



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

**Máster en Ingeniería de Minas**



**Trabajo Fin de Máster**

**Análisis comparativo del desescombros de un túnel ferroviario  
avanzado con rozadora (minador)**

**Autora: Ainhoa Etxebarria Altuna**

**Tutor: Rafael Rodríguez Díez**

**Oviedo, Junio de 2017**

## *ÍNDICE*

---

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	11
2.	DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....	12
2.1.	ANTECEDENTES .....	12
2.2.	SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO.....	13
2.3.	GEOMETRÍA DEL PROYECTO .....	15
2.3.1.	Trazado en planta.....	15
2.3.2.	Sección tipo .....	16
2.3.3.	Geometría transversal .....	17
2.4.	OBRAS AUXILIARES .....	18
2.5.	SISTEMA CONSTRUCTIVO.....	19
2.5.1.	Especificaciones de la máquina de excavación .....	19
2.6.	SOSTENIMIENTO. NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO.....	21
2.7.	UBICACIÓN DEL VERTEDERO.....	22
3.	GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA .....	24
3.1.	GEOLOGÍA.....	24
3.1.1.	Estructura regional.....	25
3.1.2.	Estratigrafía y litología .....	25
3.1.3.	Planta y Perfil geológico.....	28
3.2.	GEOTÉCNIA.....	29
3.2.1.	Estudio geotécnico.....	29
3.2.2.	Unidades geotécnicas atravesadas .....	30
3.2.3.	Principales características de los materiales .....	32
4.	HIDROGEOLOGÍA Y DRENAJE.....	34
5.	ALTERNATIVAS DE DESESCOMBRO.....	37
5.1.	CINTA TRANSPORTADORA – ALTERNATIVA 1.....	37

5.1.1.	Descripción del sistema .....	37
5.1.2.	Ventajas .....	38
5.1.3.	Desventajas .....	39
5.2.	DÚMPERES ARTICULADOS – ALTERNATIVA 2.....	40
5.2.1.	Justificación de la propuesta de la alternativa .....	40
5.2.2.	Descripción del sistema .....	40
5.2.3.	Ventajas .....	42
5.2.4.	Desventajas .....	43
6.	CRITERIOS DE COMPARACIÓN .....	44
6.1.	CRITERIO ECONÓMICO.....	44
6.2.	PLAZO DE EJECUCIÓN DE LA OBRA.....	44
6.3.	IMPACTO AMBIENTAL POR EMISIONES.....	45
6.4.	NECESIDAD DE CAUDAL DE VENTILACIÓN .....	45
7.	CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES.....	46
7.1.	CONSIDERACIONES GENERALES .....	46
7.2.	RENDIMIENTO DE AVANCE TEÓRICO DEL MINADOR.....	47
7.3.	ESTIMACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS REALES DE LOS SISTEMAS DE EXCAVACIÓN Y DESESCOMBRO .....	49
7.3.1.	Estimación del rendimiento real - cinta transportadora.....	49
7.3.2.	Estimación del rendimiento real - dúmper y pala cargadora.....	52
8.	DISEÑO DEL SISTEMA DE DESESCOMBRO Y TRANSPORTE MEDIANTE DÚMPERES .....	54
8.1.	DIMENSIONAMIENTO DE LA FLOTA DE CAMIONES.....	54
8.1.1.	Selección de tipo de la maquinaria .....	54
8.1.2.	Cálculo de flota de camiones.....	56
8.2.	CÁLCULO DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN .....	69
8.2.1.	Plazo de ejecución de la obra .....	69

8.2.2.	Consumo de gasoil.....	71
8.2.3.	Condiciones sobre la ventilación.....	75
8.2.4.	Alquiler de camiones.....	80
8.2.5.	Impacto ambiental.....	83
8.2.6.	Gasto total de desescombro: dúmper articulado y pala cargadora.....	84
9.	DISEÑO DEL SISTEMA DE DESESCOMBRO Y TRANSPORTE CON CINTA TRANSPORTADORA.....	85
9.1.	DIMENSIONAMIENTO DE LA CINTA.....	85
9.1.1.	Datos de partida.....	85
9.1.2.	Dimensionamiento de la cinta 1: cinta fija.....	87
9.1.3.	Cálculo de la cinta transportadora 2: auxiliar.....	96
9.1.4.	Resumen de los resultados principales.....	110
9.2.	CÁLCULO DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN.....	111
9.2.1.	Plazo de ejecución de la obra.....	111
9.2.2.	Coste instalación de la cinta.....	112
9.2.3.	Condicionamiento sobre la ventilación.....	114
9.2.4.	Consumo energético.....	114
9.2.5.	Impacto ambiental.....	115
9.2.6.	Gasto total de desescombro: cinta transportadora.....	116
10.	ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS.....	117
10.1.	RESULTADOS DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN.....	117
10.1.1.	Coste de desescombro por m <sup>3</sup> .....	117
10.1.2.	Plazo de ejecución de la obra.....	118
10.1.3.	Impacto ambiental.....	118
10.1.4.	Necesidad de caudal de aire en la ventilación.....	119
10.2.	OTRAS CONSIDERACIONES DETERMINANTES.....	119



# Análisis comparativo del desescombro de un túnel ferroviario avanzado con rozadora



11. CONCLUSIONES .....	121
12. BIBLIOGRAFÍA.....	123

## *ÍNDICE DE FIGURAS*

---

Figura 1. Fases de la línea de Aeropuerto y conexión con el metro de Bilbao. ....	13
Figura 2. Situación del nuevo túnel de Artxanda. ....	14
Figura 3. Emplazamiento del túnel de Artxanda. ....	15
Figura 4. Trazado de la planta del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	16
Figura 5. Sección tipo del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	17
Figura 6. Obras subterráneas del túnel de Artxanda.....	18
Figura 7. Rozadora Sandvik MT720. Fuente: <a href="http://www.Sandvik.coromant.com">www.Sandvik.coromant.com</a> .....	21
Figura 8. Superficie del depósito de residuos inertes. Fuente: Google maps.....	22
Figura 9. Trayecto desde la boca del túnel al depósito de residuos inertes. Fuente: Google maps. ....	23
Figura 10. Mapa geológico correspondiente al emplazamiento del túnel. Fuente: Ente Vasco de la Energía. ....	24
Figura 11. Perfil geológico del trazado del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	28
Figura 12. Planta geológico del trazado del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	29
Figura 13. Materiales correspondientes al perfil y a la planta geológica. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	29
Figura 14. Mapa de permeabilidad del emplazamiento. Fuente: Sistema de Cartografía Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco.....	34
Figura 15. Ejemplo de una cinta transportadora en un túnel. ....	38
Figura 16. Ejemplo del desescombro mediante pala cargadora y dúmperes articulados. ....	42
Figura 17. Pala cargadora CAT 938 M. Fuente: <a href="http://www.cat.com">www.cat.com</a> . ....	55
Figura 19. Dúmper articulado CAT 725CE. Fuente: <a href="http://www.cat.com">www.cat.com</a> . ....	56
Figura 20. Ábaco de relación de resistencia total y la velocidad del dúmper 725C. Fuente: <a href="http://www.cat.com">www.cat.com</a> . ....	62

Figura 21. Sección transversal del material sobre la banda en una configuración de rodillos en artesa. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto..... 102

Figura 21. Trasmisión de potencia del tambor motriz a la banda. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto. .... 104

## *ÍNDICE DE TABLAS*

---

Tabla 1. Coordenadas de emplazamiento de los emboquilles del túnel. ....	14
Tabla 2. Ficha técnica de la rozadora Sndvik MT720. Fuente: www. Sandvik.coromant.com .....	20
Tabla 3. Parámetros de las unidades geotécnicas. Fuente: Proyecto de Trazado del Túnel de Artxanda.....	32
Tabla 4. Parámetros de las unidades geotécnicas. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda. ....	33
Tabla 5. Permeabilidad de diferentes formaciones. Fuente: Proyecto de construcción del túnel de Artxanda.....	36
Tabla 6. Escombro extraído de cada unidad litológica.....	47
Tabla 7. Relación entre potencia y resistencia de la roca. Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles.....	48
Tabla 8. Resultado del rendimiento de avance teórico de las unidades litológicas. ....	48
Tabla 9. Coeficiente de tiempo disponible. Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles. ....	50
Tabla 10. Coeficiente de eficiencia. Fuente: Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles. ....	50
Tabla 11. Rendimiento de avance medio real con cintas transportadoras. ....	51
Tabla 12. Rendimiento de avance medio real por unidad litológica con cintas transportadoras.....	52
Tabla 13. Rendimiento de avance medio real con dúmperes y pala cargadora. ....	53
Tabla 14. Rendimiento de avance medio real por unidad litológica con dúmperes y pala cargadora. ....	53
Tabla 15. Características de la pala cargadora. Fuente: www.cat.com. ....	54
Tabla 16. Características dúmper articulado. Fuente: www.cat.com. ....	55
Tabla 17. Resultado de la velocidad máxima para el dúmper 725C. ....	61
Tabla 18. Cálculo del tiempo de ciclo de cada tramo.....	67
Tabla 19. Cálculo de número de dúmperes necesarios por cada tramo.....	68
Tabla 20. Tiempo en avanzar cada tramo con desescombro mediante cinta transportadora. ....	70
Tabla 20. Cálculo del tiempo de desescombro total por cada tramo. ....	72



Tabla 21. Tiempo total de funcionamiento de la pala cargadora por cada tramo.....	74
Tabla 23. Precio unitario del alquiler de la pala cargadora. Fuente: Bases de Precios de Urbanización y Edificación del País Vasco.....	80
Tabla 24. Precio unitario del alquiler del dúmper. Fuente: Bases de Precios de Urbanización y Edificación del País Vasco.....	81
Tabla 25. Tiempo destinado al desescombro por cada tramo.....	82
Tabla 26. Precio de alquiler de dúmperes por cada mes. ....	83
Tabla 27. Características del trazado transversal.....	87
Tabla 28. Tamaños máximo de bloques recomendados. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.....	88
Tabla 29. Velocidades de las bandas (m/s). Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	88
Tabla 30. Capacidad de las cintas con ángulo de carga de 15°. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	89
Tabla 31. Coeficiente dependiente de la inclinación de la banda. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en minería a cielo abierto.....	90
Tabla 32. Velocidades de cinta recomendadas para diferentes aplicaciones. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en minería a cielo abierto. ...	91
Tabla 33. Potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	92
Tabla 34. Potencia para mover la roca horizontalmente. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.....	93
Tabla 35. Potencia para elevar o descender la roca. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	94
Tabla 36. Potencia para elevar la roca corregida.....	94
Tabla 37. Listado de los valores de las potencias de los motores normalizados. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	96
Tabla 38. Potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ....	97
Tabla 39. Potencia para mover la roca horizontalmente. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.....	98
Tabla 40. Separación de rodillos en función de ancho de banda y densidad. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”. ....	100

Tabla 41. Pesos de los órganos giratorios del ramal superior. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto. ....	100
Tabla 42. Pesos de los órganos giratorios del ramal inferior con rodillos de discos (kg). Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto. ....	101
Tabla 43. Coeficientes de adherencia banda-tambor, bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería” .....	105
Tabla 44. Valores de $e\mu\alpha$ . Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería” .....	106
Tabla 45. Campo de utilización de las bandas, en función de la tensión en kg/m de ancho de la misma. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.....	107
Tabla 46. Espesores de recubrimientos de bandas recomendados para diferentes aplicaciones. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería” .....	108
Tabla 47. Diferentes bandas textiles comerciales con su denominación y características. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”. ....	108
Tabla 48. Diámetro de tambores normalizados. . Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería” .....	109
Tabla 49. Diámetros mínimos de tambores. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería” .....	110
Tabla 50. Resultados de los parámetros principales de la cinta transportadora. ....	111
Tabla 52. Tiempo en avanzar cada tramo con desescombro mediante cinta transportadora. ....	112
Tabla 51. Coste de inversión inicial de la instalación. ....	113
Tabla 53. Tabla comparativa de los factores críticos de ambas alternativas. ....	117

## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

En el presente proyecto se realizará un estudio comparativo de dos alternativas de desescombro del nuevo túnel ferroviario de Artxanda (Bilbao) avanzado con rozadora, que fue finalizado en el año 2013. La primera alternativa consistirá en el diseño del transporte mediante cinta transportadora, mientras que en la segunda opción se plantea la labor del desescombro mediante dúmperes.

El objetivo de este proyecto es analizar la mejor alternativa de desescombro para el tramo del túnel, considerando diferentes factores que consistirán en el criterio económico, plazo de ejecución de la obra, impacto ambiental generado y necesidades de caudal de aire en el frente de trabajo.

Tanto los datos de las características del diseño del túnel como la información relacionada con la geología, mecánica de rocas y la hidrogeología se han obtenido del “*Proyecto de Trazado del Túnel de Artxanda*”, redactado por la UTE IBERINSA – LKS en Zamudio, el año 2005.

En este proyecto, partiendo de los datos geológicos, primero se calculará el avance medio del túnel para cada tramo del túnel y sistema de desescombro mencionado. Después, se diseñará la flota de camiones y la cinta transportadora para los rendimientos de avance calculados, analizando posteriormente los costes derivados de cada sistema y las ventajas y desventajas que implica cada uno de ellos. Finalmente, se compararán ambas opciones, concluyendo cual resultaría la alternativa de desescombro más favorable para el nuevo túnel de Artxanda.

## **2. DEFINICIÓN DEL PROYECTO**

### **2.1. ANTECEDENTES**

El nuevo túnel de Artxanda pertenece a la primera fase del proyecto de la conexión ferroviaria que unirá el Aeropuerto de Loiu con el centro de Bilbao. Esta nueva línea de tren permitirá viajar en el futuro en menos de 9 minutos entre el Casco Viejo, lugar de confluencia de las líneas 1, 2 y 3 del metro de Bilbao, y la terminal del aeropuerto, la Paloma.

Actualmente existe un túnel ferroviario que atraviesa el monte de Artxanda, pero este túnel es de una única vía y tiene un trazado inadecuado con varias curvas de radios inferiores a 200 metros, de modo que la velocidad comercial alcanzable del tren ronda los 30 km/h, y por lo tanto, el tiempo de ruta es elevado y la frecuencia de viajes muy limitada.

El nuevo túnel que atraviesa el monte Artxanda y que comunica Sondika con Bilbao, se sitúa debajo del antiguo túnel y tiene una longitud de 1.815 m, de los cuales 83,5 m metros son realizados en falso túnel (P.K. 1+455 – P.K. 1+538,5), y los siguientes 1.731,5 m son excavados en mina, iniciando en P.K. 1+538,5 y finalizando en P.K.3+270.

