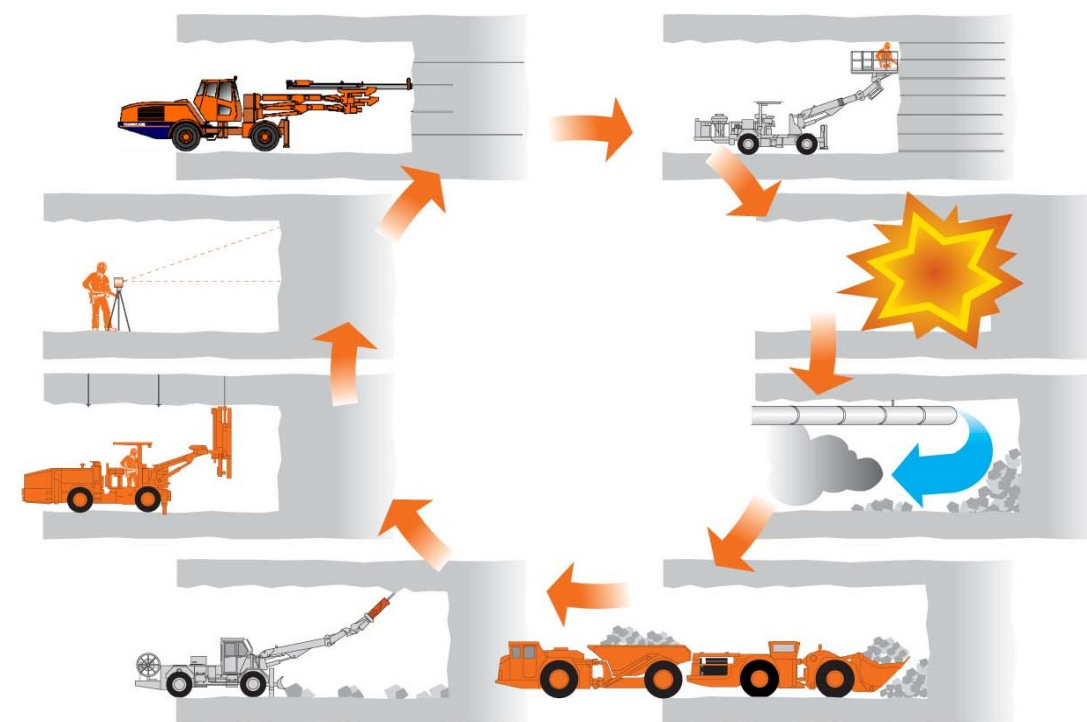
1. **AVANCE:** es la mitad superior de la sección del túnel (zona de bóveda). La sección de excavación de esta fase tiene una altura mínima desde clave de 6 m, en el caso del túnel de vía doble, suficiente para la correcta movilidad de la maquinaria necesaria.
2. **DESTROZA:** es la mitad inferior de la sección del túnel. Esta fase se comenzará a excavar a cierta distancia de la fase de avance o una vez calado el túnel. Si apareciesen problemas geotécnicos, la excavación de la destroza se podrá subdividir en bataches. En caso de hacerse en dos fases, en primer lugar se excavará una mitad de la sección, se sostendrá su hastial, para, a continuación, excavar la otra mitad y sostener el hastial restante. Otra posibilidad será excavar la zona central de la destroza, y posteriormente, excavar las zonas laterales sosteniendo sus respectivos hastiales. Las excavaciones en varias fases reducen al máximo la sección de excavación y, por lo tanto, aumentan la estabilidad.
3. En zonas de mala calidad geotécnica, se ejecutará una tercera fase de **CONTRABÓVEDA**, excavada bajo la destroza. Esta operación es norma de buena práctica habitual en obras de este tipo. Al atravesar terrenos de mala calidad geotécnica, como las zonas de falla, las tensiones horizontales son mayores que las verticales, por lo que se requiere dar continuidad a dichas tensiones entre hastiales a través de la contrabóveda.

5.3.1 Ciclos de trabajo

La ejecución de la excavación, sostenimiento, impermeabilización y revestimiento de los túneles se realizará de acuerdo a procesos cíclicos. A continuación se describen los ciclos de trabajo a seguir en cada etapa de ejecución:

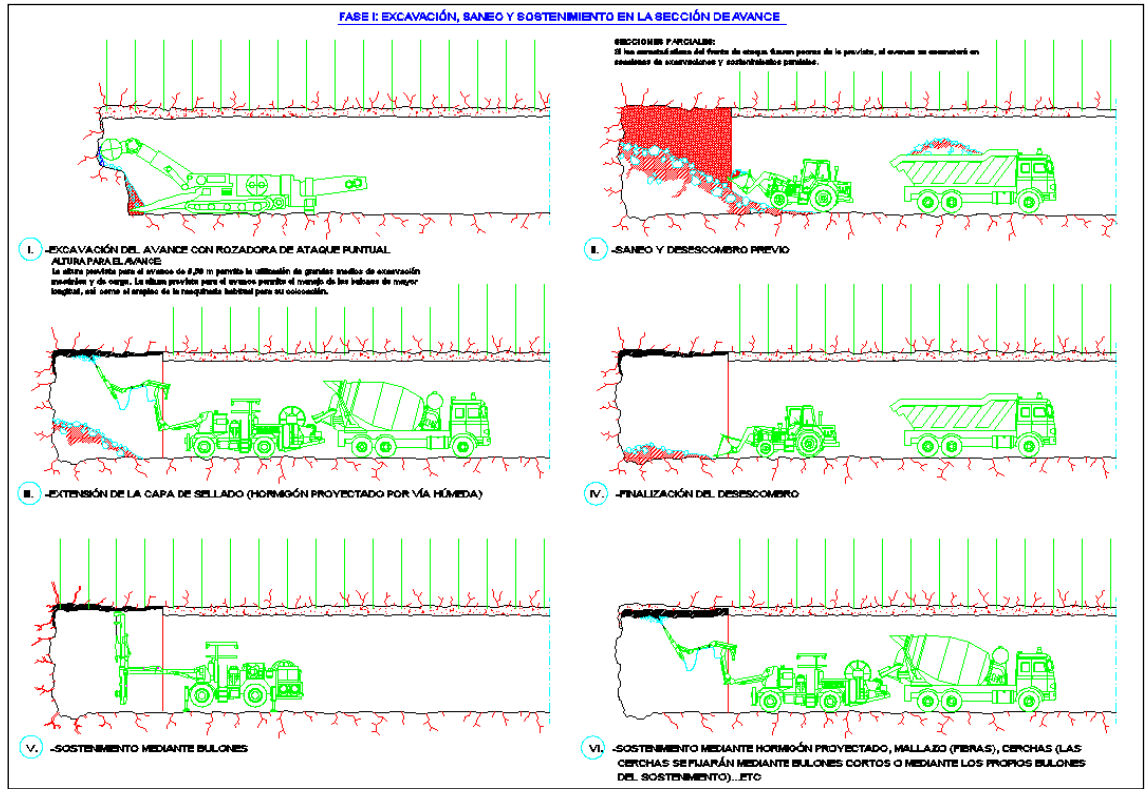
- 1) **Excavación y Sostenimiento:** La primera etapa en la ejecución de los túneles consistirá en la ejecución de los ciclos de excavación y sostenimiento. La excavación se plantea mediante rozadora. La altura del avance deberá permitir la circulación fluida de los vehículos y el manejo de los bulones si fuese necesario, con la longitud indicada (4 m en general), por lo que será del

orden de 6 m. La longitud de los pases de excavación dependerá de la calidad del terreno, variando en avance entre 0,5 m para las zonas singulares y las zonas de falla que cruzan transversalmente la traza, y los 3,5 m para las zonas más competentes. Simultáneamente a la excavación, se desarrollarán las labores de desescombrado. Una vez finalizado el pase de excavación, se colocará el sostenimiento previsto (hormigón proyectado, bulones, cerchas y mallazo). El ciclo finaliza con el replanteo del siguiente pase de excavación.

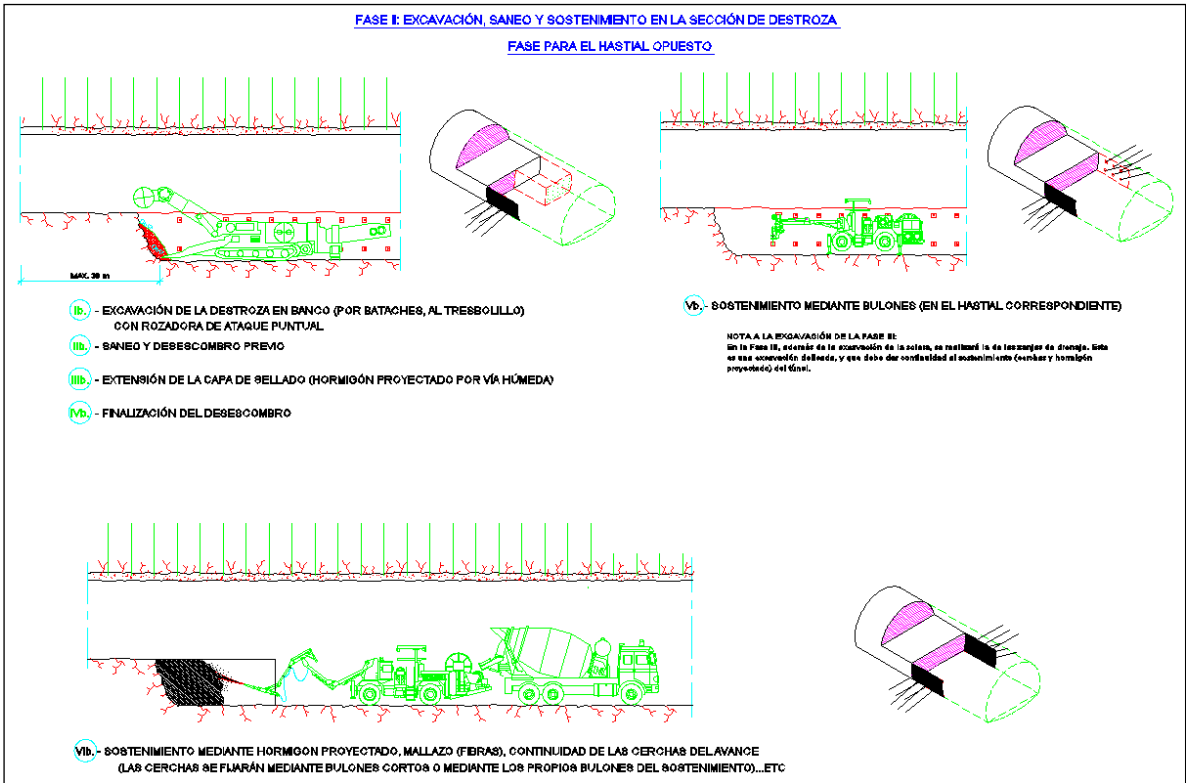


La fase de destroza se realizará por bataches, donde la longitud de excavación puede oscilar en función de la calidad del terreno entre 1 y 7-8 m. Finalizado el pase de excavación, se colocará el sostenimiento previsto (hormigón proyectado, bulones, cerchas y mallazo).

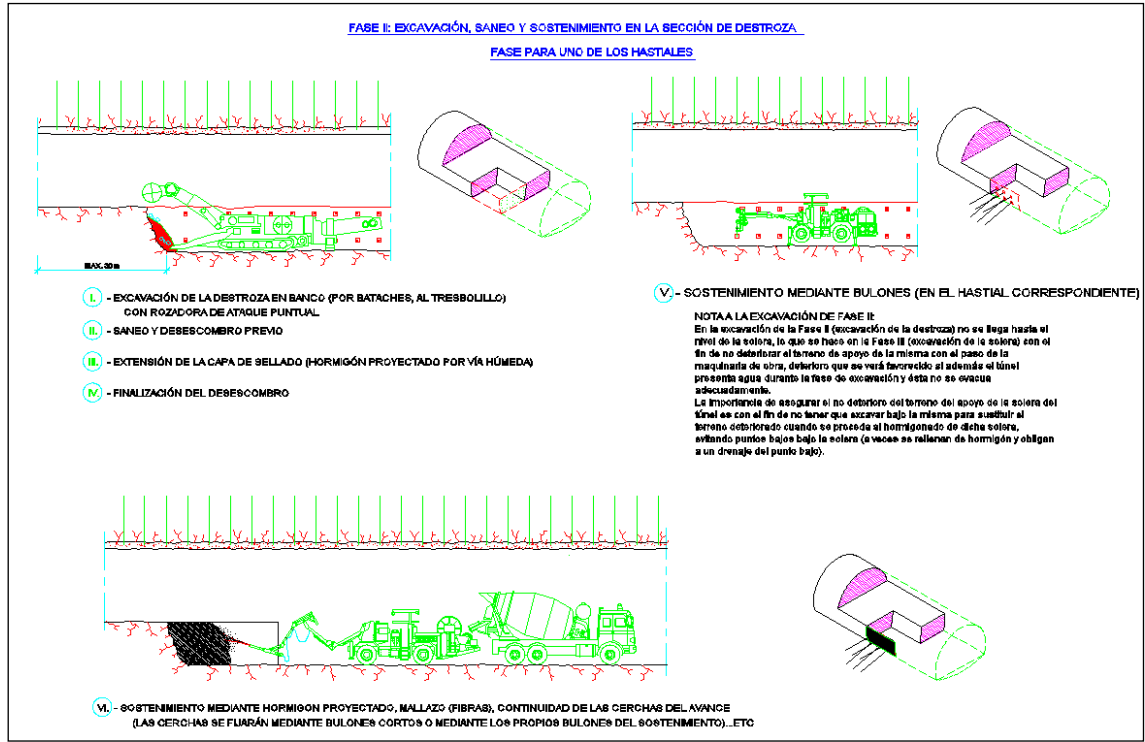
Mediante este proceso cíclico, se excavará tanto el avance como la destroza de los túneles y en su caso, la contrabóveda.



