



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

GRADO EN INGENIERÍA MINERA

TRABAJO FIN DE GRADO

PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL
INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE
LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD
VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-
ONTÍGOLA

León, Septiembre de 2016

Autor: José Gullón Conejo

Tutor: Daniel Vázquez Silva

El presente proyecto ha sido realizado por D. José Gullón Conejo, alumno/a de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Grado en Ingeniería Minera.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D. Daniel Vázquez Silva, profesor/a del Grado en Ingeniería Minera.

Visto Bueno

Fdo.: D. José Gullón Conejo

El autor del Trabajo Fin de Grado

Fdo.: D. Daniel Vázquez Silva

El Tutor del Trabajo Fin de Grado

RESUMEN

El presente proyecto desarrolla las distintas fases para la construcción del túnel EL REGAJAL incluido en la línea de alta velocidad de Levante-Madrid-Castilla la Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia. Tramo: Aranjuez-Ontígola A partir de los datos geológicos y geotécnicos, se obtienen las características del terreno con las que se determina el sostenimiento y el sistema de excavación más adecuado para la construcción de dicho túnel.

ABSTRACT

This Project develops the different phases for the construction of EL REGAJAL tunnel which is included in the line Levante-Madrid-Castilla la Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia. In Aranjuez-Ontígola .The characteristics of the terrain are obtained from the geological and geotechnical data and then, the support and the excavation system more indicated are calculated using them.

ÍNDICE

DOCUMENTO I MEMORIA

1	Introducción.....	13
2	Objeto del proyecto.....	14
3	Situación geográfica.....	14
4	Características geométricas de la obra a realizar.....	15
5	Geología general de la zona.....	15
5.1	Marco geológico.....	15
5.2	Litoestratigrafía.....	16
5.3	Tectónica.....	17
5.4	Hidrogeología.....	17
6	Caracterización geotécnica del macizo rocoso.....	19
6.1	Síntesis geotécnica de los materiales atravesados por el túnel.....	20
6.2	Tramificación geológica - geotécnica del túnel.....	26
6.3	Fases de construcción.....	33
7	Definición geométrica de las secciones tipo.....	33
7.1	Tramificación de las secciones tipo del túnel.....	34
8	Sistemas de excavación.....	35
8.1	Volumen de excavación.....	36
8.2	Arranque Mecánico.....	37
8.2.1	Fases de construcción.....	37
8.3	Avance mediante perforación y voladura.....	37
8.3.1	Perforación.....	37
8.3.2	Longitud de pase.....	38
8.3.3	Voladuras.....	38
8.3.4	Consumo previsto de explosivo.....	38
9	Sostenimiento.....	39
9.1	Cálculo del sostenimiento.....	40

9.2	Nivel de proyecto de sostenimiento	40
9.3	Secciones tipo de sostenimiento	41
9.4	Tratamientos especiales.	42
9.4.1	Tratamiento del frente.	43
9.4.2	Jet-grouting.	43
9.4.3	Sostenimiento en los emboquilles.	44
10	Ventilación.	44
10.1	Datos de partida.	45
10.2	Cálculo del caudal de aire necesario.	46
10.2.1	Caudal de aire para la respiración de las personas.	46
10.2.2	Caudal de aire para la mantener la velocidad de la corriente de retorno.	46
10.2.3	Caudal de aire para diluir los humos de las voladuras.	46
10.2.4	Caudal de aire necesario para diluir los gases de escape de los motores de combustión interna.	46
10.2.5	Caudal de aire para la eliminación del polvo.	46
10.2.6	Caudal de para la disipación del calor.	46
10.3	Determinación de la potencia del ventilador.	47
11	Electrificación.	47
11.1	Instalación de la “boca de Aranjuez”	48
12	Red de agua.	49
13	Red de aire comprimido	50
14	Resumen Presupuesto	51
14.1	Presupuesto por partida.	51
14.2	Presupuesto excavación	51
14.3	Presupuesto total.	51

DOCUMENTO II ANEXOS

ANEXO I GEOLOGÍA Y GEOTECNIA	54	
1	Introducción.....	54
2	Geología del macizo rocoso.	54
3	Geomorfología de la zona.....	55
3.1	Estratigrafía.	55
3.2	Tectónica.	60
3.3	Hidrogeología.	62

4	Estudio de gases.....	64
5	Tramificación geológica del trazado del túnel.....	65
6	Geotecnia del macizo rocoso.....	67
6.1	Síntesis geotécnica de cada litotipo definido.	67
6.2	Tramificación geotécnica del túnel.....	68
7	Problemática geotécnica.	76
8	Implicaciones constructivas.....	78
9	Excavabilidad.	78
ANEXO II SOSTENIMIENTO.....		80
1	Diseño del sostenimiento.	80
1.1	Determinación del nivel del proyecto de sostenimiento.....	80
1.2	Cálculo del sostenimiento.....	81
1.2.1	Tipos de sostenimientos.	81
1.3	Tratamientos especiales.	83
1.3.1	Tratamiento del frente.	83
1.3.2	Jet-grouting.....	84
1.3.3	Sostenimiento en los emboquilles.....	84
1.4	Revestimiento.	88
2	Método constructivo.	88
2.1	Sistemas de excavación.....	89
2.1.1	Arranque mecánico.....	89
2.1.2	Avance mediante perforación y voladura.	97
2.1.2.1	<i>Perforación</i>	97
2.1.2.2	<i>Longitud de pase</i>	97
2.1.2.3	<i>Voladuras</i>	97
ANEXO III PERFORACIÓN Y VOLADURA.....		98
1	Método de construcción del túnel.	98
2	Cálculo de las voladuras.....	99
2.1	Voladuras de avance.	99
2.1.1	Perforación.....	99
2.1.2	Longitud de pase.....	99
2.1.3	Cálculo de los parámetros del cuele, destroza, zapatera y contorno.	100

2.1.4	Cálculo del explosivo necesario para las voladuras de avance.	103
2.1.5	Esquema de perforación y secuencia de encendido.	111
2.2	Voladuras de destroza.....	111
2.2.1	Perforación.....	111
2.2.2	Longitud de pase.....	111
2.2.3	Cálculo de los parámetros de la voladura.	111
2.2.4	Cálculo del explosivo necesario para las voladuras de destroza.....	112
2.2.5	Esquema de perforación y secuencia de encendido.	113
2.3	Cálculo de Explosor.	113
3	Número de voladuras y consumo de explosivos por voladura.	114
4	Consumo total de explosivos.....	116
5	ESTUDIO DE VIBRACIONES.....	117
5.1	Características de las voladuras.	117
5.2	Clasificación de las estructuras.	118
5.3	Criterio de daños.....	118
5.4	Tipos de estudios a realizar.....	118
ANEXO IV VENTILACIÓN.....		121
1	Introducción.....	121
2	Datos de partida.	121
3	Cálculo del caudal de aire necesario.	122
3.1	Caudal de aire para la respiración de las personas.....	122
3.2	Caudal de aire para la mantener la velocidad de la corriente de retorno.....	122
3.3	Caudal de aire para diluir los humos de las voladuras.....	122
3.4	Caudal de aire necesario para diluir los gases de escape de los motores de combustión interna.....	123
3.5	Caudal de aire para la eliminación del polvo.	123
3.6	Caudal de para la disipación del calor.....	123
4	Determinación de la potencia del ventilador.	124
ANEXO V AIRE COMPRIMIDO		127
1	Introducción.....	127
2	Red de aire comprimido.	127
2.1	Consumo previsto de aire comprimido.....	127

2.2	Determinación del compresor y de la tubería.	127
3	Desagüe.....	128
ANEXO VI ELECTRIFICACIÓN		130
1	Introducción.....	130
2	Reglamentos y normas.	130
3	Suministro eléctrico.	131
4	Descripción de las instalaciones.	131
4.1	Instalación de la “boca de Aranjuez”	131
4.1.1	Centro de transformación de 1400 kva - 0.42/6 kv.....	133
4.1.2	Previsión de cargas y descripción de las líneas.	133
4.2	Canalizaciones.	139
4.3	Bornas de empalme y derivación.....	139
4.4	Cálculo de las líneas.	139
4.5	Centros de transformación: normas y reglamentos.	140
4.5.1	Características de los Centros de Transformación.	140
4.5.2	Cálculo de las intensidades en los transformadores	142
4.6	Reglamento de servicio para los centros de transformación	143
4.7	Medidas de seguridad.....	144
4.8	Instalación de alumbrado.....	145
4.9	Instalación de puesta a tierra.....	147
DOCUMENTO III PLANOS		
	<u>Plano de situación</u>	163
	Planta del túnel	163
	Perfil geológico	163
	Sección tipo I-R	163
	Sección tipo I-RA	163
	Sección tipo II	163
	Sección tipo III.....	163
	Esquema de perforación avance y destroza	163
	Esquema unifilar	163

DOCUMENTO IV PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

1	Definición y condiciones generales	163
1.1	Definición	163
1.2	Condiciones generales	163
1.2.1	Conformidad de la obra con los planos y variaciones permisibles.....	163
1.2.2	Responsabilidades durante la ejecución	163
1.2.3	Conservación del medio ambiente	163
1.2.4	Normas para la realización de los trabajos con maquinaria para obras	163
1.2.5	Materiales, piezas y equipos en general	164
1.2.6	Tratamiento y gestión de residuos	164
1.2.7	Limpieza final de las obras	167
1.2.8	Conservación de las obras durante la ejecución y el plazo de garantía	167
1.2.9	Seguro a suscribir por el Contratista	167
1.2.10	Relaciones entre los documentos del proyecto y normativa	168
2	Condiciones del proceso de ejecución	168
2.1	Excavación con medios mecánicos: retroexcavadora y martillo hidráulico.	168
2.2	Excavación con explosivos	169
2.3	Saneos	169
2.4	Longitud de avance	170
2.5	Excavación	170
2.6	Ventilación	170
3	Sostenimiento	170
3.1	Tipos de sostenimiento	170
3.1.1	Normas generales de ejecución.....	171
3.1.2	Precauciones especiales	171
3.1.3	Refuerzos	172
3.2	Bulones.....	172
3.2.1	Materiales	173
3.3	Mallazo	173
3.3.1	Materiales	173
3.3.2	Puesta en obra	173

3.4	Cerchas	173
3.4.1	Materiales	174
3.4.2	Puesta en obra	174
3.5	Hormigón proyectado	174
3.5.1	Materiales básicos	175
3.5.2	Requisitos requeridos	177
3.5.3	Dosificación de referencia	177
3.5.4	Puesta en obra	177
3.5.5	Control y ensayos.....	178
3.6	Fibras estructurales para hormigón proyectado	179

DOCUMENTO V PRESUPUESTO

1	Mediciones globales	182
1.1	Mediciones de mano de obra	182
1.2	Mediciones maquinaria.....	182
1.3	Mediciones emboquille.....	182
1.4	Mediciones explosivos	183
1.5	Mediciones de transporte y almacenamiento de explosivos.	183
1.6	Mediciones de sostenimiento.....	183
1.7	Mediciones de ventilación.	183
1.8	Mediciones aire comprimido	183
1.9	Mediciones electrificación.	184
2	Precios unitarios	184
2.1	Precios unitarios de mano de obra	184
2.2	Precios unitarios maquinaria	184
2.3	Precios unitarios emboquilles	185
2.4	Precios unitarios explosivos	185
2.5	Precios unitarios almacenamiento y transporte de explosivos.....	185
2.6	Precios unitarios sostenimiento.....	185
2.7	Precios unitarios de ventilación.	186
2.8	Precios unitarios de aire comprimido	186
2.9	Precios unitarios de electrificación.	186
3	Precios totales.....	186
3.1	Precios totales mano de obra.	186

3.2	Precios totales maquinaria.....	187
3.3	Precios totales emboquilles.	187
3.4	Precios totales explosivos.	187
3.5	Precios totales de almacenamiento y transporte de explosivos.	187
3.6	Precios totales de sostenimiento.	188
3.7	Precios totales ventilación.	188
3.8	Precios totales de aire comprimido.	188
3.9	Precios totales electrificación.	188
4	Resumen presupuesto	189
4.1	Presupuesto por partida.	189
4.2	Presupuesto excavación.....	189
4.3	Presupuesto total.....	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Situación geográfica del túnel.....	14
Ilustración 2 Sección tipo I-R.....	90
Ilustración 3 Sección tipo I-RA	92
Ilustración 4 Sección tipo II	93
Ilustración 5 Sección tipo III	94
Ilustración 6 Sección de excavación	98
Ilustración 7 Jumbo para la perforación	99
Ilustración 8 Primera sección del cuele	101
Ilustración 9 Segunda sección del cuele	101
Ilustración 10 Tercera sección del cuele.....	102
Ilustración 11 Explosivo para el cuele.....	103
Ilustración 12 Barreno tipo cuele	105
Ilustración 13 Barreno tipo destroza	106
Ilustración 14 Barreno tipo zapatera	107
Ilustración 15 Barreno tipo recorte	107

ÍNDICE DE TABLAS

1-1 Principales características del túnel.	13
5-1 Cotas del nivel freático.	19
6-1 Características unidad geotécnica M_{AR}	21
6-2 Características unidad geotécnica M_{YAR}	22
6-3 Características unidad geotécnica M_{HA}	23
6-4 Características unidad geotécnica M_G	24
6-5 Características unidad geotécnica M_y	25
7-1 Tramificación de las secciones.....	35
7-2 Longitud de las secciones en el túnel.	35
8-1 Características geotécnicas de las diferentes unidades geotécnicas.....	36
8-2 Consumo previsto explosivos.....	39
9-1 Niveles de proyecto.....	40
10-1 Concentración límite de gases nocivos.	45
3-1 Tipos de acuíferos y unidades litológicas que engloban.	63
6-1 Parámetros geotécnicos de cada litotipo.....	68
9-1 Ensayos de excavabilidad y abrasividad.....	79
1-1 Niveles de proyecto.....	81
2-1 Características geotécnicas unidades geológicas.....	89
2-2 Tramificación de secciones.....	97
2-1 Consumo explosivo avance.....	108
2-2 Consumo explosivos avance 2ª hipótesis.....	111
2-3 Consumo explosivos destroza 1ª hipótesis.....	113
2-4 Consumo explosivo destroza 2ª hipótesis.....	113
3-1 Voladuras a realizar.....	115
3-2 Consumo explosivos 1ª hipótesis.....	115
3-3 Consumo explosivos 2ª hipótesis.....	116
4-1 Consumo total de explosivos.....	117
5-1 Parámetros y características voladura tipo.....	117
5-2 Valores máximos de velocidad en función de vibración para cada grupo de edificios	118
5-3 Factor F_e	119

5-4 Factor Fr	119
5-5 Ábaco cara/distancia	119
1-1 Concentración límite de gases nocivos	121



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

Documento I: MEMORIA

Autor: José Gullón Conejo

Tutor: Daniel Vázquez Silva

1 Introducción.

En este proyecto se desarrolla la ejecución de un túnel para la Plataforma de la Línea de Alta Velocidad de Levante-Madrid-Castilla la Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia, en el tramo: Aranjuez-Ontígola, en las provincias de Madrid/Toledo.

El tramo de alta velocidad tiene una longitud total de aproximada 4,7 Km. (P.K. 100+000 a P.K. 104+700).

El túnel ferroviario de **El Regajal** tendrá una **longitud total de 2080 m** (incluido los falsos túneles), una sección media de **excavación de 164 m²** y una **sección libre aproximada de 86 m²**

Este túnel consta de una parte excavada en mina y dos tramos de túnel artificial. La primera parte, comprendida entre el P.K. 101+736 y el P.K. 101+759 se efectuará como túnel artificial, con objeto de acercar lo máximo posible la boquilla de entrada al estribo de salida del viaducto sobre el Arroyo de las Salinas. A partir del P.K. 101+759 y hasta el P.K. 103+839, se prevé la ejecución de túnel en mina, salvando el paso bajo la autopista radial R-4. En los últimos 334m se proyecta, entre los PP.KK. 103+839 Y 104+173, la construcción de otro túnel artificial.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los túneles proyectados, sin incluir los túneles artificiales:

TÚNEL EL REGAJAL						
Tipo de terreno	PK inicio	PK final	Longitud total (m)	Método constructivo	Sección adoptada	
					Sección interior (m ²)	Sección de excavación (m ²)
Yesos, arcillas, glauberitas, halitas etc.	101+759	103+759	2080	convencional	85	Variable (146-188)

1-1 Principales características del túnel.

La construcción del túnel se **realizará por sus dos bocas**, la boca de Aranjuez en sentido ascendente y la boca Ontígola en sentido descendente. Dada la naturaleza de los materiales que atravesará la traza del túnel, se ha considerado que, el sistema de construcción más adecuado es el de **avance y destroza** mediante la utilización de métodos convencionales (arranque mecánico o perforación y voladura en determinados tramos), complementado con la colocación de un sostenimiento formado, según las características del terreno, por bulones, cerchas, micropilotes y hormigón proyectado.

2 Objeto del proyecto.

El presente proyecto tiene por objeto definir de manera clara y concisa los trabajos necesarios para la realización del túnel de El Regajal. Es decir:

- Estudio geológico y geotécnico
- Diseño del sostenimiento y tipos a aplicar.
- Cálculo y diseño de las voladuras.
- Cálculo de la ventilación.
- Cálculo de y diseño de la red de electrificación.
- Cálculo y diseño de las redes de aire comprimido y agua.

3 Situación geográfica

El conjunto de obras que componen el proyecto se enmarca en los términos municipales de Aranjuez y Ontígola. El acceso, desde Madrid, a la zona de la obra puede realizarse por la autovía A-4, y cogiendo en esta la salida 52, en cuyas proximidades se encuentran las oficinas de obras y la boca de Ontígola

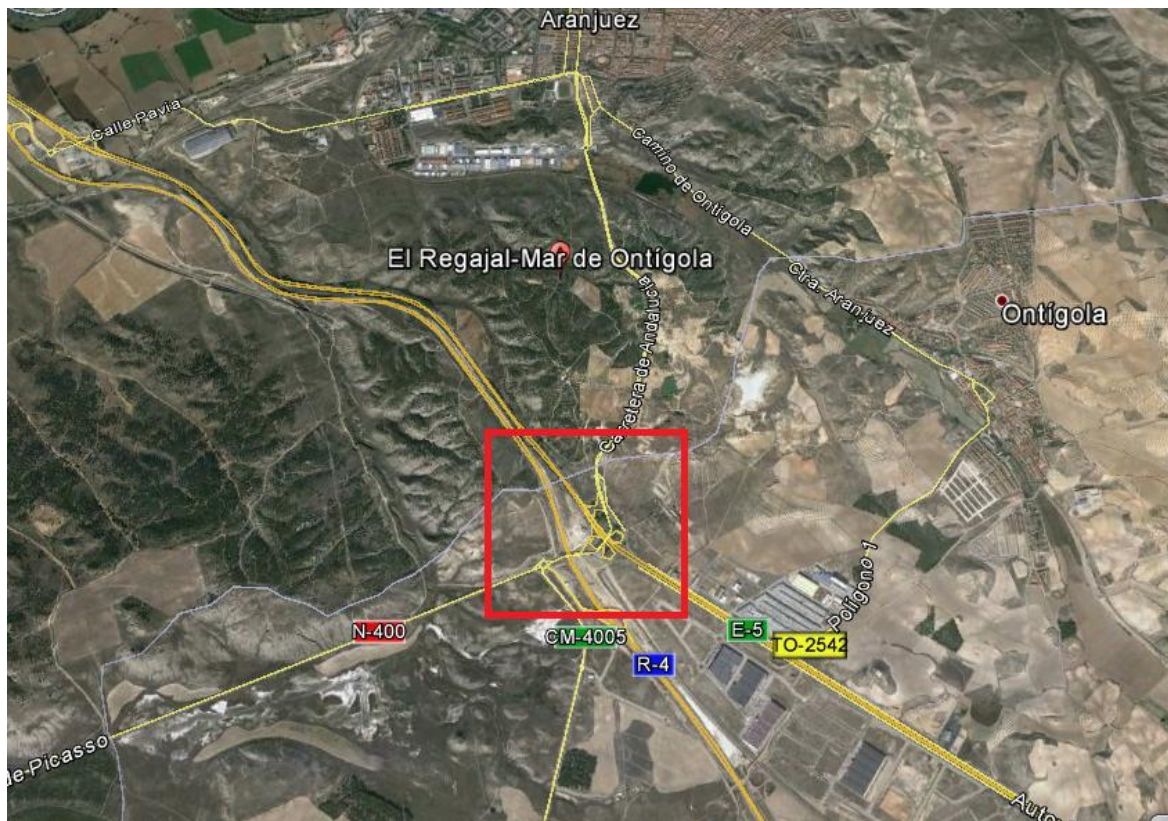


Ilustración 1 Situación geográfica del túnel.

4 Características geométricas de la obra a realizar.

A continuación se detallan las características geométricas de la obra a realizar:

- Longitud: 2080 m
- Radio de excavación en avance: 7,36 m
- Anchura de excavación en avance: 15,88 a 16,28 m.
- Altura de destroza: 4,11 a 7,86 m
- Sección de excavación en avance: 69,52 a 87,51 m²
- Sección de excavación en destroza: 62,6 a 84 m²

5 Geología general de la zona.

5.1 Marco geológico.

Desde el punto de vista geológico regional, la zona por la que transcurre la traza de la obra proyectada se sitúa en el margen meridional de la denominada Cuenca de Madrid, la cual está formada por diversos tipos de sedimentos continentales depositados a lo largo del Terciario cuyo espesor alcanza de 800 a 1.200 m. Esta cuenca está delimitada por los relieves que constituyen el área fuente de los sedimentos detríticos que la conforman, y que son, al Norte y Noroeste el Sistema Central, al Sur Los Montes de Toledo, al Este la Sierra de Altomira y al Noreste la Cordillera Ibérica. Estructuralmente la Cuenca de Madrid es una cuenca intraplaca formada en la orogenia Alpina, cuyo relleno sigue el esquema clásico de cuenca continental endorreica, en el que primero predomina el depósito por gravedad de materiales detríticos gruesos (gravas y arenas) como respuesta a la erosión de los relieves circundantes emergentes, denominados "facies de borde", continúa con la decantación de materiales detríticos más finos (limos y arcillas) denominados "facies intermedias" y finaliza con la precipitación química de materiales carbonatados y salinos o evaporíticos, como calizas y sales o yesos ("facies centrales").

Los materiales que aparecen en la zona de obra se encuadran en el Mioceno y Plioceno, además de los recubrimientos del Cuaternario, **siendo los de la base del Mioceno los directamente afectados por el Túnel del Regajal.**

Los materiales miocénicos se han sido divididos en tres grandes unidades tectosedimentarias denominadas **Unidad Inferior, Intermedia y Superior**, delimitadas por discontinuidades sedimentarias bien definidas.

La Unidad Inferior, que está directamente **afectada por la excavación del túnel** presenta una edad situada entre el Ageniense y parte del Aragoniense (Mioceno inferior), aflora ampliamente en las laderas de la zona de estudio y está constituida por sedimentos arcillosos masivos en su base, sobre los que aparecen depósitos evaporíticos, primero de carácter salino pero que pasan gradualmente hacia techo a otros de predominio yesífero.

5.2 Litoestratigrafía.

Las unidades litoestratigráficas del sustrato se han agrupado para una mejor comprensión de las litologías atravesadas en unidades geológicas de mayor rango, y las mismas se corresponden con las unidades geotécnicas que aparecen en el perfil geológico general del trazado. Estas unidades son las siguientes:

- **M_y**: Yeso con intercalaciones de arcillas.
- **M_g**: Glauberita con algo de yeso y halita e intercalaciones de arcillas.
- **M_{YAR}**: Arcillas yesíferas y yesos arcillosos negruzcos con indicios de halita.
- **M_{HA}**: Halita, glauberita y anhidrita con arcillas grises y negruzcas.
- **M_{AR}**: Arcillas marrones y grises con intercalaciones de yeso e indicios de halita.

A continuación se describen cada una de las unidades citadas.

➤ **Unidad M_y** : Yeso con intercalaciones de arcillas

Esta unidad está constituida por yeso blanquecino con intercalaciones de arcillas marrón verdoso, yesos arcillosos negruzcos y yesos con indicios de glauberita y arcilla.

Ocupa la posición superior de la serie miocena. **En el túnel la zona afectada por esta litología** se sitúa entre los PP.KK. 103+350 y 103+500, y entre los P.K. 104+100 y 104+200, con una longitud total de 250 m, que supone en torno al 10% respecto de la longitud total del túnel.

En la zona afectada por esta unidad los terrenos pertenecientes a la misma se encontrarán ocupando parcialmente la sección del túnel en su parte alta, y estarán presentes siempre en la zona de clave.

En estos terrenos se han reconocido numerosos procesos kársticos asociados a zonas de fracturas, tales como dolinas con rellenos y cavidades vacías y rellenas, en general de pequeñas dimensiones.

➤ **Unidad M_G**: glauberita con algo de yeso y halita e intercalaciones de arcillas.

Esta unidad está constituida por glauberita con algo de yeso y halita, con intercalaciones de arcillas negras a grises a veces pestilentes y glauberita arcillosa negruzca. Cabe esperar la presencia de este tipo de materiales en una longitud máxima de 1.500 m (70% de la total del túnel), de los cuales 1.250 m (60%) estarán ocupados por los terrenos de la unidad M_y; en la totalidad de la sección del túnel. Estos materiales se encontrarán también a lo largo del falso túnel.

➤ **Unidad M_{YAR}**: Arcillas yesíferas y yesos arcillosos negruzcos con indicios de halita.

Esta unidad está constituida por arcillas yesíferas y yesos negruzcos con indicios de halita, y por arcillas negras yesíferas pestilentes. Las zonas afectados por esta litología se sitúan entre el P.K. 101+750 y el P.K. 102+300, y entre el P.K. 102+450 y el P.K. 102+650, lo que representa una longitud total de terreno afectada por esta unidad igual a 750 m (35% de la longitud total del túnel). Llega a ocupar la sección completa del túnel a lo largo de 550 m

aproximadamente, en el resto de las zonas donde se excavará aparece normalmente en la zona de clave.

Esta unidad está constituida principalmente por glauberita, halita y anhidrita, con intercalaciones de niveles de arcilla con glauberita e indicios de halita. Coincide con la unidad litoestratigráfica del mismo nombre definida anteriormente.

➤ **Unidad M_{AR} : Arcillas marrones y grises con intercalaciones de yeso e indicios de halita**

Esta unidad está constituida por arcillas predominantemente marrón-rojizas con intercalaciones de yesos, presentando indicios de halita con porcentajes inferiores al 5%. Se corresponde con la unidad litoestratigráfica anteriormente definida.

En cuanto a las formaciones superficiales puede decirse que se han reconocido tres unidades, que recubren parcialmente al sustrato. Dos son los depósitos de terraza Q_T (Q_{T-1} y Q_{T-2}, granular y cohesivo) y la otra corresponde a suelos coluvio-aluviales (Q_{CA}). También se han diferenciado dos tipos de rellenos antrópicos (compactados y vertidos).

5.3 Tectónica.

De la interpretación del perfil sísmico de reflexión realizado y de las observaciones de campo, se deduce la presencia de gran número de fracturas que, enraizadas en el basamento, alcanzan niveles superiores del sustrato, **interceptando el trazado del túnel** un buen número de ellas.

Básicamente se han detectado dos alineaciones de fracturación claramente diferenciadas:

- **Alineaciones NNE - SSW**, casi ortogonales al eje. Estas alineaciones además de tener colapsos importantes en superficie llevan asociadas en el labio levantado fracturas en las que se ha producido disolución kárstica y posterior relleno.
- **Fallas de dirección SSE-NNW**, oblicuas al eje con colapsos importantes en superficie, generando valles asimétricos, en los en una ladera aparece cubierta por materiales cuaternarios, mientras que en la otra ladera afloran los yesos.

5.4 Hidrogeología.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los terrenos que atravesará el túnel de El Regajal se encuentran situados en el Sistema Acuífero 14, Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres, que limita al Sureste con el Sistema Acuífero 20, Terciario detrítico calizo del norte de Castilla - La Mancha. Los niveles de mayor interés hidrogeológico del Sistema Acuífero 14 están representados por los depósitos de terraza alta del río Tajo.

Según la documentación hidrogeológica del IGME, las formaciones presentes en el área por la que discurre la traza del túnel se engloban dentro de las formaciones porosas y fisuradas, ocasionalmente con acuíferos de interés local. Dentro de este grupo se sitúan los cuaternarios constituidos por las terrazas altas desconectadas y colgadas, y depósitos coluvio-aluviales, que, aunque por su extensión y potencia reducida no han sido

considerado como acuíferos propiamente dichos, se deben tener en consideración, ya que favorecen la recarga de las masas de agua infrayacentes del Terciario, constituidas por formaciones yesíferas.

También se incluirían en este grupo los materiales yesíferos, en general de escaso interés hidrogeológico, aunque a veces el elevado grado de Karstificación con el que aparecen proporcionan caudales aceptables, pero de mala calidad química.

El estudio de la posible afluencia de agua durante la construcción del túnel se ha realizado mediante la instalación y, posterior campaña de medidas, de piezómetros cerrados de cuerda vibrante, colocados a lo largo de un mismo sondeo y a distintas cotas.

El análisis de las lecturas obtenidas durante las campañas de medidas indican que, los materiales que presentan agua corresponden, en la mayor parte de los casos, a las unidades superiores yesíferas, aunque también se han detectado algunas zonas por debajo de estas, asociadas a fallas, con carga hidráulica.

El único nivel acuífero continuo que puede establecerse en el macizo interceptado por el túnel se corresponde con los niveles yesíferos superiores. En relación a las zonas de falla, los piezómetros instrumentados en ellas no han detectado carga de agua, aunque hay que decir que estos se situaron a cota del túnel y en formaciones donde no se esperaba la presencia de aquella. En zonas de glauberita con fracturación intensa puede esperarse niveles de agua aislados con bajas cargas hidráulicas.

En la tabla siguiente se detallan las cotas del nivel freático en los puntos donde este se ha tomado como válido, las cotas del muro del acuífero yesífero y las del túnel (clave y rasante), así como la carga hidráulica existente. En amarillo se reflejan los puntos donde el muro del acuífero se sitúa por debajo de la clave del túnel o a escasos metros por encima.

TABLA DE COTAS DEL NIVEL FREÁTICO.					
P.K.	Nivel Piezométrico. (msnm)	Cotas Túnel (msnm)		Muro acuífero yesífero (msnm)	Carga Hidráulica. (m.)
		Clave.	Rasante.		
101 +760	544,48	543,1	533,1	544,48	0,0
101 +900	550,00	543,8	533,8	545,00	5,0
102 + 020	552,50	545,3	535,3	547,00	5,0
102 + 180	559,37	547,0	537,0	551,87	7,5
102 + 650	580,00	559,0	540,0	576,50	3,5
102 + 945	584,00	566,0	556,0	573,00	11

103 + 035	583,00	568,5	558,5	572,00	11,0
103 + 200	585,00	572,4	562,4	577,30	7,7
103 + 300	585,50	574,9	564,9	579,00	6,5
103 + 440	582,50	578,4	568,4	572,50	10,0
104 + 200	596,00	597,4	587,4	590,00	6,0
104 + 420	596,00	602,7	592,7	590,30	5,7

5-1 Cotas del nivel freático.

En conclusión puede establecerse que:

- **El principal acuífero** presente en el macizo que atravesará el túnel está formado por los depósitos detríticos cuaternarios, que constituyen un acuífero libre de escasa potencia (entre 5 y 8 m) y de pequeñas reservas.

Sus infiltraciones proceden del agua de lluvia y la descarga se realiza fundamentalmente en profundidad a través de los yesos infrayacentes, o bien de modo difuso en la superficie de contacto con este sustrato.

- Por debajo se sitúa el acuífero yesífero que está afectado por karstificación. Las unidades de glauberita (M_{Y-TC}) y de halita/anhidrita/glauberita (M_{HA}) se consideran hidráulicamente improductivas, no considerándose por tanto que puedan albergar agua, salvo en algunas zonas de glauberita afectadas por fracturación.
- **Los procesos de karstificación** en los yesos y la transformación de la unidad de glauberita subyacente son en la actualidad activos. El agua se canaliza en profundidad a través de las fallas principales y de la red de fracturación, llegando al contacto con la glauberita que se transforma precipitando yeso y dejando en la solución acuosa el sulfato sódico que acaba precipitando.

Fuera de los niveles yesíferos superiores la **presencia de agua** se limitaría, en algunos casos, a **zonas de fracturas**, aunque con cargas hidráulicas bajas y discontinuas.

6 Caracterización geotécnica del macizo rocoso.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso por el que discurre el túnel se ha realizado en base a los trabajos de campo que a continuación se relacionan, completados con los ensayos de laboratorio.

- **Estudio geotécnico Aranjuez - Ontígola:** La información procedente de este estudio geotécnico consta de 8 sondeos a rotación con extracción de testigo continuo, 20 ensayos presiométricos y 7 ensayos de permeabilidad.
- **Campaña geotécnica complementaria:** La información procedente de esta campaña consta de 20 sondeos, 40 ensayos presiométricos, 31 ensayos de permeabilidad (16

del tipo Lugeon y 15 del tipo Lefranc), 1 perfil sísmico de refracción de 300 m.l. y 1 perfil sísmico de reflexión en el cuerpo del túnel con una longitud de 1.675 m.

- **Ensayos de laboratorio:** Para la caracterización geotécnica de los terrenos afectados por el túnel se han utilizado todos los ensayos de laboratorio disponibles, procedentes tanto del Estudio Geotécnico como de la Campaña Complementaria, determinándose con los mismos :
 - **El estado de los materiales:** Granulometrías, Límites de Atterbeg, Densidad y Humedad.
 - **Los parámetros resistentes de suelos y rocas:** Resistencia a Compresión Simple, Resistencia al Corte, Resistencia a la Compresión Triaxial y Resistencia a Tracción.
 - **La expansividad de los terrenos:** mediante ensayos de hinchamiento libre, presión de hinchamiento y ensayos Lambe.
 - **La dureza y abrasividad de los materiales:** mediante ensayos de dureza y abrasividad Cerchar, así como mediante la determinación del Índice de Schimazek.

6.1 Síntesis geotécnica de los materiales atravesados por el túnel.

Como ya se ha dicho la traza del túnel atravesará cinco grandes unidades geotécnicas, definidas como:

M_{AR}: Arcillas marrones y grises con intercalaciones de yeso y halita.

M_V: Yesos con intercalaciones de arcillas.

M_g: Glauberita con algo de yeso y halita, e intercalaciones de arcillas.

M_{HA}: Halita y glauberita con arcillas grises y negruzcas.

M_{YAR}: Arcillas yesíferas y yesos arcillosos negruzcos con indicios de halita.

En las tablas siguientes se indican las características más relevantes y los valores a adoptar para cada unidad.

TABLA DE LA UNIDAD M _{AR} : ARCILLAS MARRONES y GRISAS CON INTERCALACIONES DE YESO y HALITA.		
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.		VALOR.
ROCA MATRIZ.	R.C.S. (kp/cm ²).	10.
	R.T. (kp/cm ²).	5,7

MACIZO ROCOSO.	Parámetro m_i	7
	Densidad aparente (t/m^3).	2
	R.C.S. (kg/cm^2).	10
	Cohesión (kp/cm^2).	0,4
	Angulo rozamiento (0).	32
	Módulo Deformación (kp/cm^2).	2.990
	Coeficiente de Poisson.	0,3
	Presión hinchamiento media (kp/cm^2).	1,17
	Hinchamiento libre medio (%).	1,7
	Indice GSI	60

6-1 Características unidad geotécnica M_{AR}

El valor de 10 Kg/cm^2 para la R.C.S. indica que los materiales de esta unidad deben clasificarse como rocas muy blandas, y por tanto **fácilmente excavables**. En función del valor medio del hinchamiento libre (1,7 %) y en base a los criterios de Oteo (1.986), la **expansividad** de los materiales que componen la unidad M_{AR} puede considerarse como **nula**.

De igual manera puede decirse que, según el ábaco de Holtz y Gibbs, realizado en función de Límite Líquido y la Densidad Seca, los materiales de la unidad mencionada pueden clasificarse como **no colapsables**.

TABLA DE UNIDAD M _{VAR} : ARCILLAS YESÍFERAS y YESOS ARCILLOSOS NEGRUZCOS CON INDICIOS DE HALITA.		
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.		VALOR.
ROCA MATRIZ.	R.C.S. (kp/cm ²).	5
	R.T. (kp/cm ²).	5,4
	Parámetro m _i	10
	Densidad aparente (t/m ³).	2,1
MACIZO ROCOSO.	R.C.S. (kg/cm ²).	1
	Cohesión (kp/cm ²).	0,4
	Angulo rozamiento (°).	32,4
	Módulo Deformación (kp/cm ²).	4.275
	Coefficiente de Poisson.	0,3
	Presión hinchamiento media (kp/cm ²).	0,4
	Hinchamiento libre medio (%).	0,4
	Índice GSI	60

6-2 Características unidad geotécnica M_{VAR}

El valor de 5 Kg/cm² para la R.C.S. indica que los materiales de esta unidad pueden clasificarse como suelos duros o rocas muy blandas, y por tanto **fácilmente excavables**.

En función del valor medio del hinchamiento libre (0,4 %) y en base a los criterios de Oteo (1.986), la **expansividad** de los materiales que componen la unidad M_{VAR} puede

considerarse como **nula**. De igual manera puede decirse que, según el ábaco de Holtz y Gibbs, realizado en función de Límite Líquido y la Densidad Seca, los materiales de la unidad mencionada pueden clasificarse como **no colapsables**.

TABLA DE UNIDAD M _{HA} : HALITA, GLAUBERITA y ANHIDRITA CON ARCILLAS GRISES y NEGRUZCAS.		
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.		VALOR.
ROCA MATRIZ.	R.C.S. (kp/cm ²).	30-39
	R.T. (kp/cm ²).	9,9
	Parámetro m _i	7
	Densidad aparente (t/m ³).	2,4
MACIZO ROCOSO.	R.C.S. (kg/cm ²).	3 a 4,1
	Cohesión (kp/cm ²).	2,0
	Angulo rozamiento (°).	33
	Módulo Deformación (kp/cm ²).	5.890
	Coficiente de Poisson.	0,3
	Presión hinchamiento media (kp/cm ²).	1,71
	Hinchamiento libre medio (%).	17,7
	Indice GSI	35

6-3Características unidad geotécnica M_{HA}

El valor de **39 Kg/cm²** para la **R.C.S.** indica que los materiales de esta unidad pueden clasificarse como rocas muy blandas, y por tanto **excavables co medios mecánicos**. En

función del valor medio del hinchamiento libre (17,7 %) y de la presencia de anhidrita, se considera que esta unidad puede presentar un potencial expansivo en contacto con el agua.

TABLA DE UNIDAD M_G: GLAUBERITA CON ALGO DE YESO y HALITA e INTERCALACIONES DE ARCILLAS.		
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.		VALOR.
ROCA MATRIZ.	R.C.S. (kp/cm ²).	40 a 65
	R.T. (kp/cm ²).	12
	Parámetro m _i	10
	Densidad aparente (t/m ³).	2,4
MACIZO ROCOSO.	R.C.S. (kg/cm ²).	4,2 a 6,9
	Cohesión (kp/cm ²).	3,0
	Angulo rozamiento (°).	33
	Módulo Deformación (kp/cm ²).	8.260
	Coefficiente de Poisson.	0,3
	Presión hinchamiento media (KP/cm ²).	2,7
	Hinchamiento libre medio (%).	19,1
	Indice GSI	—

6-4Características unidad geotécnica M_G

El valor de 40 a 65 Kp/cm² para la R.C.S. indica que los materiales de esta unidad pueden clasificarse como rocas de tipo medio y aunque son **excavables con medios mecánicos**, también es posible que sea necesario utilizar perforación y voladura.

TABLA DE UNIDAD M _y : YESO CON INTERCALACIONES DE ARCILLAS.		
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.		VALOR.
ROCA MATRIZ.	R.C.S. (kp/cm ²).	30 a 33
	R.T. (kp/cm ²).	15
	Parámetro m _i	10 a 13
	Densidad aparente (t/m ³).	2,1
MACIZO ROCOSO.	R.C.S. (kg/cm ²).	3,1 a 3,6
	Cohesión (kp/cm ²).	1,9
	Angulo rozamiento (°).	34,7
	Módulo Deformación (kp/cm ²).	7.350
	Coefficiente de Poisson.	0,3
	Presión hinchamiento media (kp/cm ²).	0,02
	Hinchamiento libre medio (%).	0,56
	Indice GSI	

6-5 Características unidad geotécnica M_y

El valor de 30 a 33 Kp/cm² para la R.C.S. indica que los materiales de esta unidad pueden clasificarse como rocas de tipo medio y aunque son **excavables con medios mecánicos**,

también es posible que sea necesario utilizar perforación y voladura. En este tipo de terrenos no se espera que existan colapsos ni fenómenos de expansividad

6.2 Tramificación geológica - geotécnica del túnel.

La problemática geotécnica constituye el punto de partida en el diseño del túnel de El Regajal, habiéndose adaptado la sección tipo del mismo y los tratamientos a realizar a las características geotécnicas del terreno.

A continuación se incluye la tramificación geológico-geotécnica del túnel y la descripción de la problemática correspondiente.

- **Tramo 101 +759 a 101 +900**

En este tramo inicial de la excavación en mina el túnel se encaja, en la mayor parte de la sección, en arcillas yesíferas y en arcillas marrones del Mioceno Inferior. Estas arcillas presentan un contenido muy bajo de anhidrita y esmectitas. El manto acuífero yesífero superior presenta una potencia de unos 5 m como máximo, situándose su muro a cota de clave o ligeramente por encima. El nivel freático presenta gradientes fuertes (aprox. 4,1%), como corresponde a una zona de descarga. Las fluencias de agua al túnel se prevén de muy escasa cuantía, limitándose a zonas puntuales, como pueden ser la zona de falla en el 101+820 y la zona de vaguada en el 101+890. Existirán problemas de expansividad en grado bajo en las arcillas de la unidad M_{AR} , así como un cierto riesgo de disolución a largo plazo en la zona de clave.

- **Tramo 101 +900 a 102+140**

Este tramo se excava parcialmente en arcillas negras pestilentes con glauberita, correspondientes a la unidad M_{YAR} , y, en menor medida, en clave y parte alta de hastiales, en la glauberita arcillosa de la unidad M_G . Ésta presenta indicios de halita (<2%) y anhidrita en trazas y de forma puntual (0.2%). La base del túnel sigue apoyando sobre las arcillas del

Mioceno Inferior (M_{AR}). El acuífero yesífero superior se presenta colgado sobre la clave del túnel, con una altura de unos 2 m sobre éste. La carga de agua que se espera encontrar en este tramo oscila entre 5 y 9 m. Es un tramo con gradientes moderados. La entrada de agua al túnel procedente del acuífero superior podrá tener lugar a través de las posibles fracturas motivadas por el proceso de descompresión del macizo, dada la proximidad entre la clave del túnel y el muro del acuífero. En cualquier caso la posible entrada de agua se espera que sea muy reducida y de carácter muy puntual, al no haberse detectado zonas de fractura que afecten a toda la serie.

Al discurrir la mayor parte de la sección por terrenos arcillosos los problemas geotécnicos a tener en consideración se limitan a procesos de expansividad de las arcillas M_{AR} . La presencia de glauberita, en la parte alta de hastiales y en clave, puede dar lugar a problemas de disolución. Esta problemática es de esperar que se presente, de igual forma que en el caso anterior, con un grado bajo. Los procesos de expansividad podrían acentuarse ante la situación posible de neoformación de cristales tras la disolución de las sales presentes.

- **Tramo 102+140 a 102+155 (falla)**

Se trata de una zona de falla ligada al desarrollo de una zona de vaguada. El muro del acuífero superior yesífero se sitúa a unos 3 m por encima de la clave del túnel y la carga

hidráulica es de unos 9 m. La serie litológica atravesada es la misma que la descrita en el tramo anterior, si bien gana mayor presencia la unidad de glauberita (M_G).

Los problemas geotécnicos pueden venir dados por la entrada de agua, a través de la zona de falla, procedente del acuífero superior, provocando la disolución de la unidad de glauberitas. Asociado a esto podrían darse procesos de expansividad como producto de la neoformación mineral. La expansividad potencial del nivel de apoyo de la contrabóveda (M_{AR}) se considera de grado bajo.

- **Tramo 102+155 a 102+245**

Se trata de un tramo limitado por fallas. Los terrenos afectados corresponden, en prácticamente toda la sección, a la unidad M_{YAR} , formada por arcillas pestilentes negruzcas, arcillas yesíferas, y glauberita arcillosa. En la parte media de hastiales también se afecta a la unidad de glauberita M_G . La contrabóveda se sitúa en la unidad M_{AR} .

El acuífero superior yesífero aparece colgado a unos 4 m por encima de la clave del túnel, presentando una carga hidráulica entre 7 y 10 m. Por la proximidad de este acuífero a la clave del túnel es posible su drenaje durante la excavación, acompañado desprendimiento de terrones de glauberita. Los problemas geotécnicos a considerar están asociados con la posible entrada de agua desde los yesos, que puede afectar a las glauberitas disolviéndolas, tanto las presentes en la unidad M_G , como las que puedan también aparecer en M_{YAR} . Las filtraciones se pueden producir a través de fracturas o fisuras, en general de escaso porte, posiblemente generadas por la propia perforación del túnel, no esperándose en cualquier caso aportes importantes de agua.

En muchos casos la elevada concentración en sales del agua infiltrada hacia el túnel podría dar lugar al autosellado de dichas fisuras. También se debe tener en consideración los problemas de expansividad de las arcillas en contrabóveda, así como también los generados por la neoformación mineral producto de la transformación de la glauberita. En ambos casos se considera una expansividad de grado bajo.

- **Tramo 102+245 a 102+275 (falla).**

Se considera la misma problemática que en el tramo de falla anterior.

- **Tramo 102+275 a 102+345**

En este tramo se atraviesa un potente paquete de glauberitas correspondientes a la unidad M_G con porcentajes mineralógicos en torno al 80% de glauberita. En la zona baja de hastiales se excavan las arcillas pestilentes y con glauberita de la unidad M_{YAR} y en la contrabóveda las arcillas rojas M_{AR} .

Se trata de un tramo delimitado por fallas con un acuífero yesífero colgado con escasas reservas, si bien con un gradiente hidráulico alto (en torno al 5%), que puede favorecer la circulación de agua con mayores velocidades. Este acuífero se sitúa a unos 13 m de altura sobre la clave del túnel y el espesor saturado no supera los 5 m. La montera de gravas (Q_{T-2}) sobre los yesos es muy reducida o inexistente, en una zona con una elevada pendiente en superficie. Por ello, no cabe esperar filtraciones de agua importantes hacia el túnel procedente del acuífero superior. No obstante cabe la posibilidad de la presencia puntual de aportes por fracturas asociadas a las fallas que delimitan este tramo o bien de bolsadas de agua dentro de las propias glauberitas, existiendo un riesgo, en general de grado bajo,

de disolución y transformación mineral de este material. En cuanto a la expansividad de los terrenos se mantiene el mismo criterio que en tramos anteriores.

- **Tramo 102+345 a 102+355 (falla).**

Se trata de una zona de falla que afecta fundamentalmente a la unidad de glauberitas, que en este sector presenta una potencia de más de 20 m. Como en el tramo anterior el acuífero superior se encuentra muy adelgazado en cuanto a su espesor saturado.

No obstante, a lo largo de la zona de falla puede existir carga de agua, como se ha demostrado en el sondeo próximo 102+400 (Pz-28).

Por este motivo, a pesar de encontrarse relativamente lejos el acuífero yesífero, cabe la posibilidad de conexión hidráulica y aportes de agua al túnel.

Esta vía de conexión resulta problemática por la entrada de aguas agresivas o de renovación procedentes de los niveles granulares de terraza, si bien también es posible que durante el tránsito hacia el túnel éstas pierdan esta condición al cargarse de sales, e incluso pueden autosellar las fracturas por las que discurren, siempre que la velocidad de circulación a través de ellas sea baja. Los problemas de solubilidad de las glauberitas y los procesos de expansividad tienen la misma entidad que los descritos en los tramos previos.

- **Tramo 102+355 a 102+395**

Las características de este tramo así como su problemática son similares a los del tramo 102+275-102+345.

- **Tramo 102+395 a 102+410 (falla)**

Las mismas consideraciones de los tramos de falla anteriores, si bien la altura a la que se sitúa el muro del acuífero superior es mayor, en torno a 20 m.

- **Tramo 102+410 a 102+490**

El túnel atraviesa un potente nivel de arcillas glauberíticas algo pestilentes que se sitúan en clave y parte alta de hastiales. Bajo ellas se disponen los materiales de la unidad M_G y en la zona de contrabóveda aparecen las arcillas yesíferas. El muro del acuífero superior yesífero se sitúa a una altura considerable sobre la clave del túnel, a unos 20 m, si bien cabe la posibilidad de encontrar agua colgada en los niveles glauberíticos profundos. A pesar de ello no parece probable que la karstificación y lixiviación llegue a la base del túnel ya que las arcillas situadas en la parte alta de la sección frenan considerablemente el proceso.

- **Tramo 102+490 a 102+535**

Tramo delimitado por falla según el sentido de avance. En esta zona predominan las arcillas yesíferas sobre las glauberíticas o halíticas y el nivel activo se encuentra a unos 15 m sobre la clave del túnel, por lo que el riesgo de karstificación a cota del mismo es muy remoto.

- **Tramo 102+535 a 102+547 (falla)**

Esta falla afecta a la unidad de yesos superior, así como a niveles de arcillas y yesos arcillosos que ocupan la zona del túnel. El muro del acuífero yesífero se sitúa a unos 27 m sobre rasante y tiene un espesor saturado de apenas 4 m. No es de esperar la presencia de niveles de agua colgados por debajo del acuífero principal, y la existencia de importantes

paquetes arcillosos aislará la zona de túnel. Por ello, a pesar de asociarse a la falla una zona muy karstificada en los yesos y presentar una montera de material granular importante, la posible entrada de agua al túnel se prevé que sea de baja magnitud, cuando no inexistente.

- **Tramo 102+547 a 102+600**

Este tramo presenta similares características y problemática que el situado entre 102+490-102+535.

- **Tramo 102+600 a 102+650**

Tramo delimitado por una importante falla en el sentido de avance. El túnel atraviesa un potente paquete glauberítico, que presenta algunas intercalaciones de pequeño espesor de arcillas, situadas en los hastiales. Sobre el túnel el nivel de glauberitas continúa hasta alcanzar los yesos superiores. El acuífero superior yesífero se sitúa a unos 17 m sobre la clave del túnel y el espesor saturado de este es de unos 4 m.

La karstificación en los niveles superiores es bastante intensa, presumiblemente favorecida por la potente montera de gravas cuaternarias. Si bien los niveles arcillosos intercalados entre la unidad de glauberita aísla a éstas, impidiendo de esta forma que los procesos de disolución y transformación mineral puedan darse con facilidad.

- **Tramo 102+650 a 102+680 (falla)**

Falla importante que requerirá tratamientos intensos de sellado e inyección. Su prolongación hacia superficie determina que los procesos de karstificación en los yesos adquieran gran profusión, habiéndose detectados huecos y rellenos kársticos. Estos aspectos unidos a la presencia de una importante montera formada por materiales granulares de terraza, aseguran la recarga del acuífero yesífero.

Los problemas geotécnicos vendrán dados, por lo tanto, por la entrada de agua a través de la falla o fracturas asociadas provocando la disolución y transformación mineral de las glauberitas.