El objetivo de este túnel es proporcionar acceso al aeropuerto y ofrecer a los pasajeros un mejor servicio con mayor rapidez de ruta y mayor frecuencia, construyendo un túnel de doble vía y en alineación recta, siendo la velocidad máxima del proyecto de 80 km/h.

En la figura 1, se puede apreciar un esquema donde se muestran las distintas líneas ferroviarias y de metro que existen en Bilbao, y en qué manera se conecta el nuevo túnel de Artxanda con todos ellos.

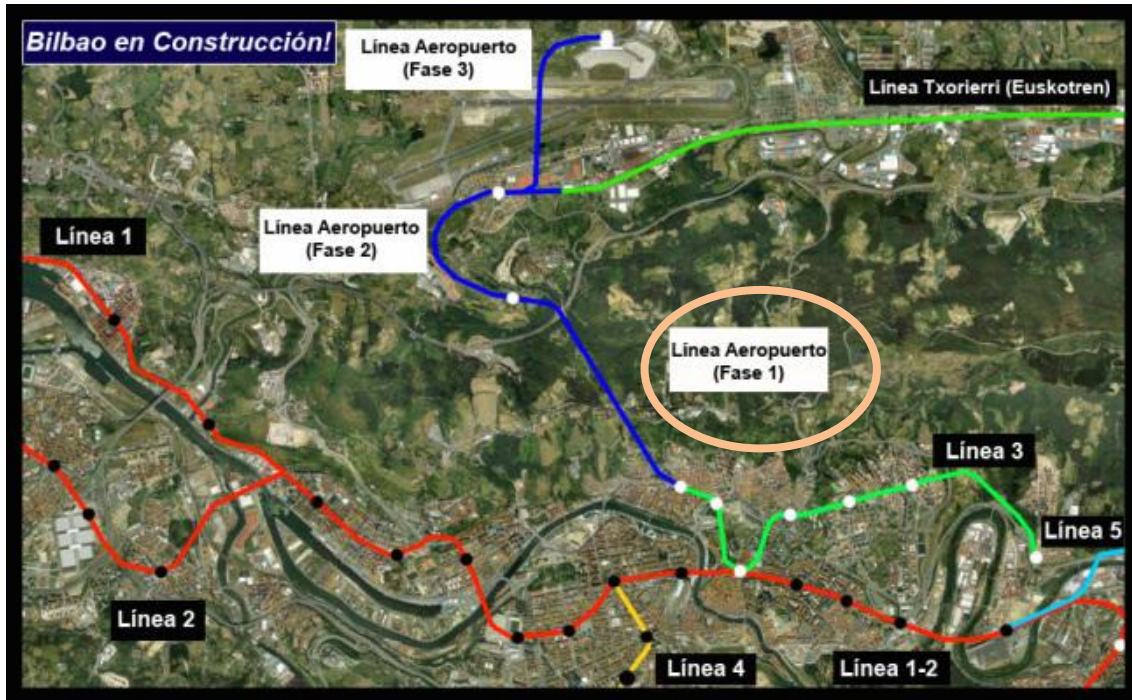


Figura 1. Fases de la línea de Aeropuerto y conexión con el metro de Bilbao.

## 2.2. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

El túnel perteneciente a la primera fase de la línea Bilbao-Aeropuerto de Loiu transcurre por el municipio de Sondika y la ciudad de Bilbao atravesando el monte Artxanda, los cuales están ubicados en la zona centro del Gran Bilbao de la provincia de Vizcaya, País Vasco.





**Figura 2. Situación del nuevo túnel de Artxanda.**

El Emboquille Sur del túnel se sitúa en la calle Artasamina de la ciudad de Bilbao en el P.K. 1+538,5 donde se ha realizado cut and cover, mientras que el Emboquille Norte se sitúa en el camino “Errotako bidea” de Sondika, en el P.K. 3+270 por debajo del corredor de txorierri, al lado de la antigua línea de Bilbao - Lezama.

Punto de emplazamiento	Coordenadas geodésicas	
	Longitud	Latitud
Emboquille Sur (Bilbao)	2°55'42,9''O	43°16'17,5''N
Emboquille Norte (Sondika)	2°55'32,5''O	43°17'14,3''N

**Tabla 1. Coordenadas de emplazamiento de los emboquilles del túnel.**

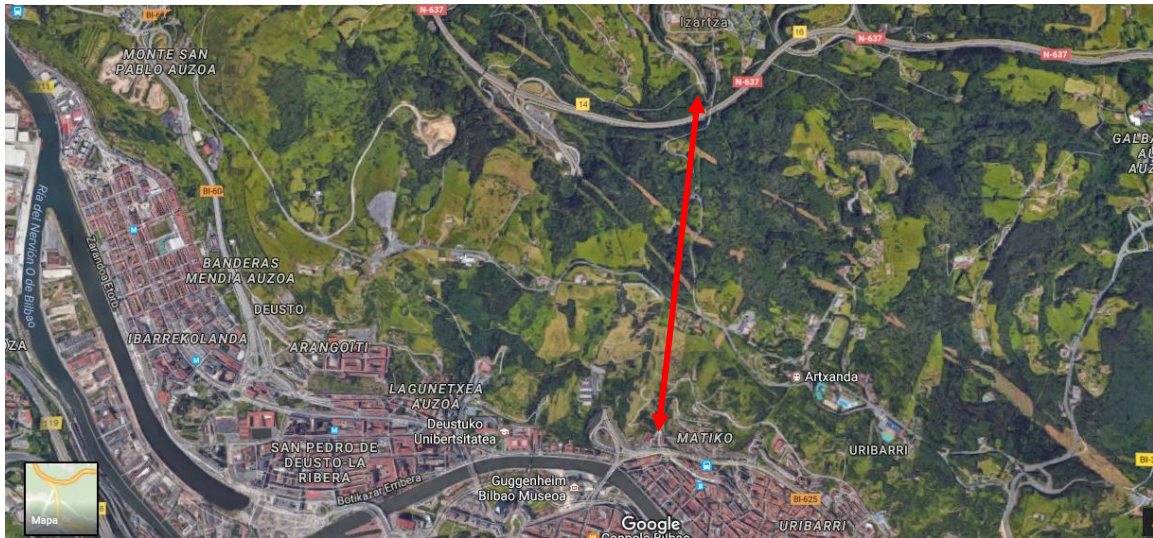


Figura 3. Emplazamiento del túnel de Artxanda.

## 2.3. GEOMETRÍA DEL PROYECTO

### 2.3.1. Trazado en planta

En la figura 4, se muestra el trazado en planta de la primera fase de la línea del Aeropuerto, donde se muestra el inicio y el final del nuevo túnel de Artxanda.

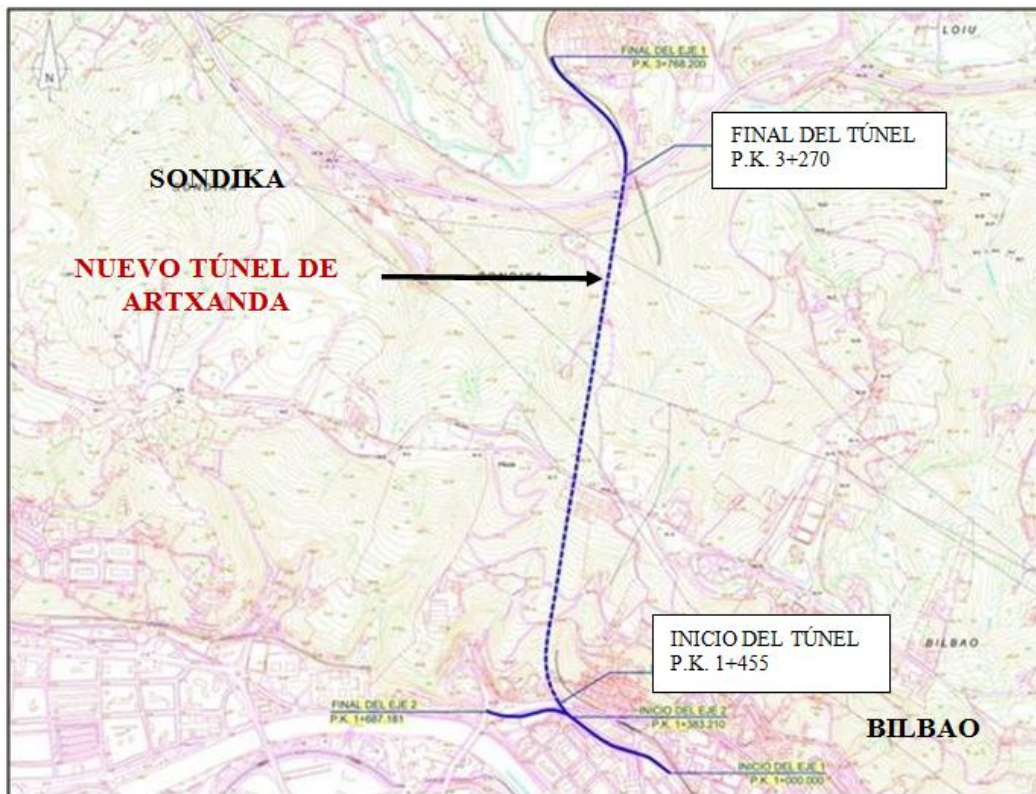


Figura 4. Trazado de la planta del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.

### 2.3.2. Sección tipo

Las características de la sección tipo del túnel son los que se muestran a continuación:

- ❖ Longitud total: 1815 m
- ❖ Longitud construcción del túnel subterráneo: 1731,5 m
- ❖ Sección de excavación: 55 m<sup>2</sup>
- ❖ Montera máxima: 212 m
- ❖ Montera habitual: más del 60% del túnel tiene una montera superior a 100 metros.
- ❖ Ancho máximo: Al ser de doble vía, el ancho máximo de excavación es de 8,5 m en alineación recta y 9 m en alineación curva.



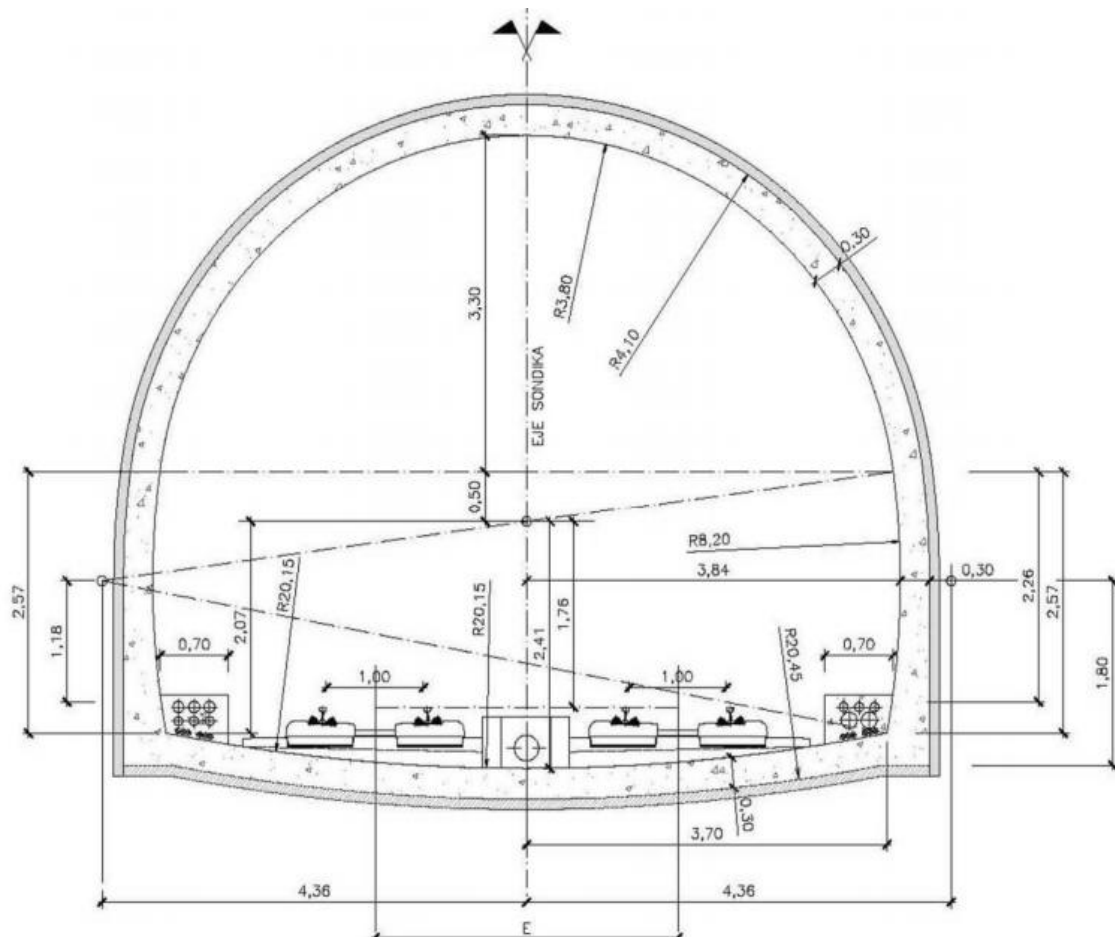


Figura 5. Sección tipo del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.

### 2.3.3. Geometría transversal

El túnel tiene una pendiente única y constante de 0,5% de dirección ascendente con la dirección de emboquille Norte – emboquille Sur, exceptuando las rasantes de entrada y salida.

La rasante de entrada tiene una pendiente descendente del 2,5% a lo largo de 466 m, mientras que la rasante de salida tiene una pendiente ascendente del 3,5 % en una longitud de 153 m.

## 2.4. OBRAS AUXILIARES

El proyecto incluye el diseño de obras subterráneas de seguridad asociadas, que consiste en la construcción de dos galerías de evacuación y el acondicionamiento del actual túnel de Artxanda para la evacuación de peatones.

La primera galería conecta el nuevo túnel de Artxanda con el antiguo túnel que pertenece a la línea Deusto-Lezama actual, la cual transcurre por una cota superior de manera casi paralela al nuevo túnel. Esta galería tiene una longitud de 207 metros y una pendiente de 8%.

La segunda galería, en cambio, tiene una longitud de 375 m y conecta el nuevo túnel con el exterior, pudiendo realizar la evacuación a la zona de Bilbao, al lado de la boca Sur.

Ambas galerías de seguridad tienen una sección de 10 m<sup>2</sup> y se han construido en mina mediante métodos convencionales.