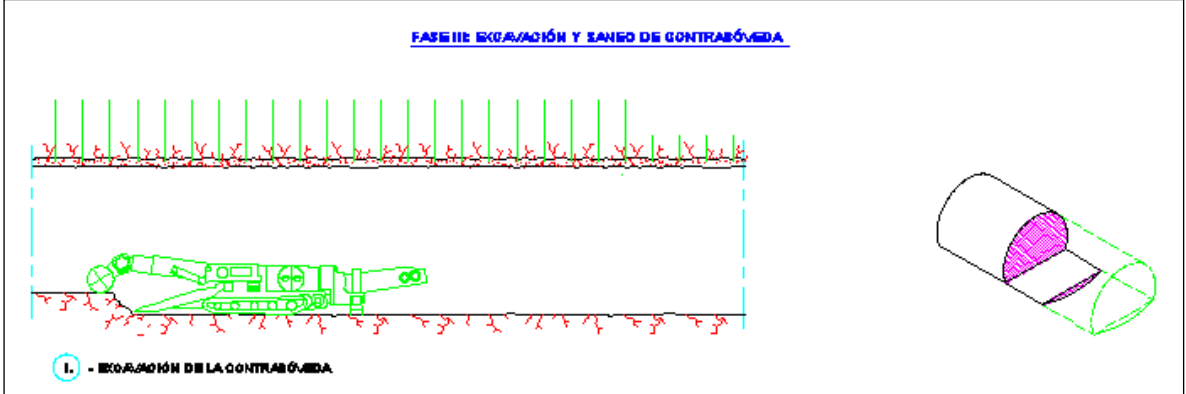
Fase de excavación en la sección de Avance



Fase de excavación en la sección de Destroza, hastial opuesto



Fase de excavación en la sección de Destroza, primer hastial



Fase de excavación de la contrabóveda

- 2) **Impermeabilización y revestimiento:** Una vez comprobadas las secciones transversales, se colocará la impermeabilización en todo el túnel y a continuación se hormigonará el revestimiento. Por último se inyectará en el trasdós de la clave con lechada de cemento para rellenar los huecos que hayan podido quedar en esta zona durante el hormigonado.

6 Secciones tipo de sostenimiento

Para realizar una estimación previa del sostenimiento a utilizar en las excavaciones a realizar en los túneles por métodos convencionales, se ha utilizado el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton, los cuales se ha correlacionado mediante la expresión:

$$Q = e^{\frac{RMR-44}{9}}$$

El sostenimiento a utilizar se puede estimar mediante el **ábaco de Barton**, que exige el conocimiento del cociente entre la *dimensión crítica de la excavación y el ESR*.

El **Índice Q de Barton** fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego. Se basó su desarrollo en el análisis de cientos de casos de túneles construidos principalmente en Escandinavia. Actualmente se denomina Nuevo Método Noruego de túneles al diseño de las excavaciones basándose directamente en los trabajos de Barton.

La Clasificación de Barton asigna a cada terreno un índice de calidad Q, tanto mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la del RMR, sino exponencial, y oscila entre Q=0.001 para terrenos muy malos y Q=1000 para terrenos muy buenos.

El valor de Q se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde cada parámetro representa lo siguiente:

RQD: es el índice Rock Quality Designation, es decir, la relación en tanto por ciento entre la suma de longitudes de testigo de un sondeo mayores de 10 cm y la longitud total. Barton indica que basta tomar el RQD en incrementos de 5 en 5, y que como mínimo tomar RQD=10.

J_n: varía entre 0.5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo.

J_r: varía entre 1 y 4, y depende de la rugosidad de las juntas.

J_a: varía entre 0.75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca.

J_w: varía entre 0.05 y 1, dependiendo de la presencia de agua en el túnel.

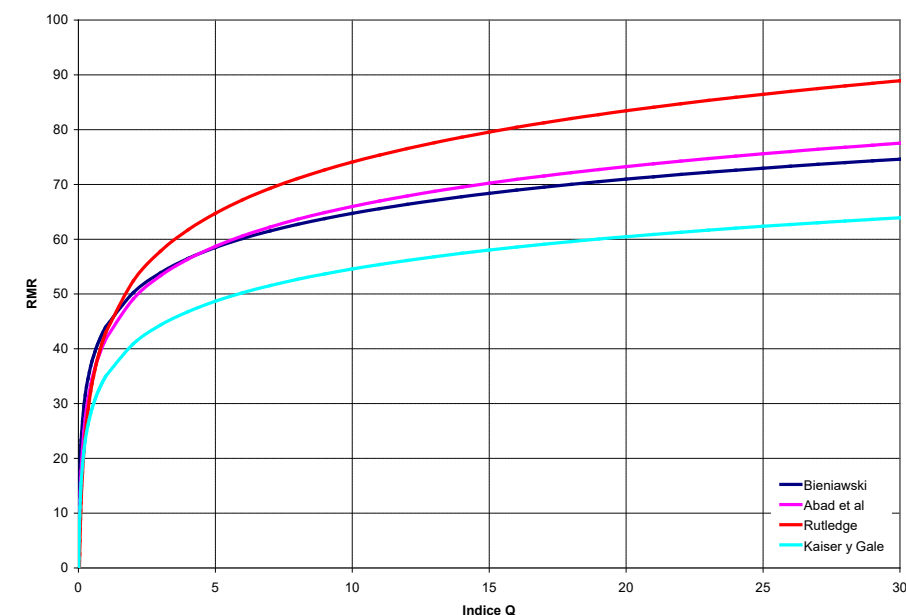
SRF: son las iniciales de Stress Reduction Factor, y depende del estado tensional de la roca que atraviesa el túnel.

Para la obtención de cada uno de los cinco últimos parámetros, Barton aporta unas tablas donde se obtienen los valores correspondientes en función de descripciones generales del macizo rocoso.

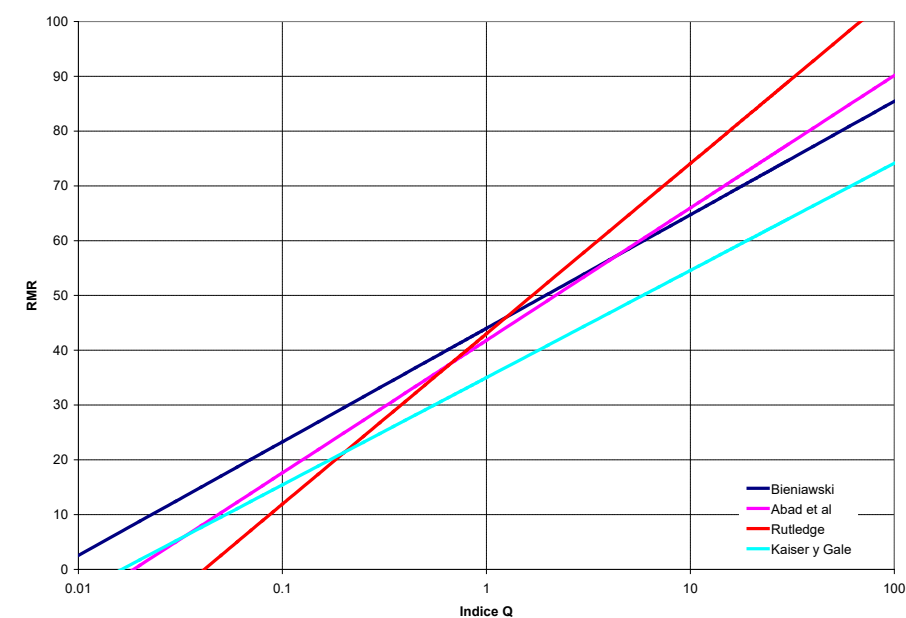
Existen también diversas correlaciones para establecer una estimación entre el índice Q y el RMR, entre estas correlaciones hay que destacar:

- RMR = 9,0 · Ln Q + 44 (Según Bieniawski, 1976)
- RMR = 13,5 · Ln Q + 43 (Según Rutledge, 1978)
- RMR = 4,5 · Ln Q + 55,2 (Según Moreno, 1980)

- RMR = 10,5 · Ln Q + 41,8 (Según Abad et al, 1983)
- RMR = 8,5 · Ln Q + 35 (Según Kaiser y Gale, 1985)
- RMR = 15 · log Q + 50 (Según Barton, 1995)



Correlaciones RMR-Q



Correlaciones RMR-Q en escala logarítmica

De entre estas correlaciones se adopta la de Bieniawski para determinar el índice Q, quedando la siguiente expresión empírica:

$$Q = e^{\frac{RMR-44}{9}}$$

6.1 Predimensionamiento según el índice Q de Barton

A partir de este índice se realizará un predimensionamiento de los Sostenimientos. La clasificación de Barton está más desarrollada que la del RMR de Bieniawski y permite obtener un sostenimiento más afinado. Para su aplicación es preciso además obtener el parámetro ESR (Excavation Support Ratio). El ESR es un factor que pondera la importancia de la obra de acuerdo a la siguiente tabla:

TIPO	DESCRIPCIÓN	ESR
A	Minas abiertas temporalmente	3 - 5
B	Pozos verticales	2,5 - 2
C	Minas abiertas permanentemente. Túneles hidroeléctricos Túneles piloto y galerías de avance para grandes excavaciones	1,6
D	Cavernas de almacenamiento Plantas de tratamiento de aguas Túneles pequeños de carretera y ferrocarril	1,3
E	Centrales eléctricas subterráneas Túneles grandes de carretera y ferrocarril Cavernas de defensa civil Boquillas e intersecciones	1
F	Centrales nucleares subterráneas Estaciones de ferrocarril Pabellones deportivos y de servicios	0,8

Con el Índice Q y la relación Ancho de excavación / ESR, se puede determinar al sostenimiento propuesto por Barton en el Abaco.

En el caso objeto de este estudio, se ha adoptado un ESR de 1,0 al tratarse de túneles ferroviarios de gran sección.

De acuerdo con la metodología descrita, se ha estimado el sostenimiento a aplicar adoptando un ancho de excavación máximo de 13 para el túnel de doble vía, lo que nos da un cociente dimensión crítica de excavación/ESR igual a 13.

Para el túnel de vía única, el ancho de excavación máximo es de 10 m, lo que da un cociente dimensión crítica de excavación/ESR igual a 10.

A continuación se presenta la estimación previa del sostenimiento a aplicar en los tipos de terreno que está previsto sean atravesados por los túneles.

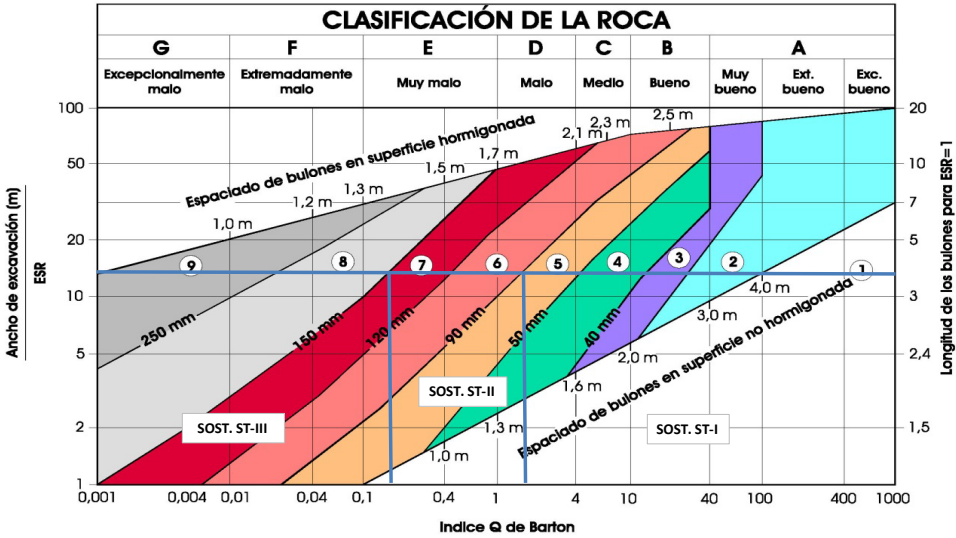


Gráfico de Barton para el Túnel de Vía Doble

Categorías de sostenimiento:

1. Sin sostenimiento

2. Bulonado puntual

3. Bulonado sistemático

4. Bulonado sistemático con hormigón proyectado

5. Hormigón proyectado con fibras, 5-9 cm, y bulonado
6. Hormigón proyectado con fibras, 9-12 cm y bulonado

7. Hormigón proyectado con fibras, 12-15 cm y bulonado

8. Hormigón proyectado con fibras, >15 cm con bulonado y cerchas

9. Revestimiento de hormigón

Por lo tanto en función de los resultado obtenidos en el ábaco de Barton se establecen tres secciones tipo de sostenimiento (para las zonas singulares como emboquilles, paso de falla bajo edificaciones, o zonas de escasa cobertera, se ha proyectado una cuarta sección de sostenimiento ST-IV independiente).