- **Tramo 102+680 a 102+740**

En este tramo, por debajo de los niveles glauberíticos, aparece la unidad M_{HA} , formada por halitas, glauberitas y anhidritas. Se trata de un nivel bastante potente en el que se encaja la parte inferior del túnel, aunque en un corto tramo llega a estar inmersa la totalidad de la sección. Los contenidos mineralógicos son del 40 a más del 60% de halita, anhidrita entre el 20 y 70% y glauberita en torno al 25%. Por debajo de la unidad M_{HA} se ha reconocido la unidad arcillo-yesífera M_{YAR} , que se sitúa a unos 8 m por debajo de cota de rasante. El muro del acuífero superior yesífero se sitúa a una altura entre 12 y 18 m sobre la clave del túnel, con una carga hidráulica máxima de 8 m.

No hay experiencias sobre el comportamiento de estas formaciones compuestas por anhidritas potencialmente muy expansivas y halitas de elevada solubilidad. Cabe suponer que si llega el frente activo de disolución a cota de túnel la halita adquirirá un estado pastoso que ofrecerá escaso confinamiento a la expansión de la anhidrita. También es cierto que la anhidrita nunca aparece en forma masiva sino dispersa o interestratificada con la halita o la glauberita, por lo que su presión de hinchamiento se verá en gran parte amortiguada por la compresibilidad de las capas blandas salinas.

Por otra parte los cambios de volumen de la anhidrita pueden verse compensados por la deformabilidad de la halita o el yeso lixiviado, con lo que pueden darse tanto asientos como levantamientos.

- **Tramo 102+740 a 102+770 (falla)**

Se trata de una de las más importantes zonas de falla identificadas, afectando a cota de túnel a la unidad M_{HA} . Constituye, por lo tanto, una vía potencial preferente de entrada de agua al túnel en donde aparecen minerales y materiales susceptibles de disolución, transformación e hinchamiento en grado elevado.

- **Tramo 102+770 a 102+945**

En este tramo el túnel se excavará prácticamente en toda su sección en la unidad de halitas, glauberitas y anhidritas, M_{HA} , hasta el Pk 102+820, donde progresivamente la unidad de glauberita (M_G) desciende desde la clave hasta llegar a la contrabóveda. La potencia de este paquete aumenta de igual forma en el sentido de avance del trazado, pasando de 12 a unos 20 m, manteniendo a muro siempre la unidad M_{HA} .

El frente activo se encuentra a unos 10 m sobre la clave del túnel, manteniendo un espesor saturado próximo a los 10 m. Al igual que en el tramo anterior a la falla antes descrita, es de esperar importantes porcentajes de anhidrita inmersa en halita y glauberita, por lo que en este tramo la problemática geotécnica es similar, con el agravante de situarse el muro del acuífero yesífero a una altura menor respecto a la clave.

- **Tramo 102+945 a 103+060**

En este tramo el túnel se excava en su totalidad en la unidad M_G , donde se han reconocido porcentajes de glauberita en torno al 70%, así como puntualmente halita en porcentajes del 40%, indicios de yeso y trazas de anhidrita (3%). Esta unidad presenta una potencia de unos 20 m y bajo ella, bien coincidente con la base del túnel o a distancias de 3 a 8 m, existe una capa de anhidrita y halita, M_{HA} , de unos 10 m de potencia que cubre a las arcillas yesíferas basales (M_{AR} y M_{YAR}). A unos 5 m de media por encima de la clave se disponen los materiales yesíferos que se presentan muy arcillosos a la base. Constituyen el acuífero principal, que presenta un espesor saturado de unos 11 m de espesor.

El gradiente hidráulico natural en este sector es subhorizontal en la dirección del eje del túnel, que coincide en gran medida con la divisoria de aguas subterráneas considerada.

El tramo aparece compartimentado por diversas fallas. La problemática geotécnica a considerar está relacionada con la disolución de la glauberita por la posible entrada de agua desde el acuífero superior a favor de la red de fracturación. Especialmente este proceso tendrá lugar al final del tramo, donde el muro del acuífero se sitúa muy próximo (3 m) a la clave del túnel. No se descarta la posibilidad de aparición de bolsas de agua en el nivel de glauberitas, que constituirán aportes de agua al túnel de escasa entidad y en cualquier caso con una concentración elevada en sales que muy probablemente acabarán precipitando y sellando las vías de conexión. Asociado a la disolución de las glauberitas no debe descartarse la posible neoformación de minerales de yeso que pueden constituir el motor de procesos de expansividad. Es poco probable la afección a los niveles inferiores de halitas.

- **Tramo 103+060 a 103+170**

A lo largo de este tramo el túnel se excava en toda su sección en la unidad de glauberita (M_G). El esquema geológico es similar al anterior tramo, si bien no se han reconocido fracturas de entidad, por lo que el riesgo de disolución es menor que en el tramo anterior. Un aspecto que puede contribuir de modo negativo es la proximidad del muro del acuífero yesífero superior a la clave del túnel, la excavación del túnel puede acarrear la formación de nuevas fisuras o juntas o reactivación de las existentes, constituyendo vías de entrada de agua.

- **Tramo 103+170 a 103+185 (falla)**

Se trata de una zona de fractura muy importante en la que la clave del túnel se sitúa a escasos metros (2 m) por debajo del muro del acuífero yesífero, que presenta un espesor saturado de 10 m. La contrabóveda se sitúa en la unidad M_{HA} formada predominantemente por halita.

En base a estos datos, esta zona constituye un enclave propicio para las filtraciones de agua procedentes del acuífero superior, pudiendo afectar al tramo glauberítico por donde discurre el túnel e incluso alcanzar al nivel inferior.

El caudal estimado para esta zona puede alcanzar 1 l/min. Dada la proximidad de las aguas de los yesos al túnel, no es probable que pueda producirse el autosellado de las juntas o fracturas por las que discurrirá el agua. Así mismo, no es de descartar la posible presencia adicional de bolsadas de agua en equilibrio con el nivel de glauberitas a cota de túnel. Por lo tanto el riesgo de disolución y alteración de los materiales interceptados es alto.

- **Tramo 103+185 a 103+270**

La base del túnel se encaja en una especie de pequeña meseta con halita, como componente principal y anhidrita como secundario (M_{HA}). El contenido de anhidrita detectado alcanza un valor máximo próximo al 15%, limitándose a una franja de unos 4 m de potencia que afecta a la contrabóveda y la parte baja de hastiales. La parte superior del túnel sigue en la capa de glauberitas (M_G). El frente activo, coincidente con el techo de las glauberitas, se sitúa a menos de 5 m de la clave del túnel, existiendo una carga hidráulica cercana a los 7 m. No es de descartar la presencia de algunas fracturas o juntas de menor entidad que las identificadas, que pueden haber favorecido los procesos de karstificación (de grado bajo) observados en el nivel de glauberitas. Así mismo el terreno muestra una importante karstificación en los yesos superiores M_V .

- **Tramo 103+270 a 103+285**

La presencia de importantes manifestaciones kársticas detectadas en el sondeo S-13 indica que muy probablemente éstas estén asociadas a una zona de falla, que no pudo ser identificada en los estudios geofísicos. Se han detectado abundantes cavidades de karstificación tanto rellenas como huecas. Se trata, por lo tanto, de una zona a tener en cuenta en lo relativo a la posible entrada de agua al túnel, situándose el nivel hidrogeológico activo en el contacto yesos-glauberitas, a unos 5 m por encima de la clave del túnel. También se han detectado huecos en el contacto entre el nivel de glauberita (M_G) y el de halita (M_{HA}), lo que presupone filtraciones y procesos de karstificación que han afectado a una zona por debajo del nivel piezométrico general estimado. Al igual que en el tramo anterior, la unidad M_{HA} presenta contenidos de anhidrita de hasta el 13%, lo que confiere a esta zona un riesgo añadido en relación a problemas de expansividad.

- **Tramo 103+285 a 103+350**

Se trata de un tramo similar al 103+185 a 103+270, bien en éste el muro del acuífero desciende hasta situarse a cota de clave de túnel, aumentando de esta forma las posibilidades y el riesgo de filtraciones de agua hacia los niveles de mayor solubilidad, en especial la unidad M_G , que ocupa la práctica totalidad de la sección. El contacto entre esta unidad y la situada por debajo, formada fundamentalmente por halita (M_{HA}), desciende progresivamente de cota, desde la parte media de los hastiales hasta situarse a cota de contrabóveda. Al igual que en el anterior tramo, es de esperar la presencia de anhidrita dentro de la unidad M_{HA} en porcentajes similares.

La problemática geotécnica es la misma que la anteriormente contemplada.

- **Tramo 103+350 a 103+580**

En este tramo el sustrato de halita-anhidrita (M_{HA}) aparece más profundo, a más de 15 m por debajo de rasante, y en forma de cubeta en la que se han depositado, además de las glauberitas, diversas capas de arcillas yesíferas, algunas de ellas con indicios de arcillas expansivas. Dentro de este tramo puede diferenciarse un sector inicial que llega hasta el P.K. 103+500 donde el nivel de glauberita se excava desde la parte media de hastiales hasta la contrabóveda, mientras que la clave y parte alta de hastiales se excavan en yesos arcillosos. A partir del anterior punto el techo de la unidad de glauberitas asciende, de forma que la totalidad de la sección se excavará en estos materiales.

El nivel freático acompaña también a la morfología de cubeta antes indicada. Es probable que esta zona de concentración de flujos se deba a la presencia de fallas y zonas karstificadas que progresen en profundidad, de ahí la presencia de agua en niveles profundos, aunque siempre dentro de la unidad de glauberitas. En estos casos la asociación de agua profunda y fracturas parece ser clara.

El túnel cortará al acuífero superior por lo que la entrada de agua al túnel será un aspecto con el que se tendrá que contar, estimándose un caudal de 1.1 l/min. Así mismo también hay que contar con que se cortarán niveles aislados profundos. Por todo ello existe un alto riesgo de disolución y transformación de la glauberita, mineral mayoritario en la unidad M_G , que puede afectar a niveles situados bajo la contrabóveda.

- **Tramo 103+580 a 103+740**

Se produce en este tramo un ascenso del sustrato de anhidrita-halita (M_{HA}), el cual llega a ser coincidente con la base del túnel, a la par que asciende también el techo de la unidad de glauberitas (M_G). La sección del túnel en su totalidad se excavará en la unidad de glauberitas, M_G . Parece existir una karstificación considerable en los niveles superiores, tanto en la unidad de yesos superiores, M_Y , como en las glauberitas M_G que rodean el túnel.

Los análisis mineralógicos han permitido detectar un nivel con altos contenidos en anhidrita, situado a techo de la unidad M_{HA} , y prácticamente coincidente con la contrabóveda. A pesar de que el nivel freático se sitúa muy por encima de la clave, no debe descartarse la posibilidad de que las aguas lleguen hasta las anhidritas.

Con excepción de la zona de falla, en el resto del tramo la probabilidad de encontrar agua en la unidad de glauberita es baja, pudiendo considerarse que la excavación se realizará en seco.

Hacia el final del tramo el techo de la unidad M_{HA} desciende suavemente hasta situarse a unos 5 m por debajo de rasante. La continuidad hasta el final del tramo de la capa con altos contenidos de anhidrita no está confirmada, aunque debe tomarse en cuenta.

6.3 Fases de construcción.

La construcción de los túneles se desarrollará siguiendo las siguientes fases constructivas:

- **FASE I:** Excavación y sostenimiento de los emboquilles de las bocas de Aranjuez
- **FASE II:** Excavación y sostenimiento del avance.
- **FASE III:** Excavación y sostenimiento de la destroza.
- **FASE IV:** Colocación de drenajes, desagües y canalizaciones
- **FASE V:** Puesta en obras del revestimiento.

7 Definición geométrica de las secciones tipo.

El túnel de El Regajal atraviesa unidades geotécnicas con distinto grado de expansividad y solubilidad potencial. Con objeto de lograr un correcto funcionamiento estructural a largo plazo se han considerado 4 secciones tipo distintas, que se han distribuido a lo largo del túnel en función de la problemática geotécnica de cada tramo. A continuación se describen cada una de las secciones adoptadas:

✓ ST-I-R

La sección interior está constituida por 3 arcos de circunferencia de radios, 6,36 m (bóveda), 5,10 m (hastiales) y 9,45 m (contrabóveda).

La bóveda, de 1 m de espesor, presenta sendas patas de elefante de 0,6 m, con el fin de mejorar el apoyo de la misma durante la ejecución de los hastiales. Éstos, de trasdós recto, son de canto variable entre 1 y 2,88 m, siendo arriostrados interiormente por una contrabóveda de 1 m de espesor. Esta sección tipo se ha propuesto en aquellos tramos en donde el túnel se apoya en las unidades M_{AR} o M_{VAR} , no previéndose a largo plazo presiones de hinchamiento superiores a 10 kp/cm^2 ni tampoco riesgo de disolución bajo la cimentación.

✓ ST- I-RA

La única diferencia entre esta sección y la I-R es la realización de un saneo y sustitución por hormigón pobre bajo los hastiales y contrabóveda. El espesor de saneo es variable, habiéndose estimado, según el tramo, entre 1 y 2 m. No obstante, el espesor de saneo podrá modificarse durante la ejecución de la obra a la vista de las condiciones reales del

terreno. El objetivo del saneo es mejorar las condiciones de apoyo de la sección en las zonas de falla, en donde se prevé una reducción de la capacidad portante del terreno como consecuencia de la presencia de agua y de los propios esfuerzos tectónicos habidos.

✓ **ST- II**

Las dimensiones interiores de esta sección coinciden con las de la I-R, variando respecto a ésta la geometría de hastiales y contrabóveda. Los hastiales, de trasdós curvo, presentan un espesor de 1 m, enlazando con una contrabóveda de 2 m de espesor máximo.

Esta sección es la propuesta en aquellos tramos en donde el túnel se apoya en la unidad M_{Ha}, de elevada expansividad potencial debido a la presencia de anhidrita, pudiendo aparecer a medio-largo plazo presiones de hinchamiento de hasta 40 kp/cm².

✓ **ST- III**

La sección III es una variante de la sección I-R, en donde se incluye la ejecución de grupos de 4 pilotes de 1 m de diámetro dispuestos longitudinalmente cada 2,5 m. La longitud de los pilotes es la correspondiente a un empotramiento de 5 m en la unidad M_{Ha}, alcanzando un máximo de unos 20 m.

Se exceptúan las zonas de fallas correspondientes a los PP.KK. 102+650-102+680 y 102+740-102+770 donde la longitud de los pilotes es la correspondiente a un empotramiento de 15 m en las unidades arcillosas M_{Ar} y M_{Yar}, alcanzando un máximo de unos 20 m. La geometría de la contrabóveda, de 1,5 m de espesor mínimo, se ha adaptado a su función de encepado de los pilotes.

Esta sección es la propuesta en aquellos tramos en donde la coexistencia de fallas, proximidad del acuífero yesífero a la clave del túnel y materiales solubles en torno al mismo, hacen probable la pérdida de apoyo del túnel a largo plazo por disolución. La ejecución de los pilotes se reconsiderará durante la construcción del túnel a la vista de las condiciones reales del terreno.

7.1 Tramificación de las secciones tipo del túnel.

De acuerdo con los criterios de aplicación de cada una de las secciones tipo, en la tabla siguiente se incluye la tramificación de las mismas según PP.KK., así como la longitud total de cada una de ellas.

TABLA DE TRAMIFICACIÓN DE LAS SECCIONES.			
P.K. Inicial	P.K. Final	Sección tipo	Sección Total (m ²)
101+736	101+759	Túnel artificial	
101+759	101+815	I-R	147,42
101+815	102+830	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
101+830	102+140	I-R	147,42
102+140	102+155	I-RA (saneos = 1 m)	187,71

102+155	102+245	I-R	147,42
102+245	102+275	I-RA (saneamiento = 1 m)	187,71
102+275	102+345	I-R	147,42
102+345	102+390	I-RA (saneamiento = 1 m)	187,71
102+390	102+490	I-RA (saneamiento = 2 m)	187,71
102+490	102+540	I-R	147,42
102+540	102+555	I-RA (saneamiento = 1 m)	187,71
102+555	102+580	I-R	147,42
102+580	102+650	I-RA (saneamiento = 2 m)	187,71
102+650	102+680	III	157,95
102+680	102+740	II	156,58
102+740	102+770	III	157,95
102+770	102+950	II	156,58
102+950	103+060	III	157,95
103+060	103+170	III	157,95
103+170	103+185	III	156,58
103+185	103+395	II	156,58
103+395	103+580	III	157,95
103+580	103+725	II	156,58
103+725	103+839	III	157,95
103+839	104+173	Túnel artificial	

7-1 Tramificación de las secciones

Sección tipo	Longitud(m)
I-R	601
I-RA	290
II	595
III	594
Total	2.080

7-2 Longitud de las secciones en el túnel.

8 Sistemas de excavación.

Se han realizado distintos ensayos destinados a la determinación de aquellas propiedades que presentan una influencia importante en la excavabilidad del terreno, esto es, en el

rendimiento del arranque y en el consumo de material fungible. Entre estas propiedades cabe destacar la resistencia a compresión simple, la tenacidad y la abrasividad. Ésta última puede determinarse a partir de distintos procedimientos como el ensayo de perforabilidad, el ensayo Cerchar o el análisis mineralógico (coeficiente de Schimazek).

Los resultados obtenidos para las distintas unidades geotécnicas son los siguientes:

	M_y	M_G	M_{HA}	M_{YAR}	M_{AR}
Ensayo brasileño (MPa)	1.53	1.2	0.99	0.54	0.57
índice Cerchar	0.27	0.25	0.27		
Fschimazek (Kn/m)		0.02	0.02		0.001
RCS (MPa)	2.5	4.53	2.84	0.49	1.02

8-1 Características geotécnicas de las diferentes unidades geotécnicas.

De acuerdo con los resultados anteriores todas las unidades indicadas corresponden a materiales muy poco abrasivos, pudiendo calificar su rozabilidad, a partir del factor de Schimazek, como muy buena. En consecuencia con lo anterior la excavación del túnel podría realizarse de forma mecánica mediante Rozadora o Retroexcavadora con martillo hidráulico.

No obstante lo anterior, existe una zona de la traza del túnel con predominio de glauberita donde **es posible que sea necesario la utilización de explosivos** para conseguir unos rendimientos de avance acorde con los plazos de ejecución de la obra, por lo que en el presente proyecto se contemplan los dos tipos de arranque : **Mecánico y Perforación mas Voladura.**

En general puede decirse que, la excavación del túnel se realizará en **dos fases: avance y destroza. La altura de la sección de avance** debe permitir la circulación fluida de los vehículos y el manejo de los bulones, por lo que la misma será de **6,21 m. La anchura** de la sección de avance, incluida las patas de elefantes, **será de 15,88 m. La altura de la destroza** oscilará, según las secciones, entre será de **4,9 m. y 7,86 m. La anchura de la destroza** oscilará entre **14,54 m y 15,02 m.**

8.1 Volumen de excavación.

A partir de las longitudes y secciones definidas en el epígrafe 1.10.1 se calcula un **volumen total** en excavación subterránea de: **330.022,72 m³**, correspondientes a:

- ST I - R : 88.599,42 m³
- ST I - RA : 54.435,9 m³
- ST II : 93.165,1 m³

- ST III : 93.822,3 m³

8.2 Arranque Mecánico.

En principio la excavación con medios mecánicos se realizará utilizando una retroexcavadora provista de martillo hidráulico, para pasar posteriormente a un minador (rozadora) con las siguientes características:

- Modelo: PAURAT T3.20
- Masa aproximada: 120 T.
- Potencia eléctrica total instalada: 400 Kw.
- Tensión y frecuencia de conexión :1.000 V - 50 Hz
- Velocidad de traslación: 0-17,6 m/min.
- Velocidad de giro de la cabeza de corte: 41,20 a 20,35 r.p.m.
- Presión media sobre el suelo : 0,15 MP_a
- Potencia mínima del transformador necesario: 1000 Kva.

8.2.1 Fases de construcción.

Teniendo en cuenta las características del terreno y las dimensiones de la sección, se propone la excavación y el sostenimiento del túnel por fases, ejecutándose las mismas con un desfase mínimo con el fin de limitar la descompresión del terreno y con ello la alteración del mismo en el entorno de la excavación. En el anexo correspondiente se describe el procedimiento constructivo propuesto para cada una de las distintas secciones tipo:

8.3 Avance mediante perforación y voladura.

8.3.1 Perforación.

Los barrenos tendrán un diámetro de 51 mm y la perforación de los mismos se realizará con un jumbo electrohidráulico de tres brazos, tipo Rocket Boomer o similar, referenciado por:

Modelo: ROCKET BOOMER XLC3

Potencia eléctrica instalada: 240kW.

Potencia diesel instalado: 170kW

Tipo de brazo: Hidráulico BUT 35L.

Tipo de deslizadera: BMH 6818 de 7,102 m.

Tipo de martillos: COP 1838 HF.

8.3.2 Longitud de pase.

Inicialmente las longitudes de pase dependerán de la calidad geotécnica del macizo rocoso. no obstante los cálculos de las voladuras se han realizado para una **longitud máxima de 2 m**. No obstante lo anterior, la longitud de pase podrá aumentarse si así lo estima la Dirección de Obras **Voladuras**.

8.3.3 Voladuras

Las voladuras de avance se han calculado con la hipótesis de que las mismas se desarrollarán a partir de un **cuele quemado de 3 secciones**, la primera compuesta por un barreno cargado y cuatro barrenos vacíos, la segunda por cuatro barrenos cargados y la tercera por ocho barrenos cargados. Como parámetros fijos de las voladuras a realizar se establecen los siguientes:

- Diámetro de perforación de los barrenos cargados: 51 mm.
- Diámetro de perforación de los barrenos vacíos: 102 mm.
- Longitud de perforación: 3 m.

En las figuras siguientes se representan las tres secciones del cuele y en el ANEXO N° III se reflejan los cálculos de las voladuras a realizar, incluyendo las hipótesis de utilizar solo explosivo gelatinoso o una combinación de la anterior con agente explosivo seco

Las voladuras de destroza se realizarán con una longitud de pase comprendida entre 1 y 3 m en función de la calidad geotécnica que presente el macizo rocoso en cada momento.

Las Cargas Específicas a utilizar para las voladuras de avance oscilarán, como media, en torno a los $1,5 \text{ Kg/m}^3$ para las voladuras de avance y entorno a 1 Kg/m^3 para las voladuras de destroza.

El cálculo de las voladuras se completa con el Estudio de Vibraciones que se refleja en el ANEXO III.

8.3.4 Consumo previsto de explosivo.

En la tabla siguiente se refleja en consumo previsto de explosivos para las obras subterráneas a realizar.

TABLA DE CONSUMO PREVISTO DE EXPLOSIVOS EN EL TÚNEL DE EL REGAJAL.			
TIPO DE EXPLOSIVOS	UDS.	HIPÓTESIS 1ª (Solo se utiliza explosivo gelatinoso)	HIPÓTESIS 2ª (explosivo gelatinoso y agente explosivo seco)
E.Gelatinoso	Kg.	300.800	174.400
A.Explosivo seco	Kg.		202.100
CORDÓN DET.	m.l.	125.000	125.000
DETONADORES.	Uds.	146.900	146.900
CONEC. EZTL	Uds.	73.000	73.000

8-2 Consumo previsto explosivos

Nota: Los detonadores podrán ser eléctricos o no eléctricos

9 Sostenimiento.

Al tratarse de una excavación subterránea a la misma se le aplica el **R.G.N.B.S.M.** y en concreto, la **I.T.C. 04.6.05: Labores Subterráneas: Sostenimiento de Obras.**

En base al apartado 3.2. de la citada I.T.C. los túneles son **labores no asociadas** a una explotación minera por lo que el diseño del sostenimiento debe tener en cuenta :

- Las características geométricas de la obra.
- Las características del terreno.
- Las condiciones impuesta por el tiempo de utilización de la obra
- Las medidas de control a instalar.

El sostenimiento debe ser capaz de controlar y mantener la estabilidad de la excavación, así como de las labores e instalaciones próximas durante todas las etapas constructivas a lo largo de la utilización de la obra.

Como resultado de los trabajos de diseño han de definirse los elementos estructurales de sostenimiento, en calidad y cantidad, así como el proceso de su colocación, en cada sección diferenciada de la obra.

En el apartado 4.2.7 de la referida I.T.C. se especifica que **el nivel del proyecto de sostenimiento** se debe corresponder con el comportamiento previsible del terreno y con el tiempo de utilización de la obra.

Por lo tanto, se estima que el macizo rocoso donde se pretende realizar el proyecto se encuentra **perfectamente investigado y estudiado** geológica y geotécnicamente, con los estudios elaborados.

9.1 Cálculo del sostenimiento.

El diseño del sostenimiento, entendiéndose como tal el conjunto de elementos que se colocan en una excavación subterránea para conseguir su estabilización provisional hasta que se realiza el revestimiento definitivo, puede abordarse con ayuda de las clasificaciones geomecánicas del terreno, o en función de la resistencia a compresión del terreno en el entorno de la excavación.

9.2 Nivel de proyecto de sostenimiento

Para cumplir estos objetivos se establecen dos parámetros de clasificación: El tiempo de utilización de la obra y el cociente σ_c/h , siendo:

- σ_c : Resistencia a Compresión Simple del litotipo más representativo de la excavación, expresada en MPa.
- h : Profundidad media de la excavación respecto a la superficie exterior, expresada en metros.

El ratio que establece dicho criterio σ_{cm}/P_0 contempla la resistencia del macizo correspondiente a las formaciones atravesadas que dominan la traza del túnel en cuestión, así como tiene en cuenta la tensión in situ calculada según la profundidad del túnel.

Los proyectos se clasifican en cuatro niveles, de acuerdo con las características especificadas en el cuadro siguiente:

NIVELES DE LOS PROYECTOS.		
σ_c/h (MPa/m.)	Tiempo de duración de la obra.	
	Menor de 15 años.	Mayor de 15 años.
>0,1	A	B
0,1 -0,05	B	C
< 0,05	C	D

9-1 Niveles de proyecto

Consideramos que, a lo largo de la traza del túnel el litotipo predominante es la **Unidad M_g**. (Glauberita con algo de yeso y halita e intercalaciones de arcillas), cabe esperar la presencia de este tipo de materiales en una longitud máxima de 1.500 m (70% de la total del túnel), de los cuales 1.250 m (60%) estarán ocupados por los terrenos de la unidad M_g en la totalidad de la sección del túnel, la cual presente un valor medio de la **R.C.S. de 30 MP_a**, que la altura media de recubrimiento es de **40 m** y que el tiempo de vida de la obra ha de ser mayor de 15 años.

$$\frac{\sigma_c}{h} = \frac{30}{40} = 0,7$$

Con los parámetros definidos la relación σ_c/h toma el valor de **0,7** por lo que el nivel del proyecto de sostenimiento sería: **B**. En este caso el sostenimiento puede diseñarse a partir de **experiencias similares** o en base a **Clasificaciones Geomecánicas acreditadas**.

9.3 Secciones tipo de sostenimiento

Dadas las características geotécnicas de los materiales afectados por el trazado del túnel, se proponen los siguientes Tipos de Sostenimiento en función de la resistencia a compresión del terreno en el entorno de la excavación.

- **SOSTENIMIENTO TIPO A**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance sea superior a **30 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Proyección de 12 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

- **SOSTENIMIENTO TIPO B**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance se sitúe entre **15 y 30 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas TH-29 (AE-355B) espaciadas 0,85 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 250 x 250 x 10 mm.
- Proyección de 14 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas de apoyo se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

- **SOSTENIMIENTO TIPO C**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance se sitúe entre **5 y 15 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas HEB-140 (AE-355B) espaciadas 0,85 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 300 x 300 x 20 mm.
- Proyección de 15 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas de apoyo se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

- **SOSTENIMIENTO TIPO D**

Se adoptará en los siguientes tramos:

Tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance **sea inferior a 5 kp/cm²**.

Primeros metros de excavación en mina: P.K. 101+759- P.K. 101+779 y P.K. 103+819- P.K. 103+839.

Zonas de falla.

Vaguada: P.K. 101+870- P.K. 101+910.

Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas HEB-180 (AE-355B) espaciadas 0,75 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 300 x 300 x 20 mm.
- Proyección de 20 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 4 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

9.4 Tratamientos especiales.

Con los sostenimientos anteriormente definidos se logra estabilizar la excavación en todas las calidades de terreno previstas. Sin embargo, cabe la posibilidad de que se intercepten zonas en las que la calidad geomecánica del macizo sea inferior y, por lo tanto, los sostenimientos previstos pudieran no ser suficientes, por lo que sería necesario recurrir a tratamientos especiales.

A lo largo del túnel en mina se ha previsto la realización de diversos tipos de tratamientos con el fin de mejorar la estabilidad de la excavación o lograr una impermeabilización adecuada.

9.4.1 Tratamiento del frente.

De acuerdo con los reconocimientos realizados, el macizo rocoso atravesado por el túnel se encuentra intensamente fallado, estimándose la existencia de al menos 12 zonas de falla. En estas zonas es previsible una reducción de las características resistentes del macizo, así como la posible existencia de carga de agua procedente del acuífero yesífero superior.

En estas circunstancias, con el fin de asegurar la estabilidad del frente, se propone la ejecución del siguiente tratamiento:

1) Bulones de fibra de vidrio 025 de 15 m de longitud en malla cuadrada de 1m x 1m.

Los bulones se ejecutarán con un solape mínimo de 4 m, para lo cual se perforarán con una inclinación del 2% para mantener constantes las coordenadas de los puntos de replanteo de la malla.

2) 6 drenes de PVC ranurado de 12 m de longitud y 2" de diámetro.

Los drenes se ejecutarán con un solape mínimo de 4 m, para lo cual se perforarán con una inclinación del 2% para mantener constantes las coordenadas de los puntos de replanteo iniciales.

Aparte de las zonas de falla, se propone la aplicación de este tratamiento entre los PP.KK. 101+870 y 101+910. En esta zona de vaguada la montera sobre el túnel es inferior a un diámetro. A esto se une la existencia de un depósito de materiales cuaternarios en superficie, de unos 5 m de espesor, que puede actuar como zona de captación del acuífero yesífero, y la proximidad entre éste último y la clave del túnel. Todas estas circunstancias hacen posible la aparición de problemas de inestabilidad del frente.

9.4.2 Jet-grouting.

Entre los PP.KK. 103+780 y 103+839 la clave del túnel intercepta el muro del acuífero yesífero superior. Esta circunstancia, unida a una altura de montera reducida, entre 10 y 12 m, puede dar lugar a fenómenos de inestabilidad global, que se traduzcan en la formación de chimeneas.

Para mejorar las características resistentes del terreno en el entorno de la excavación y reducir su permeabilidad, se propone la ejecución desde superficie de un tratamiento de columnas de jet-grouting.

El tratamiento propuesto consiste en la ejecución de una malla triangular de 0,75 m de lado con columnas de 0,9 m de diámetro. El ancho de la malla cubrirá toda la sección del túnel, manteniendo un resguardo de al menos 2 m a los hastiales. La longitud de las columnas será variable: unos 10 m, en la zona central de la sección, y 20 m en torno a los hastiales.

9.4.3 Sostenimiento en los emboquilles.

Dentro del concepto de emboquille se agrupan tanto los trabajos que deben realizarse previamente al comienzo de la excavación en mina, con el fin de asegurar su estabilidad, como los relacionados con la construcción de los portales definitivos del túnel.

Los emboquilles suelen presentar problemas de estabilidad adicionales a los previstos en el interior del túnel, debido a que su excavación se realiza en materiales descomprimidos y con un mayor grado de meteorización. Los criterios adoptados en la definición de los emboquilles han sido los siguientes:

- 1) Ubicación de los puntos de emboquille en zonas donde no se han detectado síntomas de deslizamiento que pudieran activarse con las excavaciones. Se ha evitado, en la medida de los posibles, la afección a materiales poco competentes como rellenos superficiales.
- 2) Localización de los emboquilles lejos de accidentes tectónicos de importancia.
- 3) Ejecución de los emboquilles en puntos con cobertera suficiente, con el fin de iniciar la excavación del túnel en materiales no afectados por la descompresión y la meteorización superficial.
- 4) Excavación de taludes provisionales de gran inclinación, con el fin de reducir la afección al entorno (especialmente en el emboquille noroeste).
- 5) En caso necesario, refuerzo de los taludes de emboquille con hormigón proyectado, mallazo y bulones, y drenaje mediante la ejecución de drenes californianos.
- 6) Ejecución de paraguas pesados de presostenimiento en los primeros metros del túnel y de viseras para la protección de los operarios.
- 7) Restitución del entorno de los emboquilles mediante túneles artificiales, cubriendo los taludes provisionales con los rellenos correspondientes.

Siguiendo estos criterios, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los cálculos realizados, se plantean las soluciones que se describen a continuación.

10 Ventilación.

Los cálculos que se realizan en los epígrafes siguientes están orientados fundamentalmente a determinar la cantidad de aire necesaria para la correcta respiración de las personas, refrigeración de los equipos instalados en el interior del túnel y mantener las concentraciones de polvo y gases nocivos (CO, CO₂ , NOX, SH₂ , SO₂) por debajo de los límites exigidos por el R.G.N.B.S.M., y desarrollados por la I.T.C. 04.7.02 : Ventilación y Desagüe” en su “ Apartado 1 : Concentración límite de gases.”

En la tabla siguiente se muestran las concentraciones volumétricas admisibles para los gases considerados, en jornadas de ocho horas y en periodos cortos.

CONCENTRACIÓN LÍMITE DE GASES NOCIVOS.		
Jornada de 8 Horas.		Periodos cortos.
GASES.	Concentración (p.p.m.)	Concentración (p.p.m.)
M. de Carbono (CO).	50	100
D. de Carbono (CO ₂).	5.000	12.500
O. de Nitrógeno (NO _x).	10	25
S. de Hidrógeno (SH ₂).	10	50
D. de Azufre (SO ₂).	5	10

10-1 Concentración límite de gases nocivos.

10.1 Datos de partida.

En este caso el túnel se atacará por dos bocas (Aranjuez y Ontígola) y cada una de ellas tendrá las siguientes características:

- Longitud: 1.040 m.
- Sección media de la excavación (Avance + Destroza): 156 m²

Dadas las rocas existentes (Arcillas, Glauberita, Yesos, etc.) se ha considerado que la excavación podrá realizarse tanto con medios mecánicos, como mediante perforación y voladura.

El número máximo de personas que trabajarán en el frente de avance será de 10.

La **potencia eléctrica total** de la maquinaria a utilizar será de **1.594 Kw**, correspondientes a:

- 1 Minador: 400 Kw.
- 1 Pala cargadora: 134 Kw.
- 1 Retroexcavadora: 130 Kw.
- 1 Elevador telescópico: 75 Kw.
- Dúmperes x 200 Kw/ud. = 600 Kw.
- 1 Robot Gunitador: 55 Kw.
- 1 Camión hormigonera: 200 Kw.

Para los cálculos a realizar solo se considerará la potencia correspondiente a la maquinaria que esté presente en el frente en el momento más desfavorable.

Para la conducción del aire hasta el frente de avance se utilizará tubería flexible lisa P-R de 2.200 mm de diámetro.

La velocidad de retorno de la corriente de aire se fija en 0,5 m/s.

10.2 Cálculo del caudal de aire necesario.

10.2.1 Caudal de aire para la respiración de las personas.

$$Q_1 = 10 \text{ personas} \times 40 \text{ l/s} = 400 \text{ l/s} = \mathbf{0,4 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

10.2.2 Caudal de aire para mantener la velocidad de la corriente de retorno.

$$Q_2 = 156 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m/s} = \mathbf{78 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

10.2.3 Caudal de aire para diluir los humos de las voladuras.

$$Q_3 = 0,166 \times 312 = \mathbf{51,7 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

10.2.4 Caudal de aire necesario para diluir los gases de escape de los motores de combustión interna.

$$Q_4 = 0,066 \times 440,4 = \mathbf{29 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

10.2.5 Caudal de aire para la eliminación del polvo.

$$Q_5 = 0,4 \times 74,38 = \mathbf{29,7 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

10.2.6 Caudal de para la disipación del calor.

- **Calor que puede desprender el macizo rocoso.**

$$W_1 = 0,20 \times 10^3 \times 48.880 = \mathbf{9,77 \text{ kW}}$$

- **Calor desprendido por el personal (0,25 kw/persona).**

$$W_2 = 0,25 \times 10 = \mathbf{2,5 \text{ KW}}.$$

- **Calor desprendido por los equipos eléctricos (minador) : 0.1 Kw de energía calorífica por cada kW eléctrico instalado, por lo que en nuestro caso :**

$$W_3 = 0,1 \times 400 = \mathbf{40 \text{ KW}}.$$

- **Calor desprendido por los equipos diesel : 0.90 Kw de energía calorífica por cada kW eléctrico instalado, por lo que en nuestro caso y considerando una pala y tres dúmpers sería:**

$$W_4 = 0,9 \times 734 = \mathbf{660,6 \text{ KW}}$$

Por tanto el calor producido en el túnel y que se incorpora al aire es:

$$W = 9,77 + 2,5 + 40 + 660,6 = \mathbf{712,87 \text{ kW.}}$$

El caudal de aire capaz de evacuar esta cantidad de calor incrementando su temperatura en 33° C es:

$$Q_6 = 712,87 / 1,2 \times 33 \times 1,39 = \mathbf{13 \text{ m}^3/\text{s.}}$$

En función de lo expuesto observamos que, todos los caudales requeridos son inferiores al necesario para mantener una velocidad de la corriente de aire igual a 0,5 m/s. que se cifra en **78 m³/s**, luego en principio este será el caudal que debe proporcionar el ventilador soplante que se instale en las bocas del túnel.

10.3 Determinación de la potencia del ventilador.

Durante el recorrido del aire por el túnel y por la tubería y debido al rozamiento con las paredes y a las fugas se producen pérdidas en el caudal de aire transportado. Las citadas pérdidas deben ser consideradas para poder determinar el caudal real que debe suministrar el ventilador y la potencia del mismo.

Como datos de partida se han tomado el diámetro de la tubería de ventilación a instalar (2.200 mm.) y el caudal necesario (78 m³/s) para la ventilación del túnel.

El punto de funcionamiento del ventilador queda definido por:

a) $Q_v = 83 \text{ m}^3/\text{s}.$

b) $AH = 1.690,3 \text{ Pa}$

- **Potencia del ventilador.**

La potencia aerodinámica a suministrar por el ventilador se determina mediante la expresión:

$$P = Q (\text{m}^3/\text{s}) \times AH (\text{mm.c.a.}) / 101,9 = 83 \times 169,03 / 101,9 = \mathbf{137 \text{ Kw.}}$$

El ventilador que se elija estará provisto de variador de frecuencia, para poder adaptar el caudal de aire en cada momento.

11 Electrificación.

Las instalaciones a describir en el presente proyecto se pueden dividir en dos partes totalmente independientes: una de ellas correspondiente a la zona de trabajo denominada "Boca de Aranjuez" y otra correspondiente a la zona de trabajo "Boca de Ontígola". Aunque las dos instalaciones son independientes, ambas van a ser prácticamente idénticas, por lo que el desarrollo detallado se realiza para la instalación de la "Boca de Aranjuez", siendo todos los resultados aplicables para la instalación de la "Boca de Ontígola".

11.1 Instalación de la “boca de Aranjuez”

La instalación a definir en el presente apartado tienen como punto de partida un equipo generador formado por tres grupos, dos de 500 kVA y uno de 800 kVA de potencia (total 1800 kVA ~ 1600 kW) que suministran una corriente a 400 V y 50 Hz. Desde el cuadro general de mando y protección situado a la salida del grupo de generadores partirán a 400 V:

- **Una línea que alimentará** un centro de transformación de 1400 kVA, con 0.42 kV de tensión de entrada (tensión de generación) y 0.6 kV de tensión de salida.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario del taller de mantenimiento situado en el exterior del túnel. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Tomas generales de fuerza situadas en el taller.
 - Alumbrado exterior.
 - Alumbrado del taller.
 - Grupo de presión de agua.
 - 1 circuito de reserva.
 - Casetas de oficina, vestuarios y comedor.
 - Taller de mantenimiento mecánico.
 - Taller de mantenimiento eléctrico.
 - 1 toma de fuerza de 250 A para realizar pruebas de equipos.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de la zona de bombas. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Máquina de lavar.
 - Bombas.
 - Depósito de gasoil.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de la gunitadora para cuando ésta se encuentra en el exterior del túnel, para tareas de mantenimiento, limpieza, comprobación, etc. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Gunitadora.
 - 1 Toma general de fuerza de 16 A situadas en el propio cuadro,
 - 1 Toma general de fuerza de 32 A situadas en el propio cuadro.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de iluminación interior del túnel. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Alumbrado interior del túnel.

- 1 Toma general de fuerza de 16 A situadas en el propio cuadro.
- 1 Toma general de fuerza de 32 A situadas en el propio cuadro.

Una línea de 420 V que alimentará el cuadro secundario de los ventiladores del sistema de ventilación del túnel.

12 Red de agua.

No se tienen datos precisos sobre el volumen de agua que puede llegar a acumularse en el frente de avance, por lo que es necesario considerar una instalación de desagüe general.

En su conjunto la instalación estará compuesta por un equipo de bombas y las conducciones pertinentes, estando previsto realizar el bombeo en una sola etapa. Las aguas bombeadas serán tratadas en balsas de decantación antes de su incorporación a cauces públicos.

En principio se instalará una bomba centrífuga sumergible lo más próxima posible al frente de avance, creándose en las proximidades de aquel un pozo de aspiración con capacidad próxima a 1,5 m³.

Para el cálculo de la instalación se parte de los siguientes datos:

- Aportación estimada de agua: 7,2 m³/h.
- Longitud de bombeo 1100 m
- Diferencia de cotas: 24 m

➤ Cálculo de la instalación.

La evacuación de las aguas se hará a través de una tubería flexible de PVC con las siguientes características:

- Factor de fricción: $f = 290 \times 10^{-4}$ m/s.
- Velocidad máxima de diseño en tubería de impulsión: $V = 1,5$ m/s.
- Diámetro de la tubería de impulsión: $d = 76,2$ mm.
- Longitud de la tubería de impulsión: $L = 1525$ m.

Las pérdidas de carga primaria pueden estimarse por la expresión:

$$\Delta H = f LV^2 / 2 dg$$

$$\Delta H = 290 \times 10^{-4} \times 1100 \times 1,5^2 / 2 \times 0,0762 \times 9,81 = \mathbf{26,82 \text{ m.c.a.}}$$

La **altura manométrica** que debe vencer la bomba a instalar será de **26,82 m**.

➤ Selección de la bomba

Para atender incrementos imprevistos del caudal a bombear y aumentos de las pérdidas de carga de la instalación, se propone instalar una bomba centrífuga sumergible sobredimensionada un 50%, tanto en altura manométrica como en caudal. Por consiguiente la bomba a utilizar tendrá las siguientes características:

- **Altura manométrica:** $26,82 \times 1,5 = 40,23 \text{ m}$.
- **Caudal de desagüe:** $7,2 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,5 = 10,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

13 Red de aire comprimido

En ambas bocas la red de aire comprimido estará compuesta por:

- Compresor.
- Calderín
- Tubería de conducción del aire.

13.1 Consumo previsto de aire comprimido.

Maquinaria que requiere aire comprimido:

- Robot de gunitado = $18 \text{ m}^3/\text{min}$
- Dos llaves de impacto ($1,05 \text{ m}^3/\text{min}$) = $2,1 \text{ m}^3/\text{min}$
- Otros = $5 \text{ m}^3/\text{min}$
- Pérdidas (10% aprox) = $3 \text{ m}^3/\text{min}$

13.2 Determinación del compresor y de la tubería.

Partimos de una presión de trabajo de 7 bar.

- **Caudal de trabajo:**

Suma de los caudales de todas las máquinas multiplicado por el coeficiente de simultaneidad.

$$Q = \sum Q_i \times K = (18 + 2,1 + 5 + 3) \times 0,7 = 19,7 \text{ m}^3/\text{min}$$

En ambas bocas (Aranjuez, Ontígola) se instalará un compresor de **$21 \text{ m}^3/\text{min}$**

- **Cálculo del diámetro de la tubería:**

Siendo:

D = Diámetro interior de la tubería en pulgadas

P = Presión inicial en bar

p = Pérdida de carga admitida en bar

Q = Caudal de aire a transportar en m³/min

L = Longitud de la tubería en m Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt[5]{\frac{0,008 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{P \cdot p}} = \sqrt[5]{\frac{0,008 \cdot 21^{1,85} \cdot 1600}{7.1}} = 3,48''$$

Se toma **D=4'' = 101,6mm**

Los cálculos realizados son aplicables a las dos bocas del túnel ya que se va a realizar la mitad por cada una.

14 Resumen Presupuesto

14.1 Presupuesto por partida.

CONCEPTO	IMPORTE (€)
PERSONAL (2 turnos)	897.000,00
MAQUINARIA	1.209.150,00
EMBOQUILLES	212.272,56
PERFORACIÓN Y VOLADURA	1.205.410,2
ALMACENAMIENTO DE EXPLOSIVO	216.500
SOSTENIMIENTO	2.379.296,013
VENTILACIÓN	71.000
AIRE COMPRIMIDO	125.400
ELECTRIFICACIÓN	397834,56
TOTAL COSTES	6.713.763,33

14.2 Presupuesto excavación

		€/m ³	€/m
Volumen excavado(m ³)		41,79	-
Metros (m)	2100	-	5.223,87

14.3 Presupuesto total.

CONCEPTO	IMPORTE (€)
COSTES TOTALES	6.713.763,33
GASTOS GENERALES (13% COSTES)	872.789,2329
BENEFICIO INDUSTRIAL (6% COSTES)	402.825,7998
TOTAL	7.989.378,363
I.V.A. (21% TOTAL)	1.677.769,546

PRESUPUESTO	9.667.147,819
-------------	---------------

El presupuesto para la construcción del túnel asciende a: **Nueve millones seiscientos sesenta y siete mil ciento cuarenta y siete coma ochocientos diecinueve euros.**



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

Documento II: ANEXOS

Autor: José Gullón Conejo

Tutor: Daniel Vázquez Silva

ANEXO I GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

1 Introducción.

El objeto del presente anexo es el establecimiento de las características geológicas y geotécnicas de los terrenos afectados por las labores subterráneas del trazado del *Acceso de Alta Velocidad de Levante Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia. Tramo: Aranjuez-Ontígola*, concretamente el túnel de El Regajal, así como establecer las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de contorno del macizo donde se sitúa y que sirva como base para determinar los parámetros necesarios que permitan elaborar las recomendaciones geotécnicas para su construcción.

El túnel tiene una longitud total de 2347 m, de los cuales los 334 m finales, en sentido Ontígola, se ejecutarán como túnel artificial. El túnel mina se ubica entre el P.K. 101+759 y el P.K. 103+839. El trazado se desarrolla en los términos municipales de Aranjuez y Ontígola, en las comunidades autónomas de Madrid y Castilla La Mancha respectivamente.

Los principales problemas geológico-geotécnicos estriban en la presencia de materiales muy evolutivos, para lo que la presencia de agua constituye el elemento desencadenante o acelerante de diversos procesos de transformación mineralógica que han de ser tenido en cuenta en la geotecnia del túnel.

2 Geología del macizo rocoso.

La zona por la cual transcurre la traza se sitúa en el margen meridional de la denominada Cuenca de Madrid, la cual está formada por diversos tipos de sedimentos continentales depositados a lo largo del Terciario cuyo espesor alcanza de 800 a 1200 m.

Estructuralmente la Cuenca de Madrid es una cuenca intraplaca formada en la orogenia Alpina, cuyo relleno sigue el esquema clásico de una cuenca continental endorreica, en el que primero predomina el depósito por gravedad de materiales detríticos gruesos (gravas y arenas) como respuesta a la erosión de los relieves circundantes emergentes, denominados "facies de borde", continúa con la decantación de materiales detríticos más finos (limos y arcillas) denominados "facies intermedias", y finaliza con la precipitación química de materiales carbonatados y salinos o evaporíticos, como calizas y sales o yesos, o "facies centrales".

Respecto a los materiales que en concreto aparecen en la zona de estudio se encuadran en el Mioceno y Plioceno, además de los recubrimientos del Cuaternario, siendo los de la base del Mioceno los directamente afectados por el Túnel del Regajal.

Por otro lado, los materiales miocenos han sido divididos en tres grandes unidades tectosedimentarias denominadas Unidad Inferior, Intermedia y Superior, delimitadas por

discontinuidades sedimentarias bien definidas, que en esta zona se encuentran bien representadas.

La denominada **Unidad Inferior**, que está **directamente afectada por la excavación del túnel**, presenta una edad que se sitúa entre el Ateniense y parte del Aragoniense medio (Mioceno inferior). Está constituida por sedimentos arcillosos masivos en su base, sobre los que aparecen depósitos evaporíticos, primero de carácter salino pero que pasan a yesífero.

Sobre la unidad antes descrita se sitúa la **Unidad Intermedia**, esta unidad ya no se ve afectada por el trazado. Está formada siguiendo un esquema sedimentario parecido al anterior: en su base depósitos arcillosos y luego un desarrollo importante de facies yesíferas.

Finalmente con respecto a los **materiales del Cuaternario**, estos se encuentran relacionados con la actividad del río Tajo. Litológicamente son arenas arcósicas y conglomerados de cantos síliceos que a techo pasan a depósitos limosos.

3 Geomorfología de la zona.

El tramo se desarrolla desde el margen izquierda (Sur) del valle del río Tajo hasta la Mesa de Ocaña, discurriendo sobre materiales modernos (Terciario superior), sedimentados en la etapa final de la orogenia alpina, y por tanto, apenas deformados por la misma. Esta característica estructural determina que la morfología de la zona tenga un carácter tabular, fisionomías condicionadas por el grado de incisión de la red fluvial en los estratos sedimentarios y del carácter homogéneo o heterogéneo de la litología de dichos estratos.

Tras el cruce del Arroyo Salinas se afrontan los resaltes que delimitan la “Mesa de Ocaña”, que serán salvados mediante la excavación del Túnel de El Regajal. La base de estos está formada por materiales de la Unidad Inferior miocena arcillosa, sobre los que se sitúan los sedimentos evaporíticos.

3.1 Estratigrafía.

Se ha llevado a cabo un estudio minucioso de las litologías registradas en los sondeos perforados a lo largo del túnel, así como de los afloramientos de su entorno próximo. En base a estos datos, así como a los obtenidos del estudio mineralógico, se han establecido nueve unidades litoestratigráficas.

- Tres de ellas se disponen en niveles superiores de la montera del túnel y están formadas por yesos fundamentalmente (M_{y-2} , M_{y-1a} y M_{y-1b})
- Por debajo se sitúa una unidad de gran continuidad formada por glauberita (M_{y-1c}) que hacia el inicio del túnel da paso a las dos unidades predominantemente arcillosas (M_{y-1e} y M_{y-1f})
- Bajo la unidad de glauberita se dispone, desde aproximadamente la mitad del túnel hasta su final, una unidad formada por halita, glauberita y anhídrita (M_{HA}).
- El nivel basal está formado por una unidad arcillosa (M_{AR}) muy continua que aflora en la boquilla de entrada al túnel y pierde progresivamente cota.

En cuanto a formaciones superficiales se han reconocido tres unidades, que recubren parcialmente al sustrato. Dos son los depósitos de terraza Q_{T-1} y Q_{T-2} (granular y cohesivo) y la otra corresponde a suelos coluvio-aluviales (Q_{CA}). También se han diferenciado dos tipos de rellenos antrópicos (compactados y vertidos).

Por otra parte, en numerosos sondeos se han identificado depósitos de naturaleza predominante cohesiva, cuya génesis obedece a procesos de disolución de los yesos y relleno posterior, que se han denominado como rellenos cársticos (R_K). Estos materiales alcanzan potencias superiores a los 10 m en varios casos, correlacionándose algunas de ellas con zonas de rellenos de dolinas identificadas en el exterior (taludes de la R-4).