En la figura 6, se puede apreciar un esquema de cómo es la conexión entre el nuevo túnel de Artxanda y el antiguo túnel, y cómo se realizarán las galerías auxiliares de evacuación.



Figura 6. Obras subterráneas del túnel de Artxanda.

- ❖ Túnel actual de la línea Deusto – Lezama (antiguo túnel de Artxanda) → naranja

- ❖ Nuevo túnel de Artxanda → azul
- ❖ Galería 1. (207 m) → rosa
- ❖ Galería 2. (375 m) → verde

## **2.5. SISTEMA CONSTRUCTIVO**

El método empleado para la ejecución del túnel es el Nuevo Método Austríaco NATM, de modo que la construcción fue realizado en mina por medio mecánico entre el P.K. 1+538,5 y el P.K.3+270 del trazado proyectado.

La máquina empleada para realizar la excavación fue una rozadora de mina (minador), y la construcción del túnel se llevó a cabo desde los dos emboquilles, realizándose en dos fases, avance y destroza.

Para este estudio de análisis se considerará que el avance se ha realizado desde un único emboquille, siendo éste el emboquille Norte (Sondika). Esto se debe a que el túnel no llega a tener 2 km de longitud, por lo que resulta más factible y más económico considerar sólo una única dirección de avance. Se ha seleccionado el emboquille Norte como punto inicial de las labores, porque a la salida de la boca del túnel hay un espacio mayor disponible para el tráfico de camiones y para acopios de materiales provisionales que posteriormente se redirigirán a un vertedero que se encuentra además, más cerca del emboquille Norte que del emboquille Sur.

### **2.5.1. Especificaciones de la máquina de excavación**

La máquina puntual empleada en la excavación mecánica del túnel, es una rozadora con cabezal de tipo transversal.

Como se prescinde de los resultados oficiales del modelo de la rozadora empleada en la construcción del túnel de Artxanda, para realizar este estudio se partirá de los datos obtenidos de la rozadora Sandvik MT720 que se ha utilizado en la construcción de la tercera línea del metro de Bilbao, la cual está conectada al nuevo túnel de Artxanda

como se puede apreciar en la figura 1, y que se han realizado en un macizo rocoso de similares características.

Las especificaciones técnicas de dicha rozadora son los que se muestran en la siguiente tabla 2.

<b>Ficha técnica: Sansvik MT720</b>	
Peso	135000 kg
Dimensiones (Largo-ancho-alto)	15200 x 4500 x 4600 mm
Altura máxima de corte	6600 mm
Altura mínima de corte	5500 mm
Anchura de corte	5500-9100 mm
Potencia de cabeza de corte	300 kW
Presión en el terreno	0,23 MPa
Capacidad de carga	350 m <sup>3</sup> /h
Potencia instalada	522 kW

**Tabla 2. Ficha técnica de la rozadora Sandvik MT720. Fuente: [www. Sandvik.coromant.com](http://www.Sandvik.coromant.com)**

Mediante el empleo de la rozadora para excavar el túnel, a diferencia que con los explosivos, se consigue disminuir notablemente la sobreexcavación, y al mismo tiempo, el macizo rocoso será alterado lo mínimo posible.

Por el otro lado, como las longitudes de paso son cortos el equipo minador funciona bien y además, es muy flexible a cambios de longitudes de paso al excavar en un terreno con tramos de diferentes calidades.



Figura 7. Rozadora Sandvik MT720. Fuente: [www.Sandvik.coromant.com](http://www.Sandvik.coromant.com)

## 2.6. SOSTENIMIENTO. NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO

Este método utiliza la relación de la reducción de tensiones efectuadas por el terreno al sostenimiento a medida que aumenta su deformación, por lo que esto significa que la roca se sostiene a si misma al ir deformándose transmitiendo las tensiones al terreno formando un arco de descarga.

El sostenimiento se colocará de forma que permita que se produzca una deformación en el terreno, lo que reduce su tensión. Se utilizan bulones, hormigón proyectado, fibra metálica, mallazo y cerchas para el sostenimiento. Justo después de realizar la excavación, se instala un sostenimiento primario, a la cual una vez transcurrido un tiempo se le añade el sostenimiento secundario. El sostenimiento será diferente para cada tramo, dependiendo de la calidad de la formación que se atraviesa.



Se estima que el proceso de sostenimiento llevará un tiempo máximo de 4 horas, por lo que en las 8 horas restantes del turno habría que excavar y desescombrar todo el material al exterior del túnel.

### 2.7. UBICACIÓN DEL VERTEDERO

El vertedero donde se ha apilado todos los residuos inertes extraídos del nuevo túnel de Artxanda se denomina “Depósito del túnel de Artxanda”, y actualmente se encuentra totalmente restaurada.

Esta escombrera tiene una superficie de 106.187 m<sup>2</sup> y está ubicado en la dirección Aretxabaleta bidea, 20. La superficie de la escombrera se muestra en la figura 8.



Figura 8. Superficie del depósito de residuos inertes. Fuente: Google maps.

La distancia entre el emboquille Norte y el depósito de residuos inertes es de aproximadamente 3 km, como se puede ver en la ruta propuesta por el visor Google Maps. Como se encuentra alejado de la boca del túnel, se encargarán los camiones carreteros de realizar el transporte del material desde el acopio provisional de escombro que se sitúa en el exterior del túnel hasta el depósito señalado, ya que no sería viable diseñar una cinta transportadora en estas condiciones. Los dúmperes podrían transportar el material hasta el depósito, pero en este proyecto, se compararán ambas alternativas partiendo de las mismas condiciones.



Figura 9. Trayecto desde la boca del túnel al depósito de residuos inertes. Fuente: Google maps.



### 3. GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

#### 3.1. GEOLOGÍA

El trazado del túnel objeto de análisis se enmarca geológicamente en la Hoja BILBAO (61-II) con escala 1:25.000 que se publicó en el año 1993 por el Ente Vasco de la Energía (EVE). La región se encuentra situada en el flanco Sur del Sinclinorio de Vizcaya, como se puede apreciar en la siguiente figura, en la zona centro-sureste del plano geológico y se incluye en la unidad de Oiz, sector de Durango.

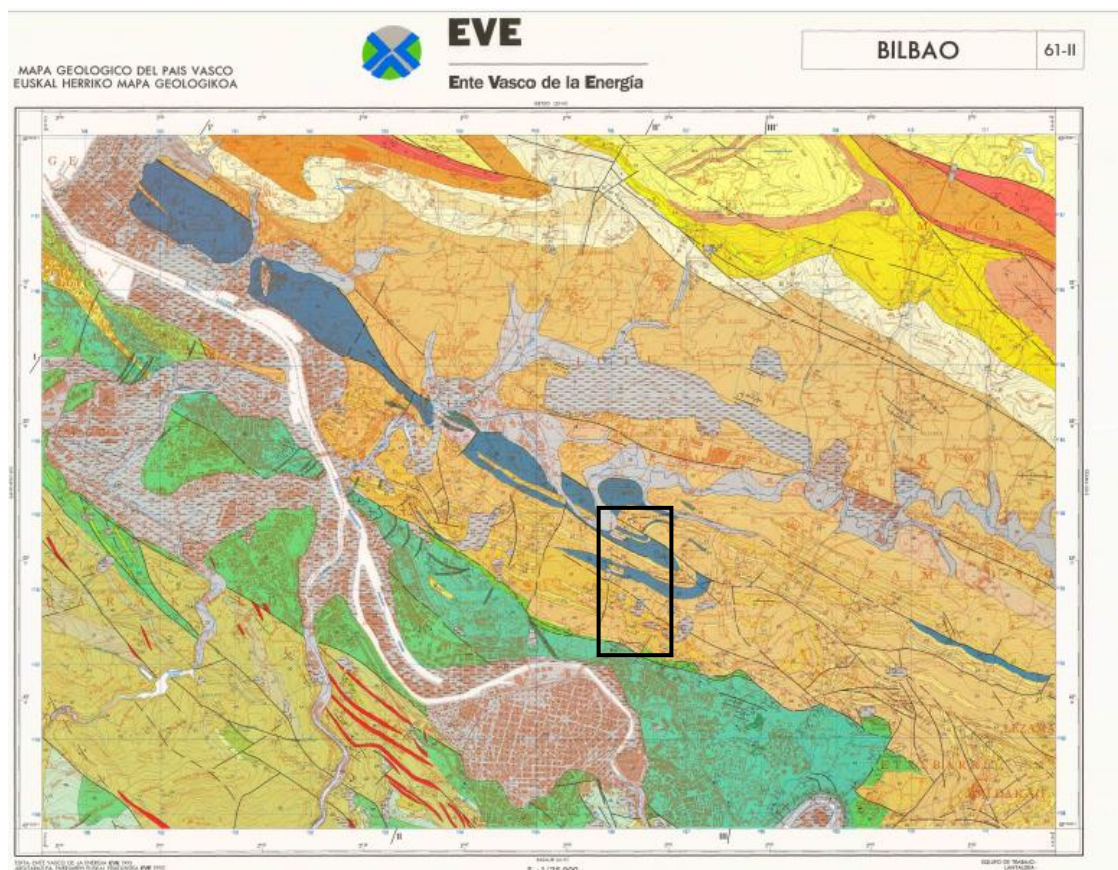


Figura 10. Mapa geológico correspondiente al emplazamiento del túnel. Fuente: Ente Vasco de la Energía.



### **3.1.1. Estructura regional**

La estructura regional queda determinada por la disposición del Sinclinorio de Vizcaya. La zona de Proyecto queda emplazada en el flanco Sur de dicho sinclinorio que presenta una dirección NW.-SE., por lo que tanto la disposición de las diferentes formaciones litológicas como la dirección de la estratificación respetan esa dirección, presentando buzamientos en general muy fuertes (60-70°) hacia el Norte.

Por otra parte, en las inmediaciones a la zona de Proyecto existen numerosas fallas que presentan dos direcciones fundamentalmente. Las fallas de mayor desarrollo siguen la dirección regional NW.-SE., mientras que existen otras fallas secundarias de menor desarrollo y orientación ortogonal a la anterior.

La orientación aproximada del monte Artxanda, corresponde prácticamente con la orientación regional de la principal familia de fallas y dirección general de la estratificación, mientras que los valles que existen en él discurren justamente siguiendo la trayectoria marcada por el segundo sistema de discontinuidades.

Por otra parte, se considera que habrá diversas zonas de cizalla o fractura a lo largo del trazado. En la mayor parte de las ocasiones, más que de brechas de falla, se trata de zonas replegadas que presentan una mayor fracturación y meteorización y, por lo tanto, con un descenso en la calidad del macizo.

Por último, en esta área aparece una potente secuencia de materiales de origen volcánico que han sido intruidos dentro de una serie sedimentaria de edad Cretácico inferior.

### **3.1.2. Estratigrafía y litología**

En este apartado se definen las formaciones litológicas que constituyen la zona de estudio y se encuentran ordenados cronológicamente.

### ***Complejo Urganiano del Cretácico inferior (Albiense inferior)***

Consisten en calizas arcillosas y argilitas, en general de aspecto masivo o estratificación difusa, que presentan una esquistosidad muy penetrativa y que tienen un color gris claro azulado en estado sano.

Dentro de la serie aparecen ocasionales intercalaciones de calcarenitas y parabrechas calcáreas que pueden llegar a presentar indicios de karstificación.

### ***Complejo Supraurgoniano del Cretácico inferior (Albiense superior)***

Consiste en la roca encajante de los materiales volcánicos, constituido básicamente por limolitas que presentan intercalaciones de argilitas y/o areniscas, donde estas son más frecuentes hacia el Norte del trazado del túnel de Artxanda.

Dentro de los estratos de limolitas, ocasionalmente se encuentran intercalaciones de estratos carbonosos, con abundantes restos fósiles vegetales. Las areniscas son micáceas y se encuentran bien estratificadas, dando lugar a capas con un espesor de orden centimétrico a decimétrico o incluso métrico.

### ***Complejo Volcánico***

Corresponden a rocas intrusivas y efusivas, con diversos tipos de coladas y vulcanoclásticas, que constituyen una franja de orientación N.W-S.E., con una potencia muy variable desde los 700 metros, en planta, en la zona de la costa hasta acñarse en las inmediaciones a la localidad de Derio.

El Complejo Volcánico, se encuentra ligado a una etapa de expansión oceánica y adelgazamiento de la corteza, en la que se abrieron grandes fracturas en el fondo oceánico por las que extruyó el material volcánico. Estos materiales volcánicos se presentan intruidos, según los planos de estratificación, en el Complejo Supraurgoniano del Cretácico inferior.

Se diferencian una serie de términos que representan litologías mayoritarias o estructuras características. Por lo general, el contacto con las formaciones de roca contiguas suele ser gradual y de difícil definición.

Siguiendo criterios litológicos y de estructuras volcánicas, se pueden diferenciar dentro del Complejo Volcánico los siguientes términos:

- ❖ Rocas efusivas básicas con estructura de sill
- ❖ Coladas volcánicas masivas y traquitas
- ❖ Coladas de lavas almohadilladas (Pillow-lavas)
- ❖ Rocas vulcanoclásticas
- ❖ Brechas de pillow-lavas rotas
- ❖ Brechas volcánicas
- ❖ Tobas y cenizas

### ***Flysch detrítico calcáreo del Cretácico superior (Cenomaniense Santoniense)***

Aparece desde el casco urbano de Sondika hasta el aeropuerto y corresponde a una serie flyschoides de materiales carbonatados, cuya secuencia viene marcada por sucesiones de eventos turbidíticos,

En esta zona predominan los niveles de grano fino, más margosos. Así la serie viene a estar constituida por una alternancia de calizas, calizas arcillosas y argilitas, con ocasionales intercalaciones de calizas arenosas y areniscas, que se encuentran depositadas en estratos de espesor centimétrico a decimétrico.

### ***Otros materiales***

Corresponde a los principales recubrimientos cuaternarios de suelos aluviales y coluviales que descansan sobre el substrato rocoso:

- ❖ Suelos aluviales

- ❖ Suelos coluviales
- ❖ Rellenos antrópicos

### 3.1.3. Planta y Perfil geológico

En el siguiente perfil geológico, figura 12, y planta geológica, figura 13, se muestran las diferentes unidades litológicas que se encuentran a lo largo del trazado transversal y longitudinal del túnel, y se puede observar que el túnel se divide en 19 tramos diferentes.