En la siguiente tabla, a modo de resumen, pueden observarse los espesores de hormigón proyectado y otros elementos de sostenimientos necesarios según las recomendaciones de Barton.

SECCION TIPO	CALIDAD GEOTÉCNICA	RANGO APROXIMADO Q	RANGO APROXIMADO RMR	ESPESOR GUNITA	REFUERZO	CERCHA	BULONES
ST-I	FAVORABLE	Q > 2	RMR > 50	9 cm	FIBRAS DE ACERO	NO	LONG. BULON 4 m espaciado 1,8 m
ST-II	MEDIA	2 > Q > 0,2	50 > RMR > 30	15 cm	FIBRAS DE ACERO	NO	LONG. BULON 4 m espaciado 1,35 m
ST-III	DESFAVORABLE	Q < 0,2	RMR < 30	25 cm	FIBRAS DE ACERO	SI	LONG. BULON 4 m espaciado 1,0 m
ST-IV	EMBOQUILLES Y ZONAS SINGULARES						

Secciones tipo de sostenimientos según recomendaciones de Barton

6.2 Predimensionamiento según el índice RMR de Bieniawski

Otra forma para la caracterización del macizo es utilizar la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), calculándose el índice RMR (Rock Mass Rating).

Las clasificaciones geomecánicas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, este comportamiento incluye la estimación de los parámetros geotécnicos de diseño y en el tipo de sostenimiento en el túnel.

La clasificación de Bieniawski de 1989 permite valorar la calidad de un determinado macizo atendiendo a una serie de criterios como pueden ser la resistencia a la compresión simple, las condiciones de diaclasado, efecto del agua y la posición relativa de la excavación respecto a las diaclasas.

Para tener en cuenta la incidencia de estos factores, se definen una serie de parámetros, asignándoles unas determinadas valoraciones, cuya suma en cada caso nos da el RMR.

Los cinco parámetros que definen la calidad global del macizo son los siguientes:

Resistencia de la roca matriz:	0 –15 %
RQD (%):	3 – 20 %
Espaciado de las juntas:	5 –20 %
Estado de las juntas:	0 – 30 %
Presencia de agua:	0 – 15 %
RANGO VARIACIÓN RMR:	8 – 100 %

Adicionalmente el sistema de clasificación considera un factor de minoración en función de la disposición relativa entre las discontinuidades y el eje del túnel, distinguiendo entre cinco posibles estados, que discurren entre muy favorable y muy desfavorable, con una constante de corrección que varía entre 0 y – 12. Esta penalización del índice obtenido, así como la presencia o no de agua, sólo deben considerarse cuando se pretenda llevar a cabo una aplicación del índice RMR muy concreta, como por ejemplo la asignación empírica de sostenimientos mediante el cuadro propuesto por Bieniawski.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		R. compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Valoración		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de les discontinuidades		Superficies muy rugosas. Sin separación. Bordes sanos y duros	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1mm Bordes ligeramente alterados	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1mm Bordes muy alterados	Superficies estriadas o con rellenos < 5mm o abiertas 1-5 mm. Continuas	Rellenos blandos > 5 mm ó apertura > 5 mm. Continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua subterránea	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES				
	Relación: Presión agua / Presión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Estado General	Completamente seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0

Cuadro de sostenimientos de Bieniawski

De acuerdo con los criterios de Bieniawski y en función del RMR obtenido, los macizos se clasifican en las cinco categorías (Rocas de Calidad I a VI), los cuales se detallan a continuación:

RMR	TIPO	CALIDAD
81 – 100	I	Muy bueno
61 – 80	II	Bueno
41 – 60	III	Medio
21 – 40	IV	Malo
< 20	V	Muy malo

Para la valoración de los diferentes parámetros que conforman el índice RMR, se emplean como fuentes de información principales las estaciones geomecánicas efectuadas, así como los sondeos y ensayos de laboratorio disponibles.

Para túneles de sección en herradura con anchura máxima de 10 m y una tensión vertical máxima de 250 kg/cm² Bieniawski propone los siguientes sostenimientos en función de la calidad de la roca estimada según el RMR (Rock Mass Rating).

CLASE ROCA	RMR	EXCAVACIÓN	SOSTENIMIENTO PRIMARIO		
			Bulonado (*) (longitudes, túneles de 10 m de luz)	Gunitado	Cerchas
I	100 - 81	A sección completa. Avances de 3 m	Innecesario, salvo algún bulón ocasional		
II	80 - 61	Plena sección. Avances de 1-1,5 m	Bulonado local en bóveda, con longitudes de 2-3 m y separación de 2-2,5 m, eventualmente con mallazo	5 cm en bóveda para impermeabilización	No
III	60 - 41	Galería en clave y bataches. Avances de 1,5 a 3 m en la galería	Bulonado sistemático de 3-4 m con separaciones de 1,5 a 2 m en bóveda y hastiales. Mallazo en bóveda	5 a 10 cm en la bóveda y 3 cm en hastiales	No
IV	40 - 21	Galería en la clave y bataches. Avances de 1 a 1,5 m en la galería	Bulonado sistemático de 4-5 m con separaciones de 1-1,5 m en bóveda y hastiales, con mallazo	10-15 cm en bóveda y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación	Entibación ligera ocasional, con separaciones de 1,5 m
V	> 20	Galerías múltiples. Avances de 0,5-1 m en la galería de clave	Bulonado sistemático de 5-6 m, con separaciones de 1-1,5 m en bóveda y hastiales, con mallazo. Bulonado de la solera	15-20 cm en bóveda, 15 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada voladura	Cerchas fuertes separadas 0,75 m con blindaje de chapas, y cerradas en solera

(*) Bulones de 20 mm de diámetro, con resina.

Por lo tanto, atendiendo a los rangos de RMR utilizados previamente en el Predimensionamiento realizado por el ábaco de Barton, los elementos de sostenimiento recomendados por Bieniawski son los siguientes:

SECCION TIPO	CALIDAD GEOTÉCNICA	RANGO APROXIMADO Q	RANGO APROXIMADO RMR	ESPESOR GUNITA	REFUERZO	CERCHA	BULONES
ST-I	FAVORABLE	$Q > 2$	$RMR > 50$	5 - 10 cm en bóveda 3 cm en hastiales	Mallazo en bóveda	NO	LONG. BULON 3-4 m espaciado 1,5-2 m
ST-II	MEDIA	$2 > Q > 0,2$	$50 > RMR > 30$	10 - 15 cm en bóveda 10 cm en hastiales	Mallazo	OCASIONAL espaciado 1,5 m	LONG. BULON 4-5 m espaciado 1-1,5 m
ST-III	DESFAVORABLE	$Q < 0,2$	$RMR < 30$	15 - 20 cm en bóveda 15 cm en hastiales 5 cm frente excavación	Mallazo	CERCHAS FUERTES espaciado 0,75 m	LONG. BULON 5-6 m espaciado 1-1,5 m
ST-IV	EMBOQUILLES Y ZONAS SINGULARES						

Secciones tipo de sostenimientos según recomendaciones de Bieniawski

Tabla de sostenimientos propuestos para el Estudio Informativo

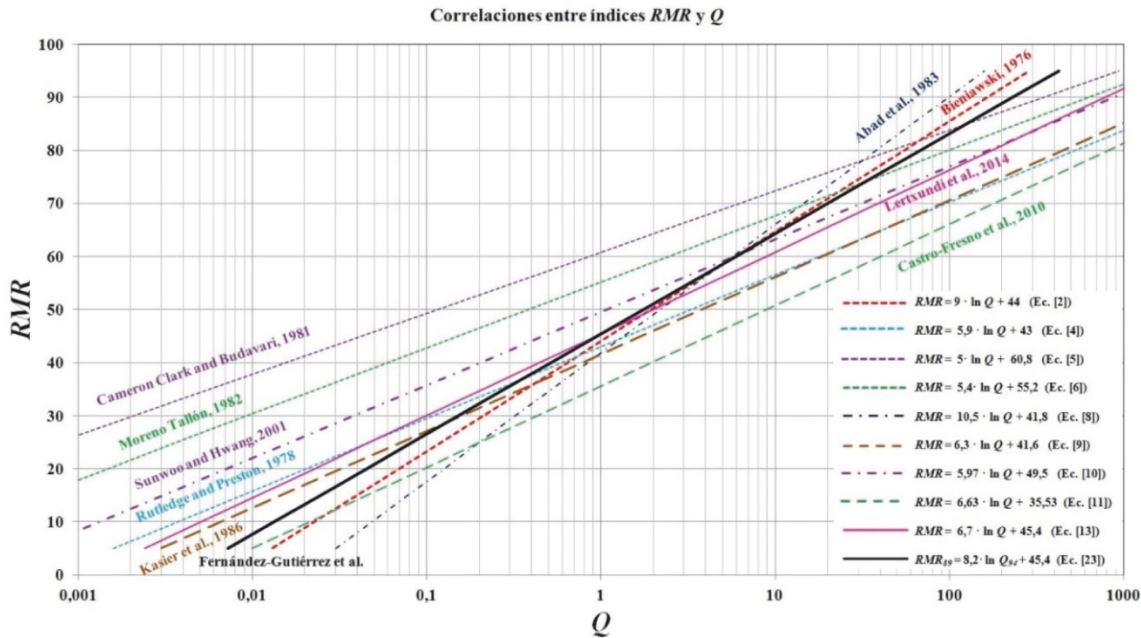
SECCIÓN TIPO	CALIDAD GEOTÉCNICA	RANGO APROX. Q BARTON	RANGO APROX RMR	LONG PASE	HP-30	FIBRAS PLÁSTICAS	CERCHA	BULONES	PARAGUAS MICROPILOTES	EXCAVACIÓN
ST-I	MUY BUENA		$RMR > 80$	5m	7cm	Polipropileno 5 kg/m3		Expansivos 24T. L=4m 2,5mx2,5m		AVANCE Y DESTROZA
ST-II	BUENA		$80 > RMR > 60$	4m	12cm	Polipropileno 5 kg/m3		Expansivos 24T. L=4m 2m x2m		AVANCE Y DESTROZA
ST-III	MEDIA		$60 > RMR > 45$	3m	18 cm	Polipropileno 5 kg/m3		Expansivos 24T. L=4m 1,5m x1,5m		AVANCE Y DESTROZA
ST-IV	MEDIA - MALA		$45 > RMR > 20$	2m	22 cm	Polipropileno 5 kg/m3	TH-29 a 1 m	Expansivos 24T. L=4m 1m x1,5m		AVANCE Y DESTROZA
ST-V	MALA		$RMR > 20$	1 m	25 cm	Polipropileno 5 kg/m3	HEB-180 a 1m	Autoperforantes Ø32. L=4m 1m x 1,5m		AVANCE Y DESTROZA
Especial	EMBOQUILLES FALLAS Y ZONAS SINGULARES			1m	25 cm	Polipropileno 5 kg/m3	HEB-180 a 1m		Paraguas Micropilotes L=9m Ø114 e=9mm	AVANCE Y DESTROZA

6.3 Sostenimientos propuestos

Una vez valoradas las recomendaciones de sostenimientos para los rangos adoptados, se proponen las siguientes secciones tipo. Son muy similares a las obtenidas en el Predimensionamiento de Barton y Bieniawski, pero adaptadas a la experiencia de obras similares próximas a la zona de estudio. Para ello se ha tenido en cuenta la correlación entre ambos índices propuesta por J. D. Fernández-Gutiérrez , H. Pérez-Acebo , D. Mulone-Andere en base a experiencias en la línea 3 del Metro de Bilbao

$RMR_{89} = 8,2 \cdot \ln Q_{94} + 45,4$

Figura 7. Comparación de la ecuación [23] obtenida para formaciones sedimentarias de grano fino con otras correlaciones propuestas entre índice RMR y Q. DOI: 10.3989/id54459



7 Tratamientos especiales

Una vez definidas las secciones tipo de sostenimiento aplicar en la excavación por métodos convencionales, mediante las recomendaciones de Barton y Bieniawski, se logrará estabilizar la excavación en todas las calidades de terreno previstas. No obstante, cabe la posibilidad de que se intercepten zonas en que la calidad geotécnica de los materiales sea tan mala, que puede no ser suficiente con los sostenimientos anteriormente definidos, y sea necesario recurrir a tratamientos de refuerzo complementario, conocido con el nombre genérico de tratamientos especiales.