A continuación se describen cada una de las unidades mencionadas.

- **Sustrato. Mioceno Inferior-Medio**

M_{Y-2} -Yeso blanquecino masivo con intercalaciones arcillosas, yeso arcilloso.

Se sitúa a techo de la serie miocena, desarrollándose en ellas los procesos de karstificación detectados en los sondeos, tanto en forma de rellenos de dolinas, como oquedades, algunas de ellas de porte métrico. Aparece recubierta en superficie por las formaciones superficiales anteriormente mencionadas. Se sitúa siempre por encima de la clave del túnel en el sector donde este se excavará en mina, siendo tan solo afectado, de modo reducido, en la zona del túnel artificial.

M_{Y-1a} Yeso arcilloso de tonos negruzcos.

Se presenta en niveles de potencia entre 3 y 5m, que pasan lateralmente a arcillas yesíferas y glauberita arcillosa (Ud. M_{Y-1d}). Su presencia se limita fundamentalmente al sector inicial del macizo, aunque aparece, muy localmente, en su parte central, donde forma niveles canalizados de escasa potencia y limitada continuidad lateral.

M_{Y-1b} - Yeso con indicios de glauberita e intercalaciones grises de arcilla.

Esta unidad tan solo aparece en la parte central del túnel, donde se sitúa a la base de la unidad M_{Y-2} . Su potencia varía entre 5 y 8 m, pasando lateralmente y en la vertical a la unidad de glauberita.

M_{Y-1c} - Glauberita con algo de yeso, masiva, porosa, fibrosa radial y Glauberita gris con intercalaciones de arcillas negras a grises a veces pestilentes.

Esta unidad tiene un amplio desarrollo a lo largo del túnel, ya que comienza a aparecer al poco de iniciarse y gana progresivamente potencia y continuidad en el sentido de avance del mismo, de forma que en su parte central y último tercio este se excavará predominantemente en ella. Presenta gran potencia, en torno a 12 m en la zona del túnel artificial, y entre 15 y 20 m en el sector central del túnel, aunque no se trata de un nivel continuo, si no que se engrosa, adelgaza y pasa lateralmente a otra unidad, de acuerdo con

el esquema sedimentario de formación. A grandes rasgos se sitúa bajo los niveles predominantemente yesíferos (Unidades M_{Y-2} y M_{Y-1b}) y sobre los materiales con mayor contenido de halita (Ud. M_{HA}), presentándose interdigitado con niveles arcillosos pestilentes, pasando en la vertical a la unidad de glauberita y halita (M_{HA}), así como, en tránsito gradual, a la alternancia de glauberita y yeso con arcillas (M_{Y-1d}).

M_{Y-1d} – Alternancia de glauberita/yeso con arcillas. Glauberita arcillosa negra pestilente con yeso.

Esta subunidad tan solo se ha identificado en el sector terminal del túnel, donde se excavará el túnel artificial. Se sitúa sobre la anterior y por debajo de la unidad M_{Y-2} . Su potencia varía entre 3 y 8 m.

M_{Y-1e} – Arcillas negras yesíferas pestilentes, glauberita y yeso.

Adquiere gran importancia en el sector inicial y central del túnel, donde aparece en niveles de escasa continuidad lateral de potencias máximas de entre 3 y 12 m. Se caracterizan por su color oscuro, así como por el olor que desprenden, pestilente. El olor desaparece una vez que las muestras han estado expuestas al exterior. Un posible origen hay que buscarlo en la acumulación de materia orgánica durante la deposición del sedimento y su posterior diagénesis, transformándose en lo que viene a conocerse como sapropel, o materia primigenia de los hidrocarburos. Las zonas donde esta unidad tiene más entidad se sitúan a nivel de clave y contrabóveda el túnel, si bien en la parte inicial del mismo, donde su potencia es menor, se situará en los hastiales.

M_{Y-1f} – Arcillas yesíferas, arcillas gris con yeso de tonos gris a negro, con indicios de halita seún zonas, que en ocasiones se presentan alternantes con yesos arcillosos negruzcos.

Constituyen niveles de gran continuidad y potencias medias entre 3 y 8 m, cuya disposición estratigráfica es variable que se sitúan tanto a la base de la unidad de yesos M_{Y-2} , como por encima de la unidad M_{AR} , en incluso interdigitada en la unidad M_{Y-1c} . Será excavada por el túnel en su primer tercio.

M_{HA} – Glauberita, halita y anhidrita, con intercalaciones de niveles de arcillas negruzcas con glauberita e indicios de halita.

Esta unidad de naturaleza litológica un tanto heterogénea tiene, como rasgo propio, la importante presencia de halita. Se extiende de forma importante bajo el cuerpo del túnel aunque sólo será excavada en dos sectores de su parte central. En el primero afecta a prácticamente toda su sección, mientras que en el segundo a la contrabóveda llegando en algunos casos a la parte media de los hastiales. Se trata, por tanto de un potente nivel de amplia extensión lateral, que estratigráficamente se ubica entre los niveles predominantemente glauberíticos, a techo, y a las arcillas miocenos (Ud. M_{AR}) de la base. Litológicamente esta unidad se puede definir como una mezcolanza de niveles de arcillas negras pestilentes, dispuestas en veteados o como intercalaciones masivas de rango

centimétrico, entre las que aparecen intercrecimientos cristalinos de glauberita, halita y anhidrita. La primera se caracteriza por presentar cristalización lenticular con crecimientos al azar y masivos, mientras que la halita lo hace de manera masiva. Es significativa la presencia de huecos de disolución de tamaño milimétrico a centimétrico.

M_{AR}- Arcillas marrones y grises con intercalaciones de yeso e indicios de halita.

Constituye la base de los depósitos miocenos presentes a lo largo del trazado. Se trata de arcillas masivas predominantemente marrón-rojizas con intercalaciones asiladas de yeso nodular. Presentan indicios de halita con porcentajes inferiores al 5%. Estos materiales forman el sustrato por el que discurre el trazado en la primera parte del trazado, recubiertos parcialmente por depósitos cuaternarios de terraza y aluviales en la primera parte del trazado. A lo largo del túnel de la zona afectada por esta litología se sitúa entre el P.K. 101+750 y el P.K. 102+000, situándose muy cerca de rasante hasta el P.K. 102+380, a partir del cual desciende progresivamente de cota sin llegar a atravesarse posteriormente a lo largo del trazado. Ha sido identificada en el P.K. 102+945 a 65 m de profundidad y a más de 19 m por debajo de rasante.

Con excepción de los 100 primeros metros del túnel, donde estas arcillas alcanzan la parte media de los hastiales, en el resto del sector donde serán excavados se sitúan a cota de contrabóveda.

- **Formaciones superficiales.**

Q_T- Depósitos de terraza. Se corresponden con las terrazas altas del río Tajo, identificándose dos niveles de características litológicas diferenciadas:

- **Q_{T-1} Limos con algo de gravas**

Se trata del nivel superior de los depósitos de terraza, compuesto por limos marrones con niveles dispersos de limos arenosos y gravas. Se dispone normalmente sobre la unidad granular, habiéndose reconocido potencias de hasta 12 m. Se encuentran escasamente litificadas. Se sitúan tanto en el desmonte inicial del trazado como en la montera del túnel, donde se han reconocido potencias de hasta 7 m.

- **Q_{T-2} Gravas arenosas**

Aparece situado bajo el anterior y sobre el sustrato mioceno arcilloso, estando formado por gravas, cuya matriz es, por lo general, de naturaleza limosa a limo arenosa de color marrón. La potencia máxima de esta unidad varía entre los 8 m en el desmonte inicial y los 6 m en la zona de montera del túnel de El Regajal.

Q_{CA}- Depósitos coluvio-aluviales. Limos arenosos marrones y arcillas limosas.

Estos depósitos que se disponen directamente sobre el sustrato yesífero, son el resultado de la erosión del mismo y de las terrazas altas del Tajo, por lo que están formados por limos a arcillas limosas, con bastante yeso en matriz y en forma de cantos y nódulos, con

contenidos variables de arenas y gravas de naturaleza calcárea o cuarcítica, en las que predomina el limo en matriz. Presentan colores marrones a verdosos. Se sitúan entre el P.K. 102+880 Y 103+300 en la zona de montera del túnel de El Regajal. Su potencia máxima es de unos 6 m.

Q_{AL}-Depósitos aluviales del arroyo Salinas.

Se trata de materiales situados a ambos márgenes del arroyo Salinas, formados por limos arenosos, arcillas limosas y arenas con pasadas de gravas. Su grado de consolidación y cementación es bajo, dado que se trata de un depósito relativamente reciente, aunque en la actualidad desconectado del arroyo que lo generó, dado que este se ha encajado profundamente en estos hasta alcanzar el sustrato arcilloso sobre los que descansan. Su potencia máxima varía entre 3 y 10 para las márgenes izquierda y derecha respectivamente.

Q_{COV}- Depósitos coluvio-eluviales.

Se trata de suelos residuales fundamentalmente, si bien al situarse en zonas de ladera presentan una componente gravitacional en su génesis. Se disponen sobre el sustrato arcilloso (MAR) así como sobre el sustrato yesífero (MY). Su potencia es reducida, no habiéndose reconocido espesores superiores a los 2 m. Se trata de materiales predominantemente limo-arcillosos y de escasa compactación, con contenidos variables de cantos yesíferos, dependiendo de la zona y el sustrato sobre el que se ubiquen.

R_K-Rellenos Kársticos.

Se encuentran rellenando cavidades en la unidad de yesos de la unidad basal o bien rellenando antiguas dolinas. Están constituidos por arcillas grises y ocasionalmente rojas con fragmentos y bloques de yesos procedentes de las formaciones miocenas, o por limos arenosos de color marrón con gravas dispersas de cuarcitas y cuarzo, subredondeadas y de dimensiones centimétricas, correspondientes a los depósitos de terraza. A menudo estos depósitos se presentan basculados, debido a procesos de reajuste tectónico y colapso. Pueden observarse claramente en los taludes de la R-4

Q_{ALV}-Depósitos de fondo de vaguada

Se trata de materiales asociados a pequeños arroyos y en general de escasa potencia. A lo largo del trazado estos materiales han sido reconocidos en el inicio del túnel de El Regajal, ocupando el fondo de una vaguada que discurre al noreste del trazado y que acaba enlazando aguas abajo con la zona llana correspondiente a los aluviales del arroyo Salinas. Está formado por limos yesíferos y arcillas con algunos cantos. Se trata de un depósito generado por los acarrees de carácter estacional que transporta el arroyo, incluso en la actualidad.

- **Rellenos antrópicos**

R_V-Rellenos vertidos. Su compactación es muy escasa o nula. Son materiales muy heterogéneos ligados a la construcción de la autopista de peaje R-4, constituidos por

arcillas y limos con alto contenido de yesos. El espesor es variable pudiendo superar los 5 m de altura, como es el caso de los caballones situados a ambos lados de la R-4 en el sector final del túnel de El Regajal en mina.

R_C-Rellenos compactados. Se trata de rellenos ejecutados para las diversas infraestructuras situadas junto al trazado, correspondientes a la autovía N-IV y la R-4. Serán afectadas por el túnel artificial en el sector final del trazado.

R_{BA}: Rellenos de bancal. Corresponde con los aterrazamientos derivados de las actividades agrícolas. Su litología es variada y está relacionada con los suelos o terrenos del sustrato de donde proceden. No son afectados directamente por el trazado y su presencia se reduce a una pequeña zona ubicada al inicio del trazado.

3.2 Tectónica.

Desde el punto de vista tectónico la zona se ha visto afectada por fallas inversas y de desgarre desde el Mioceno hasta el Plioceno y Cuaternario. Controlados por estas estructuras se producen fenómenos de disolución en profundidad de las litologías evaporíticas. Estudios recientes han constatado la hipótesis de considerar un origen inicialmente tectónico de la mayor parte de las deformaciones observables tanto en materiales miocenos como en los depósitos cuaternarios, tratándose en realidad de procesos de reajustes tectónicos profundos que al propagarse a superficie son asistidas y amplificadas por los materiales evaporíticos, proceso que se traduce en karstificación, colapsos y halocinesis.

De la interpretación del perfil sísmico de reflexión se deduce la presencia de gran número de fracturas que, enraizadas en el basamento, alcanzan niveles superiores del sustrato, interceptando el trazado del túnel buen número de ellas.

Estas fracturas se han incluido en el perfil geológico del túnel. En él se han dibujado estas fallas con dos tipos de líneas diferentes, en función de la importancia dada en la interpretación geofísica.

Así mismo se ha comprobado, en muchos casos, la presencia de zonas de disolución kárstica y relleno asociadas a estas fallas. Estas zonas de disolución kárstica, cuando coinciden con depósitos cuaternarios en superficie, han generado colapsos que han provocado un basculamiento de estos materiales, como las fallas entre los PP.KK 101+820 y 102+340. En otros casos las fallas se presentan como una banda con rellenos arcillosos y brechas yesíferas.

De todo ello puede deducirse que estas fracturas actúan como elementos a favor de los cuales tienen lugar procesos de disolución y colapso en los yesos, con entrada y relleno de materiales detríticos. Así mismo constituyen vías de entrada de agua al macizo.

En los trabajos de fotointerpretación se localizaron dos alineaciones claramente diferenciados:

- **Lineaciones NNE-SSW**, casi ortogonales al eje. Estas lineaciones además de tener colapsos importantes en superficie, llevan asociados en el labio levantado fracturas asociadas en los que se ha producido disolución y posterior relleno kárstico.
- **Fallas de dirección SSE-NNW**, oblicuas al eje con colapsos importantes en superficie, generando éstos valles asimétricos, en los que una ladera aparece cubierta por materiales cuaternarios, mientras que en la otra afloran yesos.

De esta manera se han reconocido las siguientes fallas referenciando cada una de ellas al punto de corte con el eje del túnel.

- **Falla P.K. 102+149:** Dirección NNE-SSW. Es una falla en la que en la R-4 se observa un colapso importante, encontrándose basculados los materiales cuaternarios hacia el SE. Así mismo en el corte de la falla con el trazado se observa un valle asimétrico en que la ladera Este se encuentra constituida por materiales cuaternarios basculados, mientras que la ladera Oeste se encuentra constituida por materiales yesíferos miocenos
- **Falla P.K. 102+260:** Dirección SSE-NNW. En el corte de la falla con el trazado se observa un valle asimétrico en que la ladera Este se encuentra constituida por materiales cuaternarios basculados, mientras que la ladera Oeste se encuentra constituida por materiales yesíferos miocenos
- **Falla P.K. 102+340:** Dirección NNE-SSW. Se ha observado el colapso producido por la disolución de los materiales infrayacentes en el talud de la R-4, en el que se observa el colapso de los materiales cuaternarios. Según la interpretación sísmica, esta falla no tiene reflejo en superficie en las inmediaciones del túnel-
- **Falla P.K. 102+400:** Dirección SSE-NNW. Se ha observado además de la alineación, el colapso provocado por la misma en el talud de la R-4, en la que los materiales cuaternarios se encuentran basculados hacia el SE. Según la interpretación sísmica, esta falla no tiene reflejo en superficie en las inmediaciones del túnel. En la foto aérea se observa el codo de captura que forma el barranco al Sur del P.K. 102+450, que corresponde con la continuación de la falla al otro lado del eje.
- **Falla P.K. 102+540:** Dirección NNE-SSW. Se ha observado su situación en el talud de la R-4, en la que se observa al igual que en el sondeo S-102+440, un importante relleno, así como una zona brechificada. Según la interpretación sísmica, esta falla no tiene reflejo en superficie en las inmediaciones del túnel.
- **Falla P.K. 102+670:** Dirección E-W. Esta falla al sur del trazado a generado el barranco de la misma dirección de la falla, que aguas abajo ha sido capturado por el barranco generado por la falla del P.K. 104+400.
- **Falla P.K. 102+770:** Dirección NNE-SSW. Se ha situado en el talud de la R-4, en forma de una zona fracturada y brechificada.
- **Falla P.K. 102+950 a P.K. 103+180.** Dirección NE-SE. Se trata de un racimo de fallas profundas que han generado una zona deprimida, posteriormente ha sido tapizada

por un depósito coluvial. El reflejo de estas fallas al SW del eje es en forma de cuatro barrancos de dirección SW-NE.

- **Falla P.K. 103+440:** Dirección NE-SW. Se ha observado un importante relleno Kárstico en el talud de la R-4, así como un levantamiento del labio SE
- **Falla P.K. 103+430.** Dirección NE-SW. Se ha situado en el talud de la R-4, así como en el sondeo 103,440, en forma de un relleno kárstico. Su proyección hacia el SW es a través de un valle y alineándola con un colapso de materiales cuaternarios.

En el sector inicial del trazado, hasta llegar al túnel, no se han reconocido fracturas.

3.3 Hidrogeología.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los terrenos que atravesará el túnel se encuentran situados en el Sistema Acuífero 14, Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres, que limita al sureste con el Sistema Acuífero 20, Terciario detrítico calizo del norte de Castilla La Mancha. En el área de estudio los niveles de mayor interés hidrogeológico del Sistema Acuífero 14 están representados por los depósitos de terraza alta del río Tajo.

El Sistema Acuífero 14 pertenece a la Cuenca del Tajo, mientras que el Sistema Acuífero 20 engloba a diversas unidades hidrogeológicas, situándose a caballo entre la Cuenca del Guadiana y la del Tajo. El sector noroccidental de este sistema acuífero se corresponde con la unidad 03.08 Ocaña (Cuenca del Tajo).

Según la documentación hidrogeológica del IGME, las formaciones presentes en el área de estudio se engloban dentro de las formaciones porosas y fisuradas, ocasionalmente con acuíferos de interés local. Dentro de este grupo se sitúan los cuaternarios constituidos por las terrazas altas desconectadas y colgadas y depósitos coluvio-aluviales, que, aunque por su extensión y potencia reducida no han sido considerado como acuíferos propiamente dichos, se deben tener en consideración favoreciendo la recarga de las masas de agua infrayacentes del Terciario, constituidas por formaciones yesíferas.

También se incluirían en este grupo los materiales yesíferos, en general de escaso interés hidrogeológico, si bien a veces el elevado grado de karstificación con el que aparecen caudales aceptables pero de mala calidad química.

En la tabla siguiente se resumen los tipos de acuíferos existentes y las unidades litológicas que engloban.

EDAD	UNIDAD LITOLÓGICA	PERMEABILIDAD	TIPO DE ACUÍFERO
CUATERNARIO	Q _{T-1} , Q _{T-2} , depósitos de terraza Q _{CA-1} , coluvio-aluviales	Tipo: Intergranular Grado: Media, localmente alta	Libre
MIOCENO INFERIOR MEDIO	M _{Y-2} , M _{Y-1a-b} , yesos masivos y yesos con arcillas	Tipo: aislados, karstificación Grado: Baja, localmente alta	Libre a semiconfinado
	M _{Y-1c} , M _{Y-1f-e} , M _{HA} , glauberita, arcillas, halita/glauberita/anhidrita	Baja a muy baja	Acuitardo-acuicludo
MIOCENO INFERIOR	M _{AR} , arcillas	Baja a muy baja	Acuitardo-acuicludo

3-1 Tipos de acuíferos y unidades litológicas que engloban.

Respecto a la piezometría de la zona, se disponen de datos procedentes de niveles de agua tomados en sondeos abiertos, así como en los 38 piezómetros cerrados instalados en 13 sondeos.

Tomando en consideración estas medidas se puede concluir que los materiales que albergan agua de importancia y de forma generalizada corresponden a las unidades superiores yesíferas. El resto de litologías del macizo (unidades arcillosas, glauberitas y halitas/anhidritas/glauberitas) o bien carecen de agua o su presencia es limitada, no pudiendo considerarse que forman acuíferos definidos.

Por lo tanto los únicos niveles piezométricos que de forma generalizada aparecen en el macizo corresponden con los niveles de yesos superiores. En algunos casos las formaciones infrayacentes al acuífero superior yesífero, en especial la unidad de glauberitas (M_{Y-1c}), pueden albergar agua en pequeñas cantidades, en zonas afectadas por fracturación importante, si bien es difícil determinar la profundidad que pueden alcanzar estos reductos. En ningún caso se trata de niveles de acuíferos sino más bien de bolsadas o niveles colgados, y la mayoría de los casos estarían conectados de alguna manera con el nivel yesífero superior. El agua de estos niveles colgados se presentará en equilibrio químico respecto al medio donde residen.

En conjunto, la circulación de agua a través de las diferentes unidades sedimentarias mostradas en el perfil parece escasa y disminuyendo en profundidad. Las zonas con fracturas en el perfil parece escasa y disminuyendo en profundidad. Las zonas con fracturas aflorantes en superficie y aquellas donde se sitúan materiales cuaternarios actúan como áreas de captación de aguas meteóricas y recarga de los paquetes inferiores. No obstante en líneas generales las aguas analizadas muestran índices de recarga baja.

El principal acuífero presente en el macizo que atravesará el túnel está formado por los depósitos detríticos cuaternarios, que constituyen un acuífero libre de escasa potencia

(entre 5 y 8 m de máxima) y de pequeñas reservas. Su infiltración procede del agua de lluvia y la descarga se realiza fundamentalmente en profundidad a través de los yesos infrayacentes, o bien de modo difuso en la superficie de contacto con este sustrato.

Por debajo se sitúa el acuífero yesífero que está afectado por karstificación. Las unidades de glauberitas (M_{Y-1c}) y de halita/anhidrita/glauberita (M_{HA}) se consideran hidráulicamente improproductivas, no considerándose por tanto que puedan albergar agua, salvo en algunas zonas de la unidad M_{Y-1c} , afectadas por fracturación, donde pueden aparecer niveles colgados.

Los procesos de karstificación en los yesos y la transformación de la unidad de glauberita subyacente son en la actualidad activos. El agua se canaliza en profundidad a través de las fallas principales y de la red de fracturación, llegando al contacto con la glauberita que se transforma precipitando yeso y dejando en la solución acuosa el sulfato sódico que acaba precipitando. La velocidad de este proceso depende de las condiciones de contorno, agilizándose en el caso de entrada de aguas renovadas al sistema. La perforación del túnel podría agilizar este proceso.

Las zonas de recarga principales al macizo yesífero tendrán lugar de modo difuso en los recubrimientos cuaternarios (depósitos de terraza), así como a través de las zonas de debilidad de la roca, constituidas por las zonas de falla indentificadas.

Las descargas del macizo van a tener lugar, fundamentalmente, de forma difusa a través de depósitos de ladera y coluvio-aluviales hacia el Arroyo Salinas, en el borde impermeable norte y a lo largo del Arroyo de Ontígola. De forma puntual existen descargas a través del manantial denominado "surgencia", situado en el extremo noroccidental del acuífero, que mantiene un caudal permanente todo el año. Así mismo existirán descargas por flujos profundos en dirección norte hacia las terrazas del río Tajo.

4 Estudio de gases.

Habiéndose detectado niveles arcillosos pestilentes, se han realizado dos sondeos adicionales para el estudio de gases, situados en el tercio inicial del túnel. Como resultado del estudio se ha detectado gas libre, formando bolsadas, concretamente isobutano (tipo de hidrocarburo), en una concentración muy baja (33ppm).

La detección de gases combustibles se basa en el análisis de muestras recogidas inmediatamente después de ser sacados los testigos en la perforación. En este sentido, conviene realizar los comentarios siguientes;

- El grisú o los gases combustibles se pueden encontrar asociados a la roca, fundamentalmente, de tres formas:
 - Libre, en el interior de los poros y demás cavidades que existen en la roca y a una determinada presión. Según la ley de Boile-Mariot, es proporcional a la relación entre la presión y la temperatura y a la porosidad de la roca. Esta relación suele representar un 5% del grisú total.

- Absorbido, dentro de la estructura molecular de la roca.
- Adsorbido, sobre las superficies libres internas de la roca, unido a ella mediante fuerzas de Van der Waals.
- El gas que se desprende en las labores de excavación subterránea procede casi exclusivamente de las fracciones libre y adsorbida.
- Entre el gas libre y el adsorbido existe un equilibrio dinámico siendo, generalmente, el gas adsorbido el más abundante.
- En las rocas los contenidos de grisú son, normalmente, muy inferiores a los contenidos en las capas de carbón, estando, casi exclusivamente, el gas en su forma libre, en los poros y fisuras.

La concentración de gas se determina a partir de las muestras que se obtienen de los testigos de sondeos. Los resultados obtenidos para el contenido de gases combustibles en las formaciones rocosas atravesadas por el sondeo tienden a un valor de 0,00 m³ de gas por tonelada bruta arrancada.

Los valores obtenidos del análisis elemental del material recogido en las muestras dan un contenido alto de azufre total, unas cenizas elevadas y un carbono total muy bajo. Estos valores revelan la escasa presencia de material orgánico (sulfuros o sulfatos).

En cuanto al olor detectado en algunas muestras, este podría provenir de compuestos organosulfurados (mercaptanos o tioéteres) de cadena larga, muy poco volátiles, que aún en muy pequeñas concentraciones (ppm) generan un olor muy intenso. Menos probable es la posible presencia de SH₂ (gas muy volátil) que no estaría asociada al alto contenido en azufre total, sino que sería un gas libre recogido en los poros o huecos del material, procedente de fermentaciones anaerobias de materia orgánica con contenido en azufre.

En cuanto a las medidas de desorción de gas hacia el sondeo, solamente se han obtenido trazas de la existencia de gas en el sondeo 102+000 con la presencia de isobutano en la atmósfera del sondeo en la cantidad de 33 partes por millón, lo que indica la presencia de gas libre en estas formaciones rocosas, eso sí en unas concentraciones muy bajas.

5 Tramificación geológica del trazado del túnel.

Se ha dividido el trazado en 3 tramos para realizar una descripción geológica coherente del mismo.

Tramo 1: PK. 100+000 al PK 101+736 (boquilla noroeste del túnel de El Regajal).

En los primeros 600 m el trazado discurre en desmonte por depósitos de terraza. Su potencia máxima es de 20 m y están formados por niveles limosos en la parte superior que dan paso en profundidad a gravas y arenas, que prácticamente no son afectadas. El nivel freático se sitúa por debajo de la cota de rasante.

A continuación el trazado entra en terrenos arcillosos de la unidad M_{AR}, que se excavarán igualmente en desmonte hasta el PK 101+100. Estos materiales presentan un nivel superior de unos 2 m de potencia, formados por un suelo coluvio-eluvial, que da paso al sustrato alterado que alcanza unos 10 m de potencia. La cota de rasante se sitúa en estos materiales. Por debajo de unos 10 m se sitúa el sustrato no alterado.

Tramo 2: Túnel de El Regajal (Del 101+736 al 104+173)

La boquilla de acceso y el inicio del túnel hasta el PK, aproximado, 102+000 se desarrollan en materiales predominantemente arcillosos, en los que aparecen cantidades menores de yeso y glauberita. A partir de ese punto comienzan a aparecer a nivel de la clave materiales más competentes, con características de roca blanda, con intercalaciones de arcillas, correspondientes a la Ud. M_G que tienden a bajar topográfica y estratigráficamente de manera que también afectan a partir del PK 102+070 a los hastiales, mientras que la zona de la contrabóveda sigue formada por materiales arcillosos.

Esta tendencia se mantiene hasta el PK aproximado 102+150, donde se cruza una de las fallas que han sido deducidas, a partir de la cual se produce un salto estratigráfico que implica que prácticamente toda la sección del túnel se desarrolle en arcillas yesíferas con glauberita, excepto en la zona de hastiales, donde continua la presencia de un nivel subhorizontal y competente de glauberitas con arcillas.

El subtramo siguiente, entre los PP.KK 102+500 al 102+670, se caracteriza por el predominio de materiales de naturaleza principalmente glauberítica, en clave y contrabóveda, con niveles de predominio arcilloso en la parte central de la sección.

En el P.K. 102+670 se atraviesa una importante fractura a través de la cual se pasa a afectar a materiales caracterizados por contener una destacable presencia de sales, sobre todo halita, englobados en la unidad litológica M_{HA}. Litológicamente son rocas blandas formadas por cristalizaciones masivas de halita con glauberita y anhídrita.

Estos materiales ocupan la sección completa del túnel hasta el P.K 102+820, punto en el que el techo de esta unidad desciende para dejar paso gradualmente a glauberitas con intercalaciones de arcillas negras pestilentes, que a partir del PK 102+920 ocupan la totalidad de la sección.

Esta situación se mantiene hasta el PK 103+180 cuando, tras el cruce de otra importante fractura los materiales salinos vuelven a ascender topográficamente afectando a la zona de la contrabóveda y hastiales. Finalmente tras el P.K. 103+380 las rocas glauberíticas vuelven a ocupar la totalidad de la sección hasta el fin del túnel en mina y principio del falso túnel.

El túnel termina en un túnel artificial de 334 m de longitud que se excavará en rocas glauberíticas en su parte inicial así como también en niveles yesíferos y arcillosos en su término, que serán afectados en la clave y hastiales del túnel.

Tramo 3: Del P.K. 104+173 al 104+700 (final del trazado).

Corresponde al desmonte final del trazado, con una longitud de 527 m. Se excavará fundamentalmente en la unidad de yesos, si bien en la parte inferior del desmonte, a nivel de rasante se verán afectados los materiales de yesos y glauberitas. El nivel freático se dispone entre 3 y 4 m de profundidad, situándose, por lo tanto, a una altura respecto de rasante entre 1 y 9 m. Es de esperar por lo tanto resacas y afluencia de agua al desmonte.

6 Geotecnia del macizo rocoso.

El objeto de este apartado es la caracterización de las distintas unidades geotécnicas afectadas por la excavación del túnel de El Regajal, con la misión última de establecer el comportamiento constructivo de los distintos materiales y la previsión de las condiciones geotécnicas en que deberá desarrollarse la futura construcción.

Para ello se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos in situ y en los ensayos de laboratorio realizados en las distintas fases de investigación geotécnica, desarrolladas anteriormente y durante el Proyecto de Construcción. Como resultado de este análisis se presentan, para cada una de las unidades analizadas, se establecen los parámetros geotécnicos y se incluyen las recomendaciones necesarias de cara a la ejecución de la obra.

A continuación se describen las unidades correspondientes al sustrato por considerar que son las que mayor interés presentan en la geotecnia del túnel. Se exponen un resumen de sus características geotécnicas.

6.1 Síntesis geotécnica de cada litotipo definido.

- **M_{AR}**- Acillas marrones y grises con intercalaciones de yeso e indicios de halita.
- **M_{VAR}**-Arcillas yesíferas y yesos arcillosos negruzcos con indicios de halita.
- **M_{HA}**. Halita, glauberita y anhidrita con arcillas grises y negruzcas.
- **M_G**. Glauberita con algo de yeso y halita e intercalaciones de arcillas.
- **M_Y**. Yeso con intercalaciones de arcillas.

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS		UNIDAD M_{AR}	UNIDAD M_{VAR}	UNIDAD M_{HA}	UNIDAD M_G	UNIDAD M_Y
Roca Matriz	RCS(Kp/cm ²)	10	5,0	30-39	40-65	30-33
	Resistencia a tracción(Kp/cm ²)	5,7	5,4	9,9	12	15
	m _i	7	10	10-13,4	5,4-10	10-13
	Densidad aparente (t/m ³)	2	2,1	2,4	2,4	2,1
Macizo Rcoso	RCS(Kp/cm ²)	1,11	1,0	3-4.1	4,2-6,9	3,1-3,6
	Cohesión(Kp/cm ²)	0,4	0,4	2,0	3,0	1,9
	Rozamiento(º)	32	32,4	33,0	33	34,7
	Módulo de deformación(Kp/cm ²)	2990	4275	5890	8260	7350
	Módulo de Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Presión hinchamiento (Kp/cm ²)					

Nº de ensayos disponibles	21	13	3	8	3
Valor medio	1,17	0,4	1,71	2,7	0,02
Valor mínimo	0	0	0,9	0	0,0
Valor máximo	7,5	2,9	2,11	9,93	0,05
Hinchamiento libre (%)					
Nº de ensayos disponibles	12	7	3	8	3
Valor medio	1,7	0,4	1,71	19,1	0,56
Valor mínimo	0	0	0,9	0,11	0,21
Valor máximo	7,1	5,7	2,11	33,98	0,98
Abrasividad de Cerchar(0,1mm)	-	-	0,27	0,25	0,27
Dureza Cerchar(seg/10mm)	-	-	22,5	70,57	29
Índice de Schimazek (kN/m)	-	-	0,02	0,02	-

6-1 Parámetros geotécnicos de cada litotipo

6.2 Tramificación geotécnica del túnel.

A continuación se lleva a cabo una tramificación del trazado en base a criterios geotécnicos.

Tramo 101+736 a 101+759 (Túnel artificial en el emboquille noroeste).

La litología predominante es la correspondiente a la unidad MAR (arcillas yesíferas rojas y grises con indicios de yesos), que será atravesada en contrabóveda y hastiales. En la clave se afectará a las arcillas yesíferas de la unidad M_{VAR}. No se espera fluencia de agua importante durante la excavación, pudiendo aparecer en cualquier caso en la parte alta del talud o a media altura. Los principales problemas geotécnicos a considerar están relacionados con la potencial expansividad de las arcillas, si bien se presentará en grado bajo

Tramo 101+759 a 101+900.

En el tramo inicial del trazado. En él el túnel se encaja en la mayor parte de la sección en arcillas yesíferas y en las arcillas marrones del Mioceno Inferior. Estas arcillas presentan contenido muy bajo de anhidrita y esmectitas. El manto acuífero yesífero superior presenta una potencia de unos 5m como máximo, situándose su muro a cota de clave o ligeramente

por encima. El nivel freático presenta gradientes fuertes (aprox. 4,1%), como corresponde a una zona de descarga. Las fluencias de agua al túnel se prevén de muy escasa cuantía, limitándose a zonas puntuales, como pueden ser la zona de la falla en el 101+820 y la zona de vaguada en el 101+890. Existirán problemas de expansividad en grado bajo en las arcillas de la unidad M_{AR} , así como un cierto riesgo de disolución a largo plazo en la zona de clave.

Tramo 101+900 a 102+140

Este tramo se excavará en prácticamente toda la sección, en arcillas negras pestilentes con glauberita correspondientes a la unidad M_{VAR} y en menor medida, en clave y parte alta de hastiales, en glauberita arcillosa, unidad M_G . Presenta indicios de halita (<2%) y anhídrita en trazas y de forma puntual (0,2%). La base del túnel sigue apoyando sobre las arcillas del Mioceno Inferior (M_{AR}). El acuífero yesífero superior se presenta colgado sobre la clave del túnel, con una altura de unos 2 m sobre este. La carga de agua que se espera encontrar en este tramo oscila entre 5 y 9 m.

La entrada de agua se espera que sea muy reducida y de carácter muy puntual, al no haber detectado zonas de fractura que afecten a toda la serie.

Los procesos de expansividad podrían acentuarse ante la situación posible de neoformación de cristales tras la disolución de las sales presentes.

Tramo 102+140 a 102 +155 (falla).

Se trata de una zona de falla que tiene su reflejo en superficie en una alineación tectónica cartografiada ligada al desarrollo de una zona de vaguada. El muro del acuífero superior yesífero se sitúa a unos 3 m por encima de la clave del túnel y la carga hidráulica es de unos 9 m. La serie litológica atravesada es la misma que la descrita en el tramo anterior, si bien gana mayor presencia la unidad de glauberita (M_G).

Los problemas geotécnicos pueden venir dados por la entrada de aguas, a través de la zona de falla, procedentes del acuífero superior, provocando la disolución de la unidad de glauberitas. Asociado a esto podrían darse procesos de expansividad como producto de la neoformación mineral. La expansividad potencial del nivel de apoyo de la contrabóveda (M_{AR}) se considera de grado bajo.

Tramo 102+155 a 102 + 250

Se trata de un tramo limitado por fallas. Los terrenos afectados corresponden, en prácticamente toda la sección, a la unidad M_{VAR} , formada por arcillas pestilentes negruzcas, arcillas yesíferas, y glauberita arcillosa. En la parte media de hastiales también se afectará la unidad de glauberita M_G . En la contrabóveda se situará la unidad de arcillas rojas con yesos (M_{AR}).

El acuífero superior yesífero aparece colgado a unos 4m por encima de la clave del túnel, presentado una carga hidráulica entre 7 y 10m.

Por la proximidad de este acuífero a la clave del túnel es posible su drenaje durante la excavación, acompañado con desprendimiento de terrones de glauberita.

Los problemas geotécnicos a considerar estarán asociados a la posible entrada de agua desde los yesos, que pueden afectar las glauberitas disolviéndolas, tanto las presentes en la unidad M_G como las que puedan también aparecer en M_{YAR} . Las filtraciones se llevarán a cabo a través de fracturas o fisuras, en general de escaso porte, posiblemente generadas por la propia perforación del túnel, no esperándose en cualquier caso aportes importantes de agua.

También se debe tener en consideración los problemas de expansividad de las arcillas en la contrabóveda, así como también los generados por neoformación mineral producto de la transformación de la glauberita. En ambos casos se considera una expansividad de grado bajo.

Tramo 102+250 a 102+270(falla)

Se considera la misma problemática que el tramo de falla anterior.

Tramo 102+270 a 102+345

En este tramo se atravesará un potente paquete de glauberitas correspondientes a la unidad M_G , con porcentajes mineralógicos en torno al 80% de glauberita. En la zona baja de hastiales se excavarán las arcillas pestilentes y con glauberita de la unidad M_{YAR} y en la contrabóveda las arcillas rojas (M_{AR}).

Se trata de un tramo delimitado por fallas, con un acuífero yesífero colgado con escasas reservas si bien con un gradiente hidráulico alto (en torno al 5%), que puede favorecer la circulación de agua con mayores velocidades. Este acuífero se sitúa a unos 13 m de altura sobre la clave del túnel y el espesor saturado no supera los 5m.

La montera de gravas (Q_{T-2}) sobre los yesos es muy reducida o inexistente, en una zona con una elevada pendiente en superficie. Por ello no cabe esperar filtraciones de agua importantes hacia el túnel procedente del acuífero superior. No obstante cabe la posibilidad de la presencia puntual de aportes por fracturas asociadas a las glauberitas, existiendo un riesgo general de grado bajo, de disolución y transformación mineral de este material. En cuanto a la expansividad de los terrenos se mantiene el mismo criterio que en los tramos anteriores.

Tramo 102+345 a 102+355 (falla)

Se trata de una zona de falla que afecta fundamentalmente a la unidad de glauberitas, poniendo en contacto, que en este sector presenta una potencia de más de 20 m.

Como en el anterior tramo el acuífero superior, situado sobre esta, se encuentra muy adelgazado en cuanto a su espesor saturado. No obstante a lo largo de la zona de falla puede existir carga de agua, como se ha demostrado en el sondeo próximo 102+400 (Pz-28), por lo que, a pesar de encontrarse relativamente lejos el acuífero yesífero, cabe la posibilidad de conexión hidráulica y aportes de agua al túnel.

Esta vía de conexión resulta problemática por la entrada de aguas agresivas o de renovación procedentes de los niveles granulares de terraza, si bien también es posible que

durante el tránsito hacia el túnel estas pierdan esta condición al cargarse de sales e incluso puedan autosellar las fracturas por las que discurren, siempre que la velocidad de circulación a través de ellas sea baja. Los problemas de solubilidad de las glauberitas y los procesos de expansividad tienen la misma entidad que los descritos en los tramos previos.

Tramo 102+355 a 102+395

Las características de este tramo así como su problemática es similar al 102+270- 102+345, si bien las distancias entre las fallas que lo delimitan es menor, reduciéndose a unos 50 m a cota de carril.

Tramo 102+395 a 102+410(falla)

Las mismas consideraciones de los tramos de falla anteriores, si bien la altura a la que se sitúa el muro del acuífero superior es mayor, en torno a 20 m.

Tramo 102+410 a 102+490.

El túnel atravesará un potente nivel de arcillas glauberíticas algo pestilentes que se sitúan en clave y parte alta de los hastiales. Bajo ellas se disponen los materiales de la unidad M_G y en la zona de contrabóveda aparecerán las arcillas yesíferas. El muro del acuífero superior yesífero se sitúa a una altura considerable sobre la clave del túnel, a unos 20 m, si bien cabe la posibilidad de encontrar agua colgada en los niveles glauberíticos profundos, sobre la clave.

A pesar de ello no parece probable que la karstificación llegue a la base del túnel ya que las arcillas situadas en la parte alta de la sección frenan considerablemente el proceso.

Tramo 102+490 a 102+535.

Tramo delimitado por falla según sentido de avance. En esta zona predominan las arcillas yesíferas sobre las glauberíticas o halíticas y el nivel activo se encuentra a unos 15m sobre la clave del túnel por lo que el riesgo de karstificación a cota del mismo es muy remoto.

Tramo 102+535 a 102+547 (falla).

Esta falla afecta a la unidad de yesos superior, así como a niveles de arcillas y yesos arcillosos que ocupan la zona del túnel. El muro del acuífero yesífero se sitúa a unos 27 m sobre rasante y tiene un espesor saturado de apenas 4m. No es de esperar la presencia de niveles de agua colgados por debajo del acuífero principal y la existencia de importantes paquetes arcillosos aislará la zona del túnel. Por ello, a pesar de asociarse a la falla una zona muy karstificada en los yesos y presentar una montera de material granular importante, la posible entrada de agua al túnel se prevé que sea de baja magnitud, cuando no inexistente.

Tramo 102+547 a 102+600

Este tramo presenta similares características y problemática que el situado entre 102+490-102+535.

Tramo 102+600 a 102+660

Tramo delimitado por una importante falla en el sentido de avance. El túnel atravesará un potente paquete glauberítico que presenta algunas intercalaciones de pequeño espesor de

arcillas, situadas en los hastiales. Sobre el túnel el nivel de glauberitas continúa hasta alcanzar los yesos superiores. El acuífero superior yesífero se sitúa a unos 17m sobre la clave del túnel y el espesor saturado de este es de unos 4 m.

La karstificación en los niveles superiores es bastante intensa presumiblemente favorecida por la potente montera de gravas cuaternarias. Si bien los niveles arcillosos intercalados entre la unidad de glauberita aísla a estas impidiendo de esta forma que los procesos de disolución y transformación mineral puedan darse con facilidad.

Tramo 102+660 a 102+675 (falla)

Falla importante que requerirá tratamientos intensos de sellado e inyección. Su prolongación hacia superficie determina que los procesos de karstificación en los yesos adquieran gran profusión, habiéndose detectado huecos y rellenos kársticos. Estos aspectos unidos a la presencia de una importante montera formada por materiales granulares de terraza, aseguran la recarga del acuífero yesífero.

Los problemas geotécnicos vendrán dado, por lo tanto, por la entrada de agua a través de la falla o fracturas asociadas provocando la disolución y transformación mineral de las glauberitas.

Tramo 102+675 a 102+755

En este tramo, por debajo de los niveles glauberíticos, aparece la unidad M_{HA} , formada por halitas, glauberitas y anhidritas. Se trata de un nivel bastante potente en los que se encaja la parte inferior del túnel, aunque en un corto tramo llega a estar inmersa la totalidad de la sección.

Los contenidos mineralógicos son de 40 o más del 60 % de halita, anhidrita entre el 20 y 70% y glauberita en torno al 25%. Por debajo de la unidad M_{HA} se ha reconocido la unidad arcillo-yesífera M_{YAR} , que se sitúa a unos 8 m por debajo de cota de carril. El acuífero superior yesífero sitúa su muro a una altura entre 12 y 18 m sobre la clave del túnel, con una carga hidráulica máxima de 8 m.

No hay experiencia sobre el comportamiento de estas formaciones compuestas por anhidritas potencialmente muy expansivas y halitas de elevada solubilidad. Cabe admitir que si llega el frente activo a la saturación de la halita llevará a ésta a un estado pastoso que ofrecerá escaso confinamiento a la expansión de la anhidrita. También es cierto que la anhidrita nunca aparece en forma masiva sino dispersa o interestratificada con la halita o la glauberita, por lo que su presión de hinchamiento se verá en gran parte amortiguada por la compresibilidad de las capas blandas salinas.

Tramo 102+755 a 102+770 (falla)

Se trata de una de las más importantes zonas de falla identificadas, afectando a cota de túnel a la unidad M_{HA} . Constituye por lo tanto una vía potencial preferente de entrada de agua al túnel en donde aparecen minerales y materiales susceptibles de disolución, transformación e hinchamiento en grado elevado. Por lo tanto esta zona de falla requerirá de tratamientos intensos tendentes al sellado en impermeabilización.

Tramo 102+770 a 102+945.

En este tramo el túnel se excavará en prácticamente toda su sección en la unidad de halitas, glauberitas y anhidritas, M_{HA} , hasta el PK 102+820, donde progresivamente la unidad de glauberita (M_G) desciende desde la clave hasta llegar a la contrabóveda. La potencia de este paquete aumenta de igual forma en el sentido de avance del trazado, pasando de 12 a unos 20 m, manteniendo a muro siempre la unidad M_{HA} .

El frente activo se encuentra a unos 10 m sobre la clave del túnel, manteniendo un espesor saturado próximo a los 10 m. Al igual que en el tramo anterior a la falla antes descrita es de esperar importantes porcentajes de anhidrita inmersa en halita y glauberita por lo que en este tramo la problemática geotécnica es similar, con el agravante de situarse el muro del acuífero yesífero a una altura menor respecto a la clave.

Tramo 102+945 a 103+060

En este tramo del túnel se excavará en su totalidad en la unidad M_G , donde se han reconocido porcentajes de glauberita en torno al 70%, así como puntualmente halita en porcentajes del 40%, indicios de yeso y trazas de anhidrita (3%).

Esta unidad presenta una potencia de unos 20 m y bajo ella, bien coincidente con la base del túnel o a distancias de 3 a 8 m, existe una capa de anhidrita y halita, M_{HA} , de unos 10 m de potencia que cubre a las arcillas yesíferas basales (M_{AR} y M_{YAR}). A unos 5 m de media por encima de la clave se disponen los materiales yesíferos que se presentan muy arcillosos a la base. Constituyen el acuífero principal, que presenta un espesor saturado de unos 11 m de espesor. El gradiente hidráulico natural en este sector es subhorizontal en la dirección del eje del túnel, que coincide en gran medida con la divisoria de aguas subterráneas considerada.

El tramo aparece compartimentado por diversas fallas. La problemática geotécnica a considerar está relacionada con la disolución de las glauberitas por la posible entrada de agua desde el acuífero superior a favor de la red de fracturación. Especialmente este proceso tendrá lugar al final del tramo, donde el muro del acuífero se sitúa muy próximo (3m) a la clave del túnel.

Asociado a la disolución de las glauberitas no debe descartarse la posible neoformación de minerales de yeso que pueden constituir el motor de procesos de expansividad.

Tramo 103+060 a 103+165

A lo largo del tramo el túnel se excavará en toda su sección en la unidad de glauberita (M_G). El esquema geológico es similar al anterior tramo, si bien no se han reconocido fracturas de entidad, por lo que el riesgo de disolución es menor que en el tramo anterior. Un aspecto que puede contribuir de modo negativo es la proximidad del muro del acuífero yesífero superior a la clave del túnel, la excavación del túnel puede acarrear la formación de nuevas fisuras o juntas o reactivación de las existentes, constituyendo vías de entrada de agua. En cualquier caso los tubos de inyección previstos colocar en el revestimiento constituyen un elemento de seguridad adicional frente a la posible disolución del terreno en torno al túnel.

Tramo 103+165 a 103+185 (falla).

Se trata de una zona de fractura muy importante en la que la clave del túnel se sitúa a escasos metros (2m) por debajo del muro del acuífero yesífero, que presenta un espesor

saturado de 10 m. La contrabóveda se sitúa en la unidad M_{HA} formada predominantemente por halita.

En base a estos datos, esta zona constituye un enclave propicio para las filtraciones de agua procedentes del acuífero superior, pudiendo afectar al tramo glauberítico por donde discurre el túnel en incluso alcanzar al nivel inferior. El caudal estimado para esta zona puede alcanzar 1 l/min. Dada la proximidad de las aguas de los yesos al túnel, no es probable que pueda producirse el autosellado de las juntas o fracturas por las que discurrirá el agua. Así mismo no es de descartar la posible presencia adicional de bolsadas de agua en equilibrio con el nivel de glauberitas a cota de túnel.

Por lo tanto el riesgo de disolución y alteración de los materiales interceptados es alto, lo que requerirá un tratamiento de sellado intenso en esta zona.

Tramo 103+185 a 103+270

La base del túnel se encaja en una especie de pequeña meseta con componente principal halita y la anhidrita como secundario (M_{HA}). El contenido de anhidrita detectado alcanza un valor máximo próximo al 15%, limitándose a una franja de unos 4 m de potencia que afecta a la contrabóveda y la parte baja de hastiales. La parte superior del túnel sigue en la capa de glauberitas (M_G).

El frente activo, coincidente con el techo de las glauberitas, se sitúa a menos de 5 m de la clave del túnel, existiendo una carga hidráulica cercana a los 7 m. No es de descartar la presencia de alguna fractura o juntas de menor entidad que las identificadas que pueden haber favorecido los procesos de karstificación (de grado bajo) observados en el nivel de glauberitas. Así mismo el terreno muestra una importante karstificación en los yesos superiores M_V .

Tramo 103+270 a 103+290

La presencia de importantes manifestaciones kársticas detectadas en el sondeo S-13 indica que muy probablemente estas estén asociadas a una zona de falla, que no pudo ser identificada en los estudios geofísicos. Se han detectado abundantes huecos de karstificación tanto rellenos como principalmente huecos.

Se trata, por lo tanto de una zona a tener en cuenta en lo relativo a la posible entrada de agua al túnel, situándose el nivel hidrogeológico activo en el contacto yesos-glauberitas, a unos 5 m por encima de la clave del túnel. También se han detectado huecos en el contacto entre en nivel de glauberita (M_G) y el de halita (M_{HA}), lo que presupone filtraciones y procesos de karstificación que han afectado a la zona por debajo del nivel piezométrico general estimado. Al igual que el tramo anterior la unidad M_{HA} presenta contenidos de anhidrita hasta en un 13%, lo que confiere a esta zona un riesgo añadido en relación a problemas de expansividad.

Tramo 103+290 a 103+350

Se trata de un tramo similar al 103+185 a 103+270, bien en este el muro del acuífero desciende hasta situarse a cota de clave del túnel, aumentando de esta forma las posibilidades y el riesgo de filtraciones de agua hacia los niveles de mayor solubilidad, en especial la unidad M_G , que ocupa la práctica totalidad de la sección.

El contacto entre esta unidad y la situada por debajo, formada fundamentalmente por halita (M_{HA}), desciende progresivamente de cota, desde la parte media de los hastiales hasta situarse a cota de contrabóveda. Al igual que en el anterior tramo es de esperar la presencia de anhidrita dentro de la unidad M_{HA} en porcentajes similares. La problemática geotécnica es la misma que la anteriormente contemplada.

Tramo 103+350 a 103+580

En este tramo el sustrato de halita-anhidrita (M_{HA}) aparece a unos 7 m por debajo de carril, en donde intercaladas en las glauberitas aparecen diversas capas de arcillas yesíferas, algunas de ellas con indicios de arcillas expansivas. Dentro de este tramo puede diferenciarse un sector inicial que llega hasta el P.K. 103+500 donde el nivel de glauberita se excava desde la parte alta de hastiales hasta la contrabóveda, mientras que la contrabóveda lo haría en arcillas yesíferas. A partir del anterior punto la unidad de glauberitas grana cuerpo, de modo que la práctica totalidad de la sección se excavará en estos terrenos.

El nivel freático acompaña también a la morfología de cubeta antes indicada. Es probable que esta zona de concentración de flujos se deba a la presencia de fallas y zonas karstificadas que progresen en profundidad, de ahí la presencia de agua en niveles profundos, aunque siempre dentro de la unidad de glauberitas. En estos casos la asociación de agua profunda y fracturas parece ser clara.