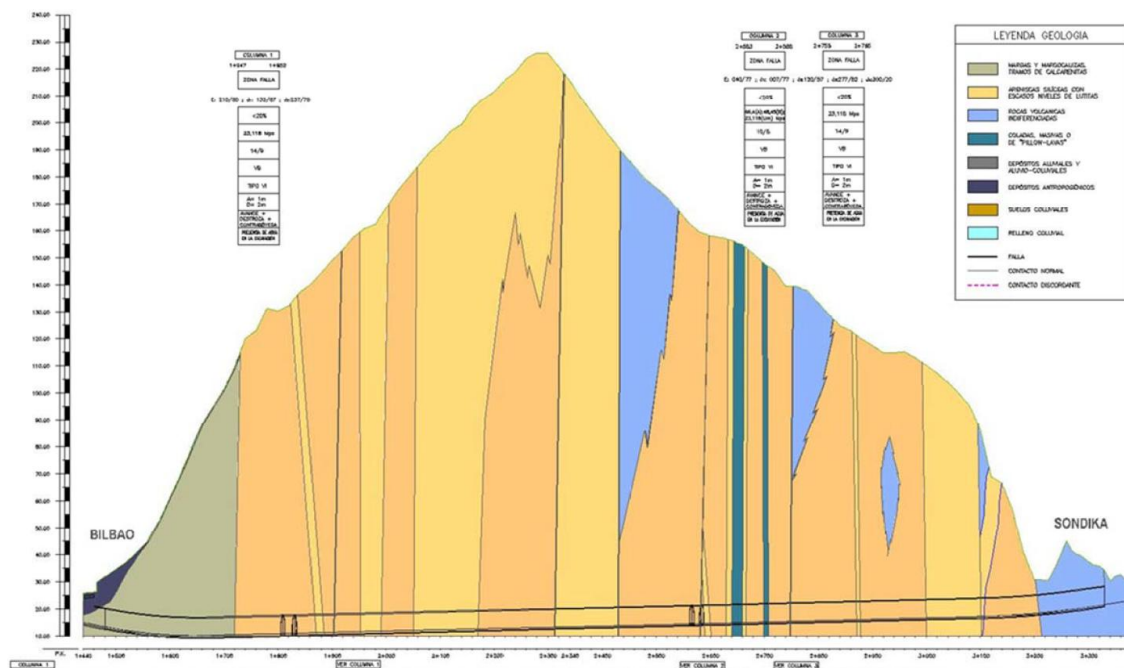
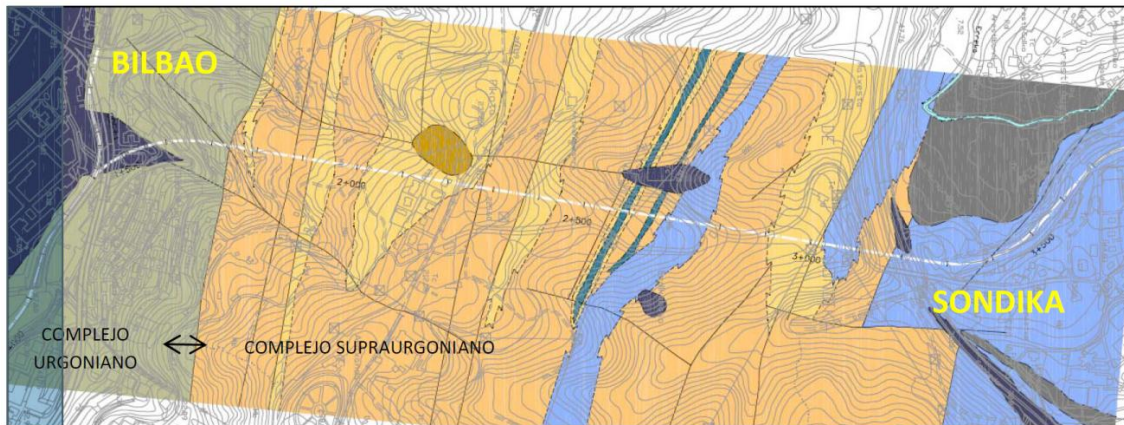
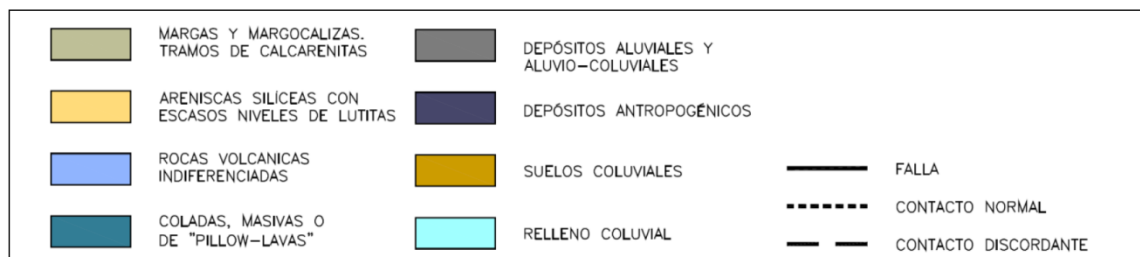


Figura 11. Perfil geológico del trazado del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.



**Figura 12. Planta geológica del trazado del túnel. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.**



**Figura 13. Materiales correspondientes al perfil y a la planta geológica. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.**

## 3.2. GEOTÉCNIA

### 3.2.1. Estudio geotécnico

Según los datos obtenidos del “Proyecto del trazado del túnel de Artxanda”, para realizar el diseño de dicho túnel se realizó una campaña geotécnica que consistió en las siguientes labores:

- ❖ 4 sondeos a rotación con recuperación continua de testigos.
- ❖ Ensayos in situ de permeabilidad en estos sondeos.
- ❖ Ensayos de resistencia con martillo Schmidt.
- ❖ Ensayos de laboratorio sobre las muestras recogidas en los sondeos.

- ❖ 9 calicatas en superficie.
- ❖ Levantamiento de 52 estaciones geomecánicas.

Por otro lado, se obtuvo información del túnel antiguo de Artxanda, ya que el trazado de este túnel se encuentra muy cerca al proyectado, afectando prácticamente a las mismas formaciones geológicas.

### **3.2.2. Unidades geotécnicas atravesadas**

Según el “Proyecto de trazado del túnel de Artxanda”, en la excavación del túnel y de las galerías asociadas se atravesarán seis unidades o grupos geotécnicos diferentes.

#### ***Argilitas, con ocasionales intercalaciones de limolitas y areniscas (Complejo Supraurgoniano)***

Esta unidad está formada principalmente por argilitas de espesores centimétricos a decimétricos que alternan con limolitas. Las argilitas, las cuales se encuentran muy alteradas, son de naturaleza mayoritariamente silíceas, aunque pueden tener altos contenidos en carbonatos.

Estos materiales sólo aparecen en la parte del túnel donde se realiza cut and cover donde se construye el emboquille norte, y a lo largo de los primeros 26,5 m construidos en mina, debajo de la Autovía de Txorierri.

#### ***Limolitas silíceas con intercalaciones de areniscas y ocasionales de argilitas (Complejo Supraurgoniano)***

Esta unidad tiene una longitud total de 840 m y aparece en varios tramos a lo largo de la traza, y supone un 45% del trazado del Túnel.

Las limolitas pueden aparecer de forma masiva en secuencias decamétricas o alternando con areniscas o argilitas. Por otro lado, en las limolitas pueden aparecer ocasionalmente espesores de hasta 30 cm de material carbonosa parcialmente recristalizada.

### ***Areniscas silíceas con intercalaciones de limolitas (Complejo Supraurgoniano)***

Esta unidad geotécnica tiene una longitud total de 390 m y aparece en varios tramos a lo largo de la traza como la unidad anterior.

Las areniscas se pueden encontrar formando estratos de espesor métrico o se pueden hallar alternando con limolitas con espesores decimétricos.

### ***Rocas volcánicas masivas (Complejo Volcánico)***

Esta unidad aparece en un tramo de 90 m y está constituido por coladas masivas y coladas almohadilladas que pueden presentar intercalaciones de limolitas, argilitas, areniscas o rocas vulcanoclásticas considerándose una unidad heterogénea.

### ***Rocas vulcanoclásticas (Complejo Volcánico)***

Esta unidad aparece en un tramo de unos 60 m de longitud a lo largo del trazado y es muy heterogénea. Contiene estructuras de espesores centimétricas de diferentes tipos de rocas vulcanoclásticas, y pueden tener intercalaciones de otros tipos de rocas sedimentarias o coladas volcánicas.

### ***Calizas arcillosas (Complejo Urganiano)***

Es una unidad que se sitúa en el tramo que engloba los primeros 300 m del túnel de Artxanda y está formado por calizas arcillosas que pueden tener intercalaciones de argilitas.

### 3.2.3. Principales características de los materiales

Este túnel se ha dividido en diferentes tramos y se ha analizado la calidad del macizo rocoso en cada uno de ellos mediante el índice de calidad RMR (Bieciawski, 1989). A cada valor del índice considerado le corresponde un grado de calidad.

Con esta clasificación se pretende cuantificar la calidad de las rocas para determinar las características del macizo rocoso a partir de las características de la roca intacta y el tipo y longitud de avance y las necesidades de sostenimiento de la excavación.

La longitud de avance es un factor muy importante a la hora de determinar el tiempo requerido para realizar el desescombro dentro del túnel.

Unidad geotécnica		R.C.S (Kg/cm <sup>2</sup> )	RMR Básico	Q	dB (t/m <sup>3</sup> )	Calidad
Argilitas, con ocasionales intercalaciones de limolitas y areniscas	U1	213-269	22-25	0,018-0,055	2,6	Mala – muy mala
Limolitas silíceas con intercalaciones de areniscas y ocasionales argilitas	U2	169-672	40-73 (82)	1,05-39,6	2,668	Media-buena
Areniscas silíceas con intercalaciones de limolitas	U3	180–1.200	(39) 46-74	(0,25) 1,1-40	2,629	Media-buena
Rocas volcánicas masivas	U4	269–1.403	(34) 38-78	(0,11) 13,2-35,2	2,501	Media-buena
Rocas vulcanoclásticas	U5	220-821	57	8,25	2,501	Media
Calizas arcillosas	U6	455–1.224	61	22	2,731	Buena

**Tabla 3. Parámetros de las unidades geotécnicas. Fuente: Proyecto de Trazado del Túnel de Artxanda.**



Aunque en el “Proyecto de Trazado del Túnel de Artxanda” se definen estas 6 unidades geotécnicas, en el “Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda” se engloban en 4 unidades geotécnicas. Se consideran una misma unidad litológica U1 y U6, y por el otro lado, las unidades correspondientes a las rocas volcánicas, U4 y U5.

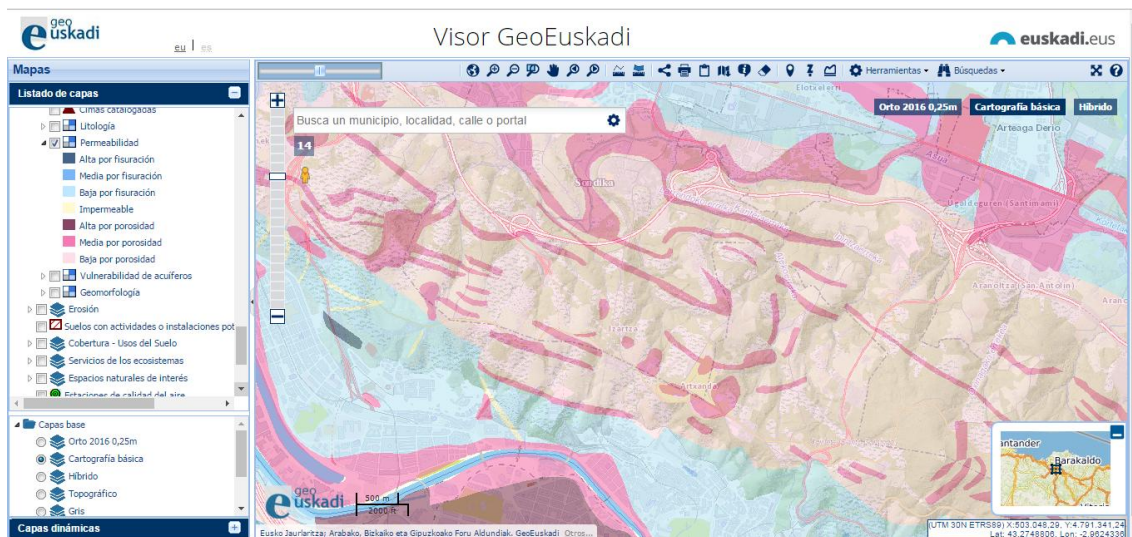
Los que se muestran a continuación serán las unidades que se tendrán en cuenta para realizar los cálculos del rendimiento de avance de la rozadora, ya que el perfil geológico está definido por estas unidades, sabiendo así la longitud y características de cada tramo. En la tabla 4, se muestran los valores medios de los parámetros geomecánicos relacionados con la excavabilidad.

Litología		R.C.S (MPa)	RQD	Dureza Cerchar	Tenacidad	Abrasividad Schimazek (Coef. F)	Abrasividad Cerchar
U1	Margocalizas arcillo arenosas (U1+U6)	32,55	40%- 80%	48,05	3,71	0,113	0,475
U2	Limolita (U2)	23,12	20%- 100%	25,51	5,42	0,0752	0,233
U3	Arenisca (U3)	62,83	48,05%- 76,41%	75,00	7,51	0,227-1,3	1,025
U4	Coladas (U4)	48,45	34,4%	....	31,95	5,315	...
	Rocas piroclásticas (U5)	6,21	4,72%- 21,85%	24,05	1,55	0,08	0

**Tabla 4. Parámetros de las unidades geotécnicas. Fuente: Proyecto de Construcción del Túnel de Artxanda.**

## 4. HIDROGEOLOGÍA Y DRENAJE

En la figura 14, se muestra el mapa de permeabilidad de la zona de estudio del Sistema de Cartografía Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco, obtenido desde el visor Geo-Euskadi. En el mismo, se diferencian zonas con distintos colores en función del grado de permeabilidad que presentan. Como se puede apreciar en la figura, en la zona de interés predominan terrenos con 3 tipos de permeabilidad.



**Figura 14. Mapa de permeabilidad del emplazamiento. Fuente: Sistema de Cartografía Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco.**

Las zonas que se muestran de rosa con tonos más fuertes, representan los terrenos de media permeabilidad debido a la porosidad. En cambio, las zonas que se aprecian con un color rosa más claro, consisten en terrenos de baja permeabilidad debido a la porosidad. Por último, las zonas que se muestran con el color azul, pertenecen a terrenos de baja permeabilidad debido a la fisuración.