Los tratamientos especiales se usan de forma puntual, con objeto de atravesar zonas muy concretas de terreno. Se aplicarán, eventualmente, dos tipos, según la misión que tenga encomendada el tratamiento:

- Tratamientos de estabilidad de la bóveda y del frente.

Con las secciones tipo de sostenimiento que se ha diseñado, junto con los tratamientos especiales, es de esperar que puedan atravesarse las zonas de baja calidad geotécnica sin problemas.

A continuación se describen los tratamientos especiales inicialmente previstos.

7.1 Tratamientos de estabilidad en bóveda y frente

En esta fase del Proyecto todos ellos se incluyen en la sección tipo ST-V, en principio según las características del terreno a atravesar se proyectan asociados a esta sección tipo, sin embargo es posible que en futuras fases, con un estudio más ajustado del trazado, en lo que a calidades geológicas – geotécnicas se refiere, puedan independizarse de esta sección tipo ST-V. También en ocasiones puede ser necesario la utilización de uno o varios de estos tratamientos asociado a otra sección tipo de sostenimiento.

Estos tratamientos son:

- Paraguas de micropilotes: se empleará para evitar sobre excavaciones en clave. Consiste en la colocación de elementos lineales paralelos al túnel en toda la bóveda de este.
Se emplearán para tubos de acero de diámetro 114 mm y espesor 10 mm. El diámetro de perforación será de 150 mm y se inyectaran lechada de cemento. Cuando la zona a atravesar es muy amplia, se colocan paraguas sucesivos, con un solape mínimo entre uno y otro de 3 metros.
- Además de en las secciones tipo ST-V, se plantea la ejecución de este tratamiento para realizar el paso bajo las infraestructuras existentes en:
 - Conexión Serantes en el paso bajo el Tronco Serantes-Olabeaga
 - Tronco: Paso bajo la Galería de extracción Minera
 - Tronco paso bajo la Variante Sur Metropolitana
 - Ramal Olabeaga en el paso bajo la línea de FEVE
- En estos tres casos, el nuevo trazado discurre bajo las infraestructuras citadas a profundidades de entre 10m y 13m. Por ello se ha considerado realizar un tratamiento con paraguas de micropilotes en estas zonas.
- Gunita sobre-acelerada: se dispondrá en el frente de excavación para evitar la descompresión del terreno y mejorar la estabilidad de la excavación. Este tipo de hormigón proyectado presenta una

dosificación de acelerante superior a la empleada para la gunita de sostenimiento, lo que le permite desarrollar altas resistencias iniciales, la reducción en las resistencias finales del hormigón proyectado, que supone el empleo de acelerantes, no resulta problemático en este caso, ya que esta gunita se eliminara con la excavación del siguiente pase.

- Machón central. Es otra medida de estabilización del frente, de esta manera evitamos que la excavación del frente sea completamente vertical, ayudando a la mejora de la estabilidad. El tamaño e inclinación del machón debe de compatibilizarse con la excavación, de manera que no repercuta en una disminución del rendimiento.
- Bulones de fibra de vidrio. Se disponen en el frente para mejorar su estabilidad. En lugar de utilizar bulones de acero se colocarán bulones de fibra vidrio, estos últimos poseen unas buenas características de resistencia a tracción con la ventaja de son muy fáciles de excavar. Se disponen de forma horizontal, con una ligera inclinación, y se han diseñado con una longitud y solape igual a la del paraguas de micropilotes. Su puesta en obra es sencilla y consiste en un replanteo inicial, perforación de los taladros, colocación de los bulones e inyección de lechada de cemento.

8 Impermeabilización y drenaje

Para proteger el revestimiento de la acción de las aguas subterráneas, y para evitar posibles goteos sobre la plataforma, así como aliviar las presiones intersticiales sobre aquel, se considera conveniente la impermeabilización completa de los túneles.

El sistema que se considera más eficaz está constituido por una lámina porosa de protección, situada en contacto con el sostenimiento, lámina de tipo geotextil, y otra lámina de impermeabilización propiamente dicha colocada a continuación, ésta de tipo sintético (P.V.C. o P.E.). El geotextil se ocupará de filtrar los finos procedentes del lavado del sostenimiento y drenar los caudales para aliviar las presiones intersticiales, así como proteger la lámina frente a las irregularidades del sostenimiento.

Estas láminas se aplican sobre el hormigón proyectado, sujetándolas con anclajes mecánicos y soldando térmicamente las distintas piezas necesarias para recubrir los paramentos del túnel.

La lámina de impermeabilización tendrá continuidad, mediante termo-soldado, hasta alcanzar los tubos dren de PVC ranurado que se colocarán longitudinalmente a lo largo de los túneles, cerca de los paramentos y que conectarán con un canal de pequeñas dimensiones adosado al paramento.

El drenaje de la solera, se resuelve mediante drenes transversales de 110 mm, canaletas laterales en cada acera de 30 cm de ancho con tapa y un colector central de 400 mm para infiltración, con arquetas cada 50 m y conexión a arquetas desde drenes de trasdós y canaletas con tubos de 110 m. En el caso del drenaje de vertidos, se han diseñado una media caña lateral en cada lado para la recogida y canalización de vertidos, cada 50 m se colocan arquetas sifónicas que se conectan con una arqueta central. El colector principal en este caso es de 400 mm, suficiente para evacuar 100 l/s.

Para el túnel de vía única el drenaje del agua de infiltración es idéntico al de vía doble. Únicamente se ha modificado el drenaje de vertidos, que en este caso sólo incluye una media caña en un lateral, y el colector principal de vertidos es de 300 mm de diámetro interior.

9 Revestimiento

Toda obra subterránea debe tener un revestimiento que no ejerza un papel estructural a corto plazo, pero que pueda asegurar la estabilidad de la obra a largo plazo ante una eventual degradación de las características mecánicas del terreno o de los elementos de sostenimiento.

El problema que se plantea es definir qué tipo de exigencias debe tener el revestimiento de un túnel para que sea compatible con las condiciones de utilización y con un costo de ejecución razonable.

A continuación se señalan algunos de los motivos por los que se considera que su colocación es necesaria:

- El revestimiento aporta un coeficiente de seguridad adicional, colaborando con el sostenimiento a corto plazo. A largo plazo no se puede confiar plenamente en el sostenimiento, pues al estar en contacto directo con las humedades del terreno, éste tiende a alterarse perdiendo alguna de sus características resistentes. La estabilidad a largo plazo se garantiza con el revestimiento.
- El revestimiento de hormigón permite disminuir significativamente las labores de mantenimiento y conservación, crecientes con la edad del túnel, que son normalmente muy costosas y que además entorpecen el tráfico.
- Evita la posible incidencia de convergencias residuales.
- El revestimiento reduce la rugosidad y por tanto mejora la circulación del aire y gases.
- Protege al sostenimiento frente a un posible incendio, el efecto de la agresividad y envejecimiento.

En el caso de los túneles ejecutados por tuneladora, el revestimiento está formado por las propias dovelas que conforman el sostenimiento.

En el caso de los túneles excavados mediante NATM, se procederá al revestimiento del túnel una vez estabilizadas las convergencias e impermeabilizado el túnel.

Antes de proceder al revestimiento del túnel, se comprobará mediante laser scanner las secciones que entren dentro de la sección de revestimiento, procediendo al picado de estas zonas puntuales, y siempre reponiendo el sostenimiento en el caso de que se destruya el que había con anterioridad.

Para los túneles ejecutados por NATM se propone un espesor de revestimiento de 30 cm de HM-30 reforzado con 2 kg de fibra de polipropileno por cada m³ de hormigón.

10 Salidas de emergencia

Se han definido dos tipos de salidas de emergencia, peatonales y vehiculares..

Debido al elevado espesor de cobertera, y a la orografía de la zona, se evita la ejecución de pozos.

Algunas de las salidas planteadas conectan zonas de falso túnel con el exterior, por lo que se ejecutarán como obras a cielo abierto y no se consideran competencia de este anejo, que detalla únicamente las salidas de emergencia “en galería” (obra subterránea).

En la Alternativa A, las salidas proyectadas son:

RAMAL SERANTES. TRONCO	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia peatonal 1	0+707	Falso Túnel	
CONEXIÓN SERANTES 1	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia 2	0+400,868	Túnel en Mina	600
TRONCO SERANTES OLABEAGA	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia peatonal 3. Galería de ataque	0+800,00	Túnel en mina	760

En la Alternativa B, las salidas proyectadas son:

RAMAL SERANTES. TRONCO	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia peatonal 1	0+592,000	Falso Túnel	
CONEXIÓN SERANTES 1	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia 2	0+158,845	Túnel en Mina	710
TRONCO SERANTES OLABEAGA	PK ENTRONQUE	TIPO	LONGITUD
Salida de emergencia peatonal 3. Galería de ataque	0+800,00	Túnel en mina	700/750

La sección tipo adoptada para ambas alternativas es idéntica. Las galerías vehiculares tendrán una anchura libre de 6,20 m y dispondrán de un revestimiento de 25 cm de hormigón en masa. Su altura libre no será inferior a los 4,73 m en clave.

Las galerías peatonales tendrán una anchura libre de 4,4 m, y un revestimiento igualmente de 25cm de hormigón en masa. Su altura libre será de 3,5 m de forma que permita con holgura alojar un gálibo de evacuación de 2,25 x 2,25 m.

11 Emboquilles

Según las conexiones planteadas en este Estudio Informativo, hay un total de siete (7) emboquilles. Uno (1) en el ramal Serantes, donde se entronca con el Falso Túnel que conecta con el túnel del Serantes existente. El otro extremo de este emboquille (2) se encuentra en la salida al viaducto del Castaños.

Tras el Viaducto del Castaños, se ubica el tercer emboquille (3), donde el túnel del Tronco continua hasta el valle del Kadagua. Un cuarto (4) emboquille da acceso por el Oeste al Viaducto del Kadagua y el quinto (5) emboquille se encuentra al Este de dicho viaducto.

Una vez pasado el Viaducto del Kadagua, se contemplan los últimos emboquilles, que en este caso es un emboquille doble (6 y 7) que dan acceso al túnel del Ramal de Olabeaga y la continuación del Tronco.

Existen también siete emboquilles de galerías de emergencia, que se corresponden a otras tantas galerías en mina, descritas en el apartado anterior.

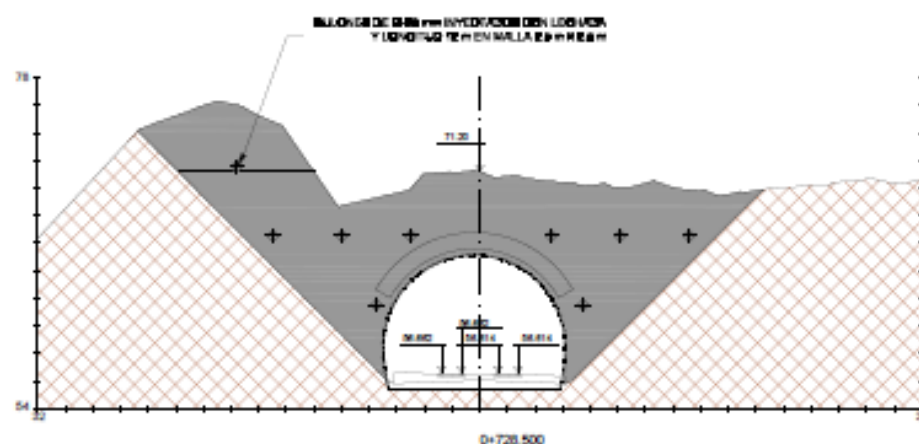
Como preparación al comienzo de los trabajos se efectuarán en todas las bocas algunas labores previas encaminadas a proteger el progreso de los primeros metros del túnel, los cuales son siempre especialmente conflictivos ya que se excavan bajo un recubrimiento mínimo, en terrenos muchas veces afectados por la alteración y donde un hundimiento del pase o del frente podrían provocar el deslizamiento del talud del portal.

En el presente Anejo sólo se profundiza en los taludes frontales, puesto que son los que más afección presentan durante la excavación, debido a que en ellos se ubican las bocas del túnel.

11.1 Emboquille Ramal Serantes-Tronco

11.1.1 Alternativas A1 y A2

El talud frontal se sitúa en el p.k. 0+728 y se ha definido con una pendiente de 1H:3V hasta 3m sobre la clave del túnel, donde el talud pasa a 1H/2V.