El túnel cortará el acuífero superior en su muro, por lo que la entrada de agua al túnel será un aspecto con el que se tendrá que contar, estimándose un caudal de 1,1l/min. Así mismo también hay que contar con que se cortarán niveles aislados profundos. Por todo ello existe un alto riesgo de disolución y transformación de la glauberita, mineral mayoritario en la unidad de M_G , que puede afectar a niveles situados bajo la contrabóveda.

Tramo 103+580 a 103 +740

Se produce en este tramo un ascenso del sustrato de anhidrita-halita (M_{HA}), el cual llega a ser coincidente con la base del túnel, a la par que asciende también el techo de la unidad de glauberitas (M_G). La sección del túnel en su totalidad se excavará en la unidad de glauberitas, M_G . Parece existir una karstificación considerable en los niveles superiores, tanto en la unidad de yesos superiores, M_Y , como en las glauberitas M_G que rodean el túnel.

Los análisis mineralógicos han permitido detectar un nivel con altos contenidos en anhidrita, situado a techo de la unidad M_{HA} , y prácticamente coincidente con la contrabóveda. A pesar de que el nivel freático se sitúa muy por encima de la clave, no debe descartarse la posibilidad de que las aguas lleguen hasta las anhidritas. No obstante se tomarán las medidas de impermeabilización necesarias, en especial en la posible zona de falla (en torno al P.K. 103+630), que impidan la progresión del agua en profundidad. Con excepción de la zona de falla, en el resto del tramo la probabilidad de encontrar agua en la unidad de glauberita es baja, pudiendo considerarse que la excavación se llevará a cabo en seco.

Hacia el final del tramo el techo de la unidad M_{HA} desciende suavemente hasta situarse a unos 5 m por debajo de rasante. La continuidad hasta el final del tramo de la capa con altos contenidos de anhidrita no está confirmada, aunque debe tomarse en cuenta.

Tramo 103+740 a 103+839.

La base del nivel de glauberita desciende suavemente hasta situarse a unos 9 m por debajo de rasante, al igual que ocurre con el techo de la misma, de forma que al final del tramo los yesos superiores se sitúan a cota de clave del túnel.

El nivel freático queda al principio a unos 7 m por encima de la clave pero, con el ascenso del túnel y la disposición estratigráfica antes mencionada, llega a coincidir con dicha clave. La carga de agua es de unos 7 m. Según esta situación es muy probable que la entrada de agua al túnel tenga lugar a partir del P.K. 102+760, afectando a los paquetes de glauberita inferiores. A pesar de no haberse detectado fracturas ni karstificación en los yesos ni en la unidad infrayacente, el propio proceso de excavación propiciará la entrada de agua.

7 Problemática geotécnica.

Los principales problemas geológico-geotécnicos a afrontar en el diseño del túnel están directamente relacionados con los procesos de disolución y la expansividad de los terrenos. En ambos casos el elemento desencadenante es el agua.

En cuanto a los primeros tendrán lugar en las litologías formadas por halita, glauberita y yeso, en este orden de importancia, y respecto a los segundos son los posibles procesos de neoformación mineral lo que mayor importancia puedan tener, no solo en la unidad donde aparece anhidrita si no en general en todas las unidades presentes a lo largo del túnel siempre que se produzca circulación de aguas sobresaturadas a través de fisuras y en condiciones termodinámicas adecuadas.

Como resultado de los distintos estudios, reconocimientos y ensayos realizados puede concluirse que los principales problemas geotécnicos del túnel de El Regajal son la solubilidad y potencial expansividad de los materiales atravesados, que están directamente ligados a la presencia de agua en el túnel.

• **Solubilidad.** Los problemas de solubilidad afectan, por orden de importancia, a los siguientes materiales:

- Halita
- Glauberita
- Yeso

Respecto a la solubilidad cabe destacar que existe un proceso de karstificación activo por el cual el nivel superior de glauberita (M_{y-1c}) se transforma en yeso, reduciendo su volumen y produciendo así colapsos que tienen su reflejo en superficie, en forma de dolinas rellenas de depósitos cuaternarios. Así mismo, en el nivel superior de yesos, y aprovechando fundamentalmente las vías preferentes de circulación de agua en profundidad, como son las zonas de falla existentes, se producen procesos de karstificación que se traducen en un

aumento de la permeabilidad y transmisividad de este nivel (M_{Y-2}), superior a las del resto de macizo.

Dadas sus características hidrogeológicas, el agua en el macizo se situará preferentemente en los yesos, pudiendo producirse entrada de agua en el túnel en aquellas zonas en las que la clave se sitúa próxima al contacto yeso-glauberita o en zonas de falla. El poder de disolución y/o transformación de los materiales que rodean al túnel (glauberitas y halitas) por parte del agua presente en el acuífero yesífero, ha quedado demostrado por los estudios hidroquímicos realizados.

Así mismo el túnel podría atravesar niveles colgados de agua situados en la unidad de glauberitas. Se espera que en estas zonas la fluencia de agua sea reducida y además ésta presenta escasa agresividad al estar en equilibrio químico con el medio.

Desde el punto de vista del control de filtraciones durante la excavación debe prestarse especial atención a los tramos en los que, simultáneamente, se dan las siguientes circunstancias:

- Entrada de agua, bien por la proximidad de la clave al contacto yeso-glauberita, bien por la presencia de fallas o discontinuidades.
- Excavación del túnel en halita.

Con el fin de no potenciar fenómenos de disolución a largo plazo, como el que de forma natural se produce en el nivel superior de yesos, es precisa la impermeabilización de la sección completa del túnel, evitando así en la medida de lo posible el efecto drenaje que supone cualquier excavación.

• **Expansividad.**

Los problemas de expansividad vienen ligados a la presencia de dos tipos de minerales:

- Arcillas expansivas (esmeclitas)
- Anhidrita

Los resultados de la investigación realizada muestran que los contenidos en minerales arcillosos expansivos son reducidos, por lo que los problemas de expansividad vienen ligados a la presencia de anhidrita.

Hasta hace poco tiempo los fenómenos de hinchamiento ligados a la presencia de anhidritas se explicaban por el aumento de volumen que experimentan al hidratarse, transformándose en yeso de forma directa. Sin embargo debe señalarse que esta explicación está actualmente en discusión, y que algunos autores sugieren que el fenómeno de expansividad en terrenos yesífero-arcillosos con presencia de anhidrita se produce como resultado del crecimiento de cristales de yeso en fisuras y juntas de la roca debido a la circulación a través de éstas de agua sobresaturada en sulfatos.

De acuerdo con esta teoría sería posible, en condiciones termodinámicas adecuadas para ello, el crecimiento de cristales de yeso en fisuras y juntas como consecuencia de la circulación de agua sulfatada, con independencia de que los sulfatos presentes en el agua procedan de la disolución de minerales como la glauberita en lugar de la anhidrita.

Siguiendo este razonamiento podrían producirse fenómenos de hinchamiento por neoformación de cristales de yeso no sólo en la unidad M_{HA} sino en general en todas las unidades presentes a lo largo del túnel siempre que se produzca circulación de agua a través de fisuras y en condiciones termodinámicas adecuadas.

La expansividad en terrenos yesífero-arcillosos es además un fenómeno que se desarrolla a lo largo del tiempo. Este hecho, debido al complejo conjunto de mecanismos que intervienen en el fenómeno (composición química del agua del macizo, presión, temperatura, degradación del macizo por descompresión debido a la excavación) obliga, en fase de proyecto, a definir una cota superior del problema, lo que conduce a un diseño conservador del revestimiento del túnel.

La expansividad potencial de las esmectitas detectadas en los ensayos mineralógicos queda, en todo caso, acotada superiormente por la de los materiales sulfatados.

8 Implicaciones constructivas.

El drenaje del agua de infiltración del terreno a través del túnel puede generar un gradiente hidráulico que favorezca la disolución de sulfatos y cloruros, presentes en las unidades geotécnicas afectadas por la excavación del túnel, así como el desarrollo de procesos de hinchamiento.

Estos fenómenos pueden también producirse como consecuencia de la entrada de agua al terreno procedente de la plataforma a través de fisuras y juntas en la contrabóveda, presentando el agua en este caso una mayor agresividad en virtud de su menor concentración en sales.

Atendiendo a los razonamientos anteriores, se propone la impermeabilización completa de la sección mediante un tratamiento adecuado de las juntas, complementando este tratamiento con la ejecución de coronas de inyecciones en las zonas de falla que corten la circulación de agua en sentido longitudinal.

No se dispondrán drenes longitudinales en hastiales, ni conexión alguna entre el sistema de impermeabilización y el sistema de drenaje del túnel, con el fin de intentar restituir en lo posible la situación actual del terreno en cuanto a sus condiciones hidrogeológicas.

Si bien no son previsibles filtraciones importantes de agua durante la excavación, sí es posible que puedan producirse de forma puntual a través de juntas o zonas de falla. En este caso, se realizarán inyecciones de impermeabilización con resinas de poliuretano que impidan la entrada de agua en el interior del túnel.

9 Excavabilidad.

De forma general los tres grandes grupos de métodos utilizados para la excavación de túneles son los siguientes:

- Excavación mecánica con tuneladora.
- Excavación mecánica con maquinaria convencional.
- Excavación con explosivos.

En el túnel de El Regajal, dada la baja resistencia de los materiales afectados, rocas blandas y muy blandas, la excavación a sección completa se realizaría mediante escudo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados para estimar la excavabilidad y abrasividad de las distintas unidades geotécnicas afectadas por el túnel

	M_Y	M_G	M_{HA}	M_{YAR}	M_{AR}
Ensayo brasileño (MPa)	1.53	1.2	0.99	0.54	0.57
Índice Cerchar	0.27	0.25	0.27		
$F_{SCHIMAZEK}$ (KN/m)		0.02	0.02		0.001
RCS (MPa)	2.5	4.53	2.84	0.49	1.02

9-1 Ensayos de excavabilidad y abrasividad.

En todos los casos se trata de materiales muy poco abrasivos, pudiendo calificar su rozabilidad, a partir del factor de Schimazek, como muy buena.

ANEXO II SOSTENIMIENTO

1 Diseño del sostenimiento.

En el siguiente Anexo se procede a definir el diseño del sostenimiento de los túneles siguiéndose una metodología progresiva aplicando sucesivamente diferentes criterios y procedimientos.

En este estudio se han utilizado los criterios de dimensionamiento basados en los parámetros geotécnicos y resistencia de los diferentes litotipos.

1.1 Determinación del nivel del proyecto de sostenimiento.

Al tratarse de una excavación subterránea a la misma se le aplica el **R.G.N.B.S.M.** y en concreto, la **I.T.C. 04.6.05: Labores Subterráneas: Sostenimiento de Obras.**

En base al apartado 3.2. de la citada I.T.C. los túneles son **labores no asociadas** a una explotación minera por lo que el diseño del sostenimiento debe tener en cuenta :

- Las características geométricas de la obra.
- Las características del terreno.
- Las condiciones impuesta por el tiempo de utilización de la obra
- Las medidas de control a instalar.

El sostenimiento debe ser capaz de controlar y mantener la estabilidad de la excavación, así como de las labores e instalaciones próximas durante todas las etapas constructivas a lo largo de la utilización de la obra.

Como resultado de los trabajos de diseño han de definirse los elementos estructurales de sostenimiento, en calidad y cantidad, así como el proceso de su colocación, en cada sección diferenciada de la obra.

En el apartado 4.2.7 de la referida I.T.C. se especifica que **el nivel del proyecto de sostenimiento** se debe corresponder con el comportamiento previsible del terreno y con el tiempo de utilización de la obra.

Para cumplir estos objetivos se establecen dos parámetros de clasificación: El tiempo de utilización de la obra y el cociente σ_c/h , siendo:

- σ_c : Resistencia a Compresión Simple del litotipo mas representativo de la excavación, expresada en MPa.
- h : Profundidad media de la excavación respecto a la superficie exterior, expresada en metros.

El ratio que establece dicho criterio σ_{cm}/P_0 contempla la resistencia del macizo correspondiente a las formaciones atravesadas que dominan la traza del túnel en cuestión, así como tiene en cuenta la tensión in situ calculada según la profundidad del túnel.

Los proyectos se clasifican en cuatro niveles, de acuerdo con las características especificadas en el cuadro siguiente:

NIVELES DE LOS PROYECTOS.		
σ_c/h (MPa/m.)	Tiempo de duración de la obra.	
	Menor de 15 años.	Mayor de 15 años.
>0,1	A	B
0,1 -0,05	B	C
< 0,05	C	D

1-1 Niveles de proyecto

Consideramos que, a lo largo de la traza del túnel el litotipo predominante es la **Unidad M_g**. (Glauberita con algo de yeso y halita e intercalaciones de arcillas), cabe esperar la presencia de este tipo de materiales en una longitud máxima de 1.500 m (70% de la total del túnel), de los cuales 1.250 m (60%) estarán ocupados por los terrenos de la unidad M_g en la totalidad de la sección del túnel, la cual presente un valor medio de la **R.C.S. de 30 MP_a**, que la altura media de recubrimiento es de **40 m** y que el tiempo de vida de la obra ha de ser mayor de 15 años.

$$\frac{\sigma_c}{h} = \frac{30}{40} = 0,7$$

Con los parámetros definidos la relación σ_c/h toma el valor de **0,7** por lo que el nivel del proyecto de sostenimiento sería: **B**. En este caso el sostenimiento puede diseñarse a partir de **experiencias similares** o en base a **Clasificaciones Geomecánicas acreditadas**.

Por lo tanto, se estima que el macizo rocoso donde se pretende realizar el proyecto se encuentra **perfectamente investigado y estudiado** geológica y geotécnicamente, con los estudios elaborados.

1.2 Cálculo del sostenimiento.

El diseño del sostenimiento, entendiéndolo como tal el conjunto de elementos que se colocan en una excavación subterránea para conseguir su estabilización provisional hasta que se realiza el revestimiento definitivo, puede abordarse con ayuda de las clasificaciones geomecánicas del terreno, o en función de la resistencia a compresión del terreno en el entorno de la excavación.

1.2.1 Tipos de sostenimientos.

Dadas las características geotécnicas de los materiales afectados por el trazado del túnel, se proponen los siguientes Tipos de Sostenimiento en función de la resistencia a compresión del terreno en el entorno de la excavación.

- **SOSTENIMIENTO TIPO A**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance sea superior a **30 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Proyección de 12 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

- **SOSTENIMIENTO TIPO B**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance se sitúe entre **15 y 30 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas TH-29 (AE-355B) espaciadas 0,85 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 250 x 250 x 10 mm.
- Proyección de 14 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas de apoyo se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

- **SOSTENIMIENTO TIPO C**

Este sostenimiento se aplicará en aquellos tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance se sitúe entre **5 y 15 kp/cm²**. Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas HEB-140 (AE-355B) espaciadas 0,85 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 300 x 300 x 20 mm.
- Proyección de 15 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 2 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas de apoyo se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

- **SOSTENIMIENTO TIPO D**

Se adoptará en los siguientes tramos:

Tramos del túnel en donde la resistencia a compresión del macizo rocoso en el entorno de la excavación de avance **sea inferior a 5 kp/cm²**.

Primeros metros de excavación en mina: P.K. 101+759- P.K. 101+779 y P.K. 103+819- P.K. 103+839.

Zonas de falla.

Vaguada: P.K. 101+870- P.K. 101+910.

Este sostenimiento se aplicará de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Proyección de 5 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (capa de sellado).
- Colocación de cerchas HEB-180 (AE-355B) espaciadas 0,75 m longitudinalmente y unidas entre sí mediante tresillones Ø32 cada metro. El apoyo de las cerchas se realizará mediante placa de acero de 300 x 300 x 20 mm.
- Proyección de 20 cm de hormigón H/MP/35/III-SR reforzado con 9 kg/m³ de macrofibras de polipropileno en 4 capas.

Tanto las cerchas como los tresillones y placas se protegerán frente a la corrosión mediante un tratamiento de galvanizado en caliente de 140 micras.

1.3 Tratamientos especiales.

Con los sostenimientos anteriormente definidos se logra estabilizar la excavación en todas las calidades de terreno previstas. Sin embargo, cabe la posibilidad de que se intercepten zonas en las que la calidad geomecánica del macizo sea inferior y, por lo tanto, los sostenimientos previstos pudieran no ser suficientes, por lo que sería necesario recurrir a tratamientos especiales.

A lo largo del túnel en mina se ha previsto la realización de diversos tipos de tratamientos con el fin de mejorar la estabilidad de la excavación o lograr una impermeabilización adecuada.

1.3.1 Tratamiento del frente.

De acuerdo con los reconocimientos realizados, el macizo rocoso atravesado por el túnel se encuentra intensamente fallado, estimándose la existencia de al menos 12 zonas de falla. En estas zonas es previsible una reducción de las características resistentes del macizo, así como la posible existencia de carga de agua procedente del acuífero yesífero superior.

En estas circunstancias, con el fin de asegurar la estabilidad del frente, se propone la ejecución del siguiente tratamiento:

3) Bulones de fibra de vidrio 025 de 15 m de longitud en malla cuadrada de 1m x 1m.

Los bulones se ejecutarán con un solape mínimo de 4 m, para lo cual se perforarán con una inclinación del 2% para mantener constantes las coordenadas de los puntos de replanteo de la malla.

4) 6 drenes de PVC ranurado de 12 m de longitud y 2" de diámetro.

Los drenes se ejecutarán con un solape mínimo de 4 m, para lo cual se perforarán con una inclinación del 2% para mantener constantes las coordenadas de los puntos de replanteo iniciales.

Aparte de las zonas de falla, se propone la aplicación de este tratamiento entre los PP.KK. 101+870 y 101+910. En esta zona de vaguada la montera sobre el túnel es inferior a un diámetro. A esto se une la existencia de un depósito de materiales cuaternarios en superficie, de unos 5 m de espesor, que puede actuar como zona de captación del acuífero yesífero, y la proximidad entre éste último y la clave del túnel. Todas estas circunstancias hacen posible la aparición de problemas de inestabilidad del frente.

1.3.2 Jet-grouting.

Entre los PP.KK. 103+780 y 103+839 la clave del túnel intercepta el muro del acuífero yesífero superior. Esta circunstancia, unida a una altura de montera reducida, entre 10 y 12 m, puede dar lugar a fenómenos de inestabilidad global, que se traduzcan en la formación de chimeneas.

Para mejorar las características resistentes del terreno en el entorno de la excavación y reducir su permeabilidad, se propone la ejecución desde superficie de un tratamiento de columnas de jet-grouting.

El tratamiento propuesto consiste en la ejecución de una malla triangular de 0,75 m de lado con columnas de 0,9 m de diámetro. El ancho de la malla cubrirá toda la sección del túnel, manteniendo un resguardo de al menos 2 m a los hastiales. La longitud de las columnas será variable: unos 10 m, en la zona central de la sección, y 20 m en torno a los hastiales.

1.3.3 Sostenimiento en los emboquilles.

Dentro del concepto de emboquille se agrupan tanto los trabajos que deben realizarse previamente al comienzo de la excavación en mina, con el fin de asegurar su estabilidad, como los relacionados con la construcción de los portales definitivos del túnel.

Los emboquilles suelen presentar problemas de estabilidad adicionales a los previstos en el interior del túnel, debido a que su excavación se realiza en materiales descomprimidos y con un mayor grado de meteorización. Los criterios adoptados en la definición de los emboquilles han sido los siguientes:

- 8) Ubicación de los puntos de emboquille en zonas donde no se han detectado síntomas de deslizamiento que pudieran activarse con las excavaciones. Se ha evitado, en la medida de los posibles, la afección a materiales poco competentes como rellenos superficiales.
- 9) Localización de los emboquilles lejos de accidentes tectónicos de importancia.

- 10) Ejecución de los emboquilles en puntos con cobertera suficiente, con el fin de iniciar la excavación del túnel en materiales no afectados por la descompresión y la meteorización superficial.
- 11) Excavación de taludes provisionales de gran inclinación, con el fin de reducir la afección al entorno (especialmente en el emboquille noroeste).
- 12) En caso necesario, refuerzo de los taludes de emboquille con hormigón proyectado, mallazo y bulones, y drenaje mediante la ejecución de drenes californianos.
- 13) Ejecución de paraguas pesados de presostenimiento en los primeros metros del túnel y de viseras para la protección de los operarios.
- 14) Restitución del entorno de los emboquilles mediante túneles artificiales, cubriendo los taludes provisionales con los rellenos correspondientes.

Siguiendo estos criterios, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los cálculos realizados, se plantean las soluciones que se describen a continuación.

1.3.3.1 Ubicación de emboquilles y taludes provisionales.

BOQUILLA NOROESTE

El emboquille se ha situado en el P.K. 101+759, siendo en este punto la montera sobre clave de 14 m. En el emboquille noroeste se ha adoptado pendiente 2H:3V en los taludes laterales de la trinchera provisional, con un desmoche 2H:1V del metro superior. En el talud frontal, con el fin de lograr la mayor montera posible, se ha considerado un talud de pendiente variable: 1H:3V, hasta alcanzar una altura de 3 m sobre la clave del túnel, y 2H:3V por encima de esta cota, disponiendo un desmoche con talud 2H:1V del metro superior. Los taludes provisionales adoptados para la excavación del saneo correspondiente a la cimentación del túnel artificial es 1H:10V (talud frontal) y 1H:2V (taludes laterales).

BOQUILLA SURESTE

El emboquille se ha situado en el P.K. 103+839, obteniéndose así un espesor de montera de 12 m. En el talud frontal, con el fin de lograr la mayor montera posible, se ha considerado un talud de pendiente variable: 1H:3V, hasta alcanzar una altura de 3 m sobre la clave del túnel, y 2H:3V por encima de esta cota, disponiendo un desmoche con talud 2H:1V del metro superior. En los taludes laterales de la trinchera provisional se ha adoptado pendiente 1H:2V, aumentando así el espacio disponible en superficie para la ejecución de las fases provisionales de obra necesarias para la restitución del enlace entre la autovía A-4 y la carretera N-400. Los taludes provisionales adoptados para la excavación del saneo correspondiente a la cimentación del túnel artificial son 1H:10V (talud frontal) y 1H:2V (taludes laterales).

1.3.3.2 Tratamiento de los taludes provisionales de emboquille.

Con el fin de evitar fenómenos de inestabilidad global o local en los taludes provisionales de los emboquilles se propone la ejecución de los siguientes tratamientos:

Emboquille noroeste:

- **Talud frontal**

Para poder alcanzar un coeficiente de seguridad respecto al deslizamiento global del talud superior a 1,3 es preciso el siguiente tratamiento.

Hasta alcanzar una altura de 8,5 m sobre la cota de cimentación del túnel artificial:

- 5 filas de bulones \varnothing 32 (B-500 S) de 12 m de longitud inyectados con lechada de cemento en malla de 2 m x 2m al tresbolillo.
- 20 cm de hormigón proyectado H/MP/35 III-SR con doble malla de 150 x 150 x 10.

Por encima de la altura indicada anteriormente:

- 5 cm de hormigón proyectado H/MP/35 III-SR con malla de 150 x 150 x 6.

Además, la posible afluencia de agua a través del contacto entre la unidad permeable M_V y la unidad impermeable M_{AR} se drenará mediante la ejecución de una hilera de drenes californianos de 2" de diámetro y 10 m de longitud dispuestos cada 2 m. Estos drenes se perforarán a 0,5 m sobre el contacto entre las unidades indicadas. Los drenes se taponarán previamente a su cubrición con el relleno del túnel artificial.

- **Taludes laterales.**

Los taludes laterales son estables sin necesidad de tratamiento alguno. No obstante, teniendo en cuenta que las trincheras de los emboquilles constituyen una zona de continua circulación de personas y maquinaria durante la ejecución del túnel, se propone, como medida de protección adicional frente a posibles desprendimientos locales resultantes de la meteorización superficial, un tratamiento consistente en una capa de hormigón proyectado H/MP/35/III-SR de 5 cm de espesor con malla de 150 x 150 x 6 mm (B-500 S).

Emboquille sureste:

- **Talud frontal.**

Con la geometría adoptada el talud es estable. No obstante, teniendo en cuenta la duración prevista de las obras, con el fin de evitar desprendimiento locales como resultado de la meteorización, se propone un tratamiento consistente en una capa de hormigón proyectado H/MP/35/III-SR de 5 cm de espesor con malla de 150 x 150 x 6 mm (B-500 S).

La posible afluencia de agua a través del contacto entre la unidad permeable M_Y y la unidad impermeable M_G se drenará mediante la ejecución de dos hileras de drenes californianos de 2" de diámetro y 10 m de longitud dispuestos en malla de 2 m x 2m. Estos drenes se perforarán a 0,5 m sobre el contacto entre las unidades indicadas. Los drenes se taponarán previamente a su cubrición con el relleno del túnel artificial.

- **Taludes laterales.**

Los taludes laterales son estables excepto los 3-4 m superiores del talud izquierdo, en donde se intersectan rellenos vertidos correspondientes al enlace. Se ha comprobado que la ejecución de un tratamiento consistente en una capa de hormigón proyectado H/MP/35/III-SR de 5 cm de espesor con malla de 150 x 150 x 6 mm (B-500 S) es suficiente para asegurar la estabilidad a corto

Con el fin de reforzar el sostenimiento de la excavación en mina a lo largo de los primeros metros del túnel, en donde pueden acentuarse los problemas de inestabilidad debido al estado de alteración y descompresión del terreno, se propone la ejecución, en ambos emboquilles, del siguiente paraguas de presostenimiento:

- Micropilotes de 180 mm de diámetro, con armadura de 114 mm de diámetro exterior y 8,7 mm de espesor (N-80), con inyección única de lechada de cemento.
- La longitud de los paraguas será al menos de 20 m, en ambos emboquilles.
- La distancia entre micropilotes será de 0,35 m.
- Los micropilotes se encajarán en cabeza con una viga de hormigón armado HA-25 de 1 m de canto y 0,5 m de ancho.

Además, en los emboquilles se propone la ejecución de viseras de protección formadas por los siguientes elementos:

- 5 cerchas HEB-180 (AE 355 B) separadas 1 m entre sí, solidarizadas con tresillones $\varnothing 32$.
- Chapas tipo Bernold o similar de 2 mm de espesor (AE 355 B).
- Capa de hormigón proyectado H/MP/35/III-SR de 0,20 m de espesor

1.4 Revestimiento.

En el caso del túnel de El Regajal el revestimiento cumple la labor de sostenimiento de la excavación, tanto a corto como a medio- largo plazo.

Dado que el revestimiento se ejecuta simultáneamente a la excavación del túnel, éste colabora, junto con el sostenimiento dispuesto, en la estabilidad de la excavación a corto plazo. De esta forma, el conjunto sostenimiento/revestimiento-terreno alcanza una situación de equilibrio, como resultado del reajuste tensional producido por la nueva condición de contorno que implica la excavación.

La ejecución del revestimiento a corto plazo tiene la ventaja de, dada su elevada rigidez, limitar las convergencias en el perímetro de la excavación y con ello la descompresión del terreno en el entorno del túnel. Limitando la descompresión se limita también la probabilidad de producir la reapertura de diaclasas selladas o incluso la apertura de nuevas diaclasas, que podrían favorecer la circulación de agua en el entorno del túnel y con ello la modificación del actual régimen hidrogeológico, especialmente en las zonas de falla y en aquellos tramos en donde la clave del túnel se sitúa próxima al acuífero yesífero superior.

Por otro lado, las unidades geotécnicas afectadas por la excavación del túnel presentan un comportamiento evolutivo, de tal forma que a la deformación que se produce como consecuencia del reajuste tensional inicial pueden sumarse, a medio-largo plazo, otras deformaciones producidas por los siguientes fenómenos:

- Hinchamiento, debido a la presencia de minerales expansivos, esmectitas y anhidrita, y a la neoformación de cristales de yeso en fisuras. Teniendo en cuenta las características del terreno, se ha considerado una presión de hinchamiento máxima de 40 kp/cm^2 .
- Lixiviación, como consecuencia de la circulación de agua capaz de disolver las sales, cloruro sódico y sulfatos de sodio y calcio, presentes en el terreno. La lixiviación se traduce en una reducción de las características resistentes del terreno.

Como resultado del cálculo del revestimiento, teniendo en cuenta las acciones indicadas a largo plazo, se ha obtenido la necesidad de diseñar secciones de hormigón armado.

El hormigón a utilizar en el revestimiento es HA-40. La clase de exposición es IV Q_c , por lo que es precisa la utilización de cemento SR resistente a los sulfatos. Dado el potencial corrosivo del terreno, las armaduras se protegerán mediante galvanizado en caliente de 140 mieras.

Con el fin de mejorar su comportamiento frente al fuego, se añadirán al hormigón del revestimiento microfibras de polipropileno monofilamento, con una dosificación de 3 kg/m^3

2 Método constructivo.

La construcción de los túneles se desarrollará siguiendo las siguientes fases constructivas:

- FASE I: Excavación y sostenimiento de los emboquilles de las bocas de Aranjuez y Ontígola.
- FASE II: Excavación y sostenimiento del avance.
- FASE III: Excavación y sostenimiento de la destroza.

- FASE IV: Colocación de drenajes, desagües y canalizaciones.
- FASE V: Puesta en obras del revestimiento.

2.1 Sistemas de excavación.

Se han realizado distintos ensayos destinados a la determinación de aquellas propiedades que presentan una influencia importante en la excavabilidad del terreno. Entre estas propiedades cabe destacar la resistencia a compresión simple, la tenacidad y la abrasividad. Ésta última puede determinarse a partir de distintos procedimientos como el ensayo de perforabilidad, el ensayo Cerchar o el análisis mineralógico (coeficiente de Schimazek).

Los resultados obtenidos para las distintas unidades geotécnicas son los siguientes:

	M_Y	M_G	M_{HA}	M_{YAR}	M_{AR}
Ensayo brasileño (MPa)	1.53	1.2	0.99	0.54	0.57
Índice Cerchar	0.27	0.25	0.27		
$F_{SCHIMAZEK}$ (Kn/m)		0.02	0.02		0.001
RCS (MPa)	2.5	4.53	2.84	0.49	1.02

2-1 Características geotécnicas unidades geológicas.

De acuerdo con los resultados anteriores todas las unidades indicadas corresponden a materiales muy poco abrasivos, pudiendo calificar su rozabilidad, a partir del factor de Schimazek, como muy buena. En consecuencia con lo anterior la excavación del túnel podría realizarse de forma mecánica mediante Rozadora o Retroexcavadora con martillo hidráulico.

No obstante lo **anterior**, existe una zona de la traza del túnel con predominio de glauberita donde **es posible que sea necesario la utilización de explosivos** para conseguir unos rendimientos de avance acorde con los plazos de ejecución de la obra, por lo que en el presente proyecto se contemplan los dos tipos de arranque : **Mecánico y Perforación mas Voladura.**

En general puede decirse que, la excavación del túnel se realizará en dos fases: avance y destroza.

La altura de la sección de avance debe permitir la circulación fluida de los vehículos y el manejo de los bulones, por lo que la misma será de 6,21 m. o La anchura de la sección de avance, incluida las patas de elefantes, será de 15,88 m. La altura de la destroza oscilará, según las secciones, entre será de 4,9 m. y 7,86 m. o La anchura de la destroza oscilará entre 14,54 m y 15,02 m.

2.1.1 Arranque mecánico.

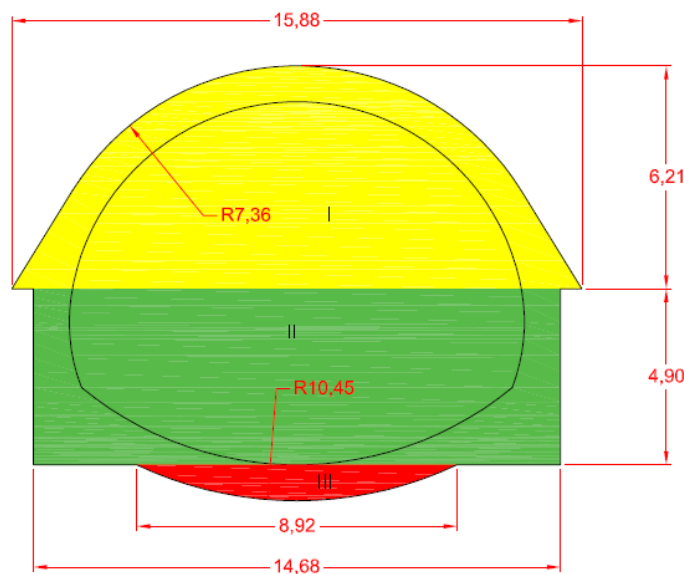
En principio la excavación con medios mecánicos se realizará utilizando una retroexcavadora provista de martillo hidráulico, para pasar posteriormente a un minador (rozadora).

2.1.1.1 Fases de construcción (Secciones tipo).

Teniendo en cuenta las características del terreno y las dimensiones de la sección, se propone la excavación y el sostenimiento del túnel por fases, ejecutándose las mismas con un desfase mínimo con el fin de limitar la descompresión del terreno y con ello la alteración del mismo en el entorno de la excavación.

A continuación se describe el procedimiento constructivo propuesto para cada una de las distintas secciones tipo:

- **Sección tipo I-R.**



I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²
 II-Sección de excavación en destroza: 71.9 m²
 III-Sección de excavación en contrabóveda: 6 m²
 SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 147,42 m²

Ilustración 2 Sección tipo I-R

La ejecución de esta sección se realizará siguiendo un procedimiento similar al denominado Método Belga, consistente en la ejecución de bóveda, hastiales y contrabóveda en fases sucesivas. Las fases constructivas serán las siguientes:

Fases I y II: Excavación y sostenimiento provisional de la bóveda.

Se realizará la excavación de la bóveda por anillos de 2,5 m de longitud, excepto en los siguientes tramos, en donde, previéndose la presencia de agua y/o peores características geotécnicas del terreno, la longitud será de 1,5 m:

- ✓ **Primeros metros de excavación en mina:** P.K. 101+759- P.K. 101+779 P.K. 103+819- P.K. 103+839

- ✓ **Zonas de falla.**
- ✓ **Vaguada:** P.K. 101+870- P.K. 101+910.

No obstante, a la vista de las condiciones reales del terreno, podrá modificarse la longitud de los anillos de acuerdo con la Dirección de Obra.

En los tramos en donde sea preciso, de acuerdo con el perfil geotécnico-constructivo, se realizará, previamente a la excavación, el bulonado y drenaje del frente.

En principio se prevé un sellado inmediato de la excavación mediante hormigón proyectado armado con fibras sintéticas. Si fuera necesario, en función de las características del terreno, se llegaría a aplicar un sostenimiento con cerchas galvanizadas y un mayor espesor de hormigón proyectado.

Fase III: Encofrado, armado y hormigonado de la bóveda.

Una vez excavado y sostenido el anillo correspondiente, se ejecutará la bóveda con hormigón bombeado. La excavación del siguiente anillo no comenzará hasta haber concluido el hormigonado del anterior.

Dados los esfuerzos previstos, es necesario el armado de la bóveda, disponiéndose en la zona de apoyo las cajas de armaduras necesarias para el solapo de la armadura de bóveda con la armadura de hastiales.

Simultáneamente al hormigonado se instalarán, tanto en las juntas transversales como en la junta longitudinal, los cordones de impermeabilización correspondientes. En tramos en donde se detecten grandes filtraciones se estudiará la sustitución de los cordones hidroexpansivos por cintas tipo water-stop.

Fases IV, V y VI: Excavación de destroza y ejecución de hastiales.

Con un desfase de 25 m respecto al frente de avance comenzará la excavación de la destroza y la ejecución de los hastiales. La excavación de la caja central se realizará, con talud máximo 1H:3V, manteniendo un resguardo, respecto al apoyo de la bóveda, de 1,5m, con el fin de evitar problemas de inestabilidad de la misma.

La excavación de los hastiales se realizará por batches alternos contrapeados de 2,5 m de longitud, o 1,5 m en los tramos indicados anteriormente. Se tomará la precaución de que la junta entre dos anillos de la bóveda se sitúe aproximadamente en el centro de un batche de hastial, a fin de no descalzar la bóveda totalmente. Así mismo, por la misma razón, nunca se excavarán de forma simultánea dos batches enfrentados.

Una vez excavado el batche correspondiente se realizará el armado del mismo. La unión entre el armado de la bóveda y el de hastiales se realizará mediante las correspondientes cajas de armaduras. Simultáneamente al hormigonado de los hastiales se instalarán los cordones de impermeabilización correspondientes.

Fase VII: Excavación, armado y hormigonado de la contrabóveda.

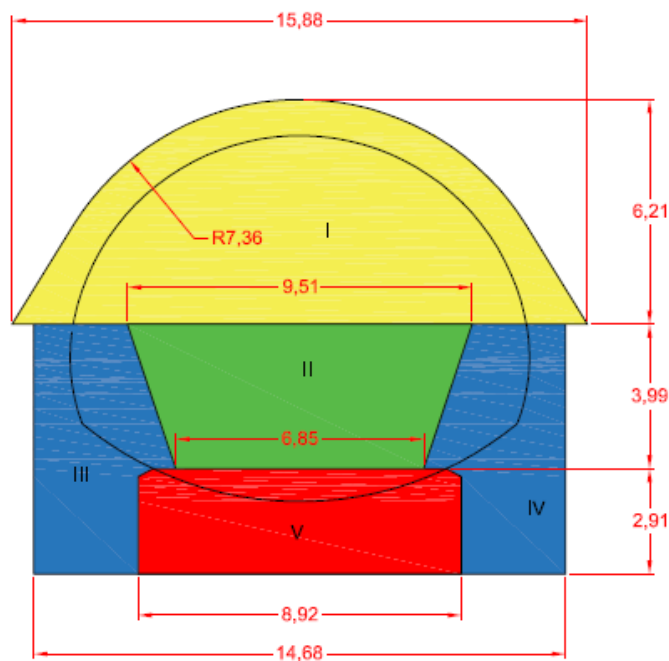
Con un desfase de 25 m respecto al frente de la destroza comenzará la excavación de la contrabóveda en tramos de 12,5 m. Una vez excavado el tramo correspondiente, se armará, realizando el solapo con la armadura de hastiales mediante la utilización de cajas de armaduras. Simultáneamente al hormigonado de la contrabóveda se instalarán los cordones de

impermeabilización correspondientes. No se excavará un nuevo tramo de contrabóveda hasta haber finalizado por completo el hormigonado del tramo anterior.

Fase VIII: Inyecciones de contacto.

Una vez finalizada la sección completa se realizarán inyecciones con lechada de cemento en el trasdós de bóveda y hastiales, con el fin de asegurar el perfecto contacto entre la sección y el terreno. En esta misma fase se realizarán las coronas de inyecciones de impermeabilización previstas en las zonas de falla. En aquellos tramos en donde se prevean grandes filtraciones el tratamiento de las zonas de falla se realizará al avance, mediante abanicos sucesivos, previamente a la excavación.

- **Sección tipo I-RA**



I- Sección de excavación en avance: 69,52 m²

II- Sección de excavación en destroza: 32,67 m²

III y IV- Sección de excavación bataches: 34,18 m²

V- Sección de excavación contraboveda: 34,18 m²

SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 187,71 m²

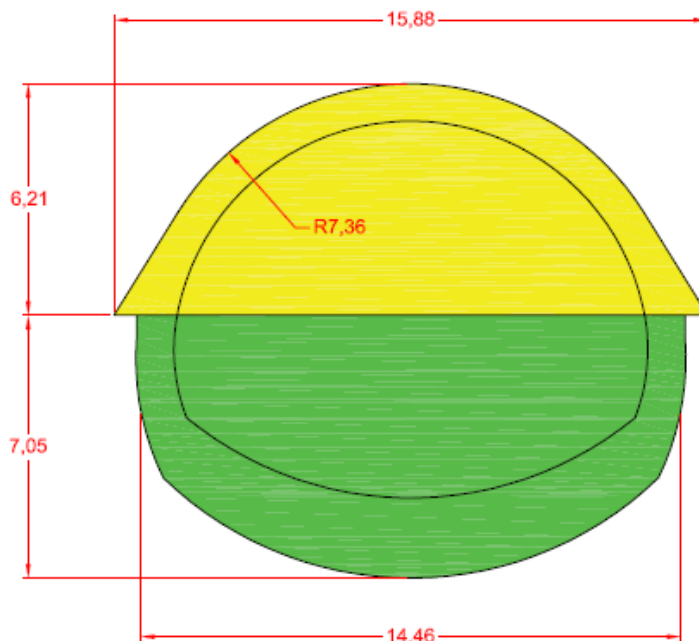
Ilustración 3 Sección tipo I-RA

La única diferencia existente entre el procedimiento constructivo de la sección I-R y el de la sección I-RA es que, en éste último caso, es precisa la ejecución de un saneo y sustitución del terreno por hormigón pobre, HM-15, bajo el apoyo de hastiales y contrabóveda.

El espesor de saneo es variable, habiéndose estimado, según el tramo, entre 1 y 2 m. No obstante, el espesor de saneo podrá modificarse durante la ejecución de la obra a la vista de las condiciones.

La ejecución del saneo da lugar a un aumento de la altura de excavación de los hastiales, por lo que se ha propuesto el sostenimiento de la pared de los mismos mediante hormigón proyectado y bulones de fibra de vidrio.

- **Sección tipo II**



I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²

II-Sección de excavación en destroza y contrabóveda: 87,06 m²

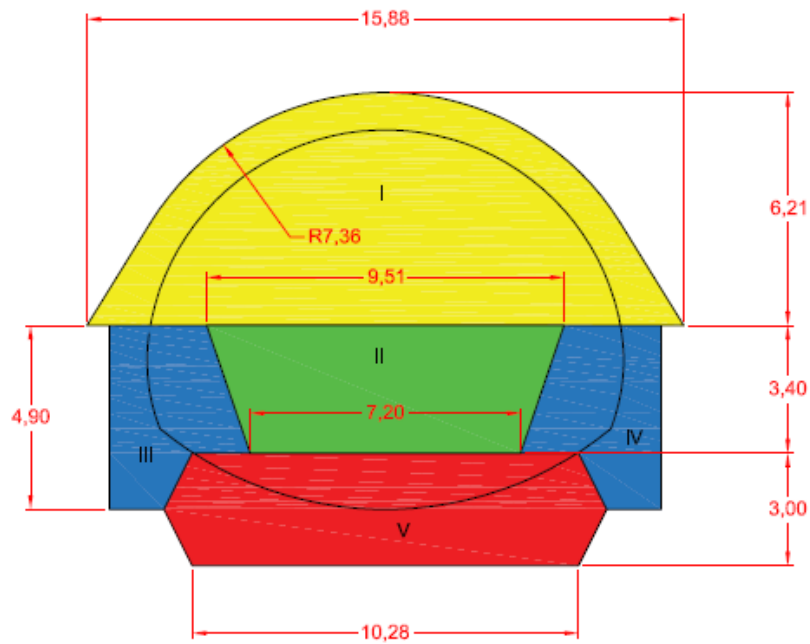
SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 156,58 m²

Ilustración 4 Sección tipo II

El procedimiento constructivo de esta sección es muy similar al descrito para la sección I-R. La única diferencia radica en la ejecución de los pilotes previamente a la excavación de la contrabóveda y manteniendo un desfase de 12,5 m respecto al frente de excavación de la destroza.

La perforación de los pilotes se realizará desde la misma plataforma de trabajo utilizada para la excavación de los bataches de hastiales.

- **Sección tipo III**



I-Sección de excavación en avance: $69,52 \text{ m}^2$
 II-Sección de excavación en destroza: $28,97 \text{ m}^2$
 III y IV-Sección de excavación bataches: $2 \times 13,67 \text{ m}^2$
 V-Sección de excavación contrabóveda: $32,12 \text{ m}^2$

SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: $157,95 \text{ M}^2$

Ilustración 5 Sección tipo III

El procedimiento constructivo correspondiente a esta sección incluye las siguientes fases:

Fases I y II: Excavación y sostenimiento provisional de la bóveda.

Se realizará la excavación de la bóveda por anillos de 2,5 m de longitud, excepto en los siguientes tramos, en donde, previéndose la presencia de agua y/o peores características geotécnicas del terreno, la longitud será de 1,5 m:

- Primeros metros de excavación en mina: P.K. 101+759- P.K. 101+779. Y P.K. 101+819- P.K. 103+8399.
- **Zonas de falla.**
- **Vaguada:** P.K. 101+870- P.K. 101+910.

No obstante, a la vista de las condiciones reales del terreno, podrá modificarse la longitud de los anillos de acuerdo con la Dirección de Obra.

A medida que se realice la excavación, ésta se irá sosteniendo con hormigón proyectado y/o cerchas. En los tramos en donde sea preciso, de acuerdo con el perfil geotécnico- constructivo, se realizará, previamente a la excavación, el bulonado y drenaje del frente.

Así mismo, en esta fase se ejecutarán los micropilotes, 4 por anillo, destinados al recalce de la bóveda durante la excavación de los hastiales y contrabóveda.

Fase III: Encofrado, armado y hormigonado de la bóveda.

Una vez excavado y sostenido el anillo correspondiente, se ejecutará la bóveda con hormigón bombeado. La excavación del siguiente anillo no comenzará hasta haber concluido el hormigonado del anterior.

Dados los esfuerzos previstos, es necesario el armado de la bóveda, disponiéndose en la zona de apoyo las cajas de armaduras y conectores necesarios para el solapo de la armadura de bóveda con la armadura de hastiales.

Simultáneamente al hormigonado se instalarán, tanto en la juntas transversales como en la junta longitudinal, los cordones de impermeabilización correspondientes. En tramos en donde se detecten grandes filtraciones se estudiará la sustitución de los cordones hidroexpansivos por cintas tipo water-stop.

Fase IV: Excavación y sostenimiento provisional de hastiales y contrabóveda.

Con un desfase de 25 m respecto al frente de excavación de avance comenzará la excavación y sostenimiento provisional de hastiales y contrabóveda, en tramos de 12,5 m. En este caso, la excavación conjunta de hastiales y contrabóveda, frente a su división en dos fases, tiene la ventaja de facilitar la colocación de la lámina de impermeabilización prevista y el solapo de las armaduras en una sección, como ésta, fuertemente armada. El, sostenimiento provisional propuesto consta de hormigón proyectado y bulones de fibra de vidrio.

La impermeabilización de hastiales y contrabóveda se realizará, en este caso, mediante una lámina de PVC, con su correspondiente protección. Por este motivo, no es precisa la instalación de cordones de impermeabilización en las juntas transversales del conjunto hastiales-contrabóveda.

Fase V: Armado y hormigonado de hastiales y contrabóveda.

Una vez sostenida la excavación y colocada la lámina de impermeabilización se realizará el armado. El solapo de la armadura de bóveda y hastiales se realizará con las cajas de armaduras y conectores correspondientes. La excavación de un nuevo tramo no comenzará hasta que hayan transcurrido al menos 7 días del hormigonado del tramo anterior

Fase VI: Inyecciones de contacto.

Una vez finalizada la sección completa se realizarán inyecciones con lechada de cemento en el trasdós de la bóveda, con el fin de asegurar el perfecto contacto entre la sección y el terreno. En esta misma fase se realizarán las coronas de inyecciones de impermeabilización previstas en las zonas de falla. En aquellos tramos en donde se prevean grandes filtraciones el tratamiento de las zonas de falla se realizará al avance, mediante abanicos sucesivos, previamente a la excavación.

2.1.1.2 Tramificación de las secciones tipo del túnel

TABLA DE TRAMIFICACIÓN DE LAS SECCIONES.			
P.K. Inicial	P.K. Final	Sección tipo	Sección Total (m²)
101+736	101+759	Túnel artificial	
101+759	101+815	I-R	147,42
101+815	102+830	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
101+830	102+140	I-R	147,42
102+140	102+155	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
102+155	102+245	I-R	147,42
102+245	102+275	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
102+275	102+345	I-R	147,42
102+345	102+390	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
102+390	102+490	I-RA (saneos = 2 m)	187,71
102+490	102+540	I-R	147,42
102+540	102+555	I-RA (saneos = 1 m)	187,71
102+555	102+580	I-R	147,42

102+580	102+650	I-RA (saneamiento = 2 m)	187,71
102+650	102+680	III	157,95
102+680	102+740	II	156,58
102+740	102+770	III	157,95
102+770	102+950	II	156,58
102+950	103+060	III	157,95
103+060	103+170	III	157,95
103+170	103+185	III	156,58
103+185	103+395	II	156,58
103+395	103+580	III	157,95
103+580	103+725	II	156,58
103+725	103+839	III	157,95
103+839	104+173	Túnel artificial	

2-2 Tramificación de secciones

2.1.2 Avance mediante perforación y voladura.

2.1.2.1 Perforación.

Los barrenos tendrán un diámetro de 51 mm y la perforación de los mismos se realizará con un jumbo electrohidráulico de tres brazos, tipo Rocket Boomer o similar.

2.1.2.2 Longitud de pase.

Inicialmente las longitudes de pase dependerán de la calidad geotécnica del macizo rocoso, no obstante los cálculos de las voladuras se han realizado para una **longitud máxima de 2 m**. La longitud de pase podrá aumentarse si así lo estima la Dirección de Obras.

2.1.2.3 Voladuras.

Las voladuras de avance se han calculado con la hipótesis de que las mismas se desarrollarán a partir de un **cuele quemado de 3 secciones**, la primera compuesta por un barreno cargado y cuatro barrenos vacíos, la segunda por cuatro barrenos cargados y la tercera por ocho barrenos cargados.

Las voladuras de destroza se realizarán con una longitud de pase comprendida entre 1 y 4 m en función de la calidad geotécnica que presente el macizo rocoso en cada momento. Las Cargas Específicas a utilizar para las voladuras de avance oscilarán, como media, entorno los 1,5 Kg/m³ para las voladuras de avance y entorno a 1 Kg/m³ para las voladuras de destroza.

ANEXO III PERFORACIÓN Y VOLADURA

1 Método de construcción del túnel.

La construcción del túnel de El Regajal se realizará atacándolo por las dos bocas, reduciendo así los plazos de ejecución.

Inicialmente se ha previsto realizar la excavación del túnel de El Regajal en **dos fases: avance y destroza**. La altura de la sección de avance debe permitir la circulación fluida de los vehículos y el manejo de los bulones así como, después de colocado el sostenimiento y el revestimiento, dejar una sección libre mínima, por lo que ésta **se fija en 7,30 m**. La altura de la destroza, en el avance con perforación y voladura, será de **4,11 m**. y la misma se excavará a sección completa, aunque si fuera necesario, la destroza podría excavar en tres fases (Bataches y machón central) con un talud 1 H: 3 V.

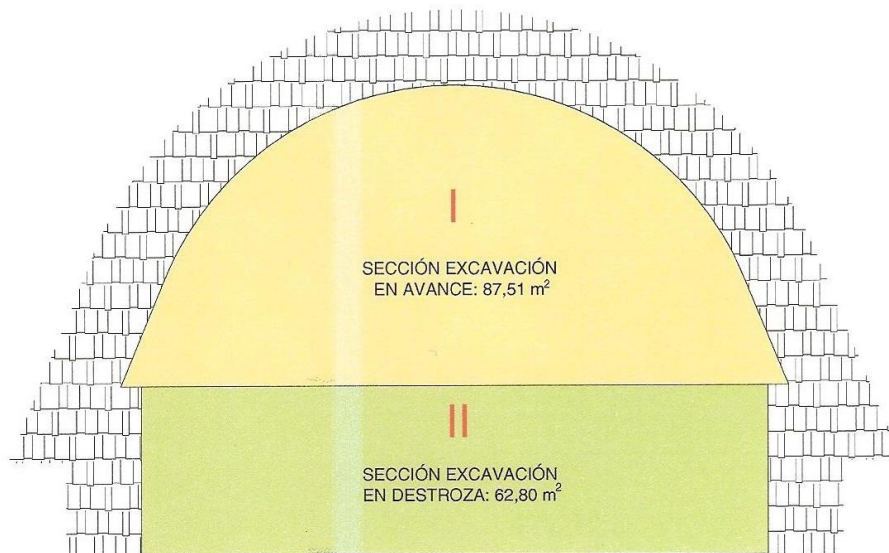


Ilustración 6 Sección de excavación

En los epígrafes siguientes se desarrollan lo concerniente al avance mediante perforación y voladura

2 Cálculo de las voladuras.

El cálculo de los explosivos para la excavación del túnel se realizará en base a 2 hipótesis. La primera, que sólo se utilizará explosivo gelatinoso, y la segunda, que se utilizará explosivo gelatinoso como carga de fondo y agente explosivo seco como carga de columna.