Los tres terrenos diferentes son los que se muestran a continuación:

- ❖ Margas y margocalizas. Permeabilidad baja por fisuración.
- ❖ Lutitas negras y alternancia de lutitas y areniscas. Permeabilidad baja por porosidad.

- ❖ Areniscas Silíceas y rocas volcánicas. Permeabilidad media por porosidad.

A continuación se muestran los datos hidrogeológicos relevantes sobre estos tres tipos de terrenos a atravesar en la excavación del túnel, los cuales son obtenidos del estudio hidrogeológico que se realizó para la realización del “Proyecto del trazado del túnel de Artxanda”, así como para el “Proyecto de construcción del túnel de Artxanda”.

Los niveles de las arcillas eluviales y aluviales, generalmente, son estratos impermeables. Los rellenos, en cambio, tienen una fracción granular que permiten contener agua, pero al tratarse de estratos de poca potencia no son capaces de contener grandes cantidades de agua.

Por otro lado, las margocalizas y las margas son poco porosas y tienen una baja transmisividad, a no ser que se encuentren muy fracturadas o diaclasadas. Pero cuando se encuentren debajo del nivel freático y si tienen un alto contenido en carbonatos, pueden ser buenos acuíferos.

Por último, las lutitas son materiales muy impermeables, ya que resultan rocas muy poco porosas y poco transmisivas cuando no están muy fracturadas o diaclasadas. Presentan un comportamiento similar las rocas volcánicas de naturaleza tobácea o formadas a partir de vidrios y cenizas volcánicas.

En cuanto a la cota de la excavación, éste se realizará por debajo del nivel freático, de modo que durante la fase de construcción del túnel, habrá presencia de agua. Según el estudio hidrogeológico del proyecto de construcción del túnel de Artxanda, la presencia de agua estará en las siguientes formaciones:

- ❖ Dominio de las areniscas y de la alternancia de arenicas y limolitas.
- ❖ Dominio de las rocas volcánicas, en concreto en la zona de las coladas de lava basáltica.
- ❖ Zonas de falla con tramos milonitizados.

Mediante los ensayos Lugeon realizados en los sondeos se determina la permeabilidad de los diferentes materiales que atravesará el túnel de Artxanda.

En la tabla 5, se muestran los resultados de la permeabilidad de los diferentes formaciones litológicas, se puede decir que se tratan de formaciones bastante permeables.

Formaciones		Permeabilidad (cm/s)		Permeabilidad (m/día)
U1	Margocalizas arcillo-arenosas	Houlsby	0,00001 - 0,00022	86,4 - 1900,8
		Schimizu	0,00004 - 0,00096	345,6 - 8294,4
U2	Limolitas	Houlsby	0,00002 - 0,00017	172,8 - 1468,8
		Schimizu	0,00007 - 0,00051	604,8 - 4406,4
U3	Areniscas	0,0000439		379,296
	Coladas	0,0000165		142,56
U4	Rocas piroclásticas	0,000000696 - 0,00000143		6,01344 - 12,3552

**Tabla 5. Permeabilidad de diferentes formaciones. Fuente: Proyecto de construcción del túnel de Artxanda.**

El “Proyecto de trazado del nuevo túnel de Artxanda” dice así, “*Durante la fase de construcción, como consecuencia de la construcción del nuevo túnel de Artxanda, se producirá una infiltración en el mismo de las aguas subterráneas y de las aguas de lluvia por la gran permeabilidad del terreno atravesado. Este impacto sobre las aguas subterráneas se producirá por tanto como consecuencia de la proyección del nuevo túnel en formaciones bastante permeables, por lo que se tendrá que prever su correcta evacuación. Este efecto “dren” se minimizará considerablemente durante la fase de explotación en el caso de que se tomen las medidas correctoras adecuadas (correcta impermeabilización del túnel).*”

## **5. ALTERNATIVAS DE DESESCOMBRO**

Es muy importante tener el frente de avance del túnel libre de obstáculos para cuando se lleve a cabo la operación de sostenimiento, para que esta labor se pueda realizar con rapidez y de manera segura, evitando posibles incidentes provocados por el material suelto en el lugar de trabajo.

El análisis de las comparativas se realizará únicamente para el tramo del túnel, sin que ninguna de las opciones llegue a descargar el material en el vertedero de Artxanda. Esto se debe a que la cinta transportadora no puede llegar hasta el depósito de residuos inertes por la irregularidad del terreno, ya que está situado en la ladera del monte Artxanda.

Por lo tanto, para realizar una comparativa de ambas opciones, se partirá de las mismas condiciones. Para ello, se ha de retirar rápidamente el escombros a vertederos provisionales (acopios) que se encuentran fuera del túnel y cerca de la boca, para que después se puedan trasladar al vertedero definitivo mediante camiones carreteros.

Los dos sistemas de desescombro planteados en el estudio son los que se definen a continuación.

### **5.1. CINTA TRANSPORTADORA - ALTERNATIVA 1**

#### **5.1.1. Descripción del sistema**

En la primera alternativa de desescombro, se contempla la instalación de una cinta transportadora que sería la encargada de extraer fuera del túnel al acopio todo el material excavado por la rozadora.

La carga del escombros a la cinta transportadora instalada se realizaría desde la misma rozadora, a medida que éste va excavando el frente de trabajo. El equipo minador lleva

incorporado un sistema de recogida y carga compuesto por brazos recolectores. De esta forma, el material arrancado cae sobre una plataforma que recoge dicho material y lo dirige mediante unos brazos recolectores hasta la cinta transportadora de la rozadora. Esta cinta transportadora descarga el material directamente al alimentador de la cinta que será el encargado de desescombrar y depositar dicho material en un acopio que se encuentra en el exterior.

Para saber en cuánto tiempo se realizará la labor de desescombro, hay que tener en cuenta que al día se realizan 2 turnos de trabajo, cada uno de 12 horas, donde se estima que el sostenimiento del túnel llevará un máximo de 4 horas, quedando 8 horas para excavar y desescombrar el material. Como las operaciones se realizan al mismo tiempo, las horas dedicadas a la excavación y al desescombro serían 8 horas, teniendo que aplicar el coeficiente de eficiencia de trabajo de la rozadora (85%), pero no el de la cinta, ya que ésta trabaja de forma continua y sin interrupciones.



**Figura 15. Ejemplo de una cinta transportadora en un túnel.**

### 5.1.2. Ventajas

Las principales ventajas de instalar una cinta transportadora para desescombrar son las siguientes:



Por un lado, la operación de desescombro del material es una operación continua, pudiendo extraer el material del frente de trabajo a medida que se va excavando, y de esta manera terminar de desescombrar al mismo tiempo que se termina de excavar, dejando la zona de trabajo despejado para proceder a los trabajos de sostenimiento.

Además, las cintas tienen capacidad para transportar el material excavado con diferentes ritmos de avance, ya que la instalación se dimensiona para producciones punta máximas.

Por último, el accionamiento de estas cintas es eléctrico y tiene una mejor eficiencia energética que los dúmperes.

### 5.1.3. Desventajas

Por el otro lado, aunque la cinta transportadora presenta grandes ventajas para extraer el material al exterior de túnel, cabe destacar los siguientes inconvenientes.

Por una parte, suponen una inversión inicial muy grande, que para que su instalación suponga rentable se debe amortizar en el periodo que dure la obra.

Por otra parte, la cinta necesita un sistema de soporte estructural que hay que construir a medida que se va avanzando la obra, y estas labores, supondrían un retraso en el proceso desescombro por cada vez que tenga que prolongar la estructura.

Por último, la cinta puede tener grandes problemas cuando en el punto de carga se introduce material con agua, además de la posibilidad de atascamiento que tienen los brazos recolectores del minador.

## **5.2. DÚMPERES ARTICULADOS – ALTERNATIVA 2**

### **5.2.1. Justificación de la propuesta de la alternativa**

Avanzando con el minador, hay dos sistemas para desescombras: con cinta transportadora o camión. Normalmente, dado que el minador es una máquina de excavación continua, se suele considerar la opción de utilizar un medio de transporte continuo, la cual sería, la cinta transportadora.

No obstante, en ocasiones el sistema interno del minador no ha funcionado bien debido a problemas relacionados a grandes caudales de agua, por lo que, a mediados de la obra, se ha tenido que cambiar de sistema de desescombro y acudir a los camiones. Esto supone un sobrecoste muy grande del presupuesto.

Por ello, como en este túnel se espera trabajar con presencia de agua, se planteará una alternativa al sistema de desescombro mediante cinta transportadora que no dependa del empleo de los brazos recolectores que dispone el minador para cargar el medio de transporte. Además, la inversión inicial de una cinta transportadora supone un coste muy alto, por tanto, nunca está de más estudiar diferentes opciones para ver cual compensaría más.

### **5.2.2. Descripción del sistema**

En la segunda alternativa de desescombro, los dúmperes articulados serían los encargados de realizar la labor de extracción del material fuera del túnel, ya que son unos volquetes que tienen una articulación que proporciona una gran maniobrabilidad con pequeños radios de giro. Además, tienen una altura de carga menor que los volquetes convencionales para la misma capacidad, que los hacen idóneos para su utilización en obras subterráneas.



Para proceder al desescombro, primero se esperaría a que el equipo minador terminase los trabajos, y después, éste se alejaría del frente de ataque para dejar suficiente espacio libre a la pala cargadora que cargaría los dúmperes. Estas operaciones se repetirán por cada metro avanzado, de modo que la operación de desescombro se tendrá que realizar lo antes posible para que el minador pueda reanudar la tarea de la excavación.

Los dúmperes, una vez cargados de escombros, extraerían el material a un vertedero provisional situado fuera del túnel, al lado de la boca Norte. Después de realizar la descarga de material en el acopio, el dúmper regresaría otra vez al frente de trabajo donde comenzaría un nuevo ciclo.

En túneles de secciones superiores se puede combinar los trabajos de excavación con los de desescombro, de modo que la rozadora atacaría por una mitad de la sección mientras que la pala cargadora aprovecharía para cargar el escombros de la otra mitad a los camiones. Pero este sistema no sería viable en este túnel, ya que no habría suficiente espacio para que los dos equipos pudiesen desarrollar sus labores de forma segura.

Como se ha mencionado en el caso anterior, de las 12 horas que tiene el turno, en 8 horas se tendría que finalizar las labores de excavación y de desescombro. Como en este caso no se realizan las labores al mismo tiempo, de esas 8 horas, aproximadamente 5,5 horas se emplearían en excavar el túnel y 2 horas en desescombrar el material. Así, habría un margen de media hora por si hay algún problema o se necesita más tiempo en el desescombro o en el sostenimiento, según las exigencias de cada tramo. Hay que tener en cuenta, que se considera una eficiencia de trabajo en todas las operaciones del 85%, siendo productivos 50 min por cada hora de trabajo, de modo que de esas 12 horas no se trabajaran aproximadamente 2 horas.



Figura 16. Ejemplo del desescombro mediante pala cargadora y dúmperes articulados.

### 5.2.3. Ventajas

El empleo de dúmperes articulados en el desescombro, presenta las siguientes ventajas:

Por un lado, supone muy fácil variar el ritmo de producción de modo que cuando la producción es mayor, se aumenta la flota de camiones, y cuando la producción disminuye, se puede reducir la flota de camiones, o el grado de utilización de esta.

Por otra parte, en un sistema muy empleado y por ello muy conocido, siendo relativamente fácil de supervisar y controlar.

Además, supone una inversión inicial menor que otros sistemas de transporte como la cinta transportadora.

Son equipos que funcionan muy bien en distancias cortas, pudiéndose utilizar para aplicaciones de obras públicas con distancias de hasta 8 km según se muestra en el “Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo abierto”.

#### **5.2.4. Desventajas**

En cuanto a las desventajas de este sistema de desescombro, se pueden destacar los siguientes:

Los coste de operación son muy elevados comparando con la cinta transportadora. Además, se complica la supervisión y optimización cuando se tiene en operación un elevado número de unidades.

Por otro lado, los rendimientos son bajos cuando se aumenta la distancia de transporte, disminuyendo notablemente el número de ciclos que puede realizar cada unidad por tiempo de desescombro estipulado.

Por último, estos equipos requieren una gran cantidad de mano de obra especializada en operación y mantenimiento, aunque normalmente, estas operaciones suelen estar incluidos en los precios de alquiler de la maquinaria.

## **6. CRITERIOS DE COMPARACIÓN**

### **6.1. CRITERIO ECONÓMICO**

El factor más determinantes a la hora de seleccionar la mejor opción de desescombro de un túnel, suele ser el precio que supone cargar y transportar un m<sup>3</sup> de material excavado.

Para calcular este precio, se tiene que tener en cuenta todos los gastos implicados en el desescombro, como la inversión que supone la maquinaria o gastos de alquiler, los consumos energéticos, consumos de combustible, transporte y montaje, etc.

### **6.2. PLAZO DE EJECUCIÓN DE LA OBRA**

El plazo de ejecución de la obra es muy importante en un túnel, ya que cada día de trabajo en el mismo, supone un gasto muy grande de personal y de maquinaria. Cuanto antes se realice la obra, más económica resultará la ejecución. Por ello, este factor será de gran relevancia a la hora de decidir qué sistema de desescombro será la más adecuada para el túnel objeto de análisis.

Para saber cuál será el plazo de ejecución total del túnel, es muy importante saber cuál es la longitud de avance o de pase, es decir, la longitud que se excava por cada turno de trabajo antes de colocar el sostenimiento. Este parámetro depende de la geología del terreno excavado y la potencia del equipo minador, y es muy importante para estimar la capacidad de la cinta o la flota de camiones que se necesitará para realizar el desescombro.

En el “Proyecto del trazado del nuevo túnel de Artxanda”, se han estimado longitudes de avance entre 1,00 m y 5,00 m por ciclo de trabajo en función de las características del terreno. Pero como no se disponen de datos exactos de las longitudes de pase para cada unidad litológica, se procederá a realizar cálculos de estimación.

### **6.3. IMPACTO AMBIENTAL POR EMISIONES**

El impacto ambiental es un aspecto a tener en cuenta, pero no será el condicionante más importante a la hora de elegir una opción de desescombro, ya que no se espera una diferencia muy grande entre ambas opciones. De todas formas, se calculará la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emitirá a lo largo de todo el periodo de desescombro con cada sistema propuesto, para saber cuál de las dos opciones resulta la más respetuosa con el medio ambiente.

### **6.4. NECESIDAD DE CAUDAL DE VENTILACIÓN**

Dependiendo del sistema de desescombro seleccionado, la necesidad de caudal de aire fresco en el frente de trabajo será diferente.