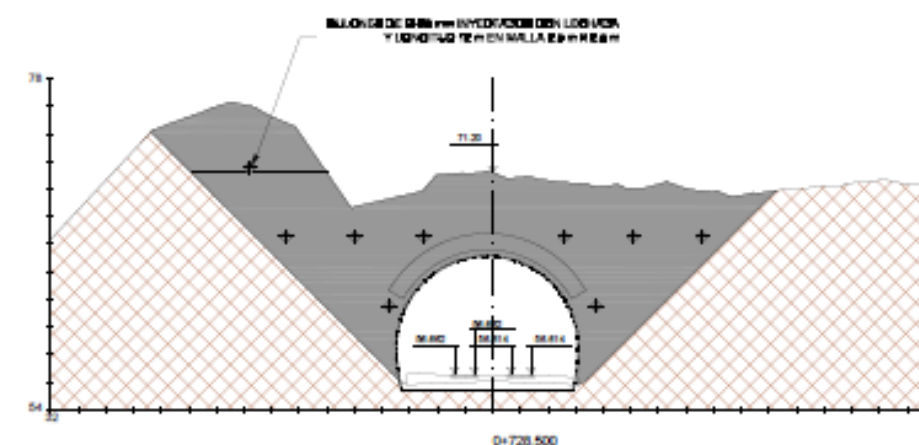


El sostenimiento consiste en un bulonado sistemático con barras Ø25 mm de 12 metros de longitud en las filas inferiores y 8 m en la superior, inyectadas con lechada de cemento y dispuestas en una malla de 2,5 x 2,5 m al tresbolillo. También se aplicará una capa de hormigón proyectado H/MP-30 de 10 cm de espesor y una capa de malla electrosoldada 6#150x150mm.

Este talud posteriormente será conectado con un falso túnel, con lo que quedará parcialmente como obra oculta.

11.1.2 Alternativa B

El talud frontal se sitúa en el p.k. 0+600 y se ha definido con una pendiente de 1H:3V hasta 3m sobre la clave del túnel, donde el talud pasa a 1H/2V.



12 Auscultación

El presente apartado tiene como objeto servir de base para el desarrollo del futuro Plan de Auscultación que deberá quedar definido en fases posteriores, adaptándolo en detalle a la construcción de la obra.

La auscultación tiene como finalidad controlar los movimientos de las estructuras así como el comportamiento de los terrenos anejos, durante las distintas fases de construcción.

Para cumplir tales objetivos se instalarán los instrumentos y sistemas de auscultación que, en cada momento, informen de las reacciones con las que el terreno, estructuras e instalaciones, responden a las distintas fases constructivas que se lleven a cabo.

12.1 Magnitudes a controlar e instrumentos

En el caso del trazado propuesto, las distintas magnitudes a controlar serían las siguientes:

- Comportamiento estructural del revestimiento del túnel. Para ello se instalarán secciones instrumentadas formadas por células de presión en clave y contrabóveda, y extensómetros de cuerda vibrante. Llevarán asociadas una sección de convergencias formada por 5 puntos de control, uno en clave y dos en cada hastial para el seguimiento de las deformaciones del terreno sobre el túnel.
- Movimientos en el terreno. El control de los movimientos en el terreno en profundidad se realizará mediante la instalación de extensómetros de varillas desde el interior del túnel, sobre todo en las zonas de peor calidad geotécnica, para verificar las condiciones de estabilidad del terreno circundante. También se instalarán inclinómetros para comprobar si se están produciendo movimientos horizontales que puedan generar subsidencias en el entorno, sobre todo si existen edificaciones próximas al túnel. Los movimientos del terreno en superficie se controlarán mediante la instalación de hitos de nivelación que serán controlados mediante topografía de precisión.
- Movimientos en los edificios y estructuras existentes. El control de los movimientos que sufran los edificios y estructuras existentes durante la excavación será de importancia vital, por la repercusión social y económica que puede suponer la aparición de desperfectos en los mismos a causa de la subsidencia. Los parámetros fundamentales a controlar serán:
 - Movimientos verticales, mediante la instalación de regletas en fachada.
 - Giros, mediante la instalación de desplomes.
 - Evolución del tamaño de grietas, ya sean existentes o de nueva aparición.
- Movimientos de las pantallas. Dado que los esfuerzos sobre la pantalla dependen de los empujes que ejerza el terreno sobre ella y estos a su vez de la deformación (rigidez) de la pantalla y la interacción suelo-pantalla, se hace necesario conocer la magnitud de estas deformaciones para comprobar que no se presenten movimientos que puedan afectar a la apariencia o uso eficiente, tanto de la propia estructura como de las estructuras vecinas. Para ello lo más habitual es instalar inclinómetros en el interior de los pilotes que nos muestren a qué profundidad se producen las máximas deflexiones, y si éstas superan los umbrales límite establecidos. Estos sensores suelen combinarse con la instalación de extensómetros de cuerda vibrante en las armaduras que nos muestran el estado tensional a las que están siendo sometidas.
- Nivel freático. Las variaciones en el nivel freático, sobre todo cuando se producen depresiones del mismo, originará un cambio de volumen en el suelo, que se suele manifestar en forma de

movimientos verticales en la superficie (subsidencias). Para controlar las variaciones del nivel freático se instalarán piezómetros, sobre todo en el entorno de las pantallas de los emboquilles, ya que podrían generar un efecto barrera y deprimir el nivel freático aguas abajo. También deberán instalarse próximos a las zonas de vaguada a fin de verificar si se está produciendo una descarga del nivel freático que podría afectar al interior del túnel.

A continuación se expone un cuadro resumen con las magnitudes que serán controladas y los instrumentos que se emplearán para ello:

	MAGNITUDES A CONTROLAR	SENSORES
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO DEL TÚNEL	Esfuerzos en el revestimiento-sostenimiento.	Células de presión total.
	Deformaciones del revestimiento-sostenimiento.	Extensómetros de cuerda vibrante.
	Empuje del terreno sobre el revestimiento-sostenimiento.	Pernos de convergencia.
MOVIMIENTOS TERRENO DEL	Movimientos en profundidad del terreno.	Extensómetros de varillas Inclinómetros
	Movimientos en superficie	Verticales: Hitos de nivelación
MOVIMIENTOS EN EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS EXISTENTES	Movimientos verticales	Regletas de nivelación
	Movimientos de giro	Desplomes
	Evolución de fisuras	Fisurómetros
MOVIMIENTOS DE LAS PANTALLAS	Movimientos horizontales de la pantalla (tanto en cabeza como a lo largo de todo el muro).	Inclinómetros en pantalla
	Empujes del terreno sobre la pantalla.	Extensómetros de cuerda vibrante.
NIVEL FREÁTICO	Variaciones del nivel freático	Piezómetros

12.2 Secciones de instrumentación

12.2.1 Túnel convencional N.A.T.M.

Durante la excavación con métodos convencionales, se propone la instalación se secciones de instrumentación en túnel (ST) cada 500 m, formadas por los siguientes dispositivos:

- 3 Células de presión en bóveda y 3 en contrabóveda
- 6 Extensómetros de cuerda vibrante doble (trasdós e intradós) junto con las células de presión
- 5 Pernos de convergencia combinados (miniprisma+perno), uno en clave y dos en cada hastial.

Cuando las condiciones geotécnicas sean peores, y siempre que se emplee el sostenimiento tipo IV, se hará coincidir al menos una de estas secciones, a la cual podrá añadirse una sección de extensómetros de varillas. De esta forma se obtiene una sección de instrumentación en túnel intensificada (STI) que permitirá tener un conocimiento exhaustivo de las condiciones del túnel y del terreno circundante.

A lo largo de la excavación de todo el túnel se dispondrán secciones de convergencias cada 25 metros formadas por 5 puntos de control, uno en clave y dos en cada hastial (SC).

Cuando sea necesario emplear el sostenimiento tipo IV, las secciones de convergencias de dispondrán cada 10 metros durante todo el tramo afectado por dicho sostenimiento.

La ubicación exacta de las secciones de convergencias y secciones intensificadas se realizará según el avance de obra y en función de la calidad de los materiales encontrados durante la excavación.

12.2.2 Pantalla de pilotes en emboquilles

Para la instrumentación de las pantallas de los emboquilles se propone una sección tipo donde la distribución de sensores sería la siguiente:

- Dos inclinómetros embebidos en los pilotes de la pantalla. Se dispondrá una sección de 2 inclinómetros enfrentados entre sí cada 100 m aproximadamente.
- Puntos de control topográfico en la parte superior de la pantalla.
- Dos piezómetros empotrados en el terreno entre 3 y 5 metros por debajo del pie de la pantalla. Se dispondrá una sección de 2 piezómetros enfrentados entre sí cada 100 m aproximadamente, y a una distancia no superior a 10 metros de la pantalla medidos perpendicularmente a ésta.

12.2.3 Edificios y estructuras existentes

Por norma general, se colocarán regletas en los edificios más próximos, así como en los que estén en la cubeta de asientos, o tengan alturas elevadas. Además, para medir el desplome que puedan sufrir, se instalarán dos miniprismas en la vertical de los edificios más altos.

En el caso de fisuras existentes o de nueva aparición, se instalarán fisurómetros de control para medir la evolución de las mismas durante la obra.

12.3 Definición de umbrales y frecuencias

Atendiendo al criterio de movimientos admisibles, se clasifican los niveles de riesgo de cara a establecer la frecuencia de lecturas de los instrumentos y para considerar las posibles medidas de actuación. Tanto los umbrales como las frecuencias quedarán definidos en fases posteriores a este estudio informativo, siendo de carácter orientativo la clasificación que se muestra a continuación:

NIVEL DE RIESGO	TÚNEL/ESTRUCTURAS EN EJECUCIÓN	EDIFICIOS/INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES	MOVIMIENTO DEL TERRENO(SECCIONES INSTRUMENTADAS)
VERDE	La excavación está estabilizada	Los movimientos inducidos en edificaciones y servicios no superan el umbral menos restrictivo.	El terreno se comporta según lo previsto y los movimientos medidos son aceptables
ÁMBAR	La excavación no se comporta según lo previsto, pero tiende a la estabilización	Los movimientos inducidos a cota de cimentación que superan el límite establecido, sin alcanzar, en su punto pésimo, los niveles de deformación equivalentes al umbral "rojo".	Los movimientos medidos sobrepasan los valores aceptables, pero tienden a estabilizarse
ROJO	La situación supera los límites considerados como aceptables y la excavación no está estabilizada	Los movimientos inducidos a cota de cimentación superan los establecidos para el umbral "rojo".	Los movimientos medidos sobrepasan los valores aceptables, y no se estabilizan

Definición de niveles de riesgo y alarmas

12.4 Medidas de actuación

Una vez establecidos los umbrales de control y la frecuencia de lecturas, se deberán prever medidas de actuación en cada caso. A continuación se proponen unos criterios generales, que serán válidos para todos los métodos constructivos y deberán concretarse con la correspondiente aprobación de la Dirección de Obra.

UMBRAL DE CONTROL	MEDIDAS DE ACTUACIÓN
VERDE	Seguir con el control de movimientos establecido por el Plan de Auscultación de la Obra.
ÁMBAR	Incrementar la frecuencia de lecturas evaluando la situación a partir de la velocidad de variación del parámetro registrado.
	Efectuar una inspección visual somera.
	Continuar con el proceso de ejecución de las obras según lo previsto.
ROJO	Establecer un análisis específico de la situación, instalando instrumentación complementaria si fuera preciso.
	Revisión del proceso constructivo para introducir modificaciones en el mismo, si es posible.
	Valorar la necesidad de introducir medidas correctoras, refuerzo o protección de las estructuras o elementos afectados.

Medidas de actuación según los umbrales de control

12.5 Tratamiento de la información y elaboración de informes

Los resultados de la auscultación serán incorporados diariamente y a medida que se vayan generando, a las bases de datos u hojas de cálculo correspondientes para su procesamiento inmediato y almacenamiento, de manera que en cualquier momento puedan ser consultados.

Una vez analizada dicha información, se emitirá un informe con la periodicidad definida en el Plan de Auscultación que recogerá toda la información actualizada hasta la fecha de emisión del informe y con los datos a origen.

Esta información se emitirá en forma de tablas y gráficas, y deberá ir acompañada de una valoración de los resultados en relación a los umbrales de control. Además, y junto a los resultados, deberán adjuntarse unos planos donde se defina la situación de la instrumentación, y esquemas relativos al avance de las obras.

13 Seguridad en túneles

Las normas aplicadas en España en relación con la seguridad en los túneles ferroviarios son:

- La Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) relativa a «la seguridad en los túneles ferroviarios» del sistema ferroviario transeuropeo convencional y de alta velocidad.
- Borrador de la Instrucción para el proyecto y construcción del subsistema de Infraestructura Ferroviaria (IFI-2011)
- Normativa Adif Plataforma (NAP) Túneles 2-3-1.0+M1

El enfoque de la normativa en vigor, incluyendo la ETI «Seguridad en los túneles ferroviarios» se refiere ante todo a la protección de las vidas humanas. Establece una serie de medidas que permiten evacuar a los pasajeros en condiciones de seguridad adecuadas en caso de incidente, así como el acceso a los servicios de emergencia.

En lo relativo a seguridad, la Norma NAP complementa los requisitos técnicos de las normas ETI, aunque no exime de cumplir el resto de preceptos ETI de los distintos subsistemas. Así mismo la NAP deroga las normas de reciente uso como son:

- IGP 4. 2011
- Túneles 2011, NAV 1-2-4.0
- IGP 0.1.2.13. 2011
- NRI 2.0.0.2. 1997

La resistencia al hundimiento de la infraestructura está por lo tanto dimensionada tanto para asegurar la evacuación de los pasajeros y del personal como también el acceso a los servicios de emergencia.