2.1 Voladuras de avance.

2.1.1 Perforación.

Los barrenos tendrán un diámetro de 51 mm y la perforación de los mismos se realizará con un jumbo electrohidráulico de tres brazos (o similar), referenciado por

- Marca: Atlas Copeo.
- Modelo: Rocket Boomer XLC3.
- Potencia eléctrica instalada: 240 kW.
- Potencia diesel instalada: 170 kW.
- Tipo de brazo: Hidráulico BUT 35 L.
- Tipo de deslizadera: BMH 6818, de 7,102 m.
- Tipo de martillos: COP 1838 HF.



Ilustración 7 Jumbo para la perforación

2.1.2 Longitud de pase.

Inicialmente **las longitudes de pase** dependerán de la calidad geotécnica del macizo rocoso, aunque éstas **pueden fijarse en 2 m**. Estas longitudes de pase podrán ser **modificadas a criterio de la Dirección de Obra** a la vista de las características reales del terreno. Con las longitudes de pase previstas y estimando un **rendimiento de avance del 95%** el avance real será **1,90 m**.

2.1.3 Cálculo de los parámetros del cuele, destroza, zapatera y contorno.

Las voladuras de avance se calculan con la hipótesis de que las mismas se desarrollarán a partir de un **cuele quemado de 3 secciones**. Como parámetros fijos de las voladuras a realizar se establecen los siguientes:

- Diámetro de perforación de los barrenos cargados: 51 mm.
- Diámetro de perforación de los barrenos vacíos: 102 mm.
- Longitud de perforación: 2 m.
- Sección disparada en avance: 87,51 m².

- **Cálculo de los parámetros del cuele.**

Primera sección: Está formada por 1 barreno cargado y cuatro barrenos vacíos.

En este tipo de cueles la piedra (V_1) entre el barreno central cargado y los barrenos vacíos viene dada por la expresión:

$$V_1 = 0,7 \times D = 0,7 \times 0,102 \text{ m.} = \mathbf{0,0714 \text{ m.}}$$

La distancia entre ejes del barreno cargado y los barrenos vacíos es de:

$$D_{\text{ejes}}: V_1 + d/2 + D/2 = \mathbf{0,1479 \text{ m}}$$

Siendo d el diámetro de los barrenos cargados y D el diámetro del barreno vacío.

Si llamamos a_1 a la distancia entre ejes de los barrenos vacíos, su valor será de:

$$(a_1)^2 = (\text{Dejes})^2 + (\text{Dejes})^2 = (0.1479)^2 + (0.1479)^2$$

$$a_1 = \mathbf{0,2092 \text{ m} = 0,209 \text{ m}}$$

En consecuencia con lo anterior el hueco abierto con el disparo de la primera sección será:

$$S_1 = 0,209 \times 0,209 = \mathbf{0,0437 \text{ m}^2}$$

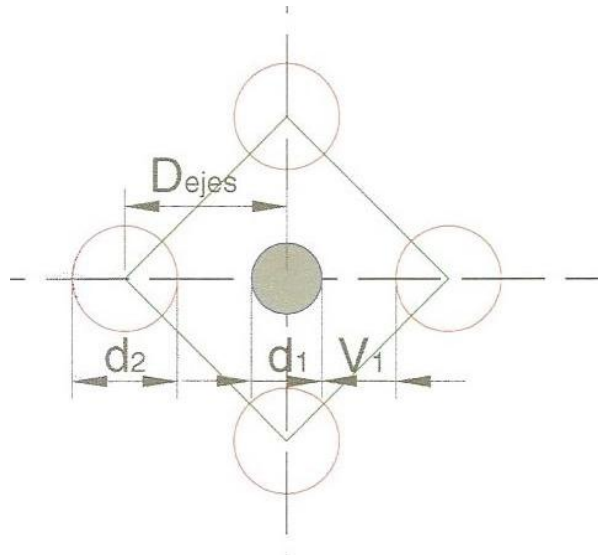


Ilustración 8 Primera sección del cuele

Segunda sección: Está formada por 4 barrenos cargados, alrededor del hueco abierto por la primera sección.

La piedra de los barrenos de la segunda sección se determina por la expresión:

$$V_2 = 0,7 \times a_1 = 0,7 \times 0,209 = 0,1463 = \mathbf{0,146 \text{ m.}}$$

La distancia (h_2) entre el centro del barrenos cargado y el centro de la primera sección es:

$$h_2 = h_1 + V_2 + d/2 = \mathbf{0,28 \text{ m}}$$

En consecuencia, $2 (L_1)^2 = (0,28)^2$, $L_1 = 0,20 \text{ m.}$, $2 L_1 = 0,40$, por lo que el hueco de la segunda sección será $0,40 \times 0,40 = \mathbf{0,16 \text{ m}^2}$

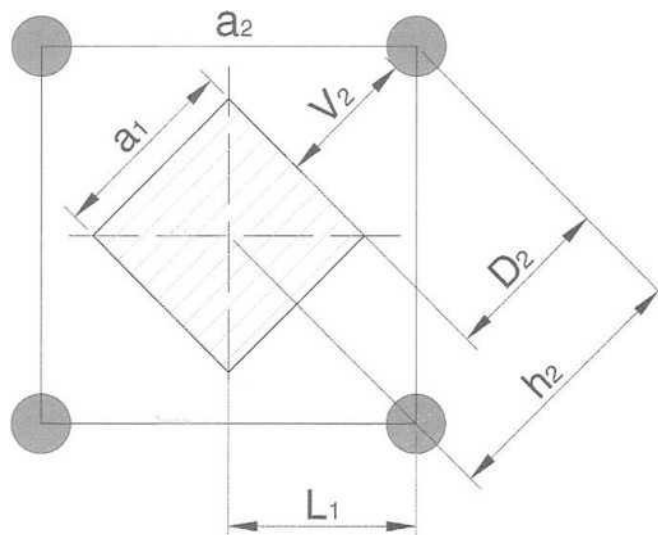


Ilustración 9 Segunda sección del cuele

Tercera sección: Está constituida por 8 barrenos cargados situado en tres filas (3 + 2 + 3) alrededor del hueco abierto por la segunda sección. Al tener mayor hueco abierto es posible aumentar la piedra (V_3) de esta sección, calculándose la misma mediante la expresión:

$$V_3 = 1,15 \times a_2 = 1,15 \times 0,40 = 0,437\text{m.} = \mathbf{0,46 \text{ m}}$$

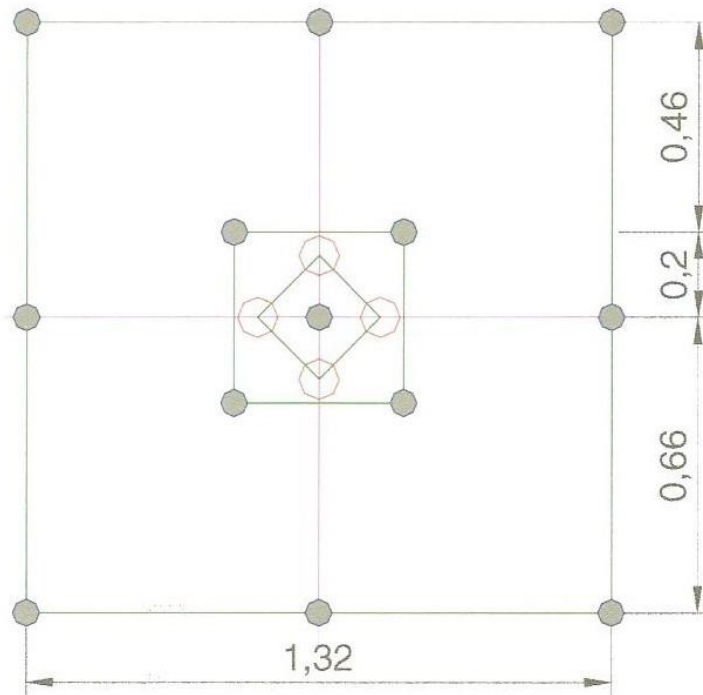


Ilustración 10 Tercera sección del cuele

- **Cálculo de los parámetros de la destroza para pases de 2 m.**

La piedra real (V_d) de la destroza se determina mediante la expresión:

$$V_d = \text{Anchura del cuele} \times 0,7 = 1,32 \text{ m.} \times 0,7 = 0,924 \text{ m.} = \mathbf{0,92 \text{ m.}}$$

El **espaciamiento (S_d)** lo ajustamos a la sección disponible, por lo que oscilará, según las filas, entre **0,83 m. y 0,97 m**

- **Cálculo de los parámetros de la zapatera.**

Los barrenos del piso se calculan de la misma forma que para la destroza, aplicando un coeficiente reductor por trabajar contra la gravedad y por tener que levantar el material

procedente del cuele y parte de la destroza. En consecuencia la piedra (V_z) de la zapatera será:

$$V_z = \text{Anchura del cuele} \times 0,65 = 1,32 \text{ m} \times 0,65 = 0,858 \text{ m.} = \mathbf{0,86 \text{ m.}}$$

El **espaciamiento** lo ajustamos a la anchura disponible, por lo que lo hacemos igual a **0,90 m.**

- **Cálculo de los parámetros del recorte.**

Con el recorte se pretende obtener un perfil de excavación lo mas liso posible. La piedra del recorte se determina por la expresión:

$$V_r = 0,9 \times V_d = 0,9 \times 0,92 = 0,828 \text{ m} = \mathbf{0,83 \text{ m.}}$$

El espaciamiento viene dado por la expresión:

$$E_r = 0,8 \times V_r = 0,8 \times 0,83 = 0,664 \text{ m.}$$

Ajustándolo a la sección del túnel: **$E_r = 0,69 \text{ m.}$**

El perímetro del recorte es de 23,61 m lo que significa que con un espaciamiento entre barrenos de 0,69 m., será necesario perforar 33 barrenos.

2.1.4 Cálculo del explosivo necesario para las voladuras de avance.

El cálculo del explosivo necesario para las voladuras de avance lo realizaremos bajo **dos hipótesis**, en la primera consideraremos que los barrenos se cargarán exclusivamente con explosivo gelatinoso, y en la segunda consideraremos que la carga de fondo se realizará con explosivo gelatinoso y la carga de columna con un agente explosivo seco a granel.

➤ **Primera Hipótesis: Carga con explosivo gelatinoso. Longitud de Pase: 2 m.**

- **Explosivo para el cuele.**

Cuando se dispara un barreno cargado contra uno o más vacíos la concentración lineal de carga se determina mediante la expresión:

$$Q_{Lk} = 0,55 (D_{\text{ejes}} - D/2) : (\text{sen } \alpha)^{3/2}$$

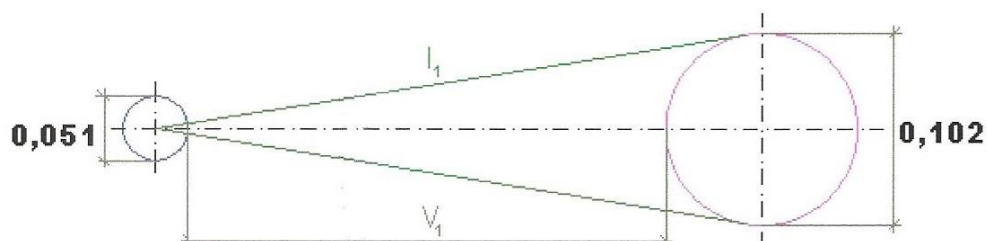


Ilustración 11 Explosivo para el cuele

Donde:

Q_{Lk} : Concentración lineal de carga.

D_{ejes} : Distancia entre ejes del barreno cargado y vacío.

D: Diámetro del barreno vacío.

α : Semiángulo de salida del barreno cargado.

En nuestro caso los parámetros conocidos son:

D_{ejes} : 0,1479 m.

D: 0,102 m.

α : 19,03° .

Con los valores anteriores obtenemos:

$$Q_{Lk} = 0,55 (0,1479 - 0,102/2) : (\text{sen } 19,03) ^{3/2} = \mathbf{0,286 \text{ kg/m.l.}}$$

El retacado de los barrenos del cuele se hace igual a 10 veces el diámetro de perforación, por lo que su valor será de 0,51 m., aproximadamente igual a 0,5 m. En función de lo anterior, y considerando una longitud de barreno de 2 m. **la longitud de carga será de 1,5 m.**, distribuida de la siguiente forma:

a) Longitud carga de fondo (L_{cf}) = 1,3 x Piedra media.

$$L_{cf} = 1,3 \times 0,226 = 0,2938 \text{ m} = \mathbf{0,29}$$

b) L. carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,29 = \mathbf{1,21 \text{ m.}}$

Para la carga de fondo utilizaremos cartuchos de explosivo gelatinoso de 40 mm. de diámetro, con un peso por cartucho de 0,420 kg y una longitud de 0,240 m., por lo que necesitaremos 1 cartucho.

Para la carga de columna utilizaremos cartuchos de 32 mm de diámetro, con una longitud de 0,200 m, y un peso de 0,238 kg., lo que supone 6 cartuchos y un peso de **1,43 kg.**

La **carga total** de los estos barrenos será de **1,85 kg.** y el consumo de explosivo en el cuele: 13 barrenos x 1,85 kg/barreno = **24,05 kg.**

CARGA TOTAL DEL CUELE: 24,05 kg.

BARRENO TIPO DEL CUELE

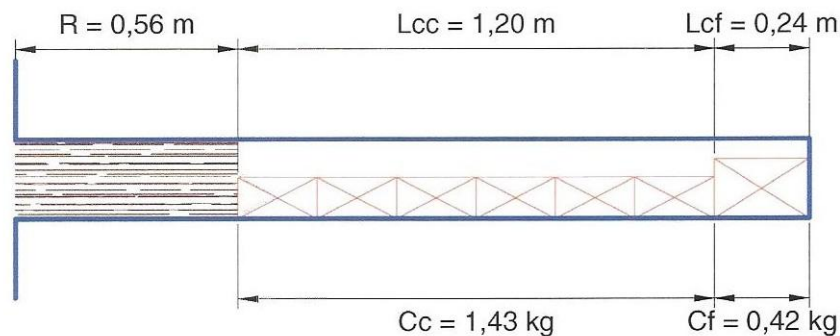


Ilustración 12 Barreno tipo cuele

- **Explosivo para la destroza.**

Partimos de que los barrenos tendrán una longitud de 2 m. y que utilizaremos para la carga de fondo explosivo gelatinoso de 40 mm. de diámetro, con un peso de 0,420 kg y una longitud de 0,240 m. y para la carga de columna cartuchos de 32 mm. de diámetro, con un peso de 0,238 kg y una longitud de 0.200 m.

- Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1/3 L_b = 0,33 \times 2 \text{ m.} = \mathbf{0,67 \text{ m.}}$
- Retacado: $10 \times d = 10 \times 0,051 \text{ m} = 0,51 \text{ m.} = \mathbf{0,5}$
- Long. carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,67 = \mathbf{0,83 \text{ m.}}$
- Número de barrenos = **79.**
- C.de Fondo (C_f)** = 0,67 m.: $0,240 \text{ m/cartucho} = 2,79 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} \times 0,420 \text{ kg/cart.} = \mathbf{1,26 \text{ kg.}}$
- C.de Columna (C_c)** = 0,83 m.: $0,200 \text{ m/cartucho} = 4,15 \text{ cartuchos} = 4 \text{ cartuchos} \times 0,238 \text{ kg/cart.} = \mathbf{0,95 \text{ kg.}}$
- Carga Total/barreno** = $1,26 \text{ kg.} + 0,95 \text{ kg} = \mathbf{2,21 \text{ kg.}}$

CARGA TOTAL DESTROZA: 79 barrenos x 2,21 kg/b. = **174,59 kg.**

BARRENO TIPO DESTROZA

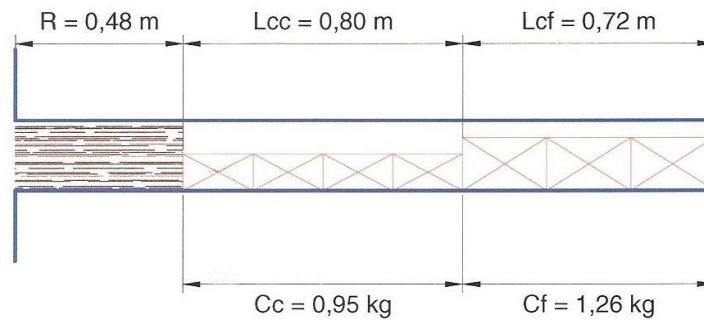


Ilustración 13 Barreno tipo destroza

- **Explosivo para la zapatera.**

Utilizamos el mismo tipo de explosivo que para la destroza, y cargaremos los barrenos de la misma manera, por consiguiente tendremos:

- Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1/3 L_b = 0,33 \times 2 \text{ m.} = \mathbf{0,67 \text{ m.}}$
- Retacado: $10 \times d = 10 \times 0,051 \text{ m} = 0,51 \text{ m.} = \mathbf{0,5}$
- Long. carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,67 = \mathbf{0,83 \text{ m.}}$
- Número de barrenos = **19.**
- C.de Fondo (C_f)** = $0,67 \text{ m.}: 0,240 \text{ m/cartucho} = 2,79 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} \times 0,420 \text{ kg/cart.} = \mathbf{1,26 \text{ kg.}}$
- C.de Columna (C_c)** = $0,83 \text{ m.}: 0,200 \text{ m/cartucho} = 4,15 \text{ cartuchos} = 4 \text{ cartuchos} \times 0,238 \text{ kg/cart.} = \mathbf{0,95 \text{ kg.}}$
- Carga Total/barreno** = $1,26 \text{ kg.} + 0,95 \text{ kg} = \mathbf{2,21 \text{ kg.}}$

CARGA TOTAL ZAPATERAS: 19 barrenos x 2,21 kg/b. = **41,99 kg.**

BARRENO TIPO ZAPATERA

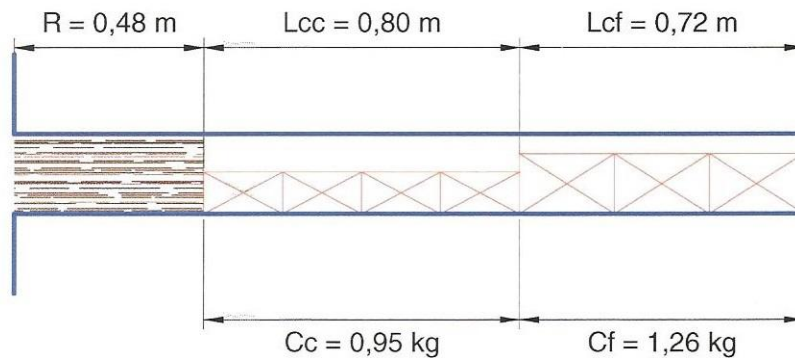


Ilustración 14 Barreno tipo zapatera

- **Explosivo para el Recorte**

Para los barrenos de recorte se utilizará como Carga de Fondo 1 cartucho de 32 mm. de diámetro y como carga de columna cordón detonante de 100 g/m.l.

- Carga de fondo: 1 cartucho x 0,238 Kg/cartucho = **0,238 kg.**
- Carga de columna: 2 m x 0,100 Kg/m.l. = **0,200 kg.**
- Carga total/barreno = 0,238 Kg + 0,200 Kg = **0,438 kg.**
- Número de barrenos = **33.**

CARGA TOTAL DEL RECORTE (sin cordón): 33 b. x 0,238 Kg/b = 7,85 kg.

BARRENO TIPO RECORTE

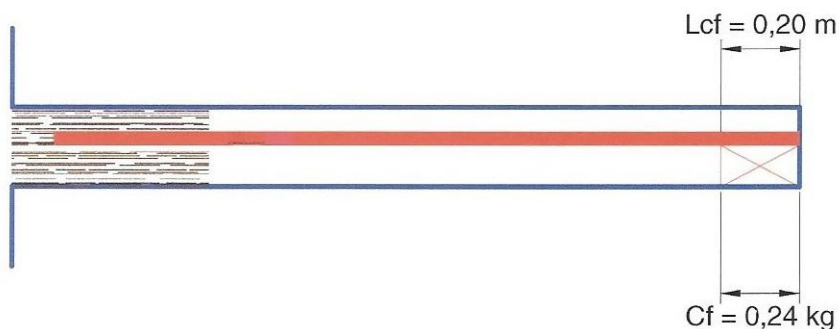


Ilustración 15 Barreno tipo recorte

En consecuencia con lo calculado, en la tabla siguiente se refleja el consumo de explosivos **para cada voladura de avance** con un pase de **2 m.**

CONSUMO DE EXPLOSIVO/VOLADURA DE AVANCE. PARA BARRENOS DE LONGITUD 2 m Primera Hipótesis (Solo se utiliza explosivo gelatinoso)			
Secciones.	N° de Barrenos.	Kg/barreno.	kg. Exp./sección.
CUELE.	13	1,85	24,05
DESTROZA.	79	2,21	174,59
ZAPATERAS.	19	2,21	41,99
RECORTE.	33	0,238	7,85
TOTAL Kg. DE EXPLOSIVOS.			248,48
DETONADORES (Unidades).			144
CORDÓN DETONANTE (Metros).			66

2-1 Consumo explosivo avance

Teniendo en cuenta que por cada voladura se arrancarán $175,02 \text{ m}^3$ la carga específica será de:

$$Q_e (\text{kg/m}^3) = 248,48 \text{ kg} / 175,02 \text{ m}^3 = \mathbf{1,42}.$$

Suponiendo que el avance con perforación y voladura se realice en 1.349 m de todo el túnel, será necesario realizar 675 voladuras.

➤ **Segunda Hipótesis: Carga con explosivo gelatinoso como carga de fondo y agente explosivo seco como carga de columna. Pase 2 m**

En este caso todos los barrenos, a excepción de los de recorte, se cargarán en fondo con explosivo gelatinoso y en columna con agente explosivo seco a granel.

- **Explosivo para el cuele.**

Considerando una longitud de barreno de 2 m. y un retacado de 0,5 m. **la longitud de carga será de 1,5 m.**, distribuida de la siguiente forma:

a) Longitud carga de fondo (L_{cf}) = 1,3 x Piedra media.

$$L_d = 1,3 \times 0,226 = 0,294 \text{ m} = \mathbf{0,29 \text{ m}}$$

b) L. carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,29 = \mathbf{1,21 \text{ m}}$.

Para la carga de fondo utilizaremos cartuchos de explosivo gelatinoso de 40 mm. de diámetro y dado que estos cartuchos tienen un peso de 0,420 kg y una longitud de 0,240 m., necesitaremos 1 cartucho, lo que supone un peso de **0,420 kg.**

Para la carga de columna utilizaremos agente explosivo seco granel ($d = 0,8 \text{ g/cm}^3$), calculamos a continuación la cantidad de agente explosivo seco que necesitamos por metro lineal:

$$\text{Volumen de 1 m.l. : } \pi \times r^2 \times 100 \text{ cm} = 3,14 \times (2,55)^2 \times 100 \text{ cm} = 2.042,82 \text{ cm}^3$$

$$M = d \times V = 0,8 \text{ g/cm}^3 \times 2.042,82 \text{ cm}^3 = 1.634,26 \text{ g/m.l} = \mathbf{1.635 \text{ g/m.l.}}$$

El agente explosivo seco cuando se carga con de manera mecánica se compacta, por lo que la cantidad teórica calculada debe sobredimensionarse, al menos, un 10 %, por lo que la cantidad real que cabe en 1 m.l. sería:

$$M = 1.635 \text{ g/m.l.} \times 1,1 = 1.798,5 \text{ g/m.l.} = \mathbf{1,799 \text{ kg/m.l.}} = \mathbf{1,8 \text{ kg/m.l}}$$

Como la longitud de la carga de columna es de 1,26 m. necesitaremos:

$$1,26 \text{ m/barreno.} \times 1,8 \text{ kg/m.l.} = \mathbf{2,27 \text{ kg/barreno.}}$$

La carga de estos barrenos será:

$$C_B = C_F + C_c = 0,420 \text{ kg. Explosivo gelatinoso} + 2,27 \text{ kg. Agente explosivo seco} = \mathbf{2,69 \text{ kg.}}$$

$$\mathbf{CARGA TOTAL DEL CUELE: 13 barrenos \times 2,69 \text{ kg/barreno: } \mathbf{34,97 \text{ kg/b.}}$$

- **Explosivo para la destroza.**

Partimos de que los barrenos tendrán una longitud de 2 m. y que utilizaremos para la carga de fondo explosivo gelatinoso de 40 mm. de diámetro, con un peso de 0,420 kg y una longitud de 0,240 m. y para la carga de columna agente explosivo seco a granel.

a) Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1/3 L_b = 0,33 \times 2 \text{ m.} = \mathbf{0,67 \text{ m.}}$

b) Retacado: $10 \times d = 10 \times 0,051 \text{ m} = 0,51 = \mathbf{0,5 \text{ m.}}$

c) Long. carga de columna: $L_{cc} = L_b - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,67 = \mathbf{0,83 \text{ m.}}$

d) Número de barrenos = 79.

e) **C.de Fondo (C_F)** = 0,67 m.: $0,240 \text{ m/cartucho} = 2,79 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} \times 0,420 \text{ kg/cart.} = \mathbf{1,26 \text{ kg.}}$

f) **C.de Columna (C_c)** = 0,83 m. $\times 1,8 \text{ kg/m.l} = \mathbf{1,49 \text{ kg.}}$

g) **Carga Total/barreno** = $1,26 \text{ kg.} + 1,49 \text{ kg} = \mathbf{2,75 \text{ kg.}}$

$$\mathbf{CARGA TOTAL DESTROZA: 79 barrenos \times 2,75 \text{ kg/b.} = \mathbf{217,25 \text{ kg.}}$$

- **Explosivo para la zapatera.**

Utilizamos el mismo tipo de explosivo que para la destroza, y cargaremos los barrenos de la misma manera, por consiguiente tendremos:

- Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1/3 L_b = 0,33 \times 2m. = 0,67 m.$
- Retacado: $10 \times d = 10 \times 0,051 m = 0,51 = 0,5 m.$
- Long. carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 2 - 0,5 - 0,67 = 0,83 m.$
- Número de barrenos = **79.**
- C.de Fondo (C_F)** = $0,67 m.: 0,240 m/\text{cartucho} = 2,79 \text{ cartuchos} = 3 \text{ cartuchos} \times 0,420 \text{ kg}/\text{cart.} = 1,26 \text{ kg.}$
- C.de Columna (C_c)** = $0,83 m. \times 1,8 \text{ kg}/\text{m.l} = 1,49 \text{ kg.}$
- Carga Total/barreno** = $1,26 \text{ kg.} + 1,49 \text{ kg} = 2,75 \text{ kg.}$

CARGA TOTAL ZAPATERAS: $19 \text{ barrenos} \times 2,75 \text{ kg}/\text{b.} = 52,25 \text{ kg.}$

- **Explosivo para el contorno (Recorte)**

Para los barrenos de recorte se utilizará como Carga de Fondo 1 cartucho de 32 mm. de diámetro y como carga de columna cordón detonante de 100 g/m.l.

- Carga de fondo:** $1 \text{ cartucho} \times 0,238 \text{ kg}/\text{cartucho} = 0,238 \text{ kg.}$
- Carga de columna: $2 m \times 0,100 \text{ kg}/\text{m.l.} = 0,200 \text{ kg.}$
- Carga total/barreno = $0,238 \text{ kg} + 0,200 \text{ kg} = 0,438 \text{ kg.}$
- Número de barrenos = **33.**

CARGA TOTAL DEL CONTORNO: $33 \text{ b.} \times 0,238 \text{ kg}/\text{b} = 7,85 \text{ kg.}$

En consecuencia con lo calculado, en la tabla siguiente se refleja el consumo de explosivos **para cada voladura de avance** con pases de 2 m.

CONSUMO DE EXPLOSIVO/VOLADURA DE AVANCE.				
PARA BARRENOS DE LONGITUD 2 m				
Segunda Hipótesis (Explosivo gelatinoso+agente explosivo seco)				
Secciones.	N° de Barrenos	Kg/barreno.		kg. Exp./sección
		G.2ECO	Nagolita.	
CUELE.	13	0,420	2,27	$(5,46 + 29,51) = 34,97$
DESTROZA.	79	1,26	1,49	$(99,54 + 117,71) = 217,25$

ZAPATERAS.	19	1,26	1,49	(23,94+ 28,31) = 52,25
RECORTE.	33	0,238		(7,85 + 0) = 7,85
TOTAL kg. DE EXPLOSIVOS.				(136,79 + 175,53) = 312,32
DETONADORES (Unidades).				144
CORDÓN DETONANTE (Metros).				66

2-2 Consumo explosivos avance 2ª hipótesis

Teniendo en cuenta que por cada voladura se arrancarán 175,02 m³ la **carga específica** será de:

$$Q_e \text{ (kg/m}^3\text{)} = 312,32/175,02 \text{ m}^3 = \mathbf{1,78}$$

Suponiendo que el avance con perforación y voladura se realice en 1.349 m de todo el túnel, será necesario realizar 675 voladuras.

2.1.5 Esquema de perforación y secuencia de encendido.

Con los datos obtenidos anteriormente, ajustados a la sección a volar, se obtiene el esquema de perforación y la secuencia de encendido que se representan en los planos 8. Los detonadores a utilizar podrán ser Eléctricos o No Eléctricos, en caso de utilizar eléctricos serán de Alta Insensibilidad.

2.2 Voladuras de destroza.

2.2.1 Perforación.

Las voladuras de destroza se perforarán con jumbo y en consecuencia los barrenos serán horizontales. Las características geométricas de las voladuras de destroza serán:

- Diámetro de perforación: 51 mm.
- Altura de la destroza: 4,11 m.
- Anchura de la destroza: 15,28 m.
- Longitud de perforación: 3 m.

2.2.2 Longitud de pase.

La longitud de pase se fija en 3 m, ya que no conviene desde el punto de vista de la estabilidad, realizar avances excesivos.

2.2.3 Cálculo de los parámetros de la voladura.

Cuando se perforan barrenos horizontales en destroza el espaciamiento entre los mismos debe ser:

$$S = 3 \times (L \times D)^{0,5} = 3 \times (3 \text{ m.} \times 0,051)^{0,5} = 1,17\text{m.}$$

Ajustándolo a la sección del túnel **S = 1,18 m.**

La piedra la determinamos por la relación $S = K \times B$. Al tratarse de rocas de tipo medio consideramos un valor de $K = 1,2$, en consecuencia la piedra será:

$$B_{zp} = 1,17/1,2 = 0,98 \text{ m.}$$

Ajustándolo a la sección del túnel **B_{zp} = 1,03**

El retacado de los barrenos lo consideramos de **0,7 m.**

En consecuencia con lo anterior las **voladuras de la destroza quedarían definidas por 4 filas con 14 barrenos por fila.**

2.2.4 Cálculo del explosivo necesario para las voladuras de destroza.

➤ **Primera Hipótesis: Carga explosivo gelatinoso.**

a) Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1,25 \times B_{zp}$

$$L_{cf} = 1,25 \times 0,98 = \mathbf{1,23 \text{ m.}}$$

b) Longitud carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 3 - 0,7 - 1,23 = \mathbf{1,07 \text{ m.}}$

Para la carga de fondo utilizaremos cartuchos de 40 mm. por lo que necesitaremos 5 cartuchos, que suponen un peso de **2,10 kg.** Para la carga de columna utilizaremos 5 cartuchos de 32 mm. de diámetro, lo que supone un peso de **1,19 kg.** La carga total de estos barrenos será de **3,29 kg.**

La longitud total a arrancar mediante perforación y voladura será de unos **1.349 m.**, por lo que será necesario realizar **450 voladuras de destroza**, 225 en cada boca.

En consecuencia con lo calculado en la tabla siguiente se refleja el consumo previsto de explosivo para cada voladura de destroza.

CONSUMO DE EXPLOSIVO/VOLADURA DE DESTROZA.		
Primera Hipótesis (Solo se utiliza explosivo gelatinoso)		
N° de Barrenos.	kg/barreno.	kg. Exp./Voladura.
56	3,29	184,24
DETONADORES (Unidades).		56

$$Q_e \text{ (kg/m}^3\text{)} - 184,24 \text{ kg}/188,40 \text{ m}^3 = \mathbf{0,98.}$$

2-3 Consumo explosivos destroza 1ª hipótesis

➤ Segunda Hipótesis: Carga con Goma 2 ECO y Nagolita.

a) Longitud carga de fondo (L_{cf}) = $1,25 \times B_{zp}$

$$L_{cf} = 1,25 \times 0,98 = \mathbf{1,23 \text{ m.}}$$

b) Longitud carga de columna: $L_{cc} = L_B - T - L_{cf} = 3 - 0,7 - 1,23 = \mathbf{1,07 \text{ m.}}$

Para la carga de fondo utilizaremos cartuchos de 40 mm. por lo que necesitaremos 5 cartuchos, que suponen un peso de **2,1 kg.**

Si utilizamos Nagolita para la carga de columna necesitamos 1,8 kg/m.l. lo que significa **1,98 kg/barreno.**

La carga total del barreno sería de 2,1 kg. + 1,98 kg = **4,08 kg.**

Para un avance de 3 m el consumo total de explosivo en la destroza será de: 4 filas x 14 barrenos/fila x 4,08 kg/barreno = **228,48 kg.**

CONSUMO DE EXPLOSIVO/VOLADURA DE DESTROZA.			
Segunda Hipótesis (Explosivo gelatinoso+ Agente explosivo seco)			
N° de Barrenos	kg/barreno.		kg. Explosivo/voladura
	EX.GEL.	A.E.SECO.	
56	2,10	1,98	(117,60+110,88)= 228,48
DETONADORES (Unidades).			56
$Q_e \text{ (kg/m}^3\text{)} = 228,48 \text{ kg}/188,40 \text{ m}^3 = \mathbf{1,21.}$			

2-4 Consumo explosivo destroza 2ª hipótesis

2.2.5 Esquema de perforación y secuencia de encendido.

Con los datos obtenidos anteriormente, ajustados a la sección a volar, se obtiene el esquema de perforación y la secuencia de encendido que se representan en el plano 8 Cálculo de Explosor.

En caso de utilizarse detonadores eléctricos serán del tipo Altamente Insensibles (AI), que tienen las siguientes características:

- Corriente de encendido: 25 A.
- Resistencia de puente: 0,05 Ω .
- Longitud de los cables del detonado r: 3 m.
- Resistencia de los cables del detonador: 0,065 Ω /m.l.

En el caso más desfavorable el disparo se realizará a 450 m del frente cuando exista curva que nos proteja de las proyecciones, y a 500 m del frente si nos encontramos en línea recta. El caso más desfavorable, cuando nos encontramos en línea recta con el frente, la longitud de está será de 500 m y tendrá una resistencia de 0,03 Ω /m.l.

La resistencia del circuito eléctrico (conexión en serie) formada por 144 detonadores y la línea de tiro será:

$$R_T = R_D + R_{LT} = 144 \times (0,05 + 2 \times 3 \times 0,065) \Omega + 0,03 \Omega /m.l. \times 2 \times 500 m.l. = 63,36 \Omega$$

$$+ 30,00 \Omega = \mathbf{93,36 \Omega}$$

En consecuencia el explosor a utilizar debe proporcionar un voltaje teórico de:

$$V_T = I \times R_T = 25 A \times 93,36 \Omega = \mathbf{2.334 v.}$$

Para prever posibles derivaciones de corriente el voltaje teórico debe sobredimensionarse en un 25%, por lo que el voltaje real a suministrar por el explosor será:

$$V_R = 1,25 \times 2.334 v = 2.915,5 = \mathbf{2.918 v.}$$

Este voltaje puede conseguirse con un explosor tipo ZEB/CU 400/HU 160, capaz de suministrar 3.000 v.

3 Número de voladuras y consumo de explosivos por voladura.

El consumo previsto de explosivos se realiza en función de dos hipótesis, en la primera solo se utiliza explosivo gelatinoso y en la segunda se utilizará explosivo gelatinoso como carga de fondo y agente explosivo seco a granel como carga de columna. En las tablas siguientes se muestran el número de voladuras a realizar y los consumos previstos de explosivo en cada una de ellas.

VOLADURAS A REALIZAR EN EL TÚNEL DE “EL REGAJAL”				
Secciones	Sección tipo	Excavación	Longitud total	Número de voladuras
Avance	ST-I	Pase de excavación: 2 m	1.349 m	675
Destroza	ST-I	Pase de excavación: 3 m	1.349 m	450

3-1 Voladuras a realizar

CONSUMO DE EXPLOSIVOS : PRIMERA HIPÓTESIS (Solo se utiliza explosivo gelatinoso)			
N° voladuras.	Kg. Explosivos.	Uds. Detonadores.	M.L. Cordón.
VOLADURAS DE AVANCE EN EL TÚNEL DE “EL REGAJAL” .			
675	167.724	97.200	44.550
VOLADURAS DE DESTROZA EN EL TÚNEL DE “EL REGAJAL” .			
450	82.908	25.200	
TOTAL	250.632	122.400	44.550

3-2 Consumo explosivos 1ª hipótesis

CONSUMO DE EXPLOSIVOS : SEGUNDA HIPÓTESIS (Se utiliza explosivo gelatinoso y)			
N° voladuras.	Kg. Explosivos.	Uds.	M.L. Cordón.
VOLADURAS DE AVANCE EN EL TÚNEL DE “EL REGAJAL” .			
	E.G	A.G.S	

675	92.333	118.483	97.200	44.550
	210.816			
VOLADURAS DE DESTROZA EN EL TÚNEL DE “EL REGAJAL” .				
450	E.G	A.G.S	25.200	
	52.920	49.896		
		102.816		
TOTAL	E.G	A.G.S	122.400	44.550
	145.253	168.379		
	313.632			

3-3 Consumo explosivos 2ª hipótesis

4 Consumo total de explosivos.

El explosivo total para la construcción del túnel se obtiene en base a los cálculos realizados, sobredimensionando los mismos en un 20% y redondeando el total al contenido comercial de las cajas de explosivos, cajas de detonadores y rollos de cordón detonante. En la tabla siguiente queda reflejado el consumo total de explosivos en función de las hipótesis realizadas.

CONSUMO TOTAL DE EXPLOSIVOS.			
CONCEPTO	UDS	HIPÓTESIS 1ª. (Explosivo gelatinoso)	HIPÓTESIS 2ª. (Explosivo gelatinoso y agente explosivo seco)
GOMA 2 ECO.	kg.	300.800	174.400
NAGOLITA.	kg.	—	202.100
CORDÓN DET.	M.L.	125.000	125.000

DETONADORES.	UDS.	146.900	146.900
CONECT. EZTL	UDS.	73.000	73.000

4-1 Consumo total de explosivos

5 ESTUDIO DE VIBRACIONES.

Aunque **sobre la vertical del túnel no existen estructuras o instalaciones que pudieran verse afectadas por las vibraciones producidas por voladuras**, este apartado se plantea con el objetivo de cuantificar los niveles de vibración que las mismas podrían ocasionar y las medidas a tomar en caso de ser necesario.

5.1 Características de las voladuras.

Se detalla a continuación los parámetros y características de una voladura tipo de avance realizada con explosivo gelatinoso como carga de fondo y agente explosivo seco a granel como carga de columna, que es la que mayor carga presenta:

Sección de excavación en avance	87,51 m ²
Longitud de perforación	2'00 m
Volumen teórico de excavación	175 m ³
Diámetro de perforación	51 mm
N° barrenos	144
Máximos cartuchos por barreno	3 Ø 40 mm
Máxima carga por barreno	2,75 kg
Retacado	0'50m
Explosivo	Explosivo gelatinoso y agente explosivo seco
Detonadores	Eléctricos Al
Carga total	312,32 kg
Carga específica	1,78 kg/m ³
Carga operante	33 kg

5-1 Parámetros y características voladura tipo

La **carga máxima instantánea**, es la carga operante y corresponde al máximo número de kilos de explosivo disparados en una misma unidad de tiempo. Esta es la carga que se considera a efectos vibratoriales. En este caso, la máxima carga operante corresponde a doce barrenos disparados con el mismo número y cargados con un total de **33 kg**.

5.2 Clasificación de las estructuras.

Desde el punto de vista de la sensibilidad a las vibraciones la Norma UNE 22.381- 93 clasifica a las estructuras en tres grupos:

- **GRUPO I:** Edificios o naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado ó metálicas.
- **GRUPO II:** Edificio de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico ó histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.
- **GRUPO III:** Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico ó histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

5.3 Criterio de daños.

El criterio de daños es determinado por la Norma UNE 22.381-93 en función de la frecuencia de la vibración y del valor de la vibración, aunque para frecuencias comprendidas entre 15 y 75 Hz se toma el valor del desplazamiento. En el cuadro siguiente se muestran los valores máximos admitidos para los tres Grupos.

GRUPOS	FRECUENCIAS PRINCIPALES (Hz)		
	2-15	15-75	>75
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)	Velocidad (mm/s)
I	20	0,212	100
II	9	0,095	45
III	4	0,042	20

5-2 Valores máximos de velocidad en función de vibración para cada grupo de edificios

5.4 Tipos de estudios a realizar.

El tipo de estudio a realizar para proteger a las estructuras frente a las vibraciones depende de la Carga Corregida y de la Distancia existente entre la voladura y la estructura a proteger.

La Carga Corregida se determina en función de la Carga Operante y de los Factores de Estructura (Fe) y de Roca (Fr), cuyos valores están tabulados y se muestran en los cuadros siguientes.

CLASE DE FORMACIÓN	VELOCIDAD SÍSMICA	FACTOR F_r
Dura	>4.000 m/sg	0'40
Media	2.000-4000 m/sg	1
Blanda	<2.000 m/sg	2'52

5-4 Factor F_r

GRUPO DE ESTRUCTURA	FACTOR F_e
I	0'28
II	1
III	3,57

5-3 Factor F_e

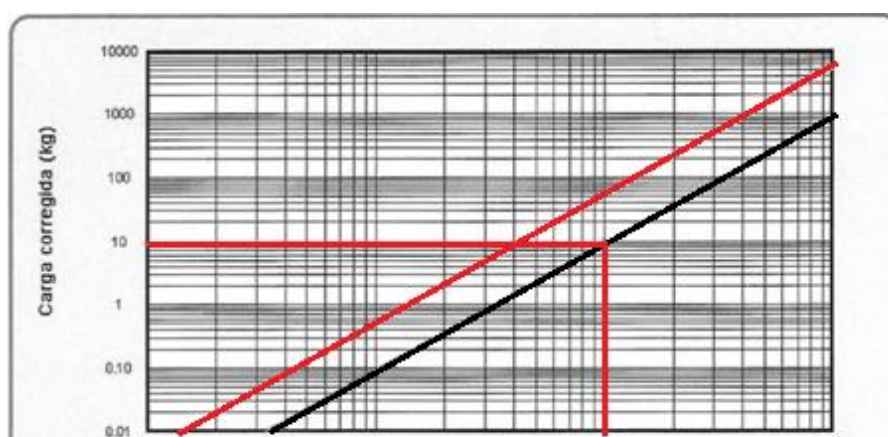
Con estos parámetros referidos, Carga Operante, Factor de Estructura y Factor de Roca, se determina la Carga Corregida (Q_c)

$$Q_c = Q \times F_e \times F_r$$

$$Q_c = 33 \times 0,28 \times 1,00$$

$$Q_c = 9,24 \text{ kg}$$

Con el valor de Q_c y la distancia existente entre la voladura y la estructura a proteger, entramos en el ábaco carga/distancia, que se muestra a continuación:



5-5 Ábaco cara/distancia

y observamos que para distancias, entre la voladura y la estructura a proteger, comprendidas entre 40 m y 110 m sería necesario realizar un **Control de Vibraciones** en cada voladura, y para distancias menores de 40 m, habría de realizarse un **Estudio Preliminar**, determinando las Cargas Operantes que se podrían utilizar en función de distancias inferiores a 40 m.

ANEXO IV VENTILACIÓN

1 Introducción.

El presente anexo tiene por objeto calcular el caudal de aire requerido para satisfacer las necesidades de ventilación durante la construcción del túnel, así como, determinar la potencia del ventilador a instalar en cada una de las bocas.

Los cálculos que se realizan en los epígrafes siguientes están orientados fundamentalmente a determinar la cantidad de aire necesaria para la correcta respiración de las personas, refrigeración de los equipos instalados en el interior del túnel y mantener las concentraciones de polvo y gases nocivos (CO, CO₂ , NO_x, SH₂ , SO₂) por debajo de los límites exigidos por el R.G.N.B.S.M., y desarrollados por la I.T.C. 04.7.02 : Ventilación y Desagüe” en su “ Apartado 1 : Concentración límite de gases.”

En la tabla siguiente se muestran las concentraciones volumétricas admisibles para los gases considerados, en jornadas de ocho horas y en periodos cortos.

CONCENTRACIÓN LÍMITE DE GASES NOCIVOS.		
Jornada de 8 Horas.		Periodos cortos.
GASES.	Concentración (p.p.m.)	Concentración (p.p.m.)
M. de Carbono (CO).	50	100
D. de Carbono (CO ₂).	5.000	12.500
O. de Nitrógeno (NO _x).	10	25
S. de Hidrógeno (SH ₂).	10	50
D. de Azufre (SO ₂).	5	10

1-1 Concentración límite de gases nocivos

2 Datos de partida.

En este caso el túnel se atacará por dos bocas (Aranjuez y Ontígola) y cada una de ellas tendrá las siguientes características:

- Longitud: 1.040 m.
- Sección media de la excavación (Avance + Destroza): 156 m²

Dadas las rocas existentes (Arcillas, Glauberita, Yesos, etc.) se ha considerado que la excavación podrá realizarse tanto con medios mecánicos, como mediante perforación y voladura.

El número máximo de personas que trabajarán en el frente de avance será de 10.

La **potencia eléctrica total** de la maquinaria a utilizar será de **1.594 Kw**, correspondientes a:

- 1 Minador: 400 Kw.
- 1 Pala cargadora: 134 Kw.
- 1 Retroexcavadora: 130 Kw.
- 1 Elevador telescópico: 75 Kw.
- Dúmperes x 200 Kw/ud. = 600 Kw.
- 1 Robot Gunitador: 55 Kw.
- 1 Camión hormigonera: 200 Kw.

Para los cálculos a realizar solo se considerará la potencia correspondiente a la maquinaria que esté presente en el frente en el momento más desfavorable.

Para la conducción del aire hasta el frente de avance se utilizará tubería flexible lisa P-R de 2.200 mm de diámetro.

La velocidad de retorno de la corriente de aire se fija en 0,5 m/s.

3 Cálculo del caudal de aire necesario.

3.1 Caudal de aire para la respiración de las personas.

Según la I.T.C. 04.07.01 para atender las necesidades de aire de las personas se necesita un caudal de aire de 40 l/s., por lo que considerando que en el caso más desfavorable en interior del túnel se encontrarán 10 personas, el caudal de aire necesario sería de:

$$Q_1 = 10 \text{ personas} \times 40 \text{ l/s} = 400 \text{ l/s} = \mathbf{0,4 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

3.2 Caudal de aire para la mantener la velocidad de la corriente de retorno.

Se establece bajo la premisa de mantener a lo largo del túnel, en ambas bocas y durante la fase de avance, una **velocidad de la corriente de retorno** de **0,5 m/s**, que consideramos suficiente para provocar la dilución y arrastre de los gases producidos por las voladuras o por los motores de combustión interna.

$$Q = S \times V$$

Donde:

- Q (m³/s.) = Caudal de aire necesario.
- S (m²): Sección del túnel.
- V (m/s): Velocidad de la corriente de retorno.

Sustituyendo valores:

$$Q_2 = 156 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m/s} = \mathbf{78 \text{ m}^3/\text{s}}.$$

3.3 Caudal de aire para diluir los humos de las voladuras.

En caso de realizar voladuras el caudal necesario para diluir los gases (CO, CO₂ y NO) hasta los niveles permitidos por la legislación vigente se determina por la expresión:

$$Q_3 = 0,166 \times E.$$

Donde E representa el número de kilos de explosivos consumido en la voladura, que en nuestro caso es de 312 Kg, por lo tanto:

$$Q_3 = 0,166 \times 312 = 51,7 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3.4 Caudal de aire necesario para diluir los gases de escape de los motores de combustión interna.

Este caudal se puede calcular en función del instante en el que mayor número de máquinas con motores diesel estén trabajando simultáneamente dentro del túnel, y aplicando un factor de corrección para tener en cuenta que las mismas no trabajan al 100% de su potencia real. El caso más desfavorable se producirá durante el desescombro, cuando pueden coincidir una pala cargadora y tres dúmperes, por lo que el caudal necesario, de acuerdo con la normativa para túneles, será:

$$Q_4 = 0,066 \times P_{KW}$$

$$P_{KW} = 0,6 \times (3 \times 200 + 134) = 440,4$$

$$Q_4 = 0,066 \times 440,4 = 29 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3.5 Caudal de aire para la eliminación del polvo.

La I.T.C. 04.8.01. exige que se pongan los medios necesarios para limitar las concentraciones de polvo en la atmósfera de trabajo. En nuestro caso se utilizará un sistema de ventilación mixto (soplante + aspirante). La aspirante tomará el aire contaminado del frente y lo hará pasar por un equipo de filtrado (TURBOFILTER) donde se producirá la decantación del polvo.

Al tratarse de rocas con bajo contenido en sílice la capacidad de la aspiración será de 0,4 m³/s/m² de sección.

$$Q_5 = 0,4 \times 74,38 = 29,7 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Para concentraciones relativamente bajas de polvo la velocidad de filtrado ha de ser del orden de 135 m³/h/m² por lo que para ese caudal de aire se necesitan del orden de 810 m² de superficie filtrante. A partir de la documentación proporcionada por los fabricantes se tiene que la depresión necesaria para fijar ese caudal a través de los filtros es de 750 a 1.750 Pa. El punto de funcionamiento del ventilador aspirante vendrá fijado por **29,7 m³/s** y **1.750 Pa** que se consigue con un ventilador contrarrotativo de 2 x 87 Kw.

3.6 Caudal de para la disipación del calor.

La I.T.C. 04.7.05. exige unas condiciones ambientales que se definen por una temperatura equivalente máxima de 30° C. Si la humedad relativa del aire está entre el 50% y el 70% y la velocidad del aire entre 0,25 y 0,50 m/s la exigencia se traduce en una temperatura seca máxima de 33° C.