Una gran necesidad de caudal de ventilación implica una mayor inversión en la instalación de ventilación, ya que exige un ventilador más potente y una tubería de mayor diámetro, suponiendo además, un mayor gasto energético mensual.

## 7. CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES

### 7.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para calcular la cantidad de material a desescombrar, sólo se tendrá en cuenta el tramo que se realiza de manera soterrada en mina, que tiene una longitud de 1731,5 m. Por lo tanto, sabiendo que la sección del túnel es de 55 m<sup>2</sup>, el volumen total que le correspondería al hueco del túnel sería el siguiente:

$$V \text{ in situ} = L \times S = 1731,5 \text{ m} \times 55 \text{ m}^2 = 95.232,5 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la longitud total de cada unidad geotécnica y la sección de excavación del túnel, en la tabla 6, se muestran los resultados de los volúmenes que se extraerán de cada tipo de material, es decir, el material excavado in situ por cada tramo.

Pero hay que tener en cuenta que en todos los terrenos, cuando son excavados sufren un aumento de volumen, es decir, un esponjamiento. Por lo tanto, el volumen a desescombrar fuera del túnel será mayor que el volumen que tiene el material a excavar cuando permanece en banco. Para ello, se necesita conocer cuál es el factor de esponjamiento del terreno teniendo en consideración que el material es excavado mediante un equipo minador. El método de explotación también influye en este factor de esponjamiento.

$$Fe = \frac{dB}{dS}$$

Donde:

dB: densidad en banco (t/m<sup>3</sup>).

dS: densidad del material suelo (escombro) (t/m<sup>3</sup>).

Se considerará un factor de esponjamiento (Fe) de 1,4 ya que es muy habitual cuando el material es excavado con máquinas puntuales de tipo minador.



En la siguiente tabla 6, se muestran los volúmenes de escombros que se obtendrán al realizar la excavación, considerando el factor de esponjamiento. Asimismo, se muestra el escombros que tendrá cada unidad litológica atravesada, que dependerá del volumen y densidad de cada uno.

Unidad Geotécnica	dB (t/m <sup>3</sup> )	Longitud (m)	Volumen in situ (m <sup>3</sup> )	dS (t/m <sup>3</sup> )	Volumen escombros (m <sup>3</sup> )	Peso escombros (t)
U1	2,731	351,5	19332,5	1,95	27065,5	52797,058
U2	2,668	840	46200	1,91	64680	123261,6
U3	2,655	390	21450	1,90	30030	56949,75
U4	2,734	90	4950	1,95	6930	13533,3
	2,501	60	3300	1,79	4620	8253,3

**Tabla 6. Escombros extraído de cada unidad litológica.**

## 7.2. RENDIMIENTO DE AVANCE TEÓRICO DEL MINADOR

Para realizar los cálculos de la longitud de avance de los tramos, se seguirá el procedimiento propuesto en el libro “CORNEJO ÁLVAREZ, Laureano. *Excavación mecánica de túneles*. Editorial Rueda S.L., 1988”.

Para calcular el avance teórico de cada unidad geotécnica, se tendrá en cuenta la resistencia a compresión simple medio de cada unidad geotécnica.

Potencia de la cabeza de corte (KW)	Resistencia a compresión simple del terreno (Mpa)					
	120	100	50	30	20	8
	Rendimiento (m <sup>3</sup> /h) (Ce=1,00) (Ri)					
300	23	29	50	72	94	116
200		12	29	48	67	81
110			27	27	34	46
50				12	17	41
40				6	12	35
20					3	12

**Tabla 7. Relación entre potencia y resistencia de la roca. Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles.**

Teniendo en cuenta que potencia de la cabeza de corte de la rozadora es de 300 KW, como indica su ficha técnica, se han realizado los siguiente cálculo realizando interpolaciones con los datos aportados por la tabla 7.

En la tabla 8, se muestran los resultados correspondientes al rendimiento teórico que tendrá la máquina rozadora en diferentes unidades geotécnicas (cortesía Westfalia).

Unidad Geotécnica	R.C.S (MPa)	Rendimiento (m <sup>3</sup> /h)
U1	32,55	69,195
U2	23,12	87,136
U3	62,83	44,6114
U4	48,45	30,705
	6,21	125

**Tabla 8. Resultado del rendimiento de avance teórico de las unidades litológicas.**

## **7.3. ESTIMACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS REALES DE LOS SISTEMAS DE EXCAVACIÓN Y DESESCOMBRO**

### **7.3.1. Estimación del rendimiento real - cinta transportadora**

En este apartado se calculará el rendimiento real teniendo en cuenta todos los factores que se muestran en la siguiente fórmula:

$$R_{EXD} = C_E \times C_D \times (1 - C_1) \times n \times R_I$$

Donde:

$R_{EXD}$ : Rendimiento de excavación/día en  $m^3$ .

$C_E$ : Coeficiente de eficiencia (tabla 9).

$R_I$ : Rendimiento instantáneo de excavación en  $m^3/h$  (tabla 8).

$n$ : Número de horas trabajadas al día.

$C_1$ : Coeficiente de tiempos muertos, que representa el tiempo perdido en cada relevo.

$C_D$ : Coeficiente de tiempo disponible para el rozado (tabla 10).

Para asignar un coeficiente de tiempo disponible, se prevé cuales serán las condiciones de trabajo dentro del túnel en cada tramo. Por lo general, las condiciones de trabajo serán buenas ya que predominan los materiales de calidad media y buena, por lo tanto, el coeficiente  $C_D$  se considerará del 50%.

<b>C<sub>D</sub></b>	<b>Condiciones de trabajo</b>
10%	Condiciones pésimas
20%	Terrenos malos con varias fases de ejecución realizadas con la misma rozadora, en los que se coloca un sostenimiento sistemático importante.
50%	Cuando se trabaja por un frente en una sola fase y con un sostenimiento de cuantía ligera
85%	En condiciones óptimas sin ningún impedimento para el trabajo de la máquina (Situación no real)

**Tabla 9. Coeficiente de tiempo disponible. Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles.**

En cuanto al coeficiente de eficiencia, se presupone que en la excavación del terreno se puede generar mucho polvo hasta el punto que a veces pueda requerir la parada del equipo minador durante un tiempo para que el polvo sea sedimentado y ventilado adecuadamente, para así poder continuar con las labores. Por lo tanto, el coeficiente de eficiencia seleccionado para todo el trazado del túnel será 0,69.

<b>Grado</b>	<b>Condiciones de trabajo</b>	<b>Coeficiente de eficiencia</b>
1	Buenas condiciones en la solera. Se produce poco polvo.	1
2	Solera en malas condiciones. Poco polvo.	0,86
3	Mucho polvo a veces hay que interrumpir el trabajo	0,69
4	Solera en malas condiciones. Mucho polvo.	0,52

**Tabla 10. Coeficiente de eficiencia. Fuente: Fuente: Cornejo Álvarez. Excavación Mecánica de Túneles.**

Por otra parte, se estima que el coeficiente de tiempo muerto,  $C_1$ , será de 0,15, considerando que la eficiencia de trabajo será de 50 min/hora (85%).

Por último, el número de horas destinadas teóricamente a la excavación con la rozadora será de 8 horas por turno, es decir, 16 horas al día. Esto se debe a que en un turno de 12 horas, se estima que el sostenimiento puede llegar a exigir 4 horas de trabajo. Por lo tanto, en 8 horas habría que excavar y desescombrar al mismo tiempo.

Habiendo determinado todos los parámetros que define la fórmula, se obtienen los resultados de los rendimientos de avance reales que tendrá la rozadora en cada unidad geotécnica, expresado en m<sup>3</sup>/día.

Unidad geotécnica	CE	CD (%)	C1	n	RI (m <sup>3</sup> /h)	REXD (m <sup>3</sup> /d)
U1	0,69	50%	0,85	16	69,195	324,66
U2					87,136	408,84
U3					44,6114	209,32
U4					30,705	144,07
					125	586,50

**Tabla 11. Rendimiento de avance medio real con cintas transportadoras.**

A continuación, partiendo de los rendimientos de la rozadora en cada unidad geotécnica, se obtendrá los resultados del avance medio real de cada tramo por día, y por cada turno, teniendo en cuenta que la sección de excavación del túnel es de 55 m<sup>2</sup>.

Unidad geotécnica	REXD (m <sup>3</sup> /d)	Avance medio (m/d)	Avance medio (m/turno)
U1	324,66	5,90	3,0
U2	408,84	7,43	3,7
U3	209,32	3,81	1,9
U4	144,07	2,62	1,3
	586,50	10,66	5,3

**Tabla 12. Rendimiento de avance medio real por unidad litológica con cintas transportadoras.**

En caso de que el desescombro se realice mediante cinta transportadora, el rendimiento de avance medio estará comprendido entre 1,3 m y 5,3 m.

### **7.3.2. Estimación del rendimiento real - dúmper y pala cargadora**

En este caso, todos los factores serán iguales que en la alternativa anterior, menos el número de horas trabajados al día. Se tendrá en cuenta que de las 8 horas de turno que se disponen para excavar y desescombrar, se emplearán 5,5 excavando y 2 extrayendo el material. De esta manera, habrá un margen de media hora para poder realizar cualquier trabajo que requiera más tiempo que el estipulado.

Por lo tanto, los resultados de los volúmenes excavados in situ serán los siguientes:



Unidad geotécnica	CE	CD (%)	C1	n	RI (m <sup>3</sup> /h)	REXD (m <sup>3</sup> /d)
U1	0,69	50%	0,85	11	69,195	223,21
U2					87,136	281,08
U3					44,6114	143,91
U4					30,705	99,05
					125	403,22

**Tabla 13. Rendimiento de avance medio real con dúmperes y pala cargadora.**

Al igual que en la alternativa anterior, se obtendrán los resultados medios de rendimiento de avance teniendo en cuenta la sección del túnel.

Unidad geotécnica	REXD (m <sup>3</sup> /d)	Avance medio (m/d)	Avance medio (m/turno)
U1	223,21	4,06	2,0
U2	281,08	5,11	2,6
U3	143,91	2,62	1,3
U4	99,05	1,80	0,9
	403,22	7,33	3,7

**Tabla 14. Rendimiento de avance medio real por unidad litológica con dúmperes y pala cargadora.**

En caso de que el desescombro se realice mediante pala cargadora y dúmperes articulados, el rendimiento de avance medio estará comprendido entre 0,9 m y 3,7 m.

## **8. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESESCOMBRO Y TRANSPORTE MEDIANTE DÚMPERES**

### **8.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA FLOTA DE CAMIONES**

#### **8.1.1. Selección de tipo de la maquinaria**

##### *Pala cargadora de ruedas: CAT 938 M*

En la tabla 15, se muestran las características más destacables de la pala cargadora seleccionada para cargar el escombros. Se ha seleccionado esta pala, porque es una pala pequeña y su potencia máxima se ajusta a la necesaria en un túnel, siendo ésta suficiente para poder cargar el material triturado por la rozadora.

<b>Modelo: Cat pala cargadora de ruedas 938 M</b>	
Potencia bruta máxima (kW)	136
Capacidad de cucharón (m <sup>3</sup> )	2,5 - 5
Cilindrada (L)	7,01
Peso de funcionamiento (Kg)	16427

**Tabla 15. Características de la pala cargadora. Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com).**



Figura 17. Pala cargadora CAT 938 M. Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com).

### *Dúmpер articulado; CAT 725CE*

En cuanto al modelo del dúmpер articulado seleccionado, consiste en un camión pequeño que tiene una capacidad media de 13 m<sup>3</sup>, la cual es adecuado para túneles debido a su tamaño ajustado.

<b>Modelo: Cat dúmpер articulado 725C2</b>	
Capacidad al ras (m3)	11
Capacidad colmado (m3)	15
Capacidad media (m3)	13
Carga útil nominal (t)	24
Potencia nominal (Kw)	234
Cilindrada (L)	9,3

Tabla 16. Características dúmpер articulado. Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com).



Figura 18. Dúmpfer articulado CAT 725CE. Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com).

### 8.1.2. Cálculo de flota de camiones

Los cálculos de la necesidad de la flota de camiones se harán para cada tramo que compone en túnel, ya que dependiendo de la longitud del trayecto, la necesidad del número de dúmpferes aumentará.

Teniendo en cuenta que la carga útil es de 24 t, aplicándole a éste valor la densidad del material suelto, es decir, 1,894 t/m<sup>3</sup>, se obtiene el volumen máximo con el que se puede cargar el dúmpfer.

$$\text{Capacidad máx (m}^3\text{)} = 24t \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,894 \text{ t}} = 12,67 \text{ m}^3$$

En un principio, la capacidad del dúmpfer a tener en cuenta se calcula haciendo una media entre la capacidad al ras y la capacidad de colmado. Pero como esta capacidad media, 13 m<sup>3</sup>, es superior a la capacidad máxima permitida debido al tonelaje máximo, en cada viaje del dúmpfer se podrán transportar 12,67 m<sup>3</sup>.

La capacidad del dúmper, es de  $12,67 \text{ m}^3$ , mientras que el cazo de la pala tendrá una capacidad de  $3 \text{ m}^3$ . Por otra parte, se considerará que el grado de llenado del cazo es del 85%, y que el grado de llenado del dúmper del 100%.

$$n^{\circ}\text{cazos} = \frac{12,67 \text{ m}^3}{3 \text{ m}^3 \times 0,85} = 4,97 \text{ cazos} \rightarrow 5 \text{ cazos}$$

Se ha seleccionado esta capacidad de cazo para que la pala pueda cargar el volquete con una cantidad de 5 cazos, ya que es la cantidad recomendada para que el dimensionamiento de la flota de camiones sea proporcional.

En este apartado no se aplica la eficiencia horaria de trabajo de la producción, ya que se ha incluido en el apartado donde se ha calculado el rendimiento de excavación/día.

Se realizarán los cálculos para definir el número de camiones que harán falta para el desescombro del material de la primera unidad, y después se repetirán los cálculos para los siguientes tramos.

### ***Ejemplo de dimensionamiento de la flota de camiones: Tramo 1***

Para dimensionar la flota de camiones, lo primero que hay que calcular es el tiempo que tardará cada dúmper en hacer el ciclo. Para ello, se definirán los tiempos fijos y tiempos variables del equipo.

Se entiende como tiempos fijos, los tiempos empleados en las operaciones de carga, descarga y las maniobras para realizar estas dos acciones, y serán constantes en todos los tramos del túnel.