A continuación se indica cada una de las características necesarias a tener por cada uno de los aspectos relacionados anteriormente. Se señala el artículo de las mencionadas NAP y ETI de Seguridad en Túneles que hace referencia a cada aspecto:

13.1 Prevención de acceso no autorizado

ETI Art. 4.2.1.1. Prevención del acceso no autorizado a las salidas de emergencia y a las salas técnicas:
Esta especificación se aplicará a todos los túneles.

- Se debe impedir el acceso no autorizado a las salas técnicas.
- Cuando se bloqueen las salidas de emergencia por motivos de seguridad, debe garantizarse que siempre se puedan abrir desde dentro.

13.2 Resistencia al fuego y protección frente a incendios

NAP Artículo 6.4 Protección contra el fuego:

En cada túnel, con independencia de su longitud, se comprobará que se cumplen los requisitos de comportamiento frente al fuego:

- Integridad de la estructura de hormigón. La integridad del revestimiento del túnel será tal que le permita soportar la temperatura del fuego durante un período de tiempo suficiente acorde con las exigencias de la ETI de Seguridad en Túneles Ferroviarios (DOUE 12.12.2014).
- El revestimiento del túnel deberá soportar una temperatura de 450 °C a nivel del techo durante ese mismo periodo de tiempo. Este aspecto deberá ser tenido en consideración en la fase de proyecto
- En los casos de túneles sumergidos o que puedan provocar el desplome de estructuras cercanas importantes, la estructura resistente del túnel deberá soportar la temperatura del fuego durante un período de tiempo suficiente para que se realice la evacuación de las zonas de túnel dañadas y de las estructuras cercanas
- Dicho período de tiempo se especificará en el plan de emergencia, que se llevará a cabo de conformidad con una “curva temperatura-tiempo” apropiada, que deberá figurar en el proyecto)
- Estabilidad de los materiales. La ETI de Seguridad en Túneles Ferroviarios (DOUE 12.12.2014) exige, para todos los túneles, en lo referente a la “reacción al fuego de los materiales de construcción”, que el material de construcción del túnel cumpla los requisitos de la clase A2 de la Decisión 2000/147/CE. Los paneles no estructurales y demás equipamiento cumplirán los requisitos de la clase B de dicha Decisión. Igualmente, exige que se enumeren los materiales (lista) que no contribuyan significativamente a una carga de fuego, y que quedarán exentos de cumplir lo antes citado
- Requisitos para los cables eléctricos en los túneles de más de 1 km de longitud, en caso de incendio. Los cables satisfarán, como mínimo, los requisitos de la clase B2CA, s1a, a1 definidos en la Decisión 2006/751/CE, según establece la ETI de Seguridad en Túneles Ferroviarios (DOUE 12.12.2014)
- Frente a la opción de sobredimensionar los elementos estructurales del túnel, se recurrirá a la colocación de un elemento aislante sobre las superficies expuestas o la incorporación de elementos, como el empleo de hormigón con fibras de polipropileno. Esta última será la opción a aplicar, salvo que a partir del análisis que se presente a la Dirección del contrato se apruebe otra diferente.

NAP Artículo 6.5 Suministro de Agua:

En los túneles de longitud superior a 1 km o concatenados deberán existir los denominados “puntos de lucha contra incendios”, exteriores e interiores (cuando proceda), de acuerdo con la “ETI de túneles”, que estarán equipados con suministro de agua como se cita en el párrafo siguiente. Además, estos puntos serán accesibles a los servicios de intervención de emergencias, pudiéndose interrumpir en ellos la alimentación eléctrica de tracción y poner a tierra la instalación eléctrica (de forma manual o por control remoto)

En los puntos de acceso a los túneles de longitud superior a 1 km o concatenados se deberá contar con la posibilidad de suministrar (a partir de una boca de incendios existente o de una balsa o depósito a proyectar) un total mínimo de 100 m³ de agua, a razón de, al menos, 800 litros por minuto durante dos horas. Si el depósito no es de uso en exclusividad, siempre se deberá de garantizar el caudal mínimo.

NAP Artículo 6.6 Simulación de incendio y evacuación

Se deberá realizar un estudio basado en los tiempos de evacuación que permita obtener, por un lado, la geometría del túnel y su división en celdas (elementos finitos) y simular, por otro lado, la simulación del incendio y su evolución teniendo en consideración los condicionantes iniciales, las características geométricas y la evolución del incendio en función del tiempo transcurrido desde su generación.

A partir de este estudio se decidirá la necesidad de implantar ventilación forzada en el diseño del túnel, teniendo en cuenta que la tipología de ventilación puede modificar la obra civil, en cuanto a pozos de ventilación, revestimientos, espacios interiores para salas técnicas, etc.

Los modelos numéricos mencionados anteriormente, se deberían relacionar en el proyecto con otro de simulación de evacuación de los pasajeros y tripulación del tren en base a las condiciones de un hipotético incendio en los puntos más críticos dentro del túnel, teniendo en consideración el perfil transversal del propio túnel, el tiro natural, la ubicación de las salidas de emergencia existentes, de las previsibles potencias de los incendios que pudieran declararse en función del tipo de tráfico previsto,... poniendo en comparación, entre otros parámetros, las temperaturas que se fueran obteniendo por el modelo del párrafo anterior a lo largo del tiempo (evolución del fuego), concentraciones de monóxido de carbono y la posición de los viajeros en su ruta de evacuación en ese mismo momento; es decir, conjugar estudios de simulación de incendios/ventilación con los de evacuación.

ETI Art. 4.2.1.2. Resistencia al fuego de las estructuras del túnel: Esta especificación se aplicará a todos los túneles:

- Esta especificación se aplica a los productos y materiales de construcción del interior de los túneles.
- El material de construcción del túnel cumplirá los requisitos de la clase A2 de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión. Los paneles no estructurales y demás equipamiento cumplirán los requisitos de la clase B de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión.
- Se enumerarán los materiales que no contribuyan significativamente a una carga de fuego. Dichos materiales no están obligados a cumplir con lo anteriormente mencionado.

ETI Art. 4.2.1.3. Reacción al fuego de los materiales de construcción: Esta especificación se aplica a todos los túneles:

- Esta especificación se aplica a los productos y materiales de construcción del interior de los túneles.

- El material de construcción del túnel cumplirá los requisitos de la clase A2 de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión. Los paneles no estructurales y demás equipamiento cumplirán los requisitos de la clase B de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión.
- Se enumerarán los materiales que no contribuyan significativamente a una carga de fuego. Dichos materiales no están obligados a cumplir con lo anteriormente mencionado.

ETI Art. 4.2.1.4. Detección de incendios en las salas técnicas: Esta especificación se aplicará a túneles de más de 1 km de longitud. Las salas técnicas estarán equipadas con detectores que alerten al administrador de la infraestructura en caso de incendio.

13.3 Evacuación, Zonas seguras y de rescate

NAP 6.3.1 Pasillos Evacuación

En todos los túneles de más de 0,5 km de longitud, se construirán pasillos de evacuación por ambos lados en caso de vía doble, o al menos a un lado en caso de túneles de vía única, hasta llegar a una de las bocas o bien a una Salida de Emergencia (a través de galería o pozo), y terminarán en una Zona segura situada preferentemente en el exterior del túnel, en una galería o túnel auxiliar paralelo o, en casos específicos, en una estación subterránea. Las dimensiones mínimas de los accesos a las zonas de seguridad a través de las puertas de acceso, desde el pasillo de evacuación, serán de 1,40 m de anchura y 2,00 m de altura.

Las características serán las siguientes:

- En túneles de vía doble se dispondrán a ambos lados, dejando libre el gálibo de obstáculos, con una anchura mínima de 0,8 m y una altura libre mínima de 2,25 m-. El tubo pasamanos estará anclado al hastial, entre 0,80 m y 1 10 m por encima de la acera y fuera del gálibo libre mínimo del pasillo de evacuación, según se especifica en el apartado 4.2.1.6 “pasillos de evacuación” de la ETI citada en la introducción
- En túneles de vía única, se respetarán las mismas características, a un solo lado.

A los pasillos (aceras) de evacuación, se les dará continuidad fuera del túnel hasta conectar con la zona de rescate o bien con la plataforma ferroviaria. La conexión se realizará mediante rampas para salvar el desnivel. La superficie de la rampa será antideslizante y tendrá una anchura libre no inferior a 760 mm. La pendiente máxima de la rampa será conforme al Real Decreto 173/2010. Las rampas deberán ir provistas de pasamanos a ambos lados. Los pasamanos deberán ser continuos conectados con los del interior del túnel, y sus especificaciones serán análogas a las de los pasamanos en el interior del túnel.

La superficie de la acera estará al mismo nivel, libre de obstáculos y será antideslizante (con coeficiente de deslizamiento Clase 2 acorde al Real Decreto 314/2006, modificado por el Real Decreto 173/2010), y no tendrá resaltes en la zona de evacuación.

En los túneles con dos pasillos laterales deberá facilitarse la interconexión entre ambos en las inmediaciones de las salidas de emergencia, con el fin de permitir la evacuación desde el pasillo del lado opuesto a la salida. La solución técnica para la interconexión entre ambos pasillos la decidirá el promotor, buscando siempre facilitar el cruce de las vías por parte de los peatones mediante algún tipo de superficie a cota de carril. Las soluciones técnicas para el cruce de las vías deberán garantizar una superficie de rodadura uniforme y sin obstáculos, no invadirán el gálibo de implantación de obstáculos, no requerirán

modificar la tipología de la vía y tendrán en cuenta las velocidades máximas de circulación por el túnel, así como la facilidad y el coste de las operaciones para su mantenimiento.

El tubo pasamanos, no es un elemento de plataforma. El tubo pasamanos deberá de contemplarse en los proyectos de las instalaciones de protección

NAP 6.3.2 Acceso a Zona Segura:

Salvo en zonas urbanas (a analizar en cada caso por ADIF, pero siempre cumpliendo con la “ETI de Seguridad en Túneles”) en todos los túneles de longitud superior a 1 km se estudiará su ubicación teniendo en cuenta uno de los tres siguientes criterios para el acceso desde el tren hasta la zona segura:

En caso de pasillos transversales a otro túnel o a una galería auxiliar, separación de 500 metros

En caso de salidas que conectan directamente con el exterior, mediante galerías o pozos, separación, como máximo, de 1.000 metros.

Se permitirán soluciones técnicas alternativas que proporcionen una zona segura con un nivel de seguridad, como mínimo, equivalente. El nivel de seguridad equivalente para pasajeros y personal del tren se verificará mediante el método común de seguridad para la evaluación del riesgo.

NAP 6.3.3 Zonas Seguras y de Rescate:

Espacio suficiente fuera o dentro del túnel (de longitud mayor a 1 km) donde se cumplan las condiciones siguientes:

- Las condiciones existentes garantizarán la supervivencia para pasajeros y personal del tren durante el tiempo necesario para realizar una evacuación completa desde la zona segura hasta el lugar seguro final
- Es posible el acceso de las personas con ayuda o sin ella
- Puede hacerse un auto-rescate o bien puede esperarse a ser socorrido por los servicios de rescate
- Es posible la comunicación con el centro de control de Adif
- En caso de zonas seguras subterráneas o submarinas, las instalaciones permitirán que las personas se desplacen desde la zona segura hasta la superficie sin tener que volver a entrar en el tubo afectado del túnel.
- El diseño de una zona segura y su equipamiento deberá tener en cuenta el control de humos para, en particular, proteger a las personas que utilicen las instalaciones de autoevacuación
-

La ETI de Seguridad en Túneles Ferroviarios obliga a que todos los túneles de más de 1 km, o concatenados de más de 1 km, dispongan de los denominados “puntos de lucha contra incendios” entendiendo como tales los lugares definidos, dentro o fuera del túnel, en los que la instalación de lucha contra incendios pueda ser utilizada por los servicios de rescate y donde los pasajeros y el personal del tren puedan evacuarlo.

Los puntos de lucha contra el fuego se ubicarán en las bocas de entrada y salida de dichos túneles e interiormente, si el caso lo requiere, en función de la categoría del material rodante que esté previsto vaya a circular por el túnel (material rodante de pasajeros de las categorías A y/o B).

Las zonas a cielo abierto en torno del punto de lucha contra incendios dispondrán, cerca de las vías de acceso, de una superficie mínima 500 m², con acceso viario afirmado de 5,0 m de ancho mínimo. La ETI de Seguridad en Túneles Ferroviarios exige dicha superficie para facilitar la disposición de los denominados “Puntos de lucha contra el fuego” exteriores (antes citados), con una “doble función” la de “posibilitar la lucha contra el fuego” y la de “evacuación del pasaje y tripulación”, equivalente a “zona segura”

En zonas donde no sea posible disponer estas plataformas podrán utilizarse las calles y carreteras existentes como zonas de rescate. Entre los accesos a las bocas previstos para la fase de obra se elegirá los que deban mantenerse para la fase de explotación definitiva conectando con la red viaria existente. Los caminos seleccionados serán objeto de expropiación definitiva en lugar de ocupación temporal y tendrán las siguientes características mínimas.