La producción de calor se puede estimar como suma de diferentes contribuciones, a saber:

- **Calor que puede desprender el macizo rocoso.**

$$W_1 = 0,20 \text{ W/m}^2 \times \text{°C}$$

Consideramos: Temperatura media del macizo rocoso 22° C. Temperatura media del aire en el túnel a lo largo de su ejecución 16.5° (Entra con una mínima de 0° C y sale con una máxima de 33° C). Superficie de las paredes del túnel en el caso más desfavorable (1.040 x 47 = 48.880 m²)

$$W_1 = 0,20 \times 10^3 \times 48.880 = 9,77 \text{ kW}$$

- **Calor desprendido por el personal (0,25 kw/persona).**

$$W_2 = 0,25 \times 10 = 2,5 \text{ KW.}$$

- **Calor desprendido por los equipos eléctricos (minador) : 0.1 Kw de energía calorífica por cada kW eléctrico instalado, por lo que en nuestro caso :**

$$W_3 = 0,1 \times 400 = 40 \text{ KW.}$$

- **Calor desprendido por los equipos diesel : 0.90 Kw de energía calorífica por cada kW eléctrico instalado, por lo que en nuestro caso y considerando una pala y tres dúmpers sería:**

$$W_4 = 0,9 \times 734 = 660,6 \text{ KW.}$$

Por tanto el calor producido en el túnel y que se incorpora al aire es:

$$W = 9,77 + 2,5 + 40 + 660,6 = 712,87 \text{ kW.}$$

El caudal de aire capaz de evacuar esta cantidad de calor incrementando su temperatura en 33° C es:

$$Q_6 = 712,87 / 1,2 \times 33 \times 1,39 = 13 \text{ m}^3/\text{s.}$$

En función de lo expuesto observamos que, todos los caudales requeridos son inferiores al necesario para mantener una velocidad de la corriente de aire igual a 0,5 m/s. que se cifra en **78 m³/s**, luego en principio este será el caudal que debe proporcionar el ventilador soplante que se instale en las bocas del túnel.

4 Determinación de la potencia del ventilador.

Durante el recorrido del aire por el túnel y por la tubería y debido al rozamiento con las paredes y a las fugas se producen pérdidas en el caudal de aire transportado. Las citadas pérdidas deben ser consideradas para poder determinar el caudal real que debe suministrar el ventilador y la potencia del mismo.

Como datos de partida se han tomado el diámetro de la tubería de ventilación a instalar (2.200 mm.) y el caudal necesario (78 m³ /s) para la ventilación del túnel.

- **Velocidad del aire en la tubería.**

La velocidad de la corriente de aire en el interior del conducto de ventilación viene determinada por la expresión:

$$V_F = Q/S = 78/3,14 \times (1,1)^2 = 20,5 \text{ m/s.}$$

- **Presión dinámica.**

La presión dinámica viene determinada por la expresión:

$$P_F = \gamma \times (V_F)^2 / 2g.$$

Donde γ es el peso específico del aire en N/m^3 ($12 \text{ N/m}^3 = 1,2 \text{ Kg/m}^3$).

$$P_F = 12 \times (20,5)^2 / (2 \times 9,8) = 257,3 \text{ Pa}$$

- **Caudal fugado.**

Si consideramos una instalación de tipo medio con un coeficiente de fugas de 0,0003, las pérdidas de caudal o caudal fugado serían:

$$Q_F = 6 \times (257,3)^{0,5} \times \Delta L = 0,0003 \times 11,5 \times 1.040 \text{ m.} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Caudal en el ventilador del portal del túnel.**

El caudal que debe suministrar el ventilador situado en el portal del túnel será:

$$Q_v = 78 \text{ m}^3/\text{s} + 5 \text{ m}^3/\text{s} = 83 \text{ m}^3/\text{s}.$$

- **Pérdidas de carga.**

Con el fin de disminuir al máximo la pérdida de carga en la tubería, utilizaremos tubería lisa ($\lambda = 0,024$) de 2.200 mm. de diámetro, que tiene una resistencia lineal de $0,20 \mu/\text{m}$.

La resistencia de la tubería será:

$$R_T = 0,20 \mu/\text{m} \times 1.040 \text{ m} = 208 \mu = 0,208 \text{ k}\mu$$

y la pérdida de carga en la misma :

$$\Delta X = R_T \times Q^2 = 0,208 \text{ k}\mu \times (83)^2 = 1.433 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga total (Presión a suministrar por el ventilador) será:

$$AH = P_F + \Delta X = 257,3 + 1.433 = 169,03 \text{ mm.c.a.} = 1.690,3 \text{ Pa}$$

El punto de funcionamiento del ventilador queda definido por :

c) $Q_v = 83 \text{ m}^3/\text{s}.$

d) $AH = 1.690,3 \text{ Pa}$

- **Potencia del ventilador.**

La potencia aerodinámica a suministrar por el ventilador se determina mediante la

expresión:

$$P = Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times AH \text{ (mm.c.a.)} / 101,9 = 83 \times 169,03 / 101,9 = \mathbf{137 \text{ Kw.}}$$

El ventilador que se elija estará provisto de variador de frecuencia, para poder adaptar el caudal de aire en cada momento.

ANEXO V AIRE COMPRIMIDO

1 Introducción.

En este Anexo se detallan los cálculos seguidos para determinar los caudales de aire comprimido y agua, necesarios para la construcción de las dos bocas por las que se atacará el Túnel de El Regajal. Posteriormente se procederá a dimensionar las infraestructuras que conformarán las redes de aire comprimido y agua.

2 Red de aire comprimido.

En ambas bocas la red de aire comprimido estará compuesta por:

- Compresor.
- Calderín
- Tubería de conducción del aire.

2.1 Consumo previsto de aire comprimido.

Maquinaria que requiere aire comprimido:

- Robot de gunitado = 18 m³/min
- Dos llaves de impacto (1,05 m³/min) = 2,1 m³/min
- Otros = 5 m³/min
- Pérdidas (10% aprox) = 3 m³/min

2.2 Determinación del compresor y de la tubería.

Partimos de una presión de trabajo de 7 bar.

- **Caudal de trabajo:**

Suma de los caudales de todas las máquinas multiplicado por el coeficiente de simultaneidad.

$$Q = \sum Q_i \times K = (18 + 2,1 + 5 + 3) \times 0,7 = 19,7 \text{ m}^3/\text{min}$$

En ambas bocas (Aranjuez, Ontígola) se instalará un compresor de **21 m³/min**

- **Cálculo del diámetro de la tubería:**

Siendo:

D = Diámetro interior de la tubería en pulgadas

P = Presión inicial en bar

p = Pérdida de carga admitida en bar

Q = Caudal de aire a transportar en m³/min

L = Longitud de la tubería en m Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt[5]{\frac{0,008 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{P \cdot p}} = \sqrt[5]{\frac{0,008 \cdot 21^{1,85} \cdot 1600}{7.1}} = 3,48''$$

Se toma D=4" = 101,6mm

Los cálculos realizados son aplicables a las dos bocas del túnel ya que se va a realizar la mitad por cada una.

3 Desagüe.

No se tienen datos precisos sobre el volumen de agua que puede llegar a acumularse en el frente de avance, por lo que es necesario considerar una instalación de desagüe general.

En su conjunto la instalación estará compuesta por un equipo de bombas y las conducciones pertinentes, estando previsto realizar el bombeo en una sola etapa. Las aguas bombeadas serán tratadas en balsas de decantación antes de su incorporación a cauces públicos.

En principio se instalará una bomba centrífuga sumergible lo más próxima posible al frente de avance, creándose en las proximidades de aquel un pozo de aspiración con capacidad próxima a 1,5 m³.

Para el cálculo de la instalación se parte de los siguientes datos:

- Aportación estimada de agua: 7,2 m³/h.
- Longitud de bombeo 1100 m
- Diferencia de cotas: 24 m

➤ Cálculo de la instalación.

La evacuación de las aguas se hará a través de una tubería flexible de PVC con las siguientes características:

- Factor de fricción: $f = 290 \times 10^{-4}$ m/s.
- Velocidad máxima de diseño en tubería de impulsión: $V = 1,5$ m/s.
- Diámetro de la tubería de impulsión: $d = 76,2$ mm.
- Longitud de la tubería de impulsión: $L = 1525$ m.

Las pérdidas de carga primaria pueden estimarse por la expresión:

$$\Delta H = f L V^2 / 2 dg$$

$$\Delta H = 290 \times 10^{-4} \times 1100 \times 1,5^2 / 2 \times 0,0762 \times 9,81 = \mathbf{26,82 \text{ m.c.a.}}$$

La **altura manométrica** que debe vencer la bomba a instalar será de **26,82 m**.

➤ **Selección de la bomba**

Para atender incrementos imprevistos del caudal a bombear y aumentos de las pérdidas de carga de la instalación, se propone instalar una bomba centrífuga sumergible sobredimensionada un 50%, tanto en altura manométrica como en caudal. Por consiguiente la bomba a utilizar tendrá las siguientes características:

- **Altura manométrica:** $26,82 \times 1,5 = 40,23 \text{ m}$.
- **Caudal de desagüe:** $7,2 \text{ m}^3 / \text{h} \times 1,5 = 10,8 \text{ m}^3 / \text{h}$.

ANEXO VI ELECTRIFICACIÓN

1 Introducción.

El presente Anexo se estudia, diseña y describe la instalación eléctrica de obra, en alta y baja tensión, que abastecerá tanto las instalaciones en el interior del túnel como las instalaciones auxiliares exteriores.

Por ello se realiza el estudio y se definen las características de dicha instalación eléctrica, grupos generadores, centros de transformación, así como las líneas de alta y baja tensión; reflejando de forma explícita los diferentes elementos que integran las instalaciones con diseño y plano del esquema unifilar de la instalación, con los detalles de carácter general más relevantes que permitan realizar el montaje de las instalaciones eléctricas de obra, teniendo igualmente presente la seguridad de las personas, instalaciones y equipos, así como para la tramitación oficial de la obra en cuanto a la aprobación del proyecto y su autorización administrativa.

2 Reglamentos y normas.

Este Anexo se ha realizado de acuerdo con los siguientes Reglamentos y Normas:

- Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, aprobado por el Decreto 3275/1982 de 12 de Noviembre, B.O.E. nº288 de 1-12-1982.
- Instrucciones Técnicas Complementarias al Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, aprobado por Orden Ministerial de 18 de Octubre de 1984, B.O.E. nº256 de 25-10-1984.
- Normas Básicas de la edificación NBE-CPI-96 sobre Condiciones de Protección Contra Incendios.
- Ley de Calidad Ambiental, Decreto 741/1996 de 20 de Febrero. Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

3 Suministro eléctrico.

El suministro eléctrico de la instalación se llevará a cabo mediante tres grupos electrógenos (generadores) en cada boca del túnel, dos con una potencia individual de 500 kVA, y el tercero de 800 kVA, lo que supone una potencia total de 1800 kVA en cada boca. La potencia activa suministrada por el conjunto de los tres grupos será de aproximadamente 1600 kW. Las características generales de la corriente eléctrica de alimentación suministrada por los generadores será de: Tensión: 400 V y Frecuencia: 50 Hz.

4 Descripción de las instalaciones.

Las instalaciones a describir en el presente proyecto se pueden dividir en dos partes totalmente independientes: una de ellas correspondiente a la zona de trabajo denominada “Boca de Aranjuez” y otra correspondiente a la zona de trabajo “Boca de Ontígola”. Aunque las dos instalaciones son independientes, ambas van a ser prácticamente idénticas, por lo que el desarrollo detallado se realiza para la instalación de la “Boca de Aranjuez”, siendo todos los resultados aplicables para la instalación de la “Boca de Ontígola”.

4.1 Instalación de la “boca de Aranjuez”

La instalación a definir en el presente apartado tienen como punto de partida un equipo generador formado por tres grupos, dos de 500 kVA y uno de 800 kVA de potencia (total 1800 kVA ~ 1600 kW) que suministran una corriente a 400 V y 50 Hz. Desde el cuadro general de mando y protección situado a la salida del grupo de generadores partirán a 400 V:

- **Una línea que alimentará** un centro de transformación de 1400 kVA, con 0.42 kV de tensión de entrada (tensión de generación) y 0.6 kV de tensión de salida.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario del taller de mantenimiento situado en el exterior del túnel. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Tomas generales de fuerza situadas en el taller.
 - Alumbrado exterior.

- Alumbrado del taller.
 - Grupo de presión de agua.
 - 1 circuito de reserva.
 - Casetas de oficina, vestuarios y comedor.
 - Taller de mantenimiento mecánico.
 - Taller de mantenimiento eléctrico.
 - 1 toma de fuerza de 250 A para realizar pruebas de equipos.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de la zona de bombas. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Máquina de lavar.
 - Bombas.
 - Depósito de gasoil.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de la gunitadora para cuando ésta se encuentra en el exterior del túnel, para tareas de mantenimiento, limpieza, comprobación, etc. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Gunitadora.
 - 1 Toma general de fuerza de 16 A situadas en el propio cuadro,
 - 1 Toma general de fuerza de 32 A situadas en el propio cuadro.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de iluminación interior del túnel. Este cuadro secundario albergará los dispositivos de mando y protección de los circuitos de alimentación de:
 - Alumbrado interior del túnel.

- 1 Toma general de fuerza de 16 A situadas en el propio cuadro.
- 1 Toma general de fuerza de 32 A situadas en el propio cuadro.
- **Una línea de 420 V** que alimentará el cuadro secundario de los ventiladores del sistema de ventilación del túnel.

4.1.1 Centro de transformación de 1400 kva - 0.42/6 kv

En el Centro de Transformación de 1400 kVA y 0.42/6 kV se inicia una línea que alimentará otro centro de transformación seco, móvil, de 1400 kVA, que irá instalado en el interior del túnel. Este centro de transformación seco tendrá dos salidas: una de 1000 kVA de potencia a 1 kV de tensión, y otra de 400 kVA de potencia a 0.42 kV de tensión. Este Centro de Transformación Seco irá avanzando conforme avance la obra del túnel e irá alimentando a los siguientes circuitos:

➤ **Salida de 1000 kva - 1 kv**

Esta salida alimentará únicamente a la máquina rozadora.

➤ **Salida de 400 kVA - 0.42 kv**

En la salida del Centro de Transformación seco de 400 kVA y 0.42 kV se inician varias líneas que alimentarán:

- Una línea de 420 V que alimentará al Jumbo.
- Una línea de 420 V que alimentará a la gunitadora.
- Toma de fuerza de 63 A.
- 3 Tomas de fuerza de 32 A.
- 1 Toma de fuerza de 16 A (5p).
- 1 Toma de fuerza de 16 A (3p).

4.1.2 Previsión de cargas y descripción de las líneas.

➤ **Línea Cuadro Secundario Taller.**

La línea que alimenta el Cuadro Secundario del taller, situado en el exterior del túnel, tendrá una sección de Aluminio de 3x300 + 1x300 mm². Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado.

➤ **Línea de Tomas generales de fuerza situada en el taller.**

Esta línea será la encargada de alimentar dos cuadros de enchufes que disponen de dos tomas de 2x16 A + TT y de dos tomas de 4x32 A + TT. Estos cuadros están situados en el interior de la nave a una distancia aproximada de 30 metros del cuadro general del taller. La línea tendrá una sección de cobre de $4 \times 6 + 1 \times 6 \text{ mm}^2$. Serán cables multiconductores e irán instalados sobre bandeja perforada que discurrirá por los paramentos verticales de la nave. La protección se realizará mediante un interruptor diferencial de 4/63/0.3 A y un interruptor magnetotérmico de 4/63 A.

➤ **Línea de Alumbrado exterior.**

El alumbrado de la zona de trabajo exterior del túnel se realizará mediante proyectores de vapor de mercurio de 400 W de potencia. En total se instalarán 12 unidades separadas entre sí 20 metros. La más alejada del cuadro general del taller estará a una distancia de unos 200 metros. La línea de alimentación del alumbrado exterior de la instalación tendrá una sección de cobre de $4 \times 10 + 1 \times 10 \text{ mm}^2$. Serán cables multiconductores dispuestos en instalación enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 63 mm de diámetro exterior. La protección se realizará mediante un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A y un interruptor magnetotérmico de 4/40 A.

➤ **Línea de Alumbrado del taller.**

El alumbrado interior del taller se llevará a cabo mediante 4 proyectores de 250 W de potencia, estancos, estando el más alejado del cuadro general del taller a una distancia de 20 m. La línea que alimenta los puntos de luz correspondientes al alumbrado interior del taller tendrá una sección de cobre de $3 \times 2.5 + 1 \times 2.5 \text{ mm}^2$. Serán cables multiconductores e irán instalados sobre bandeja perforada que discurrirá por los paramentos verticales de la nave. La protección se realizará mediante un interruptor diferencial de 4/25/0.03 A y un interruptor magnetotérmico de 4/20 A.

➤ **Línea de Grupo de presión de agua.**

Para abastecer de agua al taller así como al resto de las instalaciones auxiliares exteriores del túnel, se dispondrá un grupo de presión de agua de una potencia de 5.5 kW. Este grupo estará situado en una caseta a unos 100 metros del cuadro general del taller. La línea que alimenta el grupo de presión de agua del taller tendrá una sección de cobre de $4 \times 10 + 1 \times 10 \text{ mm}^2$. Serán cables multiconductores dispuestos en instalación enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 63 mm de diámetro exterior. La protección se realizará mediante un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A y un interruptor magnetotérmico de 4/32 A.

➤ **Línea de Casetas de oficina, vestuarios y comedor.**

Como instalaciones auxiliares para los operarios, se dispondrá de tres casetas prefabricadas destinadas a oficina, vestuarios y comedor. Las tres casetas dispondrán de un cuadro independiente de mando y protección que albergará los dispositivos de protección de sus respectivos circuitos.

La caseta de oficina dispondrá de un equipo de aire acondicionado de 2 kW de potencia, un alumbrado mediante dos pantallas fluorescentes de 2x36 W, y de 4 tomas de corriente de 16 A. Los dispositivos de protección del cuadro de esta caseta serán: Un interruptor diferencial general de 2/40/0.03 A e interruptores magnetotérmicos para cada uno de los circuitos: 2/25 A para el aire acondicionado, 2/20 A para el alumbrado y 2/20 A para las tomas generales de fuerza.

La caseta de vestuarios dispondrá de dos equipos de aire acondicionado de 1 kW de potencia cada uno, un alumbrado mediante cuatro pantallas fluorescentes de 2x36 W (dos en el vestuario de los hombres, dos en el de las mujeres), y de 2 tomas de corriente de 16 A, una en cada vestuario. Los dispositivos de protección del cuadro de esta caseta serán: Un interruptor diferencial general de 2/40/0.03 A y sendos interruptores magnetotérmicos para cada uno de los circuitos: 2/25 A para el aire acondicionado, 2/20 A para el alumbrado y 2/20 A para las tomas generales de fuerza.

La caseta prefabricada destinada a comedor dispondrá de un equipo de aire acondicionado de 2 kW de potencia, el alumbrado se realizará mediante dos pantallas fluorescentes de 2x36 W, y se dispondrán 2 tomas de corriente de 16 A destinadas a la conexión de pequeños electrodomésticos: cafeteras, microondas, etc.

Los dispositivos de protección del cuadro de esta caseta serán: Un interruptor diferencial general de 2/40/0.03 A y sendos interruptores magnetotérmicos para cada uno de los circuitos: 2/25 A para el aire acondicionado, 2/20 A para el alumbrado y 2/20 A para las tomas generales de fuerza.

La máxima distancia desde el cuadro general del taller hasta las casetas descritas es de 50 metros. La línea que alimentará los cuadros terciarios de las casetas de oficina, vestuarios y comedor tendrá una sección de cobre de $4 \times 10 + 1 \times 10 \text{ mm}^2$. Serán cables multiconductores dispuestos en instalación enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 63 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea de Taller de mantenimiento mecánico.**

El taller de mantenimiento eléctrico dispondrá de un sistema de alumbrado mediante pantallas fluorescentes de 1x36 W. Además dispondrá de una serie de tomas de corriente de 16 A, tanto trifásicas como monofásicas. En el interior de la caseta se instalará un cuadro de mando y protección que albergará los dispositivos de protección correspondientes a cada circuito. De este modo tendrá un interruptor diferencial general de 4/40/0.03 A y un magnetotérmico de 4/32 A para el circuito de las tomas generales de fuerza, mientras que para el circuito de alumbrado estos dispositivos serán de 2/25/0.03 A y 2/16 A respectivamente. La caseta prefabricada del Taller de mantenimiento mecánico se encuentra a una distancia desde el cuadro general del taller de 20 metros. La línea que alimenta la caseta de mantenimiento mecánico del taller tendrá una sección de cobre de $4 \times 6 + 1 \times 6 \text{ mm}^2$. Dada la proximidad con el edificio del taller, serán cables multiconductores dispuestos en instalación enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 63 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea de Taller de mantenimiento eléctrico.**

El taller de mantenimiento eléctrico dispondrá de un sistema de alumbrado mediante pantallas fluorescentes de 1x36 W. Además dispondrá de una serie de tomas de corriente de 16 A, tanto trifásicas como monofásicas. En el interior de la caseta se instalará un cuadro de mando y protección que albergará los dispositivos de protección correspondientes a cada circuito. De este modo tendrá un interruptor diferencial general de 4/40/0.03 A y un magnetotérmico de 4/32 A para el circuito de las tomas generales de fuerza, mientras que para el circuito de alumbrado estos dispositivos serán de 2/25/0.03 A y 2/16 A respectivamente. La caseta prefabricada del Taller de mantenimiento eléctrico se encuentra a una distancia desde el cuadro general del taller de 20 metros. La línea que alimenta la caseta de mantenimiento eléctrico del taller tendrá una sección de cobre de $4 \times 6 + 1 \times 6 \text{ mm}^2$. Dada la proximidad con el edificio del taller, serán cables

multiconductores dispuestos en instalación enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 63 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea reserva.**

La línea que alimenta el circuito de reserva tendrá una sección de cobre de $4 \times 2.5 + 1 \times 2.5$ mm².

➤ **Línea Cuadro Secundario Zona de Bombas.**

La línea que alimenta el Cuadro Secundario de la zona de bombas, situada en el exterior del túnel, tendrá una longitud de 150 m y una sección de cobre de $4 \times 35 + 1 \times 35$ mm². Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 125 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea de máquina de lavar.**

Se trata de una máquina de 4 kW destinada a tareas de limpieza. Los dispositivos de protección de la máquina estarán ubicados en un cuadro terciario destinado a tal efecto. El mencionado cuadro terciario albergará: Por un lado, un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A que protegerá a su vez a dos interruptores magnetotérmicos de 4/32 A y 2/20 A, correspondientes a la máquina de lavar y a dos tomas de fuerza de 16 A situadas en el propio cuadro respectivamente. Por otro, un interruptor diferencial de 2/40/0.03 A y un interruptor magnetotérmico de 2/6 A correspondientes al circuito de alumbrado de la caseta.

La línea que alimenta este cuadro terciario de la máquina de lavar tendrá una sección de cobre de $4 \times 6 + 1 \times 6$ mm². Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 50 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea de Bombas.**

Se trata de dos equipos de 12 kW cada uno.

Los dispositivos de protección de la máquina estarán ubicados en un cuadro terciario destinado a tal efecto. El mencionado cuadro terciario albergará:

Por un lado, un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A y un interruptor magnetotérmicos de 3/40 A correspondientes a dos tomas generales de fuerza de 16 A.

Por otro, un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A y un interruptor magnetotérmico de 4/40 A correspondientes al circuito de fuerza de las bombas

La línea que alimenta el cuadro terciario de las bombas tendrá una longitud de 15 metros y una sección de cobre de $4 \times 25 + 1 \times 25$ mm². Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 90 mm de diámetro exterior.

➤ **Depósito de gasoil.**

La línea que alimenta el cuadro terciario del depósito de gasoil tendrá una longitud de 35 metros y una sección de cobre de $4 \times 6 + 1 \times 6$ mm². Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 50 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea Cuadro Secundario Gunitadora (en exterior de túnel).**

La gunitadora es una máquina de una potencia total de 150 kW. Para proteger esta línea, el cuadro secundario de la gunitadora dispondrá de un bloque diferencial regulable de 4/400 A y sensibilidad regulable 0.4-1 A. Este cuadro secundario dispondrá de 1 Toma monofásica de fuerza de 16 A y de una trifásica de 32 A. Para ello albergará también los

dispositivos de protección para estas tomas de fuerza, véase: un diferencial de 2/16/0.3 A y un magnetotérmico de 2/20 A para la toma de 16 A y un diferencial de 4/40/0.03 A y un magnetotérmico de 4/32 A para la toma de 32 A

La línea que alimenta el Cuadro Secundario de la gunitadora se encuentra a una distancia del centro de transformación de 50 metros. Estará situado en el exterior del túnel (cerca de la boca), y tendrá una sección de cobre de $3 \times 95 + 1 \times 95 \text{ mm}^2$. Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 140 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea Cuadro Secundario de Alumbrado interior del túnel.**

El alumbrado interior del túnel se realizará mediante pantallas fluorescentes estancas de 2x36 W situadas cada 15 metros y hasta una longitud total de 1040 metros (la mitad de la longitud del túnel). Cada 30 metros, uno de los tubos fluorescentes será de emergencia. El circuito de alumbrado interior del túnel estará protegido mediante un interruptor diferencial de 4/63/0.03 A y por un magnetotérmico de 4/63 A. En el propio cuadro secundario se encuentran instaladas dos tomas generales de fuerza de 16 y 32 A. Para la protección de estas tomas se dispondrá de un diferencial de 2/16/0.03 A y un magnetotérmico de 2/20 A para la toma de 16 A y un diferencial de 4/40/0.03 A y un magnetotérmico de 4/32 A para la toma de 32 A.

El cuadro secundario de mando y protección para el alumbrado del túnel se encuentra a una distancia desde el centro de transformación de unos 50 metros. La línea que alimenta el Cuadro Secundario de alumbrado interior del túnel, situado en la boca del túnel, tendrá una sección de cobre de $4 \times 35 + 1 \times 35 \text{ mm}^2$. Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado de 90 mm de diámetro exterior.

➤ **Línea Cuadro Secundario de Ventilador**

Como sistema de ventilación, el túnel dispone de un ventilador de 135 kW. La línea de alimentación del ventilador dispondrá de un bloque diferencial regulable de 4/400 A y sensibilidad regulable 0.4-1 A.

La línea que alimenta el Cuadro Secundario del ventilador, situado en el exterior del túnel, tendrá una sección de aluminio de $3 \times 240 + 1 \times 240 \text{ mm}^2$. Se instalará enterrada en el interior de tubos de PVC corrugado.

➤ **Línea transformador seco de 1400 KVA**

La línea que unirá los dos transformadores de 1400 kVA, el refrigerado en aceite situado en el exterior del túnel y el seco móvil situado en el interior del túnel estarán unidos por una línea de sección $3 \times 70 \text{ mm}^2$ de Cu. Los conductores se instalarán sobre las paredes del túnel e irán doblemente grapados sobre la pared y protegidos con canaleta o cualquier otro dispositivo que pueda realizar esta protección contra golpes y contactos directos e indirectos.

Este cable irá avanzando en longitud por la galería alimentando al transformador móvil conforme éste avanza para alimentar a la rozadora. La máxima longitud de la línea será de 1040 metros.

➤ **Línea Rozadora.**

Se trata de un equipo con una potencia máxima de 400 kW a una tensión de 1000 V. La línea que alimenta la rozadora partirá del centro de transformación seco móvil que avanza por el túnel, transcurrirá por el interior del túnel y tendrá una sección de cobre de $3 \times 300 + 3 \times 240 \text{ mm}^2$. Los conductores se instalarán sobre las paredes del túnel e irán

doblemente grapados sobre la pared y protegidos con canaleta o cualquier otro dispositivo que pueda realizar esta protección contra golpes y contactos directos e indirectos.

Este cable irá avanzando en longitud por la galería alimentando a la máquina rozadora, así como también avanzará el centro de transformación que lo alimenta a lo largo del túnel. La máxima longitud de la línea será de 100 metros.

➤ **Línea Cuadro Secundario Gunitadora**

El cuadro secundario de la gunitadora en el interior del túnel irá avanzando a lo largo del mismo a medida que avance el centro de transformación seco. Para su transporte por el túnel, el cuadro se instalará sobre la misma estructura que el centro de transformación, de manera que la línea que alimenta el Cuadro Secundario de la gunitadora tendrá una longitud máxima de 5 metros y tendrá una sección de cobre de $3 \times 150 + 1 \times 35 \text{ mm}^2$. Los conductores se instalarán protegidos con canaleta o cualquier otro dispositivo que pueda realizar esta protección contra golpes y contactos directos e indirectos.

El propio cuadro de mando y protección dispondrá de tomas de fuerza para la conexión de diversos equipos, por lo que albergará los correspondientes dispositivos de mando y protección:

➤ **Línea Gunitadora.**

Tal y como se ha descrito anteriormente, la gunitadora es una máquina de una potencia total de 150 kW. Para proteger esta línea se instalará un bloque diferencial regulable de 4/250 A y sensibilidad regulable 0.3-1 A.

➤ **Línea del Jumbo.**

Para la alimentación del Jumbo se dispondrá de una toma de fuerza de 400 A. Esta toma que estará protegida con un bloque diferencial regulable de 4/400 A y sensibilidad regulable 0.3-1 A.

- **Toma de 63 A (5P):** El cuadro dispondrá de una toma de 63 A y 5 polos. Para su protección se instalarán un interruptor magnetotérmico de 4/63 A y un interruptor diferencial de 4/60/0.03 A.
- **Tomas de 32 A (5P):** El cuadro dispondrá de tres tomas de 32 A y 5 polos. Para su protección se instalarán un interruptor magnetotérmico de 4/40 A y un interruptor diferencial de 4/40/0.03 A.
- **Toma de 16 A (5P):** El cuadro dispondrá de una toma de 16 A y 5 polos. Para su protección se instalarán un interruptor magnetotérmico de 4/16 A y un interruptor diferencial de 4/16/0.03 A.
- **Toma de 16 A (3P):** El cuadro dispondrá de una toma de 16 A y 3 polos. Para su protección se instalarán un interruptor magnetotérmico de 2/16 A y un interruptor diferencial de 2/16/0.03 A.

➤ **Línea transformador exterior (en aceite) de 1400 KVA**

La línea que unirá el grupo de generadores con el transformador de 1400 kVA refrigerado en aceite situado en el exterior del túnel, tendrá una sección de $4 \times (3 \times 500) \text{ mm}^2$ de Cu. Los conductores serán ternas de cables unipolares aislados con polietileno reticulado.

4.2 Canalizaciones.

El conductor irá fijado en los soportes diseñados para tal efecto que van fijos al sostenimiento de la galería.

4.3 Bornas de empalme y derivación.

Para dar continuidad al tendido de las líneas y sus derivaciones se dispondrá de conectores tipo enchufes en forma de T y recto de la firma Euromold o similar. Dispondrán de cuerpo del enchufe, terminal de cable y de adaptador.

4.4 Cálculo de las líneas.

La sección de los conductores eléctricos así como las características de los dispositivos de mando y protección se ha calculado considerando la naturaleza de los conductores, la geometría del circuito, la potencia a transportar, el tipo de circuito (monofásico o trifásico), así como la máxima caída de tensión admisible y la intensidad máxima admisible del conductor.

Del mismo modo, y considerando la potencia total a instalar en la fábrica se ha determinado la derivación individual a instalar entre el centro de transformación y el cuadro general de mando y protección así como los dispositivos de mando y protección correspondientes.

Para los cálculos, se han empleado las expresiones:

	Circuitos Monofásicos	Circuitos trifásicos
Intensidad Absorbida (A)	$I = \frac{P_c}{U \cdot \cos\phi \cdot R}$	$I = \frac{P_c}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi \cdot R}$
Caída de Tensión	$e = \frac{2 \cdot L \cdot P_c \cdot \cos\phi}{c \cdot S \cdot U}$	$e = \frac{L \cdot P_c \cdot \cos\phi}{c \cdot S \cdot U}$

donde:

- I: Intensidad en amperios
- P_c : Potencia de cálculo en Watios ($P_c = n \times I_a \times F_s \times F_u \times U$)
- n: número de puntos de utilización
- F_s : factor de simultaneidad
- F_u : factor de utilización
- U: Tensión de servicio en voltios
- $\cos \phi$: Factor de potencia (se ha considerado igual a 1)
- R: Rendimiento
- L: longitud de cálculo en metros
- c: conductividad del material (56 para el Cu y 36 para el Al)
- S: Sección del conductor en mm^2

Se han prefijado los siguientes parámetros:

- Tensión de suministro, en este caso tensiones de 6, 1 y 0.42 kV.
- Densidades de corriente admisibles, tipo y condiciones de instalación de los conductores.
- La caída de tensión máxima admisible. La caída de tensión en los distintos tramos de la red, a fin de que las tensiones estén dentro de los límites establecidos en el vigente reglamento.
- Las secciones de los conductores obtenidos así como los dispositivos de mando y protección necesarios para cada circuito se muestran en los planos correspondientes al esquema unifilar de la instalación.

4.5 Centros de transformación: normas y reglamentos.

Normas generales:

- Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación e Instrucciones Técnicas Complementarias.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión e Instrucciones Técnicas complementarias.
- Reglamento de Verificaciones Eléctricas y Seguridad en el Suministro de Energía eléctrica. Normas Particulares de la Compañía Suministradora de energía eléctrica.
- Condiciones impuestas por las entidades públicas afectadas.

Normas y recomendaciones de diseño de la aparamenta eléctrica.

- ✓ UNE 20 099, 20 104-1
- ✓ CEI 129, 265-1, 298
- ✓ UNE 20 100, 20 135, 21 081, 21 136, 21 139
- ✓ RU 6407 B
- ✓ CEI 56, 420, 694
- ✓ RU 1303 A
- ✓ UNE 20 135, 20 801
- ✓ CEI 255, 801
- ✓ UNE 20 101
- ✓ UNE 21 428
- ✓ RU 5201 D
- ✓ NFC 20 010, 64 400

4.5.1 Características de los Centros de Transformación.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la instalación contará con los siguientes centros de transformación:

- 1 de 1400 kVA con tensión de entrada 0.42 kV y tensión de salida 6 kV.

- 1 transformador seco en el interior del túnel de 6 kV de tensión de entrada y con dos salidas, una de 1000 kVA a una tensión de salida de 1 kV y otra de 400 kVA a una tensión de salida de 0.42 kV.

Los centros dispondrán de todos los elementos de la apartamentada, Celdas de Alta Tensión, Transformador y Cuadro de Baja Tensión, requeridos por una estación transformadora en 24 kV, totalmente instalados y conectados.

Igualmente, dispondrán de las conexiones directas de Media Tensión y Baja Tensión necesarias entre las diferentes unidades, circuito de disparo, conexiones a tierra e iluminación.

Las Interconexiones de Alta tensión entre la función de protección de la unidad de apartamentada de Media Tensión y el Transformador se realizarán directamente.

La Interconexión entre el transformador y el Cuadro de Baja Tensión se realizará directamente mediante barras de cobre. No será accesible y estará protegida contra contactos directos.

Los Centros contarán con una iluminación realizada mediante un aplique instalado en el propio Centro.

❖ Centro de transformación de 1400 kVA - 0.42/6 Kv

Será de baño de aceite y dispondrá de todos los elementos de la apartamentada de una estación transformadora en 24 kV instalados y conectados.

- Transformador de aceite de 1400 kVA, 0.42/6+2.5+5% kV. Dispondrán de interruptor de corte y centralita de mando.
- 2 celdas de línea, entrada y salida, de 630 A, 16 kA, 24 kV.
- Celda de protección de transformador por roptofusibles, 630 A, 16 kA y 24 kV.
- Celda de Alta Tensión con 1 salidas a 6 kV con las protecciones reglamentarias para alimentar la línea del Centro de Transformación Seco situado en el interior del túnel.

❖ Centro de transformación de 1400 kVA, 1000 kVA - 6/1 kV y 400 kVA - 6/0.42 Kv

Será de tipo seco y dispondrá de todos los elementos de la apartamentada de una estación transformadora en 24 kV instalados y conectados.

- Transformador seco de 1400 kVA, 6/1+2.5+5% kV y 6/0.42+2.5+5% kV. Dispondrá de interruptor de corte y centralita de mando.
- 3 celdas de línea, 1 de entrada y 2 de salida, de 630 A, 16 kA, 24 kV. De las de salida una será la correspondiente a 1 kV y la otra a 0.42 kV.
- Celda de protección de transformador por roptofusibles, 630 A, 16 kA y 24 kV.
- Celda de Baja Tensión con 1 salida a 1 kV con las protecciones reglamentarias para alimentar a la "Rozadora".
- Celda de Baja Tensión con 1 salida a 0.42 kV con las protecciones reglamentarias para alimentar al Cuadro de la "Gunitadora" en el interior del túnel.

4.5.2 Cálculo de las intensidades en los transformadores

❖ Intensidad de entrada, baja tensión, en el transformador de 1400 kVA (0.42/6 kV)

El caso más desfavorable se da considerando toda la carga en el extremo más alejado de la línea.

La intensidad primaria o de alta tensión en un sistema trifásico se determina mediante la expresión:

$$I_P = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_P}$$

donde:

- I_P : Intensidad primaria (A)
- P: Potencia (kVA)
- V_P : Tensión primaria (kV)

Por tanto en ese caso:

$$I_P = \frac{1400}{\sqrt{3} \cdot 0,42} = 1926,78 \text{ A}$$

❖ Intensidad de salida, alta tensión, en el transformador de 1400 kVA (0.42/6 kV)

Procediendo del mismo modo que en el apartado anterior, la intensidad en el primario de este transformador será:

$$I_S = \frac{1400}{\sqrt{3} \cdot 6} = 134,87 \text{ A}$$

❖ Intensidades de entrada, alta tensión, en el transformador de 1400 kVA [1000 (6/1 kV) + 400 kVA (6/0.42 kV)]

Procediendo del mismo modo que en el apartado anterior, la intensidad en el primario de este transformador será:

$$I_P = \frac{1400}{\sqrt{3} \cdot 6} = 134,87 \text{ A}$$

❖ **Intensidades de salida, baja tensión, en el transformador de 1400 kVA [1000 (6/1 kV) + 400 kVA (6/0.42 kV)]**

Procediendo del mismo modo que en el apartado anterior, la intensidad en el secundario de este transformador en su salida de 1 kV será:

$$I_s = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 1} = 578,03 \text{ A}$$

La intensidad en el secundario en la salida de 0.42 kV será:

$$I_s = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,42} = 1926,78 \text{ A}$$

4.6 Reglamento de servicio para los centros de transformación

Durante el funcionamiento de la instalación que se proyecta, se observarán las siguientes instrucciones:

Artículo 1:

La llave del Centro obrará siempre en poder del personal responsable y tan solo se confiará al operario autorizado para la conservación y servicio, así como al personal de la Dirección General de Industria y al de la empresa suministradora de energía.

Artículo 2:

Es necesario disponer en las inmediaciones de los Centros recipientes con arena o extintores especiales para utilizar en caso de incendio, llegado el cual nunca se empleará agua como agente extintor.

Artículo 3:

El Centro se mantendrá en perfecto estado de conservación y limpieza, prohibiéndose almacenar en su interior otros objetos que no sean los propios de su servicio.

Artículo 4:

Todas las maniobras del Centro se harán situándose el operario sobre la plataforma aislante y utilizando la pértiga, bien seca y limpia, previamente conectada a la tierra desde la anilla de conexión correspondiente. El uso de uno solo de estos elementos de aislamiento no quita por parte de la instalación en tensión, lo que debe tenerse en cuenta, no prescindiendo de la plataforma aislante y sujetando la pértiga por su extremo empuñadura.

Artículo 5:

Parte del personal deberá estar instruido las prácticas de socorro a los accidentados por electricidad, dispuestos a aplicarlas en los casos necesarios, siguiendo para ello las instrucciones contenidas en el cuadro que, con este fin, se habrá colocado en la caseta.

Artículo 6:

Para la puesta en servicio inicial del Centro de Transformación se conectarán primero los seccionadores correspondientes a la entrada de la línea, y seguidamente el interruptor general. Finalmente se cerrarán los interruptores de baja tensión.

Artículo 7:

Para la desconexión se procederá siempre a la inversa, si bien caso de ser necesaria una desconexión rápida puede dispararse primero el interruptor general.

Artículo 8:

La regulación de los relés de máxima intensidad de interruptor, se hará sin que en ningún caso se exceda su valor del 25% sobre la intensidad correspondiente a la carga máxima de los transformadores.

En baja tensión deben utilizarse placas de fusibles calibradas que lleven indicadas la intensidad para la que han de usarse, no sobrepasando el límite indicado anteriormente, ni la intensidad, que en cada circuito, corresponda a la sección de sus conductores.

Artículo 9:

Periódicamente se revisará la continuidad de los circuitos de toma de tierra y su resistencia eléctrica, debiendo, en tiempo muy seco, humedecer estas tomas regando abundantemente el terreno que cubre los pozos donde están situadas las placas.

Artículo 10:

Su durante el servicio se observase alguna anomalía o se repitiera el disparo del interruptor automático, se procederá a desconectar el servicio inmediatamente, sin tratar de reanudarlo en tanto no se haya subsanado de modo perfecto la causa de la avería.

Si la anomalía hubiera repercutido en el servicio de la línea general de alta tensión, se avisará a la empresa suministradora, dándole cuenta de ello.

Artículo 11:

En las interrupciones de servicio se tendrá en cuenta que la empresa ha de efectuar seguidos y repetidos intentos de reanudado y que, aún en caso de corte prolongado, puede reanudarse en cualquier instante, por lo que en los trabajos o maniobras a realizar durante estos momentos, se tomarán las mismas precauciones que si el servicio subsistiera.

Artículo 12:

En los trabajos o reparaciones que precisen el total aislamiento del Centro de Transformación y de la línea, se ha de desconectar en el arranque de ésta, absteniéndose de realizar cualquiera de aquellos trabajos, en tanto no se persone el empleado que haya ido a efectuar la desconexión y así lo manifieste.

4.7 Medidas de seguridad.

Para la protección del personal y de los equipos descritos en este apartado se debe garantizar en todo momento que:

- No será posible acceder a las zonas normalmente en tensión si éstas no han sido puestas a tierra. Por ello, el sistema de enclavamientos interno de las celdas debe interesar al mando del aparato principal, del seccionador de puesta a tierra y a las tapas de acceso a los cables.

- Las celdas de entrada y salida dispondrán de aislamiento integral y corte en SF₆, y las conexiones entre sus embarrados deberán ser apantalladas, consiguiendo con ello la insensibilidad a los agentes externos y evitando la pérdida del suministro en los Centros de Transformación interconectados, incluso en el caso hipotético de inundación del Centro de Transformación.
- Las bornas de conexión de cables y fusibles serán fácilmente accesibles a los operarios de forma que en las operaciones de mantenimiento, la posición de trabajo normal no carezca de visibilidad sobre estas zonas.
- Los mandos de la aparamenta estarán situados frente al operario en el momento de realizar la operación y el diseño de la aparamenta protegerá al operario de la salida de gases en caso de un eventual arco interno.
- El diseño de las diferentes celdas impedirá la incidencia de los gases de escape producidos en el caso de un arco interno sobre los cables de Media y Baja Tensión. Por ello, esta salida de gases no debe estar enfocada en ningún caso hacia el foso de cables.

4.8 Instalación de alumbrado

❖ Conductores

Las líneas de los circuitos de iluminación irán protegidas mediante elementos de protección magnetotérmica y diferencial, cuyos elementos estarán incorporados en los diferentes Cuadros de Mando y Protección.

Los conductores de las líneas de iluminación serán de cobre con aislamiento 0.6/1 kV, libres de halógenos e irán alojados en el interior de tuberías de acero, canaleta de PVC o grapados sobre las paredes, siempre debidamente protegidos.

La sección de los conductores necesarios se calcularán en función de la carga a transportar así como de la caída de tensión máxima admisible en cualquier punto del circuito, el 3%. En cualquier caso, los conductores se han sobredimensionado ampliamente como previsión ante posibles incrementos de potencia por razones de obra.

Todos los circuitos llevarán conductor de protección de acuerdo con la REBT-017.

El conductor de protección está aislado y cuando vaya junto con los conductores activos, su aislamiento y montaje tendrán las mismas características que el conductor neutro.

El conductor neutro estará unido a tierra, de forma que la resistencia global resultante de las puestas a tierra sea menor o igual a 8 ohmios.

Se emplearán interruptores diferenciales de alta sensibilidad para asociar el sistema por puesta a neutro de las masas. Los interruptores diferenciales serán selectivos y temporizados.

Todos los equipos y maquinarias se conectarán a tierra con conductores de cobre de diferente color a los de las fases activas con objeto de facilitar su identificación.

Toda la instalación de la galería y del túnel será totalmente estanca y todos los circuitos de la red llevarán su conductor de protección.

Los conductores estarán convenientemente protegidos contra deterioraciones mecánicas y químicas. Las conexiones se realizarán por medio de empalmes, sin empleo de ácido, o por ciernas de conexión de aprieto por rosca.

Se procurará en todo lo posible un equilibrio de cargas en los conductores que forman parte de la instalación para que existan cargas iguales entre fases.

Todos los circuitos serán con neutro independiente e irán debidamente protegidos.

Se tomarán todas las medidas de protección contra contactos directos o indirectos de forma que no supongan riesgo contra personas.

Todo ello de acuerdo con las M.I.B.T. 002, 003, 004, 007, 008, 016, 017, 018, 025, 039, con la obligada aplicación y cumplimiento de las normas UNE y NTE.

❖ **Receptores. Aparatos de alumbrado**

Las luminarias elegidas cumplirán:

- Los requisitos exigidos en el Capítulo 2 de la ITC-BT-44 del Reglamento de Baja Tensión.
- En cualquier caso satisfarán los requisitos concernientes a un correcto montaje, utilización y seguridad.
- Su funcionamiento no deberá producir perturbaciones en las redes de suministro en las comunicaciones.
- Los receptores se instalarán de acuerdo con su destino, con los esfuerzos mecánicos previsibles y las condiciones de ventilación necesarias para que ninguna temperatura peligrosa tanto para la propia instalación como para objetos próximos pueda producirse en su funcionamiento.
- Los aparatos de alumbrado serán pantallas fluorescentes de 2x36 W y serán estancos.
- Se instalarán uno cada 15 m.
- Tendrán un grado de protección IP-68.

❖ **Iluminación de emergencia y señalización**

Se instalarán alumbrado de emergencia y señalización para las dependencias de obra interiores de la galería y del túnel.

Los aparatos serán autónomos fluorescentes estancos de 1250 lúmenes con una autonomía mínima de 1 hora.

Las luminarias serán de 1x36 W disponiéndose de balastro-batería para un tubo. Se dispondrá un tubo de este tipo cada dos luminarias de las normales, es decir, cada 30 metros.

Se instalará de acuerdo con los requisitos establecidos en el Capítulo 3.1 la ITC-BT-28.

El alumbrado de seguridad estará previsto para entrar en funcionamiento automáticamente cuando se produzca un fallo en el alumbrado general o cuando su tensión descienda por debajo del 70% de su valor nominal. La instalación de este alumbrado será fija y estará provista de fuentes propias de energía. Sólo se podrá utilizar

el suministro exterior para proceder a su carga cuando la fuente propia de energía esté constituida por baterías de acumuladores o aparatos autónomos automáticos.

El alumbrado de señalización deberá funcionar de igual forma y señalando permanentemente la situación de salidas durante todo el tiempo de permanencia de obra. Deberá ser alimentado al menos por dos suministros, sean ellos normal, procedente de la fuente de alimentación, y la propia autónoma.

Las líneas de alimentación serán independientes y estarán debidamente protegidos con su interruptor automático magnetotérmico desde cada Cuadro de Baja Tensión.

4.9 Instalación de puesta a tierra.

Las instalaciones de puesta a tierra están constituidas por varios electrodos enterrados, bien sean picas hincadas en el terreno, de acero recubierto de cobre de un diámetro superior a 14 mm y 2 metros de longitud. Las líneas principales de tierra estarán formadas por conductores que partirán del punto de puesta a tierra y a las cuales estarán conectadas las derivaciones necesarias para la puesta a tierra de las masas, generalmente a través de los conductores de protección.

Para las puestas a tierra de protección se pondrán a tierra las partes metálicas de una instalación que no estén en normalmente en tensión pero que puedan estarlo a consecuencia de averías, accidentes, desargas atmosféricas o sobretensiones como por ejemplo los chasis y bastidores de los aparatos de maniobra, los envolventes de los conjuntos de armarios metálicos, tuberías, conductos metálicos, carcasas de transformadores, generadores, motores y otras máquinas. A la puesta a tierra de servicio, se conectarán todos los elementos necesarios como pueden ser los neutros de los transformadores que lo precisan en instalaciones o redes con neutro a tierra, neutro de los alternadores, etc. Todo ello conforme con MIES-RAT 13 en su apartado 6.

En los Centros de Transformación, para evitar tensiones peligrosas provocadas por defectos en la Red de Alta Tensión, los neutros de Baja Tensión de las líneas que salen fuera de la instalación general pueden conectarse a tierra separada, por lo que las instalaciones de tierra deberán aislarse entre sí por la diferencia de tensiones que puede aparecer entre ambas.

El conductor de conexión entre el neutro de Baja Tensión del Transformación y su electrodo de tierra ha de quedar aislado dentro de la zona de influencia de la tierra general.

Las líneas de salida de Baja Tensión deberán aislarse dentro de la zona de influencia de la tierra general. Cuando las líneas de salida sean de cable aislado con envolventes conductoras, deberá tenerse en cuenta la posible transferencia al exterior de tensiones a través de dichas envolventes. Todo ello conforme a MIES-RAT 13 apartado 7.7.

Para el estudio de un sistema de puesta a tierra deberá tenerse en cuenta la resistividad del terreno, resistencia de tierra del electrodo excepto de la humedad, excepto de la temperatura, etc.

En el caso que nos ocupa, ya que el terreno puede ser rocoso en algunas de las zonas de excavación, las condiciones de puesta a tierra pueden presentarse difíciles debido a la variabilidad en la resistividad del terreno. De acuerdo con el MIES-RAT 13 en su apartado 2.2, cuando los valores de la resistividad del terreno, de la corriente de puesta a tierra o del tiempo de eliminación de la falta no sea posible técnicamente, o resulte económicamente desproporcionado mantener los valores de las tensiones aplicadas de

paso y contacto, deberá recurrirse al empleo de medidas adicionales de seguridad a fin de reducir los riesgos de las personas o cosas. Posibles medidas en este sentido serían:

- Hacer inaccesibles las zonas peligrosas.
- Disponer suelo o pavimentos que aislen suficientemente de tierra las zonas de servicio peligrosas.
- Aislar todas las empuñaduras o mandos que hayan de ser tocados.
- Disponiéndose de rótulos avisadores con instrucciones adecuadas en las zonas peligrosas.
- Disponiéndose de otros medios de protección tales como calzado aislante, guantes, alfombrillas aislantes, etc.

Se dispondrá de una línea principal de tierra que discurrirá a lo largo de la mitad de la longitud del túnel, 1440 metros. Las picas de cobre se irán clavando a medida que avance la excavación del túnel. Las líneas principales de tierra serán de 35 mm² de cobre aislado y las picas, de 1.5 metros de longitud se clavarán cada 10 metros. Será independiente y a ella se conectarán todas las derivaciones y conductores de protección.

Existirán líneas principales de tierra independientes para herrajes, neutros e instalaciones de baja tensión.

No obstante en caso de necesidad por falta de resistividad del terreno, conforme vaya avanzando la excavación se recurrirá a la formación de tierras artificiales en base a la perforación de pozos para el enclavamiento de los electrodos, bien picas o bien placas. Los pozos tendrán dimensiones aproximadas de 3 x 6 metros procurando una resistividad del terreno adecuada con arcilla o arenas arcillosas que presenten una mejor conductividad. Con independencia del terreno del pozo, al instalar los electrodos, éstos deberán estar en contacto a su alrededor con una amalgama de sal y carbón en polvo, de tal manera que se pueda establecer un buen contacto con tierra. Es decir, allá donde exista la posibilidad a lo largo del avance de la galería y del túnel, se irán instalando picas de tierra.

No obstante, se desarrollan a continuación los cálculos de un sistema prototipo de Puesta a Tierra para el interior del túnel, que en teoría transcurrirá por lo que se consideraría tierra blanda.

❖ Resistividad del terreno

Por tratarse de una instalación de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior a 16 kA, basta el examen visual del terreno, observándose que la naturaleza del terreno en las zonas de puesta a tierra, se puede considerar una resistividad de 150 Ω/m.