El tiempo variable, en cambio, consiste en el tiempo que invierte el dúmper en transportar el escombro hasta el punto donde se realiza la descarga. Este tiempo dependerá en todo momento de la distancia entre el punto de la carga y el punto de la descarga.

Tiempos fijos

*Tiempo de carga:*

A continuación, se debe calcular el tiempo que tarda la pala cargadora en llenar el dúmper articulado. Para ello, se tendrá en cuenta de cazos que necesitará la pala cargadora para cargar, y el tiempo que tarda en realizar esta acción.

En el siguiente video se muestra una pala cargadora CAT 938M operando, y se ha cronometrado el tiempo que tarda el equipo en cargar un cazo de material de similares características a un volquete.

<https://www.youtube.com/watch?v=q7a5-yqWaIU>

$$t \text{ carga cazo} = 29 \text{ s}$$

$$t \text{ carga total} = 5 \times 29 = 145 \text{ s}$$

*Tiempo de descarga:*

El tiempo de descarga del dúmper se ha calculado de la misma manera, cronometrando la descarga de un dúmper del mismo modelo, con el video que se muestra a continuación.

<https://www.youtube.com/watch?v=KVhP6kYGuqs>

$$T \text{ tiempo de descarga dúmper} = 30 \text{ s}$$



Tiempo variable

*Tiempo de acarreo*

El tiempo de tránsito dentro del túnel será de 10 km/h, es decir, 2,8 m/s. Por otra parte, aunque el trazado del túnel presenta una pequeña pendiente del 2,5%, los dúmperes no tendrán problemas para circular a la velocidad definida.

De todas formas, se realizará una comprobación para garantizar que el dúmper puede circular a esa velocidad. Para ello, se considerará el tramo más desfavorable para el dúmper, que será el que tiene una pendiente de 2,5%, siendo ésta la rasante de entrada del túnel. Este será el tramo más desfavorable porque es por donde tendrán que circular ascendentemente los camiones cuando están cargados para salir al exterior.

Para ello, se calculará la pendiente total efectiva (PE), es decir, la resistencia total, y se empleará el ábaco del dúmper articulado CAT 725C para determinar la velocidad máxima a la que puede circular este modelo de dúmper en el tramo considerado.

El proceso de cálculo se realiza siguiendo el procedimiento descrito en el Trabajo Fin de Máster “GONZÁLEZ PERNÍA, Pablo. *Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a una cantera de caliza*. Universidad de Oviedo, Oviedo, 2014”.

Para calcular la pendiente total efectiva, hay que calcular primero la resistencia a la rodadura (RR) y la resistencia en pendiente (RP), ya que la resistencia total será la suma de ambos.

*Resistencia a la rodadura (RR)*

Es la medida de la fuerza que tiene que vencer el volquete para conseguir la rotación de las ruedas en el terreno. Depende de las condiciones del terreno y de la carga que transporte.

Como se menciona en el artículo, la resistencia RR mínima es aproximadamente del 2% del peso bruto de la máquina. Por otro lado, también hay que tener en cuenta la penetración de los neumáticos en el terreno lo que constituye una resistencia adicional de 0,6% del peso bruto de la máquina por centímetro de penetración (Pe).

El factor de resistencia a la rodadura (FRR) se calcula de la siguiente manera:

$$FRR(\%) = 2\% + 0,6\% \times Pe(cm)$$

$$FRR \left( \frac{kg}{t} \right) = 20 \left( \frac{kg}{t} \right) + 6 \left( \frac{kg}{t \times cm} \right) \times Pe (cm)$$

El dúmper cuando está vacío tiene un peso de 23 t, y tiene una capacidad de carga máxima de 24 t. Por otra parte, se considerará que los neumáticos penetran 3 cm en el terreno.

$$FRR(\%) = 2\% + 0,6\% \times 3(cm) = 3,8 \%$$

$$FRR \left( \frac{kg}{t} \right) = 20 \left( \frac{kg}{t} \right) + 6 \left( \frac{kg}{t \times cm} \right) \times 3 (cm) = 38 \frac{kg}{t}$$

La resistencia a la rodadura se calcula de la siguiente manera:

$$RR (kg) = FRR \left( \frac{kg}{t} \right) \times \text{Peso total} (t)$$

El peso total será la suma del dúmper vacío y la carga máxima que puede transportar el mismo, que tendrá un valor de 47 t.

$$RR (kg) = 38 \left( \frac{kg}{t} \right) \times 47(t) = 1786 kg$$

### *Resistencia en pendiente (RP)*

Es la fuerza que debe vencer una máquina en pendientes desfavorables. En pendientes adversas cada tonelada de peso de la máquina crea una resistencia adicional de 10 kg por cada 1% de inclinación y mediante esta relación se puede determinar el Factor de Resistencia en Pendientes (FRP):

$$FRP(\%) = I(\%)$$

Donde,

I: Pendiente natural del terreno (%)

$$FRP(\%) = 2,5 \%$$

$$RP \left( \frac{kg}{t} \right) = FRP \left( \frac{kg}{t} \right) \times \text{Peso total dúmper (t)}$$

$$RP (kg) = 25 \left( \frac{kg}{t} \right) \times 47 (t) = 1175 kg$$

Por lo tanto, la resistencia total efectiva será el siguiente:

$$PE = 1786 + 1175 = 2961 kg$$

$$PE = 6,3\%$$

Empleando el ábaco del dúmper CAT 725C que se muestra en la figura 20, se calculará la velocidad máxima del dúmper en el tramo analizado. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>PE (%)</b>	<b>Vmax (Km/h)</b>
2	466	6,3	37 km/h

**Tabla 17. Resultado de la velocidad máxima para el dúmper 725C.**

Se ha podido comprobar que el modelo de dúmper articulado seleccionado será capaz de circular sin ningún problema a una velocidad de 10 km/h.

### Especificaciones del Camión Articulado 725C

#### Rendimiento en pendientes/velocidad/fuerza máxima de tracción

Para determinar el rendimiento, lea desde el peso bruto hasta el porcentaje de resistencia total. La resistencia total equivale al porcentaje de pendiente real más 1 % por cada 10 kg/tons métricas (20 lb/tons EE.UU.) de resistencia a la rodadura. Desde este punto, lea horizontalmente hasta la curva con la gama de velocidad más alta alcanzable. Luego, baje hasta la velocidad máxima. La fuerza máxima de tracción utilizable depende de la tracción disponible.

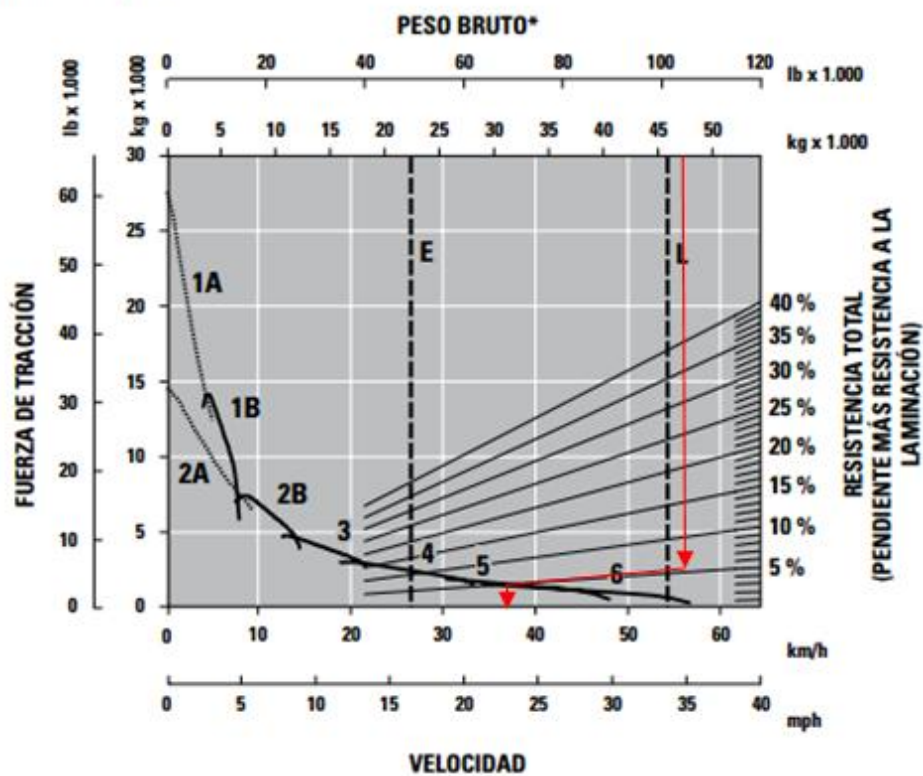


Figura 19. Ábaco de relación de resistencia total y la velocidad del dúmper 725C. Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com).

Una vez comprobado que el camión puede circular a una velocidad de 10 km/h sin ningún problema, se continuará con los cálculos referentes a los tiempos variables.

- ❖ Caso más favorable: al comienzo de la unidad geotécnica.

La distancia de acarreo será de 100 m, ya que el primer tramo del túnel se ha realizado mediante cut and cover, con una longitud de 83,5 m, y el acopio donde se depositarán los escombros se situará a aproximadamente 16,5 metros del emboquille, para que no entorpezca el tránsito de la entrada.

$$D = 100 \text{ m}$$

$$t_{\text{acarreo}} = \frac{100 \text{ m}}{2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 35,7 \text{ s}$$

- ❖ Caso más desfavorable: al final de la unidad geotécnica.

La distancia de acarreo será de 125,5 m, ya que es en este punto donde se termina el primer tramo.

$$D = 126,5 \text{ m}$$

$$t_{\text{acarreo}} = \frac{126,5 \text{ m}}{2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 45,2 \text{ s}$$

Tiempo total por cada viaje

$$t_{\text{total}} = t_{\text{carga}} + t_{\text{descarga}} + 2 \times t_{\text{acarreo}}$$

$$t_{\text{total}} = 145 + 30 + 2 \times 35,7 = 246,4 \text{ s} = 4,1 \text{ min}$$

$$t_{\text{total}} = 145 + 30 + 2 \times 45,2 = 265,4 \text{ s} = 4,42 \text{ min}$$

Se escogerá el caso más desfavorable y a este tiempo se le aplicará un coeficiente de 85% debido a la eficiencia de trabajo del dúmper, de modo que el tiempo real de ciclo será 5,2 min.

$$t_{real\ ciclo} = \frac{4,42\ min}{0,85} = 5,2\ min$$

### Tiempo de desescombro

El tiempo total destinado al desescombro es máximo de dos horas y hay que tener en cuenta que se deberá desescombrar cada vez que se avance un metro, para que el minador pueda seguir trabajando sin obstáculos.

El volumen que hay que desescombrar por cada metro avanzado es el siguiente:

$$\frac{V_{desescombro}\ (m^3)}{1\ m\ avanzado} = 55\ m^2 \times 1\ m \times 1,4 = 77\ m^3$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el dumper puede transportar  $12,67\ m^3$ , se calculará cuantos viajes hacer falta para extraer dicho volumen de material.

$$n^{\circ}\ viajes = \frac{77\ m^3}{12,67\ m^3} = 6\ viajes$$

Posteriormente, se calculará el tiempo que supondrá realizar 6 trayectos con el resultado del tiempo que se tarda por ciclo.

$$t_{desescombro\ total} = 6\ viajes \times \frac{5,2\ min}{viaje} = 31,2\ min$$

En este caso, como en el primer tramo sólo se avanza 1 metro por turno de trabajo, el desescombro se realizará cuanto el minador finalice los trabajos de excavación, pero como norma general, el desescombro de 1 m avanzado se realizará máximo en 30 min, para que no se pierda tiempo, y se pueda avanzar lo máximo posible en cada turno.



### Número de camiones necesarios

El cálculo de número de camiones se realizará teniendo en cuenta el tiempo que se necesita en realizar los 6 ciclos necesarios para desescombrar el material extraído en un metro de avance. A medida que el túnel avance, se necesitará más tiempo en realizar esos ciclos, y aumentará un número de camiones necesarios que sean capaces de desescombrar en 30 min.

Para este primer caso, se necesitará el siguiente número de camiones:

$$n^{\circ} \text{ dúmperes} = \frac{t \text{ desescombro calculado}}{t \text{ destinado al desescombro}} = \frac{31,2 \text{ min}}{30 \text{ min}} = 1,04$$

En este caso, con 1 d mper bastaría, y además como sólo se tiene que desescombrar una vez, habría más tiempo disponible para ello. Aún así, en el resto de los tramos se necesitarán mínimo dos camiones, por lo que se partirá desde el principio de las labores con una flota de 2 camiones, porque los camiones se alquilan mensualmente y el primer tramo se termina en 14 días.

### *Dimensionamiento de la flota de camiones para todos los tramos*

Después de realizar el cálculo de la flota de camiones para el primer tramo a excavar, se repetirán los cálculos en una hoja Excel para el resto de los tramos. Los resultados se muestran en las tablas 18 y 19.

Los equipos de carga y transporte serán los mismos en todos los casos por lo que se mantendrán los valores de la capacidad del d mper y la cantidad de cazos necesarios para llenar el mismo. Por otro lado, también se mantendrán los tiempo fijos, es decir, el de la carga y descarga del escombro, siendo el único variable el tiempo invertido en el transporte.

❖ Capacidad d mper: 12,67 m<sup>3</sup>



- ❖ N° cazos de pala/dúmpер: 5
- ❖ T fijos: 175 s
- ❖ Velocidad dúmpер dentro del túnel: 10 Km/h → 2,8 m/s
- ❖ Coeficiente de eficiencia de trabajo: 85%
- ❖ Distancia avanzada antes de desescombrar: 1 m
- ❖ Volumen a desescombrar por metro avanzado: 77 m<sup>3</sup>
- ❖ Número de viajes para desescombrar el volumen de escombro: 6 viajes

Tramo	Longitud (m)	Longitud acumulada (m)	t acarreo ida (s)	t acarreo ida y vuelta (s)	t total (s)	tiempo real/ciclo (min)
1	26,5	126,5	45,2	90,4	265,4	5,2
2	90	216,5	77,3	154,6	329,6	6,5
3	120	336,5	120,2	240,4	415,4	8,1
4	290	626,5	223,8	447,5	622,5	12,2
5	10	636,5	227,3	454,6	629,6	12,3
6	30	666,5	238,0	476,1	651,1	12,8
7	10	676,5	241,6	483,2	658,2	12,9
8	20	696,5	248,8	497,5	672,5	13,2
9	5	701,5	250,5	501,1	676,1	13,3
10	35	736,5	263,0	526,1	701,1	13,7
11	10	746,5	266,6	533,2	708,2	13,9
12	425	1171,5	418,4	836,8	1011,8	19,8
13	115	1286,5	459,5	918,9	1093,9	21,4
14	60	1346,5	480,9	961,8	1136,8	22,3
15	40	1386,5	495,2	990,4	1165,4	22,9
16	230	1616,5	577,3	1154,6	1329,6	26,1
17	85	1701,5	607,7	1215,4	1390,4	27,3
18	105	1806,5	645,2	1290,4	1465,4	28,7
19	25	1831,5	654,1	1308,2	1483,2	29,1

Tabla 18. Cálculo del tiempo de ciclo de cada tramo.



Tramo	Unidad	Longitud (m)	REXD (m <sup>3</sup> /día)	Avance medio (m/turno) turno: 5,5 h	Nº de veces que hay que desescombrar	Tiempo en realizar 6 viajes	Nº de dúmperes necesarios	Tiempo total de desescombro por turno (h)
1	U-4	26,5	99,05	0,9	1,0	31,2	2,0	0,3
2	U-2	90	281,08	2,6	3,0	38,8	2,0	1,0
3	U-3	120	143,91	1,3	2,0	48,9	2,0	0,8
4	U-2	290	281,08	2,6	3,0	73,2	3,0	1,2
5	U-4	10	403,22	3,7	4,0	74,1	3,0	1,6
6	U-2	30	281,08	2,6	3,0	76,6	3,0	1,3
7	U-3	10	143,91	1,3	2,0	77,4	3,0	0,9
8	U-4	20	403,22	3,7	4,0	79,1	3,0	1,8
9	U-3	5	143,91	1,31	2,0	79,5	3,0	0,9
10	U-2	35	281,08	2,56	3,0	82,5	3,0	1,4
11	U-3	10	143,91	1,31	2,0	83,3	3,0	0,9
12	U-2	425	281,08	2,56	3,0	119,0	4,0	1,5
13	U-3	115	143,91	1,31	2,0	128,7	5,0	0,9
14	U-2	60	281,08	2,56	3,0	133,7	5,0	1,3
15	U-3	40	143,91	1,31	2,0	137,1	5,0	0,9
16	U-2	230	281,08	2,56	2,0	156,4	6,0	0,9
17	U-1	85	223,21	2,03	2,0	163,6	6,0	0,9
18	U-1	105	223,21	2,03	2,0	172,4	6,0	1,0
19	U-1	25	223,21	2,03	2,0	174,5	6,0	1,0

Tabla 19. Cálculo de número de dúmperes necesarios por cada tramo.

Como se puede ver en los resultados de la tabla 19, al comienzo del túnel se necesitarán 2 dúmperes y al final del túnel 6 dúmperes para poder realizar el desescombro.

## **8.2. CÁLCULO DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN**

### **8.2.1. Plazo de ejecución de la obra**

Como se ha mencionado anteriormente, el trazado del túnel está dividido en 19 tramos formados por 4 unidades litológicas diferentes, como se puede apreciar en la figura 11, perfil geológico.

Sabiendo los datos del rendimiento de avance de cada tramo y su longitud, se puede saber cuánto tiempo llevará excavar el túnel en su totalidad. En la tabla 20, se muestra la división de los tramos que se pueden apreciar en el perfil geológico y la longitud de cada una de ellas.

Multiplicando la longitud de los tramos por los rendimiento de avance de excavación, se podrá conocer en cuántos días se realizará la excavación de cada tramo. Sumando todos los resultados, se obtendrá el número aproximado de días en los que se realizará la excavación subterránea.

Tramo	Unidad	Longitud (m)	Avance medio (m/turno)	Tiempo en avanzar el tramo (d)
1	U-4	26,5	0,9	14,72
2	U-2	90	2,6	17,61
3	U-3	120	1,3	45,86
4	U-2	290	2,6	56,75
5	U-4	10	3,7	1,36
6	U-2	30	2,6	5,87
7	U-3	10	1,3	3,82
8	U-4	20	3,7	2,73
9	U-3	5	1,31	1,91
10	U-2	35	2,56	6,85
11	U-3	10	1,31	3,82
12	U-2	425	2,56	83,16
13	U-3	115	1,31	43,95
14	U-2	60	2,56	11,74
15	U-3	40	1,31	15,29
16	U-2	230	2,56	45,01
17	U-1	85	2,03	20,94
18	U-1	105	2,03	25,87
19	U-1	25	2,03	6,16

**Tabla 20. Tiempo en avanzar cada tramo con desescombro mediante cinta transportadora.**

Según las estimaciones realizadas, la excavación del túnel se llevará a cabo en un periodo de **413** días.



### 8.2.2. Consumo de gasoil

#### *Consumo de gasoil de los dúmperes*

Según el libro “*Manual de Túneles y Obras Subterráneas*”, de López Jimeno, el consumo de gasoil de las máquinas que trabajan en el túnel es de 0,272 kg/KWh, es decir, 0,272 kg a la hora por cada KW de potencia de la máquina.

Para calcular el consumo de gasoil de los dúmperes durante la obra, primero se tiene que calcular el tiempo total destinado al desescombro en cada tramo y sumar todo este tiempo. Aunque el gasto relacionado con el consumo de gasoil vaya incluido en el precio de alquiler de la maquinaria, es imprescindible calcular el valor del combustible consumido para saber cuál será el impacto ambiental que generará este sistema de desescombro.

Para ello, sabiendo el tiempo que se tardará en avanzar cada tramo, se multiplicará el tiempo destinado al desescombro por día en cada tramo, por los días que se tarda en avanzar el tramo, y se obtendrá un resultado de las horas que se han invertido en desescombrar el material en cada tramo.

De esta forma, sumando todos los tiempos de desescombro, se sabrá el tiempo total que han trabajado los camiones. Con este dato, se podrá calcular el consumo de gasóleo total de los dúmperes.

Tramo	L (m)	T desescombro (h/d)	Tiempo en avanzar el tramo (d)	t desescombro camión (h)	t desescombro camión (h) Redondeadas
1	26,5	2,0	14,72	29,4	30,0
2	90	2,0	17,61	35,2	36,0
3	120	2,0	45,86	91,7	92,0
4	290	4,0	56,75	227,0	227,0
5	10	4,0	1,36	5,5	6,0
6	30	4,0	5,87	23,5	24,0
7	10	2,0	3,82	7,6	8,0
8	20	4,0	2,73	10,9	11,0
9	5	2,0	1,91	3,8	4,0
10	35	4,0	6,85	27,4	28,0
11	10	2,0	3,82	7,6	8,0
12	425	4,0	83,16	332,6	333,0
13	115	2,0	43,95	87,9	88,0
14	60	4,0	11,74	47,0	47,0
15	40	2,0	15,29	30,6	31,0
16	230	2,0	45,01	90,0	91,0
17	85	2,0	20,94	41,9	42,0
18	105	2,0	25,87	51,7	52,0
19	25	2,0	6,16	12,3	13,0

**Tabla 21. Cálculo del tiempo de desescombro total por cada tramo.**

El tiempo total de trabajo de los camiones es el siguiente:

$$timepo\ funcionamiento\ d\acute{u}mper = 1171\ h$$

Considerando un consumo de gasoil de 0,272 kg/KWh, y sabiendo que el dumper empleado tiene una potencia nominal del 234 kW y que trabaja al 60% de su potencia nominal, el consumo será el siguiente:

$$\text{Consumo dumper} = \frac{0,272 \text{ kg}}{\text{kWh}} \times 234 \text{ kW} \times 0,6 \times 1171 \text{ h} = 44.719 \text{ kg}$$

### *Consumo gasóleo de la pala cargadora*

Para saber cuál es la cantidad de gasóleo consumido por la pala cargadora, se tendrá en cuenta el número de viajes que se han realizado por cada turno en cada tramo y el tiempo que tarda el equipo en cargar un camión, cuyo valor se ha calculado anteriormente y es de 145 s. En este caso el coeficiente de eficiencia será del 100%. Este valor de horas se redondeará hacia arriba, teniendo en cuenta que la pala se tendrá que mover varias veces al día, retrocediendo cuando el minador va a excavar, y regresando al puesto de trabajo original, cuando le toca cargar el escombro excavado.

Tramo	Tiempo funcionamiento pala/día (h/d)	Tiempo funcionamiento redondeado (h/d)	tiempo en avanzar el tramo (d)	Tiempo funcionamiento pala (h)
1	0,5	1	13,49	14
2	0,5	1	16,14	17
3	0,5	1	42,04	42
4	0,5	1	52,02	52
5	0,5	1	1,25	2
6	0,5	1	5,38	6
7	0,5	1	3,50	4
8	0,5	1	2,50	3
9	0,5	1	1,75	2
10	0,5	1	6,28	7
11	0,5	1	3,50	4
12	0,5	1	76,23	77
13	0,5	1	40,29	41
14	0,5	1	10,76	11
15	0,5	1	14,01	14
16	0,5	1	41,25	42
17	0,5	1	19,20	20
18	0,5	1	23,72	24
19	0,5	1	5,65	6

Tabla 22. Tiempo total de funcionamiento de la pala cargadora por cada tramo.

$$\text{tiempo funcionamiento pala cargadora} = 388 \text{ h}$$

En este caso, el consumo por kWh de la pala cargadora será del mismo valor, pero se considerará que la pala funcionará al 100% de su potencia nominal.

$$\text{Consumo pala cargadora} = \frac{0,272 \text{ kg}}{\text{kWh}} \times 136 \text{ kW} \times 388 \text{ h} = 14.352,9 \text{ kg}$$

### **Consumo total de gasóleo**

El consumo total de gasóleo será la suma del consumo del dúmper y de la pala cargadora:

$$\text{Consumo gasóleo} = 44.719 \text{ kg} + 14.352,9 \text{ kg} = 59.072 \text{ kg}$$

$$\text{Consumo gasóleo} = 59.072 \text{ kg}$$

Aunque el coste relacionado al consumo de gasóleo está incluido en el precio de alquiler de los equipos, este valor será importante para calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emitirán a la atmósfera.

### **8.2.3. Condiciones sobre la ventilación**

La ventilación de un túnel se aplica, principalmente, para corregir la contaminación producida por los gases de los escapes de vehículos diesel y el cálculo para dimensionar la instalación de ventilación se realiza evaluando a priori las situaciones de concentración máxima.

Para este túnel, el sistema de ventilación seleccionado ha sido una variante del sistema de ventilación aspirante y soplante simultáneas, ya que cuando el avance del túnel se realiza con rozadoras, se puede utilizar una ventilación soplante que aporta aire fresco al frente, en tanto que una aspirante capta el polvo producido en el arranque y lo lleva a un filtro de mangas o paneles, donde es recogido, retornando el aire limpio al túnel.

Los cálculos que se realizarán a continuación, determinarán la cantidad de aire necesaria para la respiración de las personas, los equipos y para el control de la concentración de los gases nocivos por debajo de los límites exigidos por el Reglamento general de normas básicas de seguridad minera, desarrollado por la “I.T.C.04.7.02. Concentraciones límites de gases. Temperatura, humedad y clima.”

Según la Instrucción Técnica Complementaria mencionada, las concentraciones volumétricas admisibles para los distintos gases peligrosos, a lo largo de una jornada de ocho horas, son las siguientes:

- ❖ 50 p.p.m. de monóxido de carbono (CO).
- ❖ 5.000 p.p.m. de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- ❖ 10 p.p.m. de óxidos de nitrógeno (NO + NO<sub>2</sub>).
- ❖ 10 p.p.m. de sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>).
- ❖ 5 p.p.m. de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- ❖ 1.000 p.p.m. de hidrógeno (H<sub>2</sub>).

No obstante, durante periodo cortos los límites de las concentraciones volumétricas admisibles de los gases son los que se muestran a continuación:

- ❖ 100 p.p.m. de monóxido de carbono (CO).
- ❖ 12.500 p.p.m. de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- ❖ 25 p.p.m. de óxidos de nitrógeno (NO + NO<sub>2</sub>).
- ❖ 50 p.p.m. de sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>).
- ❖ 10 p.p.m. de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- ❖ 10.000 p.p.m. de hidrógeno (H<sub>2</sub>).

Por otro lado, En ninguna labor en actividad la proporción de oxígeno será inferior al 19% en volumen.

### ***Cálculo de caudal necesario de ventilación***

#### **Datos de partida**

- ❖ Sección de excavación: 55 m<sup>2</sup>.
- ❖ Longitud del túnel: 1.731,5 m.
- ❖ Número máximo de personas en el frente de avance: 10
- ❖ Velocidad del aire de la corriente de retorno: 0,5 m/s

La maquinaria que se utilizará tiene la siguiente potencia:

- ❖ Dúmpster articulado CAT 725C2: 234 KW
- ❖ Pala cargadora CAT 966M: 222 KW
- ❖ Rozadora Sandvik MT750: 522 KW

Cálculo del caudal de aire

- ❖ *Caudal necesario para la respiración de las personas:*

Según la ITC 04.7.01. Circulación de la corriente de aire, el caudal mínimo de aire en el túnel, será función del número de personas presentes en el relevo más numeroso a razón de 40 litros por persona y segundo.

Se considerará que en el caso más desfavorable, dentro del túnel puede haber un máximo de 10 personas. El caudal de aire que necesario requerido será el siguiente:

$$Q = \frac{40 \frac{l}{s}}{persona} \times 10 personas = 400 \frac{l}{s} = 0,4 \frac{m^3}{s}$$

- ❖ *Caudal necesario para mantener la corriente de retorno:*

Se establece una velocidad de la corriente de retorno de 0,5 m/s, que se considera suficiente para provocar la dilución y arrastre de los gases producidos por los motores de combustión interna en las labores, de acuerdo con la imposición de la autoridad minera.

$$Q = S \times V$$

Donde,

Q: Caudal de aire (m<sup>3</sup>/s)

S: Sección del túnel (m<sup>2</sup>)

V: velocidad de la corriente de retorno (m/s)



$$Q = 55 \text{ m}^2 \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 27,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

❖ *Caudal necesario para diluir los gases de los motores de combustión interna:*

En este caso, el factor crítico es la dilución de los humos de los motores Diesel. Para realizar el desescombro se empleará dependiendo del tramo entre 2 y 6 dúmperes simultáneamente.

Como para hacer el cálculo hay que tener en cuenta que en el momento más desfavorable, y en ese instante se utilizarán 6 dúmperes articulados de 13 m<sup>3</sup> de capacidad y 234 kW de potencia nominal, junto con una pala cargadora de 136 kW de potencia nominal.

Por el otro lado, se supondrá que