- Anchura libre: 3.5 m, no obstante es recomendable que los caminos tengan una anchura libre de 7 m para permitir el cruce de vehículos si la orografía u otros condicionantes lo permiten
- Altura libre o gálibo 4,5m
- Capacidad portante 20kN/m²

En los tramos curvos, el carril de rodadura debe quedar delimitado por la traza de una corona circular cuyo radios mínimos deben ser 5.30 m y 12.5 m., con una anchura libre para circular de 7.20 m

ETI Art. 4.2.1.5.1. Zona Segura: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- Una zona segura permitirá la evacuación de los trenes que utilicen el túnel. Tendrá una capacidad acorde con la capacidad máxima de los trenes que se prevea que circulen en la línea donde se localiza el túnel.
- La zona segura garantizará condiciones de supervivencia para pasajeros y personal del tren durante el tiempo necesario para realizar una evacuación completa desde la zona segura hasta el lugar seguro final.
- En caso de zonas seguras subterráneas o submarinas, las instalaciones permitirán que las personas se desplacen desde la zona segura hasta la superficie sin tener que volver a entrar en el tubo afectado del túnel.
- El diseño de una zona segura y su equipamiento deberá tener en cuenta el control de humos para, en particular, proteger a las personas que utilicen las instalaciones de auto-evacuación.

Acceso a Zona Seguro

ETI Art. 4.2.1.5.2 Acceso a la zona segura: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Las zonas seguras serán accesibles para las personas que inicien la auto-evacuación desde el tren así como para los servicios de intervención en emergencias.
- b) Se elegirá una de las siguientes soluciones para el acceso desde el tren hasta la zona segura:
 - 1) salidas de emergencia a la superficie laterales y/o verticales. Deberá haber este tipo de salidas, como mínimo, cada 1.000 m;
 - 2) galerías de conexión transversales entre tubos independientes y contiguos del túnel que permitan utilizar el tubo contiguo del túnel como zona segura. Deberán disponerse estas galerías transversales, como mínimo, cada 500 m;
 - 3) se permiten soluciones técnicas alternativas que proporcionen una zona segura con un nivel de seguridad, como mínimo, equivalente. El nivel de seguridad equivalente para pasajeros y personal del tren se verificará mediante el método común de seguridad para la evaluación del riesgo.
- c) Las puertas de acceso desde el pasillo de evacuación a la zona segura tendrán una abertura libre de al menos 1,4 m de ancho por 2 m de alto. De manera alternativa, se permite utilizar múltiples puertas contiguas de menor anchura siempre que se verifique que la capacidad total de paso de personas es equivalente o superior.
- d) Una vez atravesadas las puertas, la abertura libre deberá seguir siendo de al menos 1,5 m de ancho por 2,25 m de alto.
- e) Se describirá en el plan de emergencia el modo en que los servicios de intervención en emergencias accederán a la zona segura.

ETI Art. 4.2.1.5.3. Medios de comunicación en zonas seguras: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud. La comunicación será posible, bien por teléfono móvil, bien mediante conexión fija, entre las zonas seguras subterráneas y el centro de control del administrador de la infraestructura.

ETI Art. 4.2.1.5.4. Alumbrado de emergencia en las rutas de evacuación: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 0,5 km de longitud.

- a) Se instalará alumbrado de emergencia para guiar a los pasajeros y al personal del tren hacia una zona segura en caso de emergencia.
- b) La iluminación deberá cumplir los siguientes requisitos:
 - 1) en tubo de vía única: en el lado del pasillo de evacuación;
 - 2) en tubo de vías múltiples: en ambos lados del tubo;
 - 3) posición de las luces:
 - por encima del pasillo de evacuación, lo más bajo posible, y de forma que no interrumpan el espacio libre para el paso de personas, o bien
 - integradas en los pasamanos;
 - la iluminancia deberá mantenerse en el tiempo en al menos 1 lux en cualquier punto del plano horizontal a nivel del pasillo.

- c) Autonomía y fiabilidad: deberá disponerse de un suministro eléctrico alternativo durante un período de tiempo apropiado tras la interrupción del suministro eléctrico principal. El tiempo requerido deberá adecuarse a los escenarios de evacuación y estar definido en el plan de emergencia.
- d) Si las luces de emergencia se desconectan en condiciones normales de funcionamiento, será posible encenderlas por los dos medios siguientes:
 - 1) manualmente desde el interior del túnel a intervalos de 250 m;
 - 2) por el explotador del túnel mediante control remoto.

ETI Art. 4.2.1.5.5. Señalización de evacuación: Esta especificación se aplica a todos los túneles.

- a) La señalización de la evacuación indicará las salidas de emergencia, la distancia a la zona segura y la dirección hacia esta.
- b) Todas las señales se ajustarán a las disposiciones de la Directiva 92/58/CEE, de 24 de junio de 1992, relativa a las disposiciones en materia de señalización de seguridad y de salud en el trabajo y a lo especificado en el apéndice A, índice no 1.
- c) Las señales de evacuación se instalarán en los hastiales a lo largo de los pasillos de evacuación.
- d) La distancia máxima entre las señales de evacuación será 50 m.
- e) Se instalarán señales en el túnel para indicar la posición del equipamiento de emergencia, en los lugares donde esté situado dicho equipamiento.
- f) Todas las puertas que conduzcan a salidas de emergencia o galerías de conexión transversal estarán señalizadas.

ETI Art. 4.2.1.6. Pasillos de evacuación: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 0,5 km de longitud.

- a) Se construirán pasillos de evacuación en los túneles de vía única, como mínimo, a un lado de la vía, y en los túneles de vías múltiples, a ambos lados del túnel. En los túneles con más de dos vías, será posible el acceso a un pasillo de evacuación desde cada vía.
 - 1) La anchura del pasillo de evacuación será de al menos 0,8 m.
 - 2) La altura libre mínima por encima del pasillo de evacuación será de 2,25 m.
 - 3) La altura del pasillo estará al nivel de la parte superior del carril o incluso más alto.
 - 4) Se evitarán estrechamientos locales provocados por obstáculos dentro del gálibo de evacuación. La presencia de obstáculos no reducirá la anchura mínima a menos de 0,7 m y la longitud del obstáculo no superará los 2 m.
- b) Se instalarán pasamanos continuos entre 0,8 m y 1,1 m por encima del pasillo que marquen el rumbo hacia una zona segura.
 - 1) Los pasamanos se colocarán fuera del gálibo libre mínimo del pasillo de evacuación.
 - 2) Los pasamanos formarán un ángulo entre 30° y 40° respecto al eje longitudinal del túnel a la entrada y a la salida del obstáculo.

ETI Art. 4.2.1.7. Puntos de lucha contra incendios: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) A los efectos de la presente cláusula, dos o más túneles consecutivos serán considerados como un túnel único, a menos que se cumplan las dos condiciones siguientes:
 - 1) la separación a cielo abierto entre ellos supere en más de 100 m la longitud máxima del tren que vaya a circular en la línea, y
 - 2) el área a cielo abierto alrededor de la vía y su situación respecto de esta, en el tramo de separación entre los dos túneles, permiten a los pasajeros alejarse del tren hacia un espacio seguro. El espacio seguro deberá tener un tamaño suficiente para acoger a todos los pasajeros correspondientes al tren de mayor capacidad que se prevea que va a circular por la línea.
- b) Se crearán puntos de lucha contra incendios:
 - 1) fuera de ambas bocas de todos los túneles de menos de 1 km, y
 - 2) dentro del túnel, según la categoría del material rodante previsto para circular, tal y como se resume en el siguiente cuadro:

Longitud del túnel	Categoría del material rodante con arreglo al apartado 4.2.3	Distancia máxima desde las bocas hasta un punto de lucha contra incendios y entre dos de ellos
1 a 5 km	Categoría A o B	No se requiere ningún punto de lucha contra incendios
5 a 20 km	Categoría A	5 km
5 a 20 km	Categoría B	No se requiere ningún punto de lucha contra incendios
más de 20 km	Categoría A	5 km
más de 20 km	Categoría B	20 km

- c) Requisitos para todos los puntos de lucha contra incendios:
 - 1) los puntos de lucha contra incendios estarán equipados con suministro de agua (de al menos 800 l/min durante dos horas) cerca de los puntos previstos para la detención del tren. El método de suministro del agua se describirá en el plan de emergencia;
 - 2) se deberá indicar al maquinista del tren el punto previsto para la detención del tren. Esto no requerirá equipamiento específico a bordo (todos los trenes que cumplan la presente ETI podrán usar el túnel);
 - 3) los puntos de lucha contra incendios serán accesibles a los servicios de intervención en emergencias. En el plan de emergencia se describirá la forma en que los servicios de intervención en emergencias accederán al punto de lucha contra incendios y desplegarán el equipo;

- 4) se podrá interrumpir la alimentación eléctrica de tracción y poner a tierra la instalación eléctrica en los puntos de lucha contra incendios, ya sea de forma presencial o por control remoto.
- d) Requisitos de los puntos de lucha contra incendios situados fuera de las bocas del túnel. Además de los requisitos descritos en la cláusula 4.2.1.7, letra c), los puntos de lucha contra incendios fuera de las bocas del túnel cumplirán las siguientes condiciones:
 - 1) La zona a cielo abierto en torno al punto de lucha contra incendios dispondrá de una superficie de al menos 500 m2.
- e) Requisitos de puntos de lucha contra incendios dentro del túnel. Además de los requisitos descritos en la cláusula 4.2.1.7, letra c), los puntos de lucha contra incendios dentro del túnel cumplirán las siguientes condiciones:
 - 1) se podrá acceder a una zona segura desde el punto de detención del tren. En las dimensiones de la ruta de evacuación hacia la zona segura se deberá considerar el tiempo de evacuación (según lo especificado en la cláusula 4.2.3.4.1) y la capacidad prevista de los trenes (mencionada en la cláusula 4.2.1.5.1) que vayan a circular por el túnel. Se deberá demostrar que el tamaño de la ruta de evacuación resulta adecuado;
 - 2) la zona segura asociada con el punto de lucha contra incendios tendrá una superficie suficiente para que los pasajeros esperen de pie hasta ser evacuados a una zona segura final;
 - 3) existirá un acceso al tren afectado para los servicios de intervención en emergencias sin que tengan que atravesar la zona segura ocupada;
 - 4) el diseño del punto de lucha contra incendios y de su equipamiento deberá tener en cuenta el control de humos para, en particular, proteger a las personas que utilicen las instalaciones de auto-evacuación para acceder a la zona segura.

ETI Art. 4.2.1.8. Comunicaciones de emergencia: Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Deberá haber comunicación por radio entre el tren y el centro de control del administrador de la infraestructura en cada túnel, mediante GSM-R.

Asimismo, tendrá que haber continuidad por radio para que los servicios de intervención en emergencias se comuniquen in situ con sus centros de mando. El sistema permitirá que los servicios de intervención en emergencias puedan usar su propio equipo de comunicación.

13.4 Trazado y sección transversal

NAP 6.1 Trazado y Sección Transversal

Entre los riesgos que deben ser analizados y evaluados al elegir el trazado del túnel en planta y perfil y sus salidas al terreno, se considerarán los siguientes:

- En las trincheras de acceso, inestabilidad y erosión de taludes. Se estudiará la necesidad de obras de defensa o contención, revestimientos, etc.

- Existencia de edificaciones, explotaciones industriales, canteras, depósitos, etc próximos a la traza en las bocas
- Inundación del túnel por lluvias, filtraciones, cauces fluviales, rotura de canalizaciones próximas, etc.

El diseño del perfil longitudinal tendrá en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Evitar los puntos bajos de acumulación de aguas en el interior del túnel y, en su caso, proyectar los pozos y equipos de bombeo necesarios.
- La pendiente longitudinal mínima será de 5‰ y, sólo en casos excepcionales, del 2‰ en recomendaciones de trazado. La pendiente máxima, para tráfico mixto, será del 12,5‰ (excepcionalmente, 15‰) y para tráfico de viajeros 25‰ (excepcionalmente el 30‰)

La sección transversal, además de estar dimensionada a efectos de las variaciones de presión del aire (sección libre > a 85 m² y 52 m² en todos los casos) deberá cumplir los siguientes condicionantes mínimos, en todos los casos:

- Sostenimiento estructural y Revestimiento de hormigón en todos los casos, disponiendo

contrabóveda armada, en lugar de losa plana, en los siguientes:

o Excavación en suelos.

o Excavación en roca (a no ser que el estudio de sus características específicas: valores del RMR, condicionantes especiales, altura de montera, etc., no lo justificase).

- Impermeabilización del revestimiento, siempre que lo justifique la presencia de filtraciones.

- Espacio suficiente para el gálibo y las instalaciones ferroviarias (catenaria, aparatos tensores, seccionadores, señalización, etc.).

- Drenaje de las aguas de infiltración, escorrentía, limpieza, extinción de incendios, etc estudiando, en función del tipo de tráfico previsto y de la tipología de vía sobre balasto o en placa, la necesidad de sistema separativo

- Aceras aptas como pasillos de evacuación (ver más adelante) y provistas de espacio para canalizaciones ocultas.