❖ Intensidad de Puesta a Tierra

Supuesta la potencia de cortocircuito de la Red de Alta Tensión de 20 MVA, la intensidad eficaz máxima de puesta a tierra será:

$$I_{CC} = \frac{P_{CC}}{3 \cdot V} = \frac{20000}{3 \cdot 20000} = 0.33 \text{ kA}$$

Considerando a efectos del dimensionado del conductor de tierra una duración del efecto de un segundo, y que la elevación final de temperatura en el cable no pasa de 200°C, la sección de cobre de la línea de tierra no será menor de:

$$S = \frac{7200}{240} = 30 \text{ mm}^2$$

Se instalará conductor de cobre de 50 mm².

❖ **Diseño de puesta a tierra**

Se proyectan dos sistemas independientes de puesta a tierra:

- ✓ Puesta a tierra de servicio.
- ✓ Puesta a tierra de protección.

A la puesta a tierra de servicio se conectarán:

- El neutro de los transformadores de potencia.
- Los circuitos de baja tensión de los transformadores de medida.
- Los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

A la puesta a tierra de protección se conectarán:

- Los chasis y bastidores de aparatos de maniobra.
- Los envolventes de los conjuntos de cabinas metálicas.
- Los blindajes metálicos de los cables.
- Las cercas metálicas de protección de los transformadores.

El sistema previsto para la toma de puesta a tierra consiste en clavar verticalmente en el terreno picas de acero recubiertas de cobre de un diámetro no inferior a 14 mm. Como prototipo se dispondrá de 3 elementos de dos metros cada uno para obtener la resistencia reglamentaria inferior a 20 Ω.

Las líneas principales de tierra serán de conductores aislados de 50 mm². Los empalmes, derivaciones y conexiones se realizarán con medios de unión apropiados que garanticen la permanencia de la unión y no experimenten al paso de la corriente calentamientos superiores a los del conductor.

Los conductores de tierra deben aislarse procurando que su recorrido sea lo más corto posible.

❖ **Resistencia del sistema de tierra**

El sistema previsto para la toma de puesta a tierra consiste en clavar verticalmente en el terreno picas de acero recubiertas de cobre de un diámetro no inferior a 14 mm. Como prototipo se dispondrá de 3 elementos de 2 metros cada uno con una longitud total de 6 metros.

La resistividad del electrodo será:

$$R_t = \frac{P}{L} = \frac{100}{6} = 16,67$$

❖ Tensiones de paso

La tensión máxima a tierra que puede ser puenteadada por un ser humano en los 2 pies. Considerándose el paso de un metro, será:

$$V_p = \frac{K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot P_s}{1000}\right)$$

Considerando que el tiempo de eliminación del defecto a tierra es de 0.5 segundos, tendremos:

$$V_p = \frac{72K}{0.5} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 100}{1000}\right) = 230V$$

❖ Tensión de contacto

La tensión máxima de puesta a tierra que puede ser puenteadada por una persona entre la mano y el pie, será:

$$V_p = \frac{K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot P_s}{1000}\right) = \frac{72}{0.5} \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot 100}{1000}\right) = 165,5 V$$

❖ Tensión aplicada

La parte de la tensión de paso que resulta directamente aplicada entre los pies de un hombre, y teniendo en cuenta todas las resistencias del circuito, estimándose la del cuerpo humano en 1000 Q, será:

$$V_a = V_p \frac{R_t}{R_n + R_t + R_h} = 230 \cdot \frac{16,67}{55 + 16,67 + 1000} = 3,75 V$$

❖ Tensiones transferibles

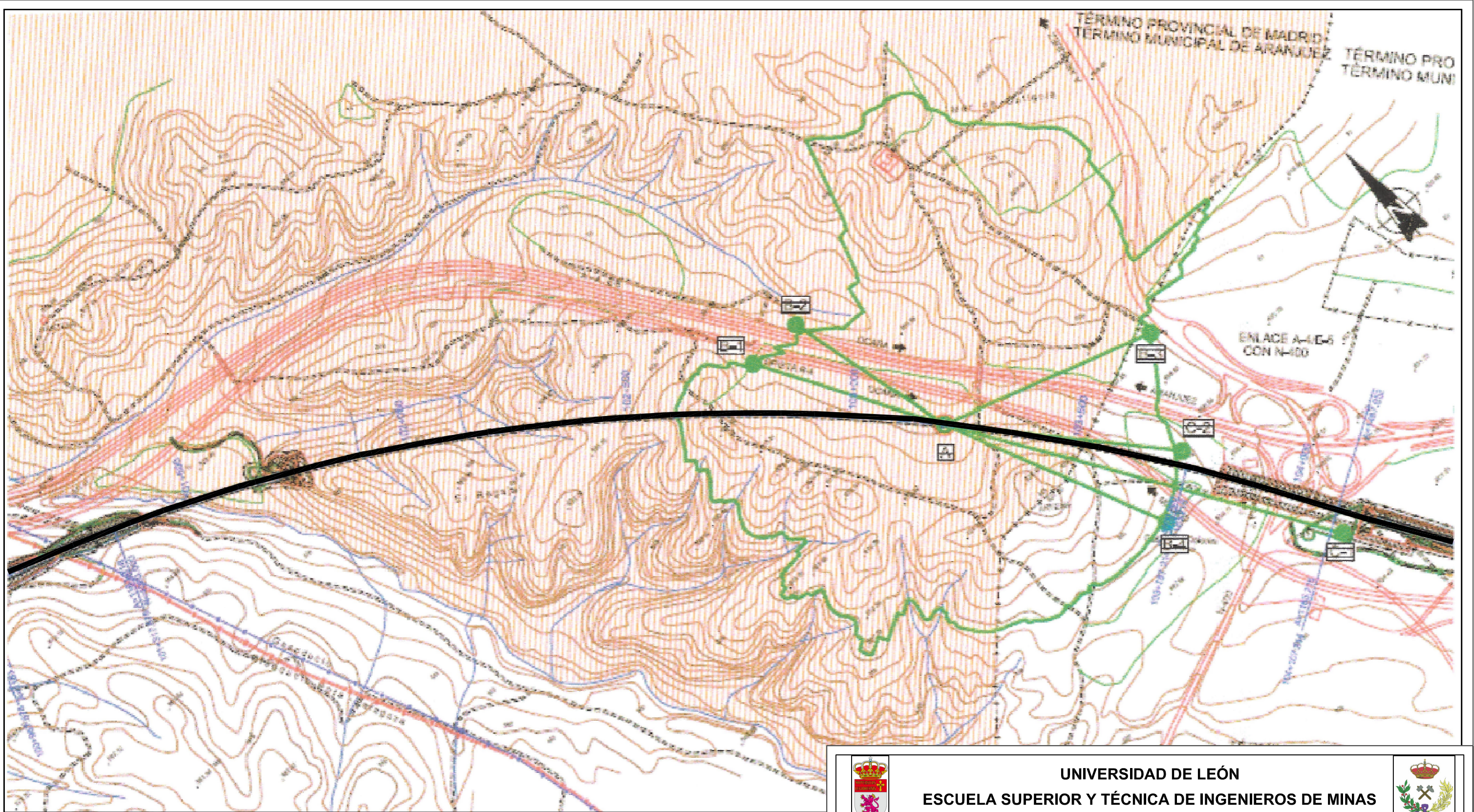
En la instalación de elementos metálicos que puedan transferir tensiones peligrosas al exterior tales como raíles y/o tuberías, deberá verificarse que no puedan transmitirse tensiones al exterior. Se verificará la posible transferencia a través de la puesta a tierra del neutro. Para garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de usuario en el momento en el que se está disipando un defecto por el sistema de protección, deberá establecerse una separación entre los electrodos más próximos de ambos sistemas. La diferencia de potencial entre el neutro de Baja Tensión y una tierra lejana no debe ser superior a 1000 V.

❖ Ajuste del diseño

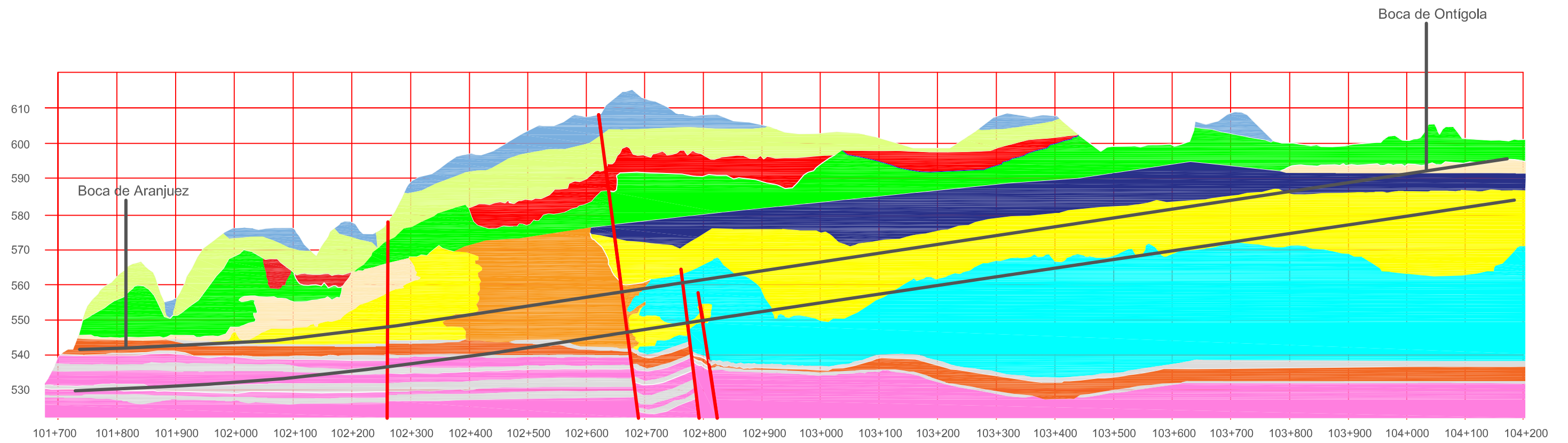
Después de construida la instalación de puesta a tierra, se harán las comprobaciones y verificaciones precisas y se efectuarán los cambios necesarios para cumplir las prescripciones generales de seguridad.



		UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS			
GRADO EN INGENIERÍA MINERA					
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA					
PLANO DE	SITUACIÓN				
ESCALA	1/50000				PLANO Nº
FECHA		Fdo.: José Gullón Conejo			1

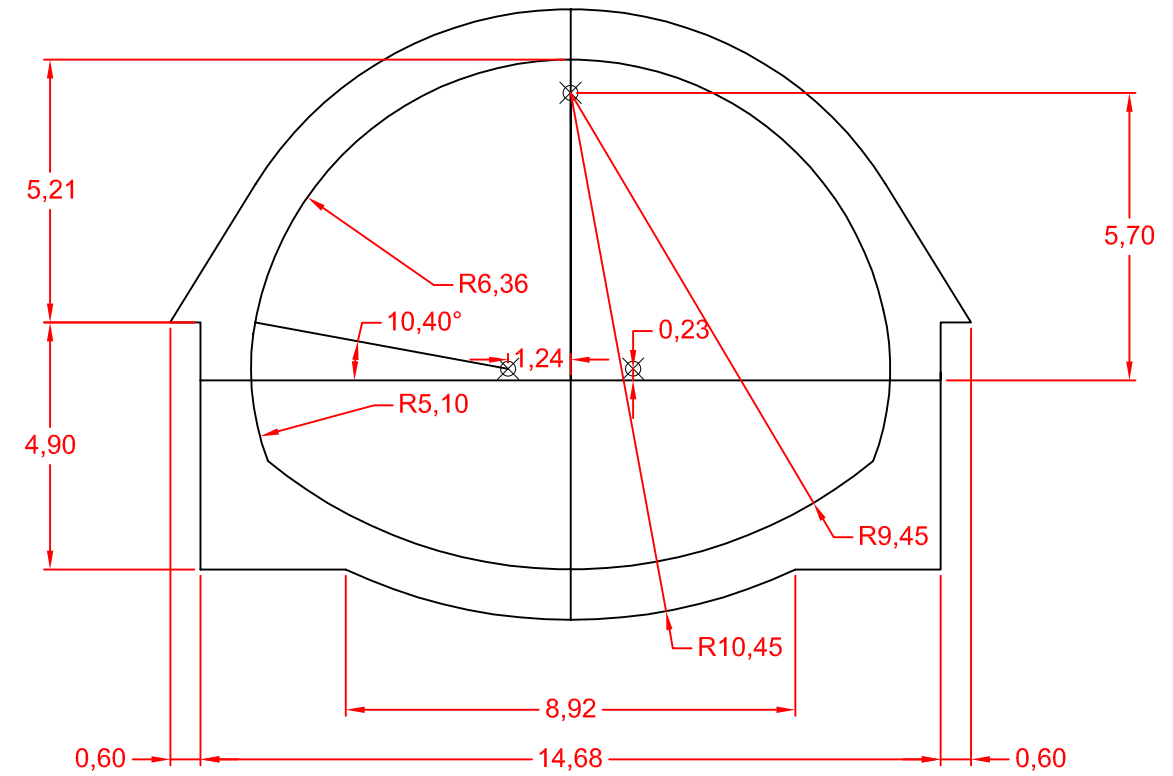
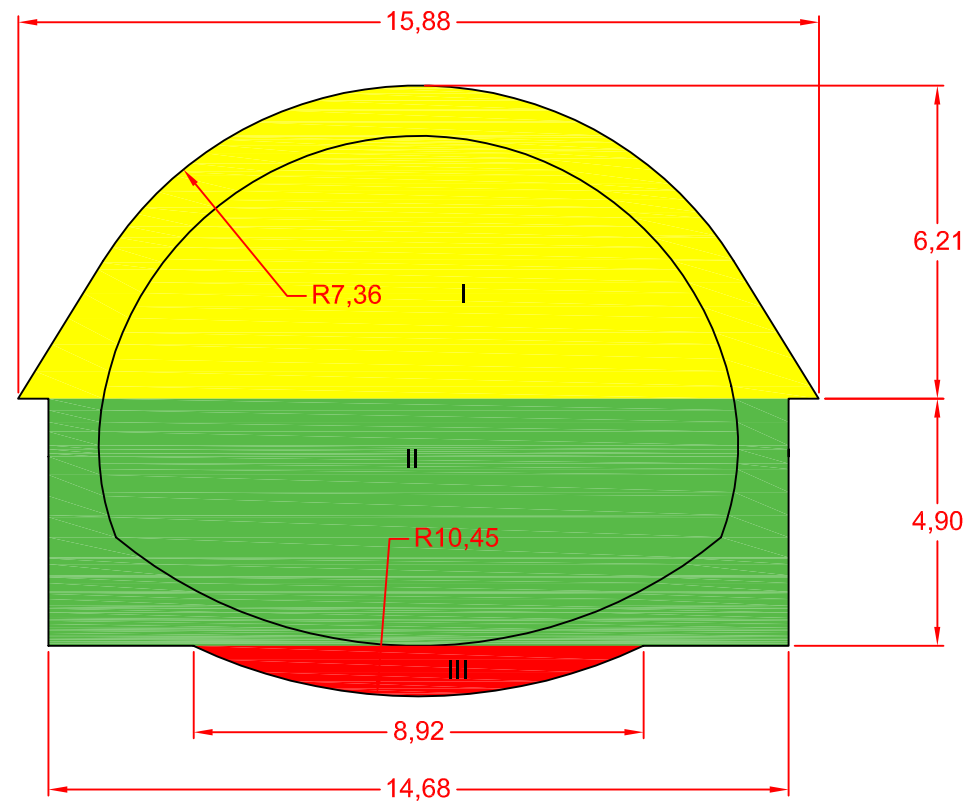


		UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS			
GRADO EN INGENIERÍA MINERA					
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA					
PLANO DE	PLANTA DEL TÚNEL				
ESCALA	1/10000				PLANO Nº
FECHA		Fdo.: José Gullón Conejo			3



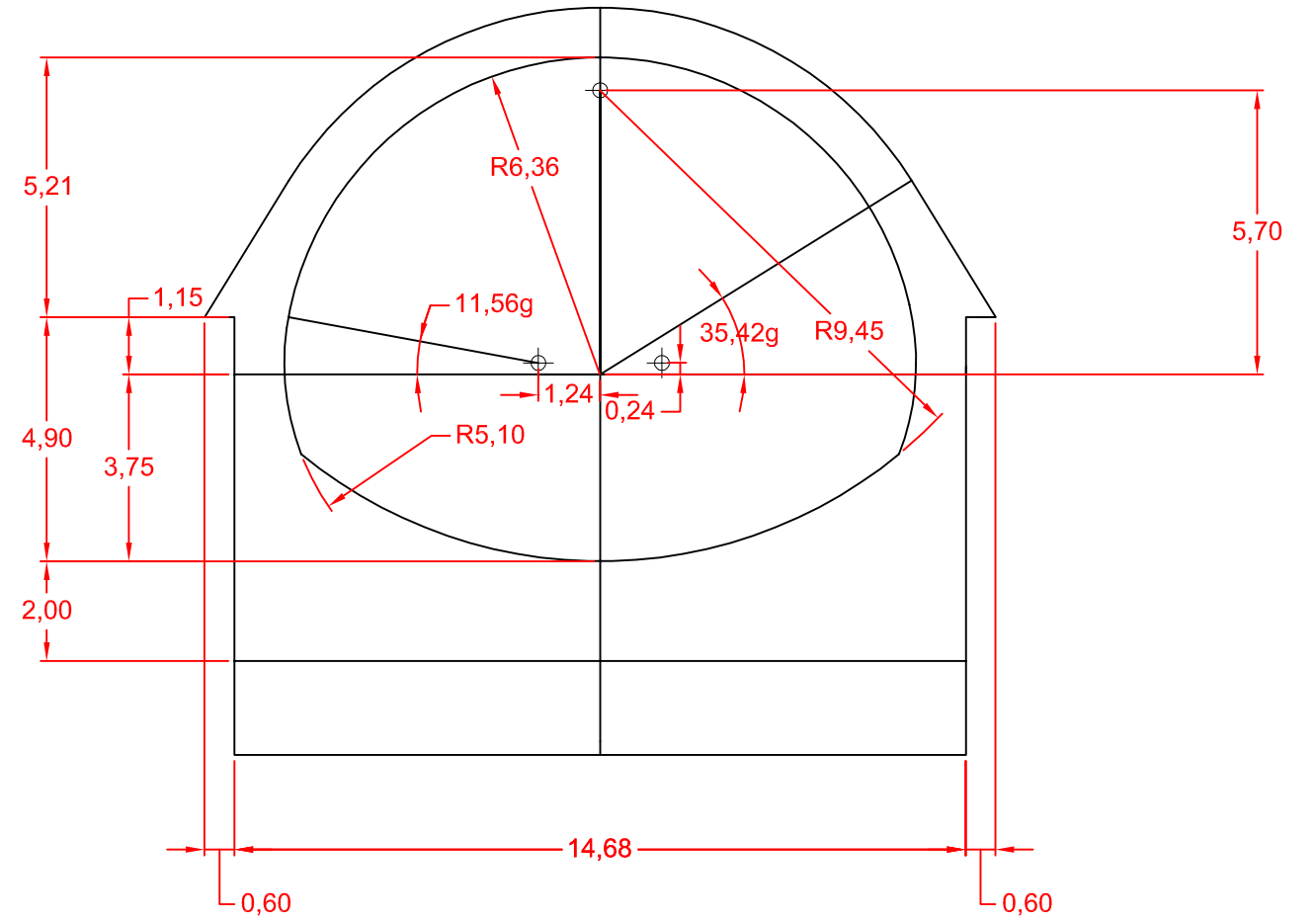
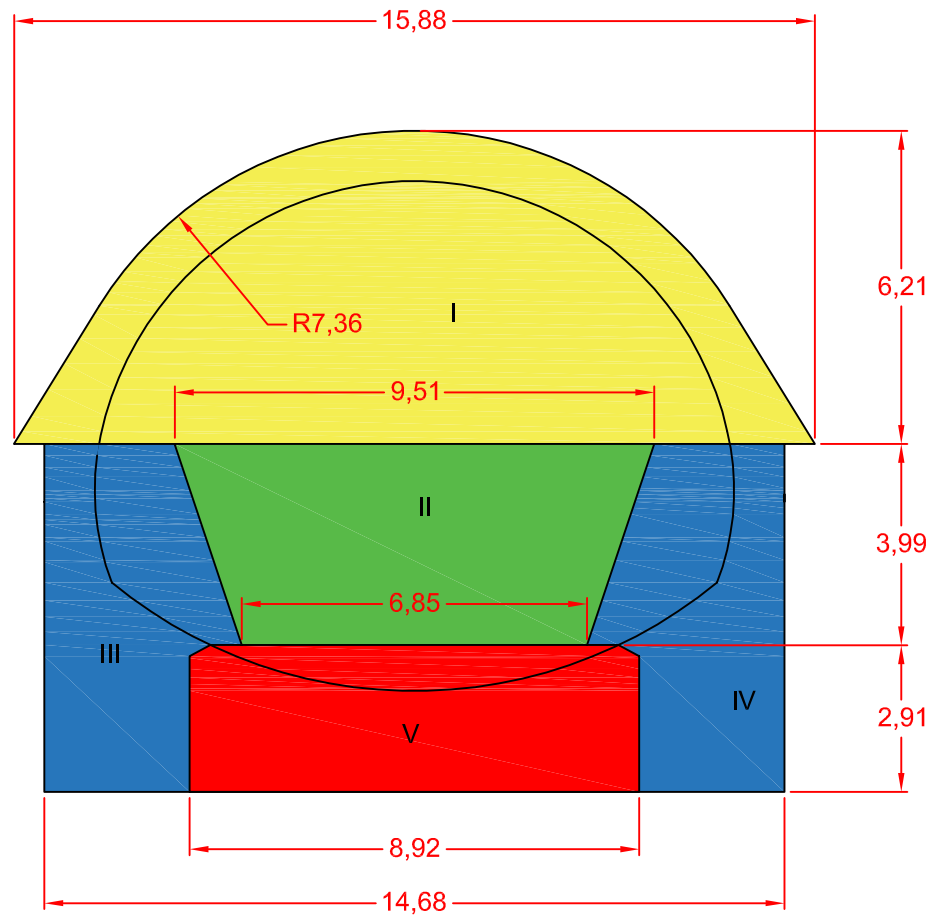
- | | | | |
|---|---------------------------------------|--|---|
|  | Paleokarst en yesos |  | Arcillas limosas |
|  | Acuífero superior y banda saturada |  | Yesos secundarios con arcillas y margas |
|  | Masa de glauberitas |  | Arcillas limosas negras |
|  | Arcillas y margas gris verdosas |  | Glauberita yesificada |
|  | Glauberita en proceso de yesificación |  | Arcillas y margas gris verdosas |
|  | Interestratificado de arcillas | | |

		UNIVERSIDAD DE LEÓN			
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS					
GRADO EN INGENIERÍA MINERA					
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA					
PLANO DE	PERFIL GEOLÓGICO				
ESCALA	1/5000				PLANO N°
FECHA		Fdo.: José Gullón Conejo			2



I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²
 II-Sección de excavación en destroza: 71,9 m²
 III-Sección de excavación en contrabóveda: 6 m²
 SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 147,42 m²

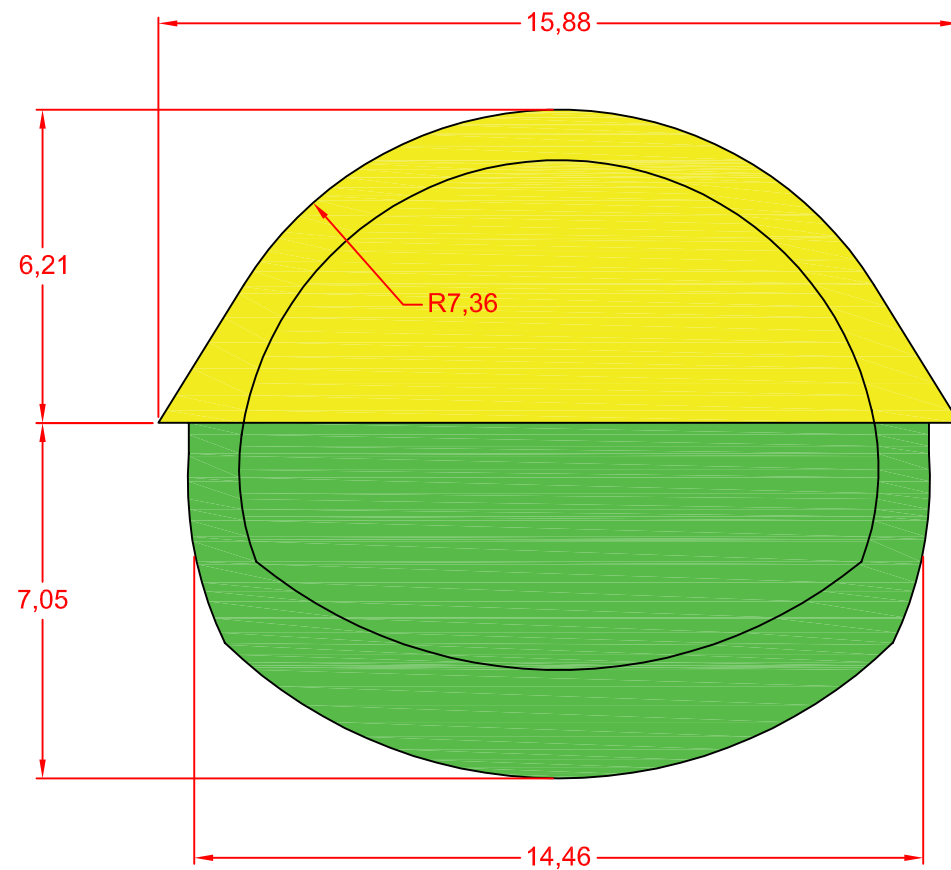
 UNIVERSIDAD DE LEÓN 	
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS	
GRADO EN INGENIERÍA MINERA	
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA	
PLANO DE	Sección tipo I-R
ESCALA	1/150
FECHA	Fdo.: José Gullón Conejo
	PLANO Nº
	4



- I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²
- II-Sección de excavación en destroza: 32,67 m²
- III y IV-Sección de excavación bataches: 34,18 m²
- V- Sección de excavación contraboveda: 34,18 m²

SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 187,71 m²

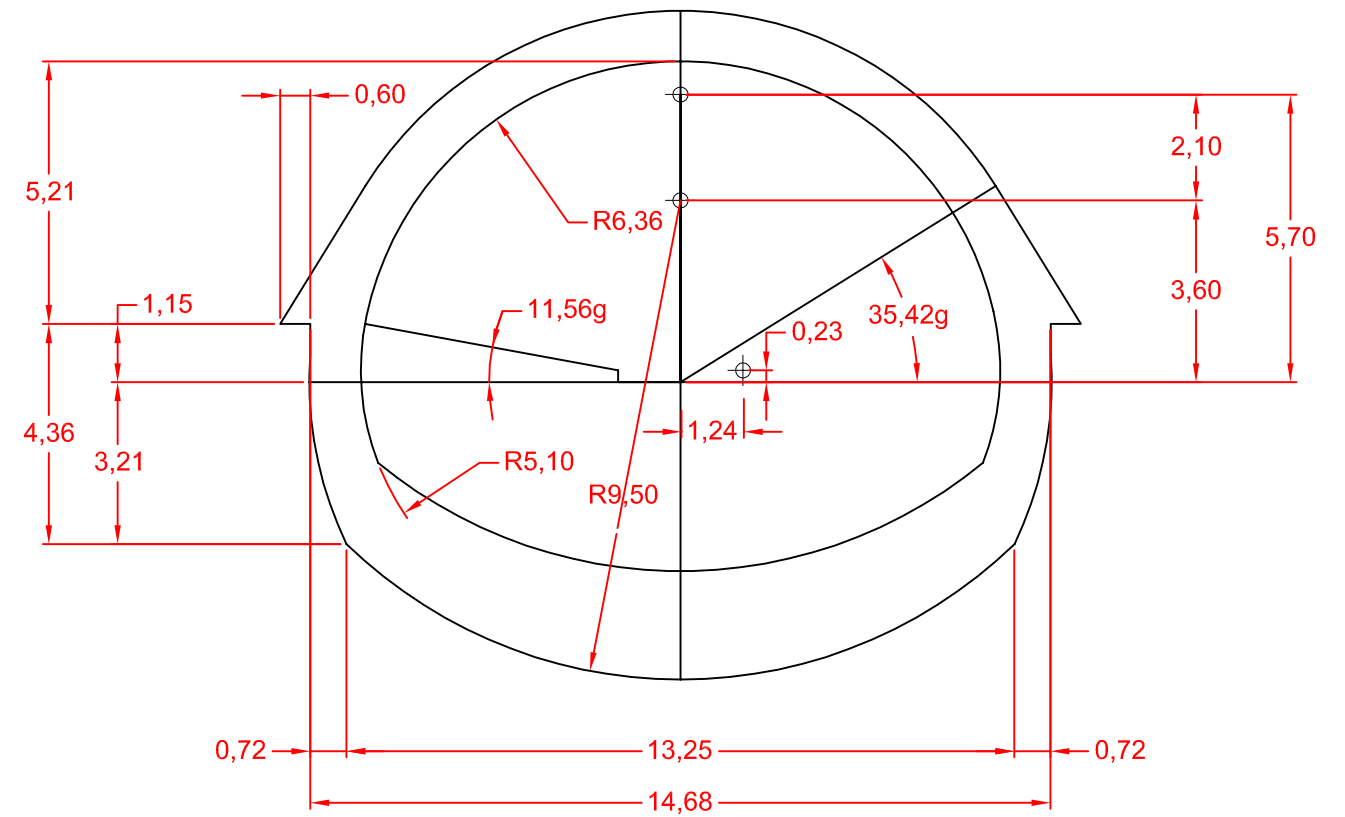
	UNIVERSIDAD DE LEÓN		
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS			
GRADO EN INGENIERÍA MINERA			
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA			
PLANO DE	Sección tipo I-RA		
ESCALA	1/150		PLANO Nº
FECHA		Fdo.: José Gullón Conejo	5



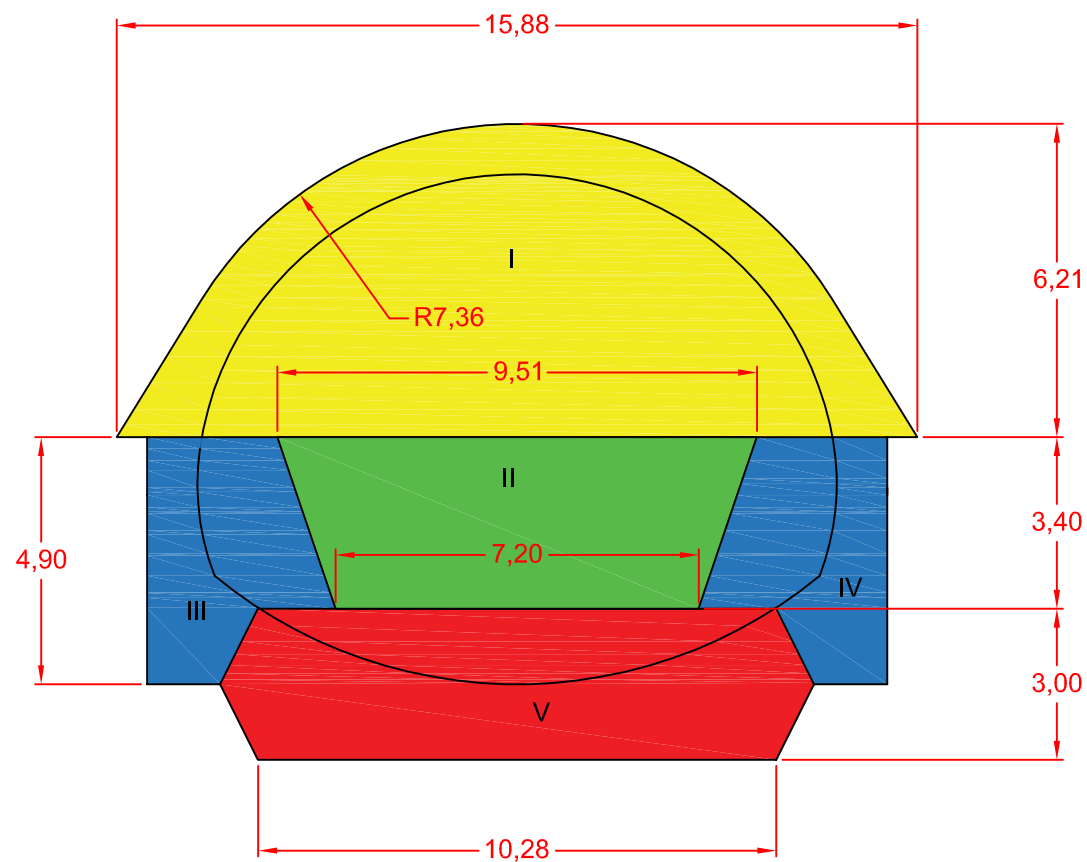
I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²

II-Sección de excavación en destroza y contraboveda: 87,06 m²

SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 156,58 m²

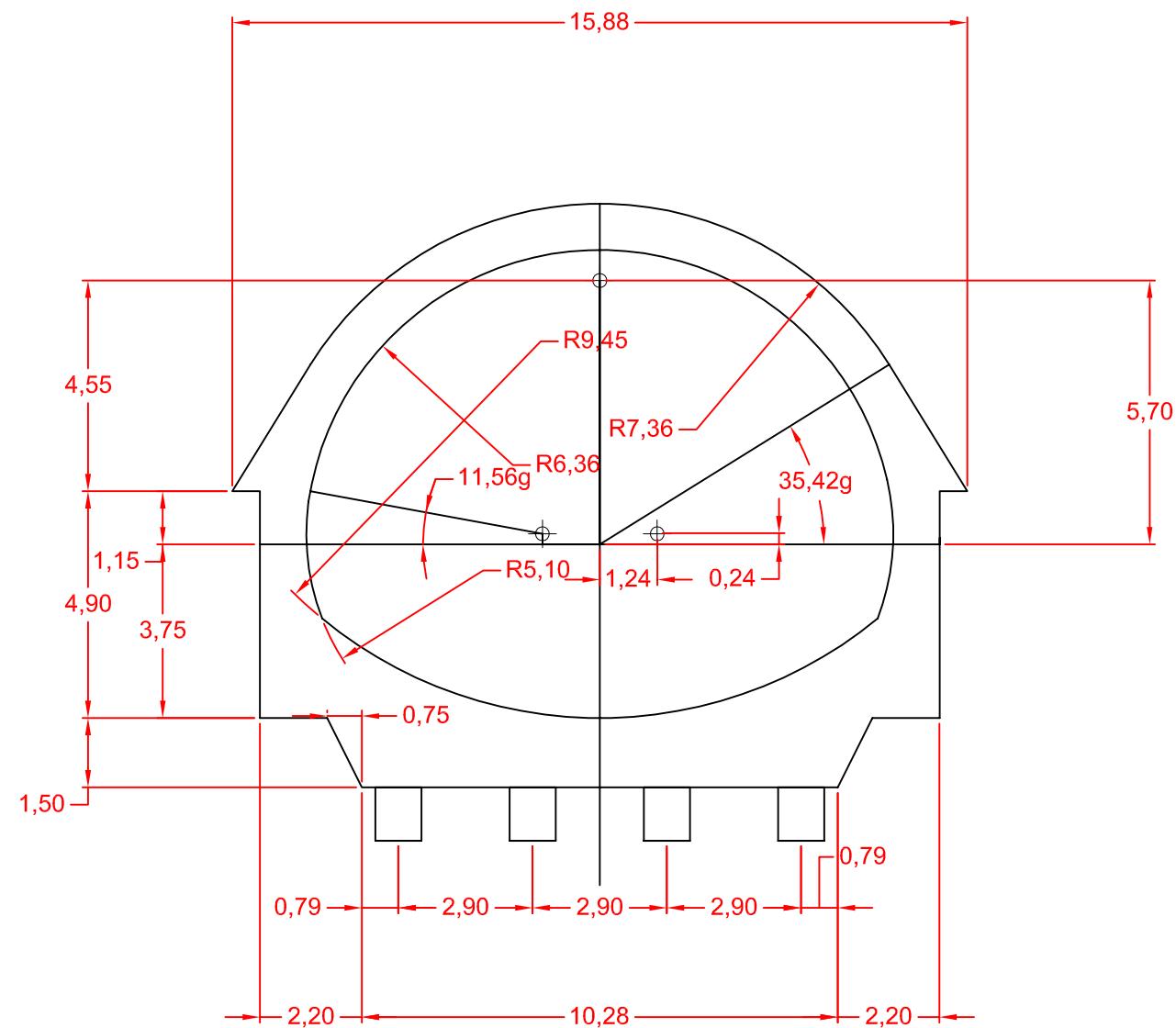


 UNIVERSIDAD DE LEÓN 	
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS	
GRADO EN INGENIERÍA MINERA	
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA	
PLANO DE	Sección tipo II
ESCALA	1/150
FECHA	Fdo.: José Gullón Conejo
PLANO Nº	
6	

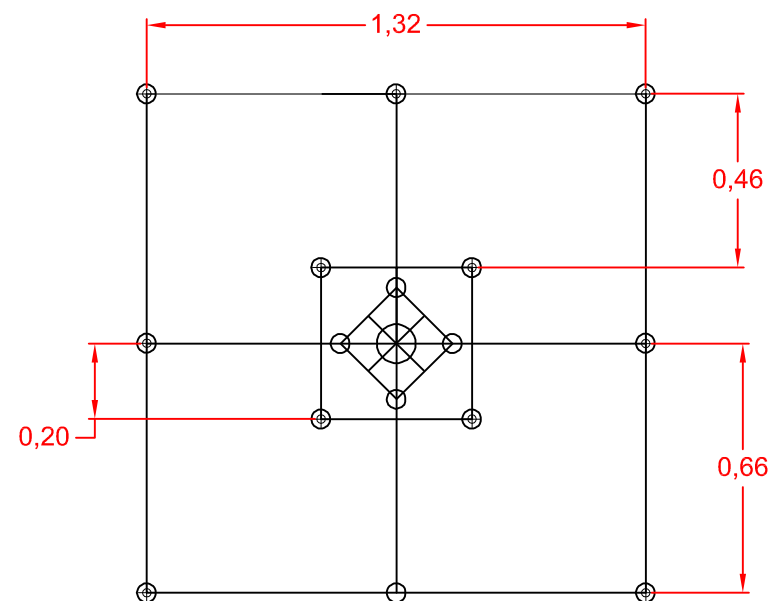
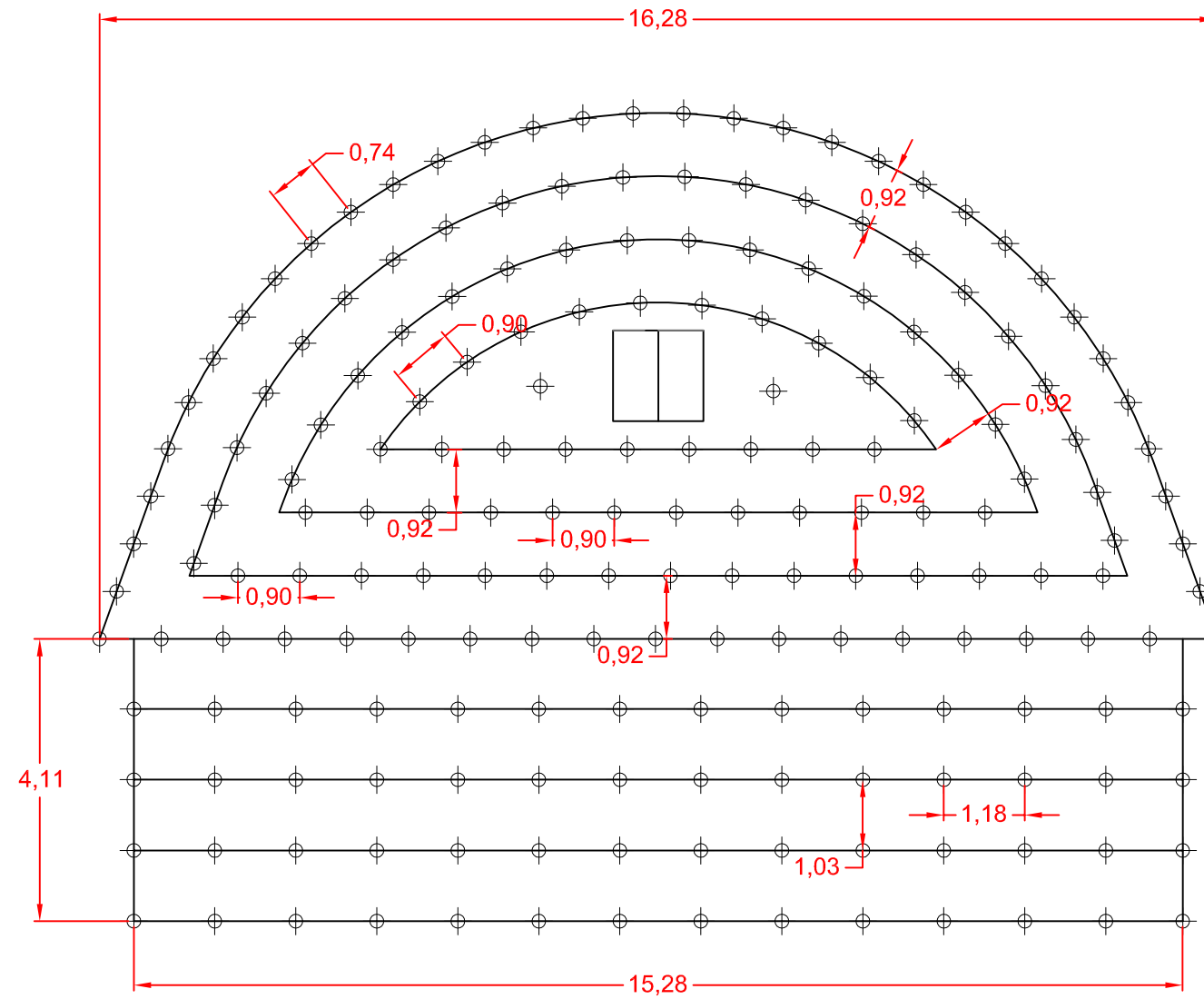


- I-Sección de excavación en avance: 69,52 m²
- II-Sección de excavación en destroza: 28,97 m²
- III y IV-Sección de excavación bataches: 2 x 13,67 m²
- V-Sección de excavación contrabóveda: 32,12m²

SECCIÓN TOTAL DE EXCAVACIÓN: 157,95 M²

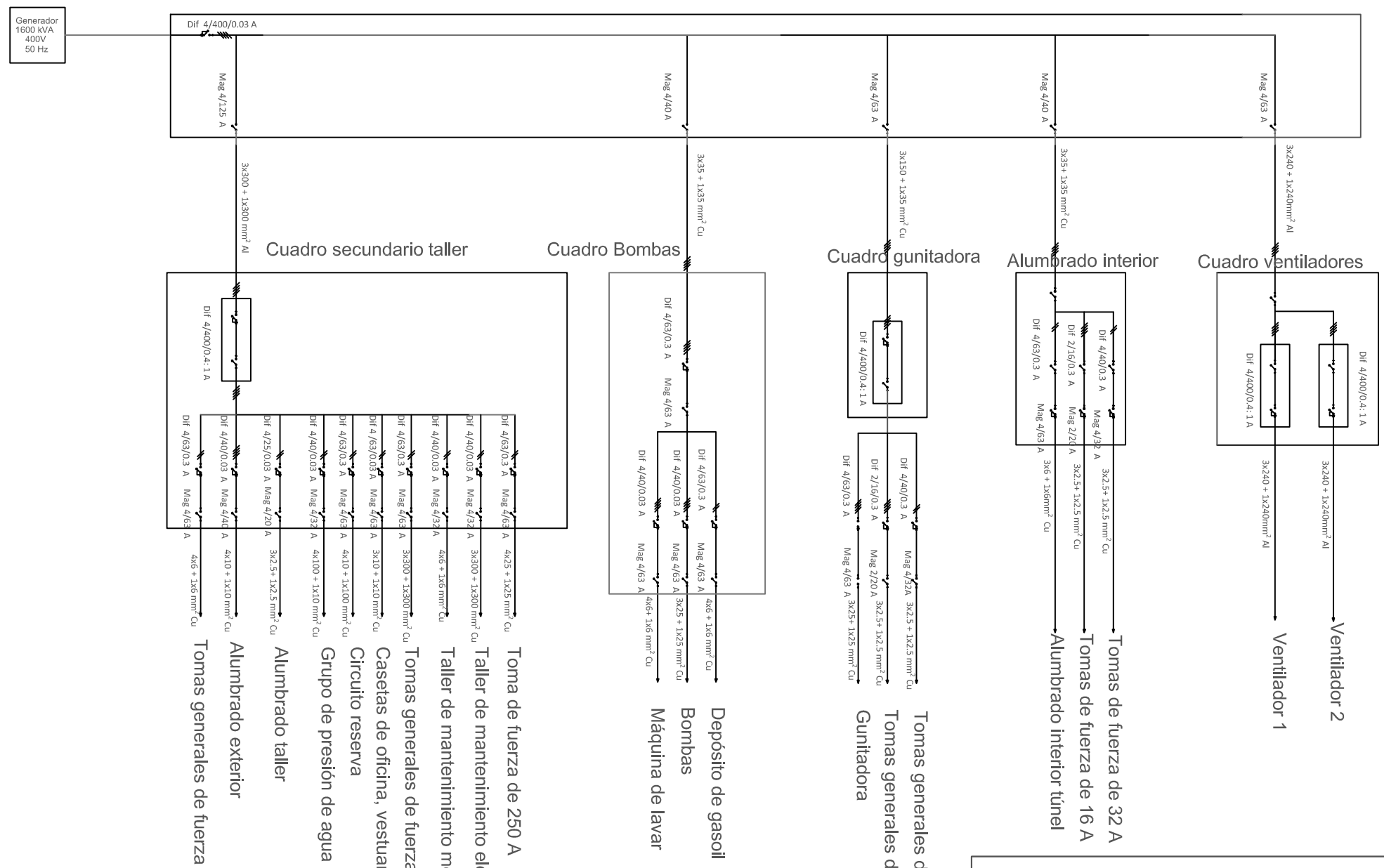


	UNIVERSIDAD DE LEÓN		
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS			
GRADO EN INGENIERÍA MINERA			
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA			
PLANO DE	Sección tipo III		
ESCALA	1/150		PLANO N°
FECHA		Fdo.: José Gullón Conejo	7



E=1/20

 UNIVERSIDAD DE LEÓN 	
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS	
GRADO EN INGENIERÍA MINERA	
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA	
PLANO DE	ESQUEMA DE PERFORACION SECCIÓN DE AVANCE Y DESTROZA
ESCALA	1/100
FECHA	1/9/2016
Fdo.: José Gullón Conejo	
PLANO Nº	
8	



	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS	
GRADO EN INGENIERÍA MINERA		
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EL REGAJAL INCLUIDO EN LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE-MADRID-CASTILLA LA MANCHA-COMUNIDAD VALENCIANA-REGIÓN DE MURCIA. TRAMO: ARANJUEZ-ONTÍGOLA		
PLANO DE	ESQUEMA UNIFILAR	
ESCALA		
FECHA	1/9/2016	Fdo.: José Gullón Conejo
		PLANO Nº 9



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

Documento IV: PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

Autor: José Gullón Conejo

Tutor: Daniel Vázquez Silva

1 Definición y condiciones generales

1.1 Definición

El presente Pliego de Prescripciones Técnicas constituye el conjunto de instrucciones, normas y especificaciones que, junto con lo indicado en los planos de proyecto, define los requisitos técnicos de las obras a realizar para la construcción de un túnel para la Plataforma de Alta Velocidad Vitoria-Bilbao-San Sebastián.

1.2 Condiciones generales

1.2.1 Conformidad de la obra con los planos y variaciones permisibles

Las obras ejecutadas estarán conformes en todos los casos con la planta, secciones, tipo y dimensiones mostradas en los planos, así como con los planos del replanteo de las obras, a excepción de que el Ingeniero Encargado ordene por escrito alguna modificación de las mismas.

En partes de la obra, en las que sea necesario a juicio del Ingeniero Encargado, el contratista podrá ser requerido para modificar las características de las obras, facilitando en cada caso el Ingeniero Encargado los planos necesarios de construcción para ejecutarlas.

1.2.2 Responsabilidades durante la ejecución

El contratista será responsable durante la ejecución de las obras de todos los daños o perjuicios, directos o indirectos, que se puedan ocasionar a cualquier persona, propiedad o servicio, público o privado, como consecuencia de los actos, omisiones o negligencia del personal a su cargo o de una deficiente organización de las obras.

Adoptará las medidas necesarias para evitar la contaminación de ríos, lagos y depósitos de agua, por efecto de los combustibles, aceites, ligantes o cualquier otro material que pueda ser perjudicial.

1.2.3 Conservación del medio ambiente

El contratista prestará especial atención al efecto que puedan tener las distintas operaciones e instalaciones que necesite realizar para la consecución del contrato sobre la estética y el paisaje de las zonas en que se hallen ubicadas las obras.

En tal sentido, cuidará de los árboles, hitos, vallas y demás elementos que puedan ser dañados durante las obras y serán debidamente protegidos para evitar posibles destrozos, que en el caso de producirse, serán restaurados.

Asimismo, cuidará el cumplimiento y sentido estético de sus instalaciones, construcciones, depósitos y acopios que, en todo caso, deberán ser previamente autorizados por el Ingeniero

Encargado de las obras.

1.2.4 Normas para la realización de los trabajos con maquinaria para obras

- **Circulación de la maquinaria de obra y de camiones**

La circulación de la maquinaria de obra, así como el transporte de materiales debe realizarse exclusivamente por el interior de los límites de ocupación de la zona de obras o sobre los itinerarios de acceso.

Se deberán acatar las limitaciones de circulación que puedan imponer las autoridades competentes y en particular: prohibición de gálibo o de velocidad, limitación de ruido, circulación en un solo sentido, prohibición de cruce.

- **Señalización e iluminación**

En el caso de utilizar en periodo vespertino o nocturno los accesos existentes o acondicionados desde la zona de obras a la red viaria, se debe garantizar la iluminación y señalización de los mismos con los niveles exigidos al tipo de vía (calle urbana, camino, carretera o autovía) a la que se accede, instalando si es necesario los elementos de seguridad vial necesarios.

1.2.5 Materiales, piezas y equipos en general

1.2.5.1 Condiciones generales

Todos los materiales, piezas, equipos y productos industriales, en general, utilizados en la instalación, deberán ajustarse a las calidades y condiciones técnicas impuestas en el presente documento.

1.2.5.2 Ensayos y pruebas

Los ensayos, análisis y pruebas que deben realizarse con los materiales, piezas y equipos que han de entrar en la obra para fijar si reúnen las condiciones estipuladas en el presente Pliego, se verificarán bajo la dirección del Director de la Obra.

1.2.5.3 Acopios

Los materiales, piezas o equipos se almacenarán de tal modo que se asegure la conservación de sus características y aptitudes para su empleo en la obra y de forma que se facilite su inspección.

1.2.6 Tratamiento y gestión de residuos

Los vertidos de aceites, combustibles, cementos y otros sólidos procedentes de las zonas de instalaciones no serán en ningún caso vertidos a los cursos de agua. La gestión de esos productos residuales deberá estar de acuerdo con la normativa aplicable en cada caso (residuos sólidos urbanos, residuos tóxicos y peligrosos, residuos inertes, etc.).

La eliminación de los residuos peligrosos deberá seguir un procedimiento distinto en función de su composición. Así mismo, deben ser retirados por Gestores autorizados para cada tipo de residuo. Se prestará especial atención a la gestión de aceites usados a la que de aplicación el

Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados.

Una buena práctica comenzará por tener en cada tajo de obras la instalación de los contenedores adecuados para cada tipo de residuo procediendo, posteriormente, a su traslado a vertedero autorizado o instalación de tratamiento o eliminación.

1.2.6.1 Puntos limpios

Las instalaciones auxiliares deberán poseer un sistema de puntos limpios, con objeto de un almacenamiento selectivo y seguro de los materiales que se generen. En el caso de residuos sólidos, se dispondrá de un conjunto de contenedores con diversos distintivos visuales, tanto escritos como de colorido, según el tipo de residuo.

Los contenedores que tengan por objeto el almacenamiento de residuos potencialmente contaminantes deberán situarse sobre terrenos impermeabilizados.

La composición del material de cada contenedor estará de acuerdo a la clase, volumen y peso esperado de almacenamiento, así como las condiciones de aislamiento necesarias.

El sistema de colores a emplear con objeto de facilitar la distinción visual será:

- Verde: Vidrio.
- Azul: Papel y cartón.
- Amarillo: Envases y plásticos.
- Marrón: Madera.
- Negro: Neumáticos.
- Blanco: Residuos orgánicos.
- Rojo: Residuos peligrosos: aceites, filtros de aceite, tóner, absorbentes.
- Morado: Pilas alcalinas y de botón.
- Gris: Inertes.

Como mínimo, se establecerá un punto limpio en las inmediaciones de las instalaciones generales de obra con contenedores estancos para vidrio, papel y cartón, envases y recipientes de plástico, maderas, residuos orgánicos, residuos tóxicos e inertes.

Los puntos limpios se dispondrán sobre una superficie que estará impermeabilizada. Su recogida será periódica y selectiva por gestores autorizados.

1.2.6.1.1 Residuos peligrosos

La ley de Residuos 22/2011, de 28 de Julio de Residuos y suelos contaminados, establece las pautas a seguir para una correcta gestión de este tipo de residuos.

Se consideran residuos peligrosos generados en la obra: aceites usados, filtros de aceite, baterías, combustibles degradados, líquidos hidráulicos, disolventes, etc. Para todos ellos se seguirán los siguientes pasos:

- Separar adecuadamente y no mezclar los residuos peligrosos, evitando particularmente aquellas mezclas que supongan un aumento de su peligrosidad o dificulten su gestión.
- Envasar y etiquetar los recipientes que contengan residuos peligrosos en la forma que reglamentariamente se determine.
- Llevar un registro de los residuos peligrosos producidos o importados, así como el destino de los mismos.
- Suministrar la información necesaria para su adecuado tratamiento y eliminación a las empresas autorizadas de la gestión y tratamiento.

- Informar con celeridad a las autoridades competentes en caso de desaparición, pérdida o escape de residuos peligrosos.

El tiempo de almacenamiento de estos residuos en obra no deberá sobrepasar los seis meses.

En particular, en lo que se refiere a aceites usados, de acuerdo con el Real Decreto 679/2006, de 2 de Junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados, el Contratista tiene las siguientes obligaciones en relación con el almacenamiento y tratamiento de aceites usados, tal como indica el Artículo 5.1:

Los productores de aceites usados deberán cumplir las siguientes obligaciones:

- Almacenar los aceites usados en condiciones adecuadas, evitando especialmente las mezclas con agua o con otros residuos no oleaginosos; se evitarán también sus mezclas con otros residuos oleaginosos si con ello se dificulta su correcta gestión.
- Disponer de instalaciones que permitan la conservación de los aceites usados hasta su recogida y que sean accesibles a los vehículos encargados para ello.
- Evitar que los depósitos de aceites usados, incluidos los subterráneos, tengan efectos nocivos sobre el suelo.

Con carácter general, quedan prohibidas las siguientes acciones:

- Todo vertido de aceites usados en aguas superficiales o subterráneas, en cualquier zona del mar territorial y en los sistemas de alcantarillado o de evacuación de aguas residuales.
- Todo vertido de aceite usado, o de residuos derivados de su tratamiento, sobre el suelo.
- Todo tratamiento de aceite usado que provoque una contaminación atmosférica superior al nivel establecido en la legislación sobre protección del ambiente atmosférico.

Por otra parte, se deberán entregar los aceites usados a un Gestor de residuos autorizado por el órgano competente de la Comunidad Autónoma, o bien a un

Sistema Integrado de Gestión de aceites usados, en los términos que señalan los artículos 6 y 11 del citado R.D. 679/2006.

1.2.6.1.2 Residuos inertes

Los residuos inertes se depositarán en el contenedor dispuesto a tal efecto (contenedor gris) y serán trasladados a un vertedero de inertes autorizado.

1.2.6.1.3 Residuos sólidos urbanos

Las casetas de obra deberán estar dotadas de un sistema de saneamiento y de contenedores para la gestión de residuos asimilables a los residuos sólidos urbanos. Se llevará a cabo el depósito selectivo de los residuos en los contenedores adecuados y para su recogida periódica.

1.2.6.2 Almacenamiento de combustibles en la obra

El almacenamiento de combustibles en la obra se realizará en las zonas de instalaciones auxiliares en los puntos acondicionados a tal efecto con depósitos móviles de almacenamiento, en un recinto vallado e impermeabilizado con hormigón, con el fin de evitar la contaminación del suelo por los derrames producidos en las operaciones de repostaje.

1.2.6.3 Retirada y limpieza de residuos al finalizar las obras

Una vez finalizadas las obras, se llevará a cabo una limpieza de toda la zona, retirando y transportando a vertedero o punto limpio de reciclaje todos aquellos residuos existentes en la zona de actuación.

Se prestará especial atención a los restos tales como embalajes, piezas o componentes de maquinaria, restos de utensilios, utillaje, herramientas o equipos manuales, etc.

En todo caso, a la finalización de las obras, todos los residuos serán gestionados adecuadamente, no se abandonarán en las inmediaciones.

1.2.6.4 Vertidos accidentales

Las tareas de limpieza y mantenimiento de la maquinaria de obra se realizarán exclusivamente en un sector acotado en las áreas de instalaciones de obra. Esta zona estará totalmente impermeabilizada. En todo caso, se tomarán las medidas de prevención adecuadas para evitar cualquier vertido accidental de sustancias contaminantes a los cauces provenientes del funcionamiento de la maquinaria o de su manipulación por los trabajadores.

1.2.7 Limpieza final de las obras

Una vez que las obras se hayan terminado, el Contratista retirará todas las instalaciones, depósitos y edificios, construidos con carácter temporal para la consecución del contrato sobre la estética y el paisaje de las zonas en que se hallen ubicadas las obras.

Todo ello se ejecutará de forma que las zonas afectadas queden completamente limpias.

1.2.8 Conservación de las obras durante la ejecución y el plazo de garantía

El contratista queda comprometido a conservar a su costa y hasta que sean recibidas provisionalmente, todas las obras que integran el proyecto.

Asimismo, queda obligado a la conservación de las obras durante un plazo de un año contado a partir de la fecha de la recepción, debiendo reparar o sustituir a su costa cualquier parte de ellas que haya experimentado desplazamiento o sufrido deterioro por cualquier causa que no pueda ser considerada como inevitable.

1.2.9 Seguro a suscribir por el Contratista

El contratista quedará obligado, después de la comprobación del replanteo y antes del comienzo de las obras, a facilitar a la Dirección de Obra la documentación que acredite haber suscrito una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil de él mismo, de los técnicos y personal a su cargo, de los facultativos, de la Dirección de Obra, así como del

personal encargado de la vigilancia de las obras, por daños a terceros o cualquier otra eventualidad que se produzca durante los trabajos de ejecución de obra.

1.2.10 Relaciones entre los documentos del proyecto y normativa

En el caso que aparezcan contradicciones entre los Documentos contractuales (Pliego de Condiciones, Planos y Cuadros de precios), la interpretación corresponderá al Director de Obra.

La inclusión en el contrato de las Cubicaciones y Mediciones no implica su exactitud respecto a la realidad.

Son documentos informativos los incluidos habitualmente en la Memoria del Proyecto. Dichos documentos representan una opinión fundada de la Propiedad.

Sin embargo, ello no supone que se responsabilice de la certeza de los datos que se suministran y, en consecuencia, deben aceptarse tan sólo como complemento de la información que el

Contratista debe adquirir discretamente y con sus propios medios. Por tanto, el Contratista será responsable de los errores que se puedan derivar de su defecto o negligencia, con la consecución de todos los datos que afectan al Contrato, al planteamiento y a la ejecución de la obra.

2 Condiciones del proceso de ejecución

La excavación del túnel se efectuará en tres fases (avance, destroza y contrabóveda), definidas geoméricamente en los planos, mediante medios mecánicos o con perforación y voladura.

En los planos se define la situación y características de los tipos de sostenimiento proyectados para cada una de las clases de terreno que se prevé atravesar. Los valores proporcionados del índice RMR de Bieniawski (1989) son de carácter orientativo.

2.1 Excavación con medios mecánicos: retroexcavadora y martillo hidráulico.

Para la excavación con medios mecánicos se empleará una máquina retroexcavadora, preferiblemente con chasis sobre orugas, con cazo excavador y un martillo hidráulico.

Para la elección de la máquina retroexcavadora y el martillo hidráulico más adecuado hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Resistencia a compresión simple de la roca. A mayor resistencia se debe emplear una potencia hidráulica superior para obtener la energía de impacto necesaria para romper la roca.
- Grado de alteración y fracturación de la roca que influirá en un mayor rendimiento del picado.
- En función de los dos aspectos anteriores, se elegirá la potencia o peso del martillo hidráulico, el cual lleva asociado una potencia hidráulica y por tanto, una máquina retroexcavadora capaz de proporcionarla.
- La máquina incorporará protecciones en la cabina de control para evitar daños producidos por el material desprendido durante la excavación.

2.2 Excavación con explosivos

Antes del Inicio de los trabajos de excavación, se propondrá a la Dirección de Obra, para su aceptación, los esquemas de tiro que piense utilizar en los diferentes tipos de terreno.

El plan de tiro inicial podrá ser modificado en función de la experiencia adquirida durante la ejecución de la obra, previa aprobación por escrito de la Dirección de Obra.

Dadas las características geotécnicas de los terrenos formados por materiales de distinta dureza, y con planos de debilidad, la excavación con explosivos deberá adecuarse a estas heterogeneidades del terreno para conseguir la optimización de la excavación.

El plan de tiro deberá analizar en particular:

- Tipos y características técnicas de los explosivos previstos.
- Reparto de las cargas de barrenos.
- Diámetro y longitud de los barrenos.
- Distancia entre barrenos.
- Retardos y micro-retardos previstos.
- Cargas instantáneas y cargas totales.

El Contratista deberá cuidarse del buen recorte de la sección en cualquier tipo de terreno, condición esencial para la correcta aplicación del Nuevo Método Austríaco. Evitará en particular la dislocación de la roca en el entorno de la excavación y las irregularidades del recorte. Por eso deberá utilizar la técnica del recorte fino, cuyas características principales son las siguientes:

- Los barrenos de contorno o de perfil deberán ser rigurosamente paralelos y equidistantes (desviación máxima tolerada de tres centímetros por metro).
- La distancia entre barrenos del perfil no sobrepasará quince veces el diámetro del barreno.
- El tipo de explosivo se seleccionará entre los más adecuados para este trabajo, dentro de los existentes en el mercado.
- El explosivo se seleccionará entre los más adecuados para este trabajo, dentro de los existentes en el mercado.
- El explosivo se repartirá uniformemente en toda la longitud del barreno y el diámetro de las cargas será aproximadamente la mitad del diámetro de los barrenos.
- Los barrenos del perfil se tirarán simultáneamente y en la última fase de la voladura.

2.3 Saneos

Inmediatamente después de la excavación de cada avance y previamente a la colocación de la capa de sellado y el inicio de los sostenimientos, se procederá al saneo de la sección excavada para eliminar bloques potencialmente inestables y la parte de materiales fracturados no desprendidos de la sección.

Se realizará un primer saneo con cazo provisto de dientes, eliminando después salientes y bloques de estabilidad dudosa con martillo hidráulico, barras, etc.

La operación de saneo estará siempre vigilada por un capataz experto, evitando en todo momento, especialmente en terrenos muy fracturados, que se produzca el descalce de bloques y el aumento de irregularidades en la sección excavada, que repercutan desfavorablemente en la estabilidad de la sección. Todas las operaciones descritas en este apartado se considerarán incluidas en los respectivos precios de excavación.

2.4 Longitud de avance

La longitud de avance máxima se fija en cuatro metros, pudiendo ser limitada por la Dirección de Obra, y ser rigurosamente respetada, ya que constituye uno de los parámetros básicos en la seguridad de la realización de la obra, influyendo en la calidad del perfilado y en el volumen de sobreexcavación y, por tanto, afecta a la efectividad de los sostenimientos.

Si no se respetara esta condición, la responsabilidad y riesgo por los excesos que se produjesen en la excavación recaerán sobre el contratista e irán a su cargo los costes de los elementos de sostenimiento adicionales, necesarios para garantizar a juicio de la Dirección de Obra, la rigidez y continuidad del sostenimiento previsto.

2.5 Excavación

Si tras la colocación del sostenimiento se detectaran defectos de gálibo para la colocación del revestimiento en todo su espesor, el contratista estará obligado a la demolición de las partes afectadas, sustituyendo todos los elementos del sostenimiento e incluyendo los elementos adicionales que la Dirección de Obra juzgue oportunos para la recuperación de la funcionalidad del mismo, en la medida que pueda ser afectada por los trabajos de repicado y reposición (discontinuidades en la capa de hormigón proyectado, anulación de la efectividad de soleras, etc.). Todos los trabajos de reposición del sostenimiento, más los adicionales correrán a cargo del contratista sin derecho a reclamación.

2.6 Ventilación

Se instalará una ventilación soplante, que garantice el caudal suficiente para la dilución de los humos de las voladuras. El ventilador se instalará en la boca de entrada al túnel.

3 Sostenimiento

En los planos se define la situación y las características del sostenimiento proyectado para cada tramo del túnel.

El contratista deberá establecer sus propias deducciones o conclusiones en cuanto a la naturaleza de los materiales, las dificultades para la realización y mantenimiento de las excavaciones necesarias y la posible necesidad de efectuar otros trabajos en relación con la geología del emplazamiento, debiendo aceptar la plena responsabilidad de las mismas.

3.1 Tipos de sostenimiento

Dentro del conjunto de elementos a colocar en la sección del túnel para garantizar su estabilidad, se establece una diferenciación entre sostenimientos ordinarios colocados durante la excavación de la galería y elementos singulares o de refuerzo. Estos últimos son los que se colocan, previa autorización de la Dirección de Obra, en secciones ya excavadas y

sostenidas, pero cuyo comportamiento, determinado a través de medidas de convergencia o mediante inspección de fallos y grietas, aconseja refuerzos adicionales.

En los planos se definen los tipos de sostenimientos ordinarios a colocar en el frente y en los emboquilles, con los elementos usuales de la técnica del Nuevo Método Austríaco (bulones, hormigón proyectado y cerchas) y que se utilizarán, salvo modificación por parte de la Dirección de Obra para hacer frente a las necesidades de los tipos de terrenos que se atraviesen.

Las características de los elementos que se utilizan en los citados sostenimientos y las condiciones y características que se les exigen, se incluyen en el proyecto.

3.1.1 Normas generales de ejecución

Como consideraciones generales válidas se establecen las siguientes:

- La proyección de una capa (capa de sellado) de hormigón proyectado en terrenos con $RMR < 70$, reforzado con fibras metálicas, se ejecutará una vez saneada la excavación para garantizar a corto plazo la estabilidad de la sección, evitando con ello los fenómenos de venteo y alteración que pudieran originar desprendimientos de fragmentos en la zona de trabajo. Los espesores de la capa de sellado se considerarán incluidos dentro del espesor total de hormigón proyectado que en cada caso se especifique.
- Los bulones habrán de colocarse cosiendo las cuñas potencialmente inestables. Estos se colocarán inmediatamente después de la capa de sellado.
- Las cerchas estarán preformadas y dobladas según la sección teórica del túnel. Los perfiles TH y perfiles HEB suelen colocarse con el hueco del perfil metálico hacia el interior de la galería de modo que pueda quedar relleno por el hormigón proyectado.
- El sostenimiento se colocará siempre hasta el fondo, en contacto con el terreno natural, para lo que se exigirá una rigurosa limpieza de estas partes de la excavación.

Se excluye el caso de los terrenos de mala calidad en los que las cerchas pueden abrirse lateralmente para quedar apoyadas a media altura mediante las oportunas placas o patones de reparto.

- En todas las operaciones de desescombro y limpieza, el Contratista deberá tener especial cuidado en no deteriorar las partes bajas de los sostenimientos colocados, pudiendo exigírsele la sustitución, a su cargo, de los elementos afectados.

3.1.2 Precauciones especiales

Al margen de lo ya señalado en el capítulo de Excavación sobre los sostenimientos mínimos a ejecutar antes de una nueva operación de pase, se establecen aquí las siguientes precauciones adicionales:

- Para un avance determinado, se deberá acabar en el mismo turno (o en cualquier caso sin que haya discontinuidad en el tiempo) toda capa de hormigón proyectado.
- El turno que preceda a una interrupción de la obra de varias horas o días (fines de semana, etc.) deberá acabar en su totalidad, el sostenimiento del nuevo avance, según las definiciones establecidas. Por otra parte, se procederá en los terrenos en que así se haya previsto en las secciones tipo, a la proyección del frente con un

espesor mínimo de cinco centímetros de hormigón proyectado u otros eventuales sostenimientos temporales.

- En caso de detenciones prolongadas (vacaciones, paradas, etc.), además de lo ya especificado, la Dirección de Obra analizará el comportamiento de los tramos ya excavados y los tramos sometidos a especial vigilancia, proponiendo con antelación suficiente los refuerzos que fuesen necesarios para garantizar la estabilidad de la excavación durante todo el tiempo que dure la parada. Se considerarán faltas muy graves, la ejecución de pases sin sostenimientos previos especificados y el incumplimiento de lo señalado para detenciones prolongadas, pudiéndose exigir al

Contratista, a su cargo, la colocación de sostenimientos específicos para recuperar la estabilidad de las secciones afectadas, al margen de poder proceder a la recusación de los responsables de estas actuaciones.

- En caso de malos recortes, la eficacia de los sostenimientos puede quedar muy limitada por las discontinuidades o irregularidades en el perfil, por lo que la Dirección de Obra podrá ordenar la colocación de elementos adicionales de sostenimiento, como bulones de mayor longitud en el entorno de la sobreexcavación, mallazo y mayor espesor de gunita, que garanticen la estabilidad de la sección.
- El Contratista estará obligado a conseguir buenos recortes quedando a su cargo la ejecución de estos trabajos complementarios cuando se deriven de defectos o incumplimientos en la ejecución de la excavación.

3.1.3 Refuerzos

Al margen de los sostenimientos habituales que se coloquen en el frente, cuando un tramo de la galería ya construida presente problemas de estabilidad, se procederá a reforzarlo aumentando la cuantía de los elementos de sostenimiento o con la colocación de nuevos elementos. El criterio para la ejecución de estos refuerzos será el seguimiento técnico de la excavación y del sostenimiento de la galería y los datos de auscultación. La parte de la sección que se haya de reforzar y la longitud de la galería afectada serán decididas por la Dirección de

Obra, si bien, en casos de inestabilidad repentina observada en ausencia de la Dirección de Obra, será el Contratista quien estará obligado a colocar los refuerzos inmediatos que a su juicio considere necesarios, justificando posteriormente su decisión a la Dirección de Obra. Ante estas posibles actuaciones, el Contratista estará obligado a equiparse con los elementos accesorios necesarios para poder actuar con rapidez en cualquier tramo y parte de la sección del túnel, donde los refuerzos fuesen requeridos.

La medición y abono de los refuerzos se realizará por las unidades realmente ejecutadas aplicándose el precio de los elementos de refuerzo establecidos para esta aplicación, sin que tenga el Contratista derecho a ningún tipo de abono o compensación por estos conceptos.

3.2 Bulones

En terrenos rocosos o competentes, el bulonaje definido en el Proyecto es de expansión. Los bulones podrán ser eventualmente activos en algunos tramos del túnel si las condiciones así lo aconsejan, a criterio de la Dirección de Obra. La dirección de Obra se reserva la facultad de cambiar a un anclaje con resina o con mortero o de cualquier otro tipo, en función de los

resultados de los ensayos efectuados en obra. En suelos, rocas blandas o materiales poco competentes serán preferibles los de inyección con lechada de cemento.

3.2.1 Materiales

- **Bulones expansivos:** se emplearán diferentes bulones de expansión o de anclaje por fricción definidos por su carga de rotura. Este tipo de pernos expansivos consiste en un tubo de acero plegado que se expande en el barreno por medio del bombeo de agua a alta presión en su interior. Las placas de unión entre el bulón y el hormigón proyectado, el mallazo o la cercha se efectuará mediante una placa cuadrada de acero S-275-JR, de las dimensiones indicadas en los planos. Las placas estarán provistas de una rótula semiesférica que permita orientar el bulón oblicuamente en relación con la normal de la pared. En formaciones blandas se podrá prescindir de dicha rótula.
- **Placas:** la unión entre el bulón y el hormigón proyectado, el mallazo o la cercha se efectuará mediante una placa cuadrada de acero, de las dimensiones indicadas en los Planos. Las placas estarán provistas de una rótula semiesférica que permita orientar el bulón oblicuamente en relación con la normal de la pared.

3.3 Mallazo

El mallazo constituye la armadura del hormigón de solera y cuando el hormigón proyectado no incorpora fibras. La Dirección de Obra podrá definir a lo largo de toda la obra la cantidad de mallazo a colocar, modificada de la reflejada en los planos, tanto en aplicación ordinaria como de refuerzo.

3.3.1 Materiales

El mallazo será electrosoldado de retícula y diámetros de alambre según se especifican en los sostenimientos. Se utilizará acero de elevado límite elástico. Se tendrán en cuenta las exigencias que incorporan los nuevos Artículos 240 y 241 del PG-3 en la O.M. FOM/475 de 13/02/02.

3.3.2 Puesta en obra

La distancia entre la malla de acero y la pared (terreno o capa de hormigón proyectado) estará comprendida entre 2 y 7 centímetros. La última capa de mallazo del sostenimiento estará recubierta con un grueso mínimo de 3 centímetros de hormigón proyectado. El número de puntos de sujeción de la malla a la pared será como mínimo de 2 puntos por metro cuadrado, a fin de evitar las vibraciones de la capa durante la proyección de hormigón. El solapamiento entre dos capas de mallazo contiguas será de 20 centímetros o dos cuadrículas.

3.4 Cerchas

En los terrenos de peor calidad geotécnica se emplean cerchas, marcos, cuadros o perfiles metálicos como elementos de sostenimiento y rigidización de la sección del túnel. El doblado de las cerchas vendrá efectuado de fábrica ajustándose a la forma y perímetro de la sección teórica y se suministrarán despiezadas en tramos que permitan su correcta manipulación.

Entes de su puesta en obra, se efectuará una comprobación de forma con el montaje de sus distintos elementos para verificar que se cumplen las medidas especificadas.

3.4.1 Materiales

Las cerchas TH serán de tipo deslizante, fabricadas con acero tipo S-355-JR (UNE EN 10025-1:2006) de límite elástico no inferior a 355 N/mm². Sus distintas piezas vendrán preparadas para su unión con solapes mínimos de 40 centímetros.

Las cerchas HEB estarán fabricadas con acero tipo S-355-JR (UNE EN 10025-1:2006) de límite elástico no inferior a 355 N/mm².

En las uniones se utilizarán grapas tipo horquilla o abarcones. El tipo de grapa será el adaptado a forma de perfil y serán de tipo cajón con grandes superficies de contacto que impida el giro de grapas.

El arriostamiento longitudinal de las cerchas se realizará mediante tresillones constituidos por redondos de acero de 20 milímetros de diámetro unidos firmemente a las cerchas.

3.4.2 Puesta en obra

En la colocación de las cerchas se cuidará especialmente la correcta ubicación geométrica del perfil dentro de la sección, se realizará con apoyo topográfico, al menos en una de cada cinco cerchas colocadas. Se prohibirá la colocación de las cerchas fuera de su perfil, arrimadas al terreno, lo que redundaría posteriormente en problemas de gálibo o malas uniones en los elementos.

Los huecos existentes entre las cerchas y el terreno o capa de sellado se rellenarán con hormigón proyectado, en las condiciones que se especifican en el capítulo de Excavación, antes de proceder con el siguiente pase.

Todas las uniones entre piezas de una misma cercha de tipo deslizante se realizarán con dos grapas que se situarán en los extremos de la zona de solape.

El Contratista deberá conseguir, con las precauciones anteriores, que todas las uniones entre cerchas reúnan las condiciones adecuadas. Defectos en las mismas, tales como solapes insuficientes, grapas juntas, tacos o cuñas, cuando sean debidos a una incorrecta colocación de las cerchas, podrían ser penalizados hasta con el 5% de la medición de las cerchas, al margen de que defectos repetidos pudieran ser considerados por la Dirección de Obra como peligrosos, exigiendo al Contratista la colocación, a su cargo de los elementos correctores que estime necesarios como anclajes o bulones hasta de seis metros de longitud, volúmenes adicionales de gunita, etc.

Los tresillones o barras de arriostamiento longitudinal se colocarán cada 1,4 metros a lo largo del desarrollo de la cercha. Este arriostamiento facilitará la estabilidad de la cercha en la fase de colocación, antes de la proyección de la capa de hormigón que recubrirá la cercha.

Durante la proyección del hormigón se evitarán los vacíos detrás de las cerchas, mediante una proyección oblicua.

En terrenos blandos, las cerchas deberán llevar las placas de reparto necesarias o incluso acompañarse de carreras metálicas de reparto para reducir las tensiones sobre el terreno.

Dentro del precio de unidad de cercha, se incluirá en este caso, la parte proporcional de la chapa de reparto, los tresillones de arriostamiento y los tornillos de sujeción.

3.5 Hormigón proyectado

Las características básicas del hormigón proyectado a utilizar son las siguientes:

- Hormigón proyectado por vía húmeda, flujo denso. Resistencia característica a 28 días: 35 N/mm².
- Proyección mecanizada.
- Aditivos: fluidificantes, inhibidores/retardadores, acelerantes/activadores, humo de sílice.

Se incorporará a la mezcla fibras metálicas y, previa autorización de la Dirección de Obra, podrá emplearse mallazo, comprobando que se mantiene, al menos, la resistencia prevista.

La correcta puesta en obra del sostenimiento presupone un dominio perfecto de la tecnología del hormigón proyectado por parte del Contratista. En el caso que la Dirección de Obra considerase insuficiente la experiencia del Contratista, éste deberá proceder a la inclusión del personal experimentado en sus equipos, a diferentes niveles, previa aprobación de la Dirección de Obra durante el tiempo necesario para la perfecta formación de su personal.

Será de libre elección del contratista la procedencia y el tipo de maquinaria a utilizar en la puesta en obra del hormigón proyectado. No obstante, el Contratista, antes de empezar las obras, deberá presentar la documentación precisa que defina las características de la maquinaria y los procedimientos de construcción para su aprobación por la Dirección de Obra, quién comprobará que se ajusta a lo establecido en el presente Pliego, así como a lo establecido en el artículo 610 del PG3 incluido en la OM FOM/475 de 13/02/2002.

En principio y por razones de seguridad se preferirá la aplicación con robot gunitador dirigido a distancia.

Antes de la primera aplicación en obra se llevará a cabo una serie de ensayos previos en el exterior del túnel para entrenamiento de los operarios, puesta a punto de los equipos y para el ajuste de la dosificación sobre la base orientativa o inicial reflejada en el presente Pliego.

Finalizados los ensayos (tres o cinco) y con las correcciones pertinentes, la Dirección de Obra autorizará el inicio de las operaciones en el túnel.

Una vez conseguida la regularidad en la utilización del hormigón proyectado, se llevará a cabo en una de las labores ordinarias de puesta en obra una prueba de rechazo que servirá para comprobar la idoneidad de los trabajos ejecutados, y sus resultados serán contrastados y firmados por el Contratista y Director de Obra como documento contractual en la medición de espesores de gunita que puedan quedar al margen de los sistemas ordinarios de control de espesor.

3.5.1 Materiales básicos

Todos los materiales constitutivos del hormigón deberán ser aprobados por la Dirección de Obra a propuesta del Contratista, quien deberá aportar los datos y ensayos pertinentes que garanticen su idoneidad dentro de lo establecido en el presente Pliego.

- Cemento

Se ajustará al vigente Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos (RC-08).

Salvo indicación del Proyecto, se empleará el cemento tipo CEM II-42,5.

En caso de circunstancias especiales que aconsejen la utilización de otro tipo de cemento, será la Dirección de Obra quien determinará el tipo y categoría del cemento a emplear en

cada caso, sin que esto suponga modificación alguna sobre los precios a aplicar en el hormigón proyectado, a excepción del empleo de cementos resistentes a los sulfatos que implica la aplicación del precio de suplemento incluido en el Cuadro de Precios. El contratista facilitará igualmente los medios necesarios para la ejecución de todos los ensayos que fuera preciso realizar motivados por este cambio.

- Agua

Cumplirá en cuanto a su idoneidad química y contenido de residuos orgánicos lo establecido en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. La toma de muestras y ensayos correspondientes la determinará la Dirección de Obra en función de las garantías de calidad y uniformidad en el abastecimiento a la planta de hormigonado, ajustándose en cualquier caso a las normas UNE vigentes al respecto.

- Áridos

Las características de los áridos se ajustaran a las especificaciones de carácter general de la Instrucción EHE-08.

Los áridos a utilizar en el hormigón proyectado se obtendrán mediante selección y clasificación de materiales naturales o procedentes de machaqueo, o bien con una mezcla de ambos, aunque con preferencia se harán servir los áridos rodados que disminuyen notablemente el mantenimiento de la máquina de proyección.

El tamaño máximo del árido será de 12 milímetros y las curvas granulométricas se ajustarán al huso elegido para la dosificación.

Como control rutinario y rápido de estos materiales se utilizara el ensayo de equivalente de arena que será como mínimo de 80.

En la dosificación del agua del amasado se tendrá en cuenta la humedad de los áridos en planta para poder realizar las correcciones pertinentes.

- Humo de sílice

El humo de sílice produce efectos beneficiosos sobre la durabilidad y permeabilidad del hormigón, al margen de otros efectos como la disminución del rebote y una mejor

trabajabilidad. Por ello se establece un uso continuado de este aditivo en un porcentaje de 35 kg/m³ (aproximadamente un 7 ó 8 % respecto al peso del cemento).

- Aditivos

Este apartado se refiere a la utilización de acelerantes, inhibidores, fluidificantes, activadores, etc., necesarios para la colocación del hormigón proyectado. Éstos se ajustarán a las prescripciones de la Instrucción EHE-08, siendo las normas UNE vigentes las de referencia a efectos de su caracterización.

Como en el caso de la maquinaria, se dejará al Contratista la elección del tipo y procedencia de los aditivos a utilizar, debiendo presentar la documentación pertinente para su análisis y aprobación por la Dirección de Obra, de acuerdo a las bases y conceptos del presente Pliego.

Los aditivos a utilizar deberán ser compatibles con el cemento, áridos y humo de sílice. No serán corrosivos a las armaduras, ni afectarán a la durabilidad de las obras, además de cumplir con los requisitos mínimos exigidos en cuanto a los controles de calidad ejecutados en obra.

La proporción óptima de los aditivos se obtendrá sobre la pauta de las recomendaciones del fabricante en los ensayos previos. Cualquier cambio en el tipo y procedencia de los aditivos conllevará un proceso similar y su utilización no estará permitida sin la aprobación de la Dirección de Obra.

3.5.2 Requisitos requeridos

La consistencia del hormigón fresco se medirá al vertido de la cuba en el momento de su puesta en obra mediante el Cono de Abrams (UNE-EN 12350-2:2006), aceptándose valores de asiento entre 100 y 150 milímetros. Deberá tenerse en cuenta que los valores del cono, en general, serán superiores a efectos de prever la influencia del transporte y de las condiciones climatológicas durante el mismo.

Para el hormigón endurecido se evaluarán las propiedades siguientes:

- Resistencia a compresión a 28 días: 30-40 MPa.
- Módulo de elasticidad (E): 27.000-30.000 N/mm².
- Coeficiente de permeabilidad: 6×10^{-10} – 20×10^{-10} m/s.

3.5.3 Dosificación de referencia

En principio se considerará una dosificación inicial de cemento de 475 kg/m³, estimada suficiente para alcanzar las resistencias exigidas.

A partir de ella, se tienen en cuenta otras relaciones habituales en la ejecución de hormigón proyectado por vía húmeda como:

- Relación agua/cemento: comprendida entre 0,40 y 0,42 (para el tamaño máximo de árido utilizado: 12 mm).
- Relación áridos/cemento: comprendida entre 3,5 y 4 y de acuerdo al huso granulométrico señalado, se establece la siguiente dosificación de referencia en la que se omiten, por las razones antes comentadas, los tipos y dosificaciones de los aditivos fluidificantes, activadores, etc.

En caso de no alcanzarse las resistencias esperadas, se procederá a la optimización de la dosificación de la mezcla y al aumento de la dosificación de cemento hasta que se alcancen las resistencias exigidas. Análogamente, se admiten variaciones en sentido contrario.

Este cambio no supondrá modificación alguna sobre los precios de hormigón proyectado establecidos.

Previa autorización de la Dirección de Obra, se utilizará la incorporación de fibras metálicas, en dosificación no inferior a 35 kg/m³, a la mezcla de hormigón proyectado como sustitución del mallazo.

3.5.4 Puesta en obra

La proyección del hormigón se efectuará mediante equipos automatizados (robots). El Contratista adoptará las medidas pertinentes para asegurar la continuidad del suministro del hormigón durante el proceso de hormigonado.

Los equipos se mantendrán permanentemente en condiciones óptimas de funcionamiento, debiendo prever el Contratista, los medios necesarios para afrontar eventuales averías de los equipos de proyección durante el hormigonado.

Su rendimiento mínimo será de 6 m³/h y en su utilización se mantendrán las recomendaciones del fabricante respecto al caudal y presión del aire comprimido, tipos de boquillas, etc.

La distancia de proyección será de un metro, mantenida de modo regular, con proyección perpendicular a las paredes de la excavación, excepto en el caso de sostenimientos con cerchas en que se utilizará una proyección oblicua para el correcto llenado en el trasdós de las mismas.

Antes de cada aplicación, y en el caso de macizos rocosos, habrá de limpiarse con agua o aire a presión toda la superficie a proyectar, eliminando de ella elementos extraños tales como hollín, polvo o fangos, pudiendo exigir la Dirección de Obra la sustitución de operarios y responsables de tajo si se produjera un incumplimiento de este tipo.

El grueso máximo de una capa de hormigón ejecutada en una sola fase no podrá exceder de 10 centímetros, excepto en las zonas bajas de la excavación donde no existe la posibilidad de despegue de las capas de gunita.

En el caso de preverse temperaturas extremas durante el hormigonado, el Contratista propondrá las medidas especiales que deberán adoptarse, las cuales se someterán a la aprobación de la Dirección de Obra.

3.5.5 Control y ensayos

La calidad del hormigón proyectado se controlará permanentemente durante la ejecución de la obra.

El tipo de control se extenderá desde los materiales hasta la calidad y el espesor de los hormigones ejecutados.

Dentro de los materiales, los cementos, microsílíce, aditivos, etc. procedentes de un proceso de elaboración industrial, no serán objeto de seguimiento específico, siendo la Dirección de Obra la que en su momento determine las verificaciones y comprobaciones oportunas.

Se llevará un control periódico de la calidad de los áridos en la planta de hormigonado, ejecutándose muestreos para el ensayo de equivalente de arena cada 20 m³ de hormigón fabricado, y muestreos para análisis granulométricos cada 60 m³ de hormigón fabricado.

Las características de resistencia de los hormigones se controlaran mediante muestras en tajos ordinarios de gunita del túnel. El muestreo comprenderá tres probetas cúbicas de diez centímetros de lado para ensayos a 24 horas y una artesa o placa de 50 x 50 centímetros de lado y quince centímetros de profundidad, de la que extraerán doce probetas de seis centímetros de diámetro y quince centímetros de altura, para ensayar en grupos de tres a 3, 7, 28 y 90 días. La resistencia a períodos menores a 1 día, se establecerá por extrapolación. La densidad del muestro se establece en 1 de cada 60 m³.

En la toma de muestras, tanto los cubos como artesa, estarán subverticales, con las aberturas dirigidas perpendicularmente a lanza de proyección. Los resultados obtenidos servirán para controlar la resistencia de los hormigones respecto a los mínimos especificados. Las resistencias obtenidas habrán de ser superiores o iguales a las exigidas, y en caso de que se observen resultados inferiores, la Dirección de Obra tomará las medidas oportunas, como la ejecución de sostenimientos adicionales, no abonables, en todo el tramo que se considere afectado, además de ordenar la comprobación y cambios de las dosificaciones en planta y obra para recuperar las resistencias exigidas.

A estos efectos, la Dirección de Obra obtendrá, a través del Contratista, acceso libre a la planta de hormigonado para seguir y controlar, tanto los datos de las amasadas como los volúmenes suministrados.

El control de los espesores reales de gunita colocados en el túnel se llevara a cabo mediante la obtención de testigos del sostenimiento recogidos de forma aleatoria dentro del mismo, a razón de 1 testigo cada 5 metros del túnel. Alternativamente, mediante clavos o vástagos fijados previamente a la superficie excavada.

Los datos obtenidos se considerarán contractuales y su tratamiento estadístico, junto con los datos de los sostenimientos ejecutados, servirán para cuantificar los posibles déficit de hormigón proyectado, respecto a los estipulados, a efecto de su reposición o descuento si se trata de volúmenes considerados estructuralmente como poco importantes. En este último caso con una penalización del 20% sobre la medición de los volúmenes afectados.

3.6 Fibras estructurales para hormigón proyectado

- Fibras de acero

Las fibras deben estar constituidas por acero de resistencia mínima a la tracción de

1.000 N/mm². Su superficie debe estar limpia de productos que puedan perjudicar la adherencia acero-hormigón y previamente a su empleo, deben realizarse ensayos tanto en laboratorio como en obra, a fin de determinar la dosificación más conveniente. La dosificación debe ser tal que se consiga una distribución uniforme de las fibras en la mezcla, sin que se formen apelmamientos, así como una puesta en obra idónea, y dependerá del diámetro equivalente (entre 0,45 y 0,75 mm) y la longitud desarrollada (entre 30 y 40 mm) de las fibras. En los casos de sustitución del mallazo por fibras debe comprobarse que éstas proporcionan a la gunita una absorción de energía igual o mayor que el mallazo. La absorción de energía se medirá en pruebas de carga hasta una flecha de 25 mm sobre una placa de 60 x 60 x 10 cm, soportada en los cuatro bordes y con una luz libre de 50 cm. La carga se aplicará en el centro de la placa con una superficie de contacto de 10 x 10 cm. No se aceptarán soluciones con una energía adsorbida inferior a 750 Joules.

- Fibras estructurales sintéticas

Las fibras sintéticas estructurales cumplen la misma función que las fibras metálicas, aportando algunas favorables diferencias, son más livianas, no se oxidan, reducen el desgaste en máquinas, tuberías y mangueras, menor rebote al proyectar y por otra parte, retardan el efecto de las altas temperaturas en el hormigón y reducen la fisuración plástica producida en el proceso de retracción del hormigón.

Podrán estar fabricadas en polipropileno, polietileno o poliolefina. Su presentación puede ser monofilamento o multifilamento. En la actualidad se fabrican varias tipologías de fibra sintéticas para la adición al hormigón proyectado, diferentes longitudes, diámetros, morfología y agrupación.



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

Documento V: PRESUPUESTO

Autor: José Gullón Conejo

Tutor: Daniel Vázquez Silva

1 Mediciones globales

1.1 Mediciones de mano de obra

	PERSONAL	UDS.
MESES	Director Facultativo	15
MESES	Oficial 1ª: Jumbista de perforación Artillero para carga, conexión y disparo de voladuras Colocación de cerchas	15
MESES	Oficial 2ª: Ayudante Jumbista en perforación Ayudante de Artillero Ayudante para colocación de cerchas	15
MESES	Palista (Oficial 1ª)	15
MESES	Retrista (Oficial 1ª)	15
MESES	Gunitador (Oficial 1ª)	15

1.2 Mediciones maquinaria

	MAQUINARIA	UDS.
MESES	Jumbo de perforación de 3 brazos para perforación de barrenos	12
MESES	Elevador telescópico	15
MESES	Nagolitera	4
MESES	Pala Cargadora 4 m ³	15
MESES	Camión Dúmpfer (x3) (incluye operario)	15
MESES	Retroexcavadora	15
MESES	Robot Gunitador para proyección de hormigón	15
MESES	Minador	9

1.3 Mediciones emboquille

	EMBOQUILLES	UDS.
METROS	Micropilotes de 15 m de longitud, 180 mm de diámetro	1.980,00
METROS CÚBICOS	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con malla	448,20
UNIDADES	Cerchas HEB-180	54,00

1.4 Mediciones explosivos

PERFORACIÓN Y VOLADURA		UDS.
KILOGRAMOS	Explosivo Gelatinoso	174.400,00
UNIDADES	Detonadores	146.900,00
KILOGRAMOS	Agente Explosivo Seco	202.100,20
METROS	Cordón detonante de 100 g/m	125.000,00
METROS	Línea de tiro para voladuras	900,00

*NOTA: Se utiliza la segunda hipótesis.

1.5 Mediciones de transporte y almacenamiento de explosivos.

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS		UDS.
UNIDADES	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de explosivos de 5.000 kg de capacidad máxima	2
UNIDADES	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de detonadores de 1.250 kg de capacidad máxima	2
HORAS	Vigilante	14.284,8
PEDIDOS	Transporte del Explosivo	27

1.6 Mediciones de sostenimiento.

SOSTENIMIENTO		UDS.
UNIDADES	Bulones de fibra de vidrio de 4 metros de longitud	15744,00
METROS	Micropilotes de 9 metros de longitud, 0150, 101,6x83,6 mm	2970,00
METROS CÚBICOS	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con fibras de polipropileno	10.370,00
UNIDADES	Cerchas TH-29	1215,00
UNIDADES	Cerchas HEB-140	140,00
METROS CUADRADOS	Mallazo 20x20x5	23.256,25

1.7 Mediciones de ventilación.

VENTILACIÓN		UDS.
UNIDADES	Ventilador 137 kW	2
METROS	Tubería de ventilación lisa soplante de 2200 mm de diámetro	2100

1.8 Mediciones aire comprimido

AIRE COMPRIMIDO		UDS.
MESES	Compresor 21 m ³ /min	13

METROS	Tubería metálica de 4" de diámetro con bridas	2100
--------	---	------

1.9 Mediciones electrificación.

ELECTRIFICACIÓN		UDS.
MESES	6 Grupo electrógeno	15
LITROS	Consumo gasoil	135.705,60

2 Precios unitarios

2.1 Precios unitarios de mano de obra

	PERSONAL	PRECIO UNITARIO
MESES	Director Facultativo	5.500,00
MESES	Oficial 1ª: Jumbista de perforación Artillero para carga, conexión y disparo de voladuras Colocación de cerchas	5.400,00
MESES	Oficial 2ª: Ayudante Jumbista en perforación Ayudante de Artillero	4.000,00
MESES	Palista (Oficial 1ª)	5.000,00
MESES	Retrista (Oficial 1ª)	5.000,00
MESES	Gunitador (Oficial 1ª)	5.000,00

**NOTA: Todos los precios de personal incluyen los costes de seguridad social.*

2.2 Precios unitarios maquinaria

	MAQUINARIA	PRECIO UNITARIO
MESES	Jumbo de perforación de 3 brazos para perforación de barrenos	24.000,00
MESES	Elevador telescópico	3.500,00
MESES	Nagolitera	600,00
MESES	Pala Cargadora 4 m ³	18.750,00
MESES	Camión Dúmpster (x3) (incluye operario)	7.400,00
MESES	Retroexcavadora	13.400,00

MESES	Robot Gunitador para proyección de hormigón	8.000,00
MESES	Minador	17000,00

*NOTA: Todos los precios del alquiler de la maquinaria incluyen el consumo de gasolina y el coste del traslado hasta la obra.

2.3 Precios unitarios emboquilles

EMBOQUILLES		UDS.
METROS	Micropilotes de 15 m de longitud, 180 mm de diámetro	50,30
METROS CÚBICOS	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con malla	90,00
UNIDADES	Cerchas HEB-180	1.339,64

2.4 Precios unitarios explosivos

PERFORACIÓN Y VOLADURA		PRECIO UNITARIO
KILOGRAMOS	Explosivo Gelatinoso	3,12
UNIDADES	Detonadores	1,73
KILOGRAMOS	Agente Explosivo Seco	1,00
METROS	Cordón detonante de 100 g/m	1,64
METROS	Línea de tiro para voladuras	0,05

2.5 Precios unitarios almacenamiento y transporte de explosivos

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS		PRECIO UNITARIO
UNIDADES	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de explosivos de 5.000 kg de capacidad máxima	30.000,00
UNIDADES	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de detonadores de 1.250 kg de capacidad máxima	4.000,00
HORAS	Vigilante	19,50
PEDIDOS	Transporte del Explosivo	400,00

2.6 Precios unitarios sostenimiento

SOSTENIMIENTO		PRECIO UNITARIO
UNIDADES	Bulones de fibra de vidrio de 4 metros de longitud	12,40
METROS	Micropilotes de 9 metros de longitud, 0150, 101,6x83,6 mm	50,30
METROS CÚBICOS	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con fibras de polipropileno	90,00
UNIDADES	Cerchas TH-29	713,65
UNIDADES	Cerchas HEB-140	1.339,64

METRO CUADRADO	Mallazo 20x20x5	2,01
----------------	-----------------	------

2.7 Precios unitarios de ventilación.

VENTILACIÓN		PRECIO UNITARIO
UNIDADES	Ventilador 137 kW	25.000
METROS	Tubería de ventilación lisa soplante de 2200 mm de diámetro	10,00

2.8 Precios unitarios de aire comprimido

AIRE COMPRIMIDO		PRECIO UNITARIO
MES	Compresor 21 m ³ /min	2.500,00
METROS	Tubería metálica de 4" de diámetro con bridas	24,00

2.9 Precios unitarios de electrificación.

ELECTRIFICACIÓN		PRECIO UNITARIO
MESES	6 Grupo electrógeno	3000,00
LITROS	Consumo gasoil	1,30

3 Precios totales

3.1 Precios totales mano de obra.

PERSONAL (1 turno de 12 horas)		UDS.	€/UDS.	IMPORTE(€)
MESES	Director Facultativo	15	5.500,00	82.500
MESES	Oficial 1ª: Jumbista de perforación; Artillero para carga, conexión y disparo de voladuras Colocación de cerchas	15	5.400,00	81.000
MESES	Oficial 2ª: Ayudante Jumbista en perforación; Ayudante de Artillero	15	4.000,00	60.000

MESES	Palista (Oficial 1ª)	15	5.000,00	75.000
MESES	Retrista (Oficial 1ª)	15	5.000,00	75.000
MESES	Gunitador (Oficial 1ª)	15	5.000,00	75.000

3.2 Precios totales maquinaria.

	MAQUINARIA	UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
MESES	Jumbo de perforación de 3 brazos para perforación de barrenos	12	24.000,00	288.000
MESES	Elevador telescópico	15	3.500,00	52.500
MESES	Nagolitera	4	600,00	2.400
MESES	Pala Cargadora 4 m ³	15	18.750,00	281.250
MESES	Camión Dúmpster (x3) (incluye operario)	15	7.400,00	111.000
MESES	Retroexcavadora	15	13.400,00	201.000
MESES	Robot Gunitador para proyección de hormigón	15	8.000,00	120.000
MESES	Minador	9	17.000	153.000

3.3 Precios totales emboquilles.

	EMBOQUILLES	UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
METROS	Micropilotes de 15 m de longitud, 180 mm de diámetro	1.980,00	50,30	99.594
METROS CÚBICOS	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con malla	448,20	90,00	40.338
UNIDADES	Cerchas HEB-180	54,00	1.339,64	72.340,56

3.4 Precios totales explosivos.

	PERFORACIÓN Y VOLADURA	UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
Kg	Explosivo Gelatinoso	174.400,00	3,12	544.128
Uds.	Detonadores	146.900,00	1,73	254.137
Kg	Agente Explosivo Seco	202.100,20	1,00	202.100,20
METROS	Cordón detonante de 100 g/m	125.000,00	1,64	205.000
METROS	Línea de tiro para voladuras	900,00	0,05	45

3.5 Precios totales de almacenamiento y transporte de explosivos.

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS		UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
Uds.	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de explosivos de 5.000 kg de capacidad máxima	2	30.000,00	60.000
Uds.	Depósito de consumo desplazable para almacenamiento de detonadores de 1.250 kg de capacidad máxima	2	4.000,00	8000
HORAS	Vigilante	10.200	19,50	198.900
PEDIDOS	Transporte del Explosivo	27	400,00	9600

3.6 Precios totales de sostenimiento.

SOSTENIMIENTO		UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
Uds.	Bulones de fibra de vidrio de 4 metros de longitud	15.744,00	12,40	195.225,6
m	Micropilotes de 9 metros de longitud, 0150, 101,6x83,6 mm	2.970,00	50,30	149.391
m ³	Hormigón proyectado H/MP-35-III-SR con fibras de polipropileno	10.370,00	90,00	933.300
Uds.	Cerchas TH-29	1.215,00	713,65	867.084,75
Uds.	Cerchas HEB-140	140,00	1.339,64	187.549,6
m ²	Mallazo 20x20x5	23.256,25	2,01	46.745,0625

3.7 Precios totales ventilación.

VENTILACIÓN		UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
UNIDADES	Ventilador 137 kW	2	25000	50.000
METROS	Tubería de ventilación lisa soplante de 2200 mm de diámetro	2100	10,00	21.000

3.8 Precios totales de aire comprimido.

AIRE COMPRIMIDO		UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
MESES	2 Compresor 20 m ³ /min	15	5.000,00	75.000
METROS	Tubería metálica de 4" de diámetro con bridas	2100	24,00	50.400

3.9 Precios totales electrificación.

ELECTRIFICACIÓN		UDS.	€/UD.	IMPORTE (€)
MESES	6 Grupo electrógeno	15	3000,00	45.000
LITROS	Consumo gasoil	271.411,2	1,30	352.834,56

4 Resumen presupuesto

4.1 Presupuesto por partida.

CONCEPTO	IMPORTE (€)
PERSONAL (2 turnos)	897.000,00
MAQUINARIA	1.209.150,00
EMBOQUILLES	212.272,56
PERFORACIÓN Y VOLADURA	1.205.410,2
ALMACENAMIENTO DE EXPLOSIVO	216.500
SOSTENIMIENTO	2.379.296,013
VENTILACIÓN	71.000
AIRE COMPRIMIDO	125.400
ELECTRIFICACIÓN	397834,56
TOTAL COSTES	6.713.763,33

4.2 Presupuesto excavación

		€/m ³	€/m
Volumen excavado(m ³)		41,79	-
Metros (m)	2100	-	5.223,87

4.3 Presupuesto total.

CONCEPTO	IMPORTE (€)
COSTES TOTALES	6.713.763,33
GASTOS GENERALES (13% COSTES)	872.789,2329
BENEFICIO INDUSTRIAL (6% COSTES)	402.825,7998
TOTAL	7.989.378,363
I.V.A. (21% TOTAL)	1.677.769,546
PRESUPUESTO	9.667.147,819

El presupuesto para la construcción del túnel asciende a: Nueve millones seiscientos sesenta y siete mil ciento cuarenta y siete coma ochocientos diecinueve euros.