- En los túneles de vía doble de más de 1800 m, con tapa de canaleta de 4 cm de espesor y cuando se prevea un aumento de la velocidad igual o superior a 350km/h y cruces de trenes en doble composición, se deberá realizar un estudio concreto de detalle para el análisis de los efectos aerodinámicos sobre la citada tapa, independientemente del cumplimiento de los criterios de salud y confort de cara a la protección del viajero.

- En el caso de zonas singulares que supongan bruscos cambios de sección tales como pozos de ventilación, cavernas de bifurcación, estrechamientos continuados u otros, se deberán realizar estudios aerodinámicos específicos para el análisis de los efectos aerodinámicos sobre las tapas de canaleta de estas zonas, siempre y cuando la velocidad de circulación sea igual o superior a 350km/h.

Se podrá dimensionar la sección libre menor a 85 m², justificada por un estudio aerodinámico y de gálidos de detalle.

14 Tramificación

La tramificación de los túneles, en función al sostenimiento a aplicar es la siguiente:

14.1 Alternativa A1y A2

Ramal Serantes Tronco			
Inicio	Fin	Longitud	
728	1162	411	
inicio	fin	long	Sost
728	748	20	Emboq
748	858	110	III
858	950	92	II
950	1162,5	212,5	IV

Conexión Serantes 1 (norte)			
Inicio	Fin	Longitud	
o	1266	1266	
inicio	fin	long	Sost
o	135	135	IV
135	645	510	II
645	680	35	III
680	785	105	IV
785	820	35	III
820	1180	360	II
1180	1313	133	IV

Conexión Serantes 2 (sur)			
Inicio	Fin	Longitud	
o	2199	2199	
inicio	fin	long	Sost
o	125	125	IV
125	250	125	I
250	325	75	III
325	1000	675	I
1000	1225	225	II
1225	1420	195	II
1420	1500	80	III
1500	1550	50	IV
1550	1690	140	IV
1690	1780	90	III
1780	2064	284	II
2064	2199	135	IV

Ramal Serantes Tronco		
	Long	%
Tipo I	o	0,00%
Tipo II	92	21,20%
Tipo III	110	25,35%
Tipo IV	212,5	48,96%
Tipo V	20	4,61%

Serantes 1 (Norte)		
	Long	%
Tipo I	o	0,00%
Tipo II	870	66,23%
Tipo III	70	5,33%
Tipo IV	373	28,39%
Tipo V		0,00%

Serantes 2 (sur)		
	Long	%
Tipo I	800	36,38%
Tipo II	704	32,01%
Tipo III	245	11,14%
Tipo IV	450	20,46%
Tipo V		0,00%

14.2 Alternativa B

La tramificación de túneles en función del sostenimiento a aplicar es la siguiente:

Tronco			
Inicio	Fin	Longitud	
620	1250	630	
inicio	fin	long	Sost
620	640	20	I
640	800	160	IV
800	1250	450	I

Ramal Serantes Tronco			
Inicio	Fin	Longitud	
600	1338	738	
inicio	fin	long	Sost
600	615	15	Emboq
615	814,7	199,7	III
814,7	976,9	162,2	II
976,9	987,2	10,3	IV
987,2	1100,55	113,35	II
1100,55	1124	23,45	III
1124	1338,8	214,8	II

Conexión Serantes 1			
Inicio	Fin	Longitud	
o	1376	1376	
inicio	fin	long	Sost
o	160	160	IV
160	953,5	793,5	II
953,5	1146,4	192,9	III
1146,4	1265	118,6	I
1265	1376	111	IV

Conexión Serantes 2			
Inicio	Fin	Longitud	
o	2194	2157	
inicio	fin	long	Sost
o	125	125	IV
125	803,8	678,8	II
803,8	842,5	38,7	IV
842,5	1011,27	168,77	II
1011,27	1038,57	27,3	III
1038,57	1056,97	18,4	IV
1056,97	1429,07	372,1	II
1429,07	1443,27	14,2	IV
1443,27	1683,45	240,18	III
1683,45	1972,2	288,75	II
1972,2	2132	159,8	IV

Ramal Serantes Tronco		
	Long	%
Tipo I	o	0,00%
Tipo II	490,35	66,44%
Tipo III	223,15	30,24%
Tipo IV	10,3	1,40%
Tipo V	15	2,03%

Conexión Serantes 1		
	Long	%
Tipo I	118,6	8,62%
Tipo II	793,5	57,67%
Tipo III	192,9	14,02%
Tipo IV	271	19,69%
Tipo V		0,00%

Conexión Serantes 2		
	Long	%
Tipo I	o	0,00%
Tipo II	1508,42	69,93%
Tipo III	267,48	12,40%
Tipo IV	356,1	16,51%
Tipo V		0,00%

14.3 Tronco

En este documento, solo se analiza el tramo de tronco comprendido entre los PPKK 0+620 a 1+250

Tronco			
Inicio	Fin	Longitud	
620	1250	630	
inicio	fin	long	Sost
620	679	20	I
679	813	134	IV
813	1250	437	I

15 Rendimientos

La previsión del tiempo real de ejecución de un túnel depende de un gran número de parámetros, tales como número de frentes de ataque, número de relevos al día, días laborables a la semana, superposición en el tiempo de distintas tareas y fundamentalmente, disponibilidad de maquinaria y de mano de obra, que únicamente pueden ser correctamente evaluados por el contratista en el momento de comenzar una obra. Pese a estas incertidumbres, se han realizado una serie de supuestos en cada caso que permiten una estimación del plazo de las obras

A continuación se incluye una tabla, en la que se establece una estimación del plazo de ejecución de ambas alternativas por métodos convencionales. En los rendimientos estimados se ha supuesto 24 horas de trabajo/día en relevos continuos trabajando 7 días a la semana y ya incluyen una penalización por posibles imprevistos que se pudieran producir. En el caso de que los trabajos se realicen en turnos de 24h en 5 días semanales, los plazos de obra deberán ser corregidos multiplicándolos por un factor de 1.4

Se suponen 90 días para la ejecución de emboquilles a cielo abierto y 20 días adicionales para realizar los entronques (cavernas) de los ramales con el tronco..

Se ha supuesto que una serie de actividades se pueden realizar de forma simultánea, por lo que se han aplicado unos coeficientes de solape de actividades:

Actividad	Coeficiente Solape	Actividades solapadas
Excavación Avance	0 %	
Excavación Destroza	60%	Excavación Avance
Ejecución Zapatas y Contrabóveda	15%	Excavación Destroza
Revestimiento	50%	Zapatas y Contrabóveda

15.1 Alternativa A1-A2

15.1.1 Ramal Serantes Tronco

Sost	Rend Excavación	Longitud	Dias Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	0	0,0	15	0,00	12	0,00
II	8	92	11,5	15	6,13	12	7,67
III	6	110	18,3	15	7,33	12	9,17
IV	3	212,5	70,8	15	14,17	12	17,71
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		414,5	101,9		27,6		34,5

Aplicando los coeficientes de solape entre trabajos resulta:

Emboq	90
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	23,49
Reves	17,27
Total	263,26
Meses	8,6

Ramal Serantes Tronco; 263.26 días /8.6 meses

15.1.2 Conexión Serantes 1

Sost	Rend Excavación	Longitud	Dias Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	0	0,0	15	0,00	12	0,00
II	8	870	108,8	15	58,00	12	72,50
III	6	70	11,7	15	4,67	12	5,83
IV	3	373	124,3	15	24,87	12	31,08
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		1313,0	101,9		87,5		109,4

Aplicando los coeficientes de solape entre trabajos resulta:

Entronq	20
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	74,40
Reves	54,71
Total	281,61
Meses	9,2

Conexión Serantes : 281,6 días. / 9,2 meses.

15.1.3 Conexión Serantes 2

Conexión Serantes 2

Sost	Rend Excavación	Longitud	Dias Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	800	80,0	15	53,33	12	66,67
II	8	704	88,0	15	46,93	12	58,67
III	6	245	40,8	15	16,33	12	20,42
IV	3	450	150,0	15	30,00	12	37,50
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		2199,0	101,9		146,6		183,3

Aplicando los coeficientes de solape entre trabajos resulta

Emboq	20
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	124,61
Reves	91,63
Total	368.73
Meses	12.1

Conexión Serantes 2: 368,7 días / 14,1 meses

15.2 Alternativa B

15.2.1 Ramal Serantes Tronco

Sost	Rend Excavación	Longitud	Dias Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	0	0,0	15	0,00	12	0,00
II	8	490,35	61,3	15	32,69	12	40,86
III	6	223,15	37,2	15	14,88	12	18,60
IV	3	10,3	3,4	15	0,69	12	0,86
V	2	15	7,5	15	1,00	12	1,25
Total		738,8	101,9		49,3		61,6

Aplicando los coeficientes de solape entre trabajos resulta

Embo	90
Avance	101,92
Zapatas	41,87
Reves	30,78
Total	264,57
Meses	8,7

Ramal Serantes Tronco: 315,7 días / 11 meses

15.2.2 Conexión Serantes 1

Sost	Rend Excavación	Longitud	Dias Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	118,6	11,9	15	7,91	12	9,88
II	8	793,5	99,2	15	52,90	12	66,13
III	6	192,9	32,2	15	12,86	12	16,08
IV	3	271	90,3	15	18,07	12	22,58
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		1376,0	101,9		91,7		114,7

Aplicando los coeficientes de solape se obtiene:

Entronq	20
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	77,97
Reves	57,33
Total	287,80
Meses	9,4

Conexión Serantes 1: 287,8 días 7 9,4 meses

15.2.3 Conexión Serantes 2

Sost	Rend Excavación	Longitud	Días Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	0	0,0	15	0,00	12	0,00
II	8	1508,42	188,6	15	100,56	12	125,70
III	6	267,48	44,6	15	17,83	12	22,29
IV	3	356,1	118,7	15	23,74	12	29,68
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		2132,0	101,9		142,1		177,7

Aplicando los coeficientes de solape de trabajos se obtiene:

Entronq	20
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	120,81
Reves	88,83
Total	362,14
Meses	11,9

Conexión Serantes 2: 362,1 / 11,9 meses

15.3 Tronco VSF

Sost	Rend Excavación	Longitud	Días Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
I	10	496	49,6	15	33,07	12	41,33
II	8	0	0,0	15	0,00	12	0,00
III	6	134	22,3	15	8,93	12	11,17
IV	3	0	0,0	15	0,00	12	0,00

Sost	Rend Excavación	Longitud	Días Excavación	Rend. Zapatas	Días Zapat	Rendimiento Revestimiento	Días Revestimiento
V	2	0	0,0	15	0,00	12	0,00
Total		630,0	101,9		42,0		52,5

Aplicando los coeficientes de reducción se obtiene:

Emboq	20,0
Avance	101,92
Destroza	30,58
Zapatas	35,70
Reves	26,25
Total	214,45
Meses	7,0

Tronco: 214,45 días / 7 meses

15.4 Conclusiones

Los trabajos de ataque y excavación se distribuyen de la siguiente manera

El Ramal Serantes Tronco y las Conexiones Serantes 1 y 2 se atacan desde el emboquille de Ortuella. Las excavaciones de las conexiones Serantes 1 y Serantes 2, se pueden simultanear en el tiempo.

El Tronco Serantes Olabeaga del tramo objeto del presente documento se atacaría desde la salida de emergencia/galería de ataque nº3.

De la misma forma se han supuesto 90 días para la ejecución de cada emboquille y 60 días para los emboquilles de las galerías, cuya ejecución se pueden solapar en el tiempo. Para el cálculo de rendimiento de las galerías de ataque se ha supuesto un rendimiento medio de 6m/día para toda la longitud de la galería. De este modo los tiempos de ejecución de las galerías de ataque son:

Alternativa A	Longitud	Emboquille	Excavación	Total
Salida de emergencia 2.	640	60 días	106 días	166 días / 5,4 meses
Salida de emergencia 3. Galería de ataque	750	60 días	125 días	185 días / 6 meses

Alternativa B	Longitud	Emboquille	Excavación	Total
Salida de emergencia 2.	715	60 días	119 días	179 días / 5.8 meses
Salida de emergencia 3. Galería de ataque	750	60 días	125 días	185 días / 6 meses

Las conexiones Serantes 1 y Serantes 2, se pueden ejecutar de forma conjunta, atacando desde un único emboquille. Por tanto, el plazo máximo de ejecución para ambas conexiones lo marca el trazado de la Conexión Serantes 2.

La tabla resumen de plazos se muestra a continuación

Tramo	Alternativa A (meses)	Alternativa B (meses)
Ramal Serantes Tronco	8,6	8,7
Ramal Serantes 1	9,2	9,4
Ramal Serantes 2	12,2	11,9
Tronco (incluye plazo Galería 3)	13	13

El plazo más largo lo marca la ejecución del tronco supeditada a la ejecución de la galería nº3. Su plazo conjunto es de 6+7=13 meses

Se han añadido a modo de “imprevistos” dos meses adicionales de plazo, con lo que el plazo final de la excavación de los túneles **es de 15 meses en el caso de trabajos 7 días a la semana o bien 21 meses en trabajos de 5 días a la semana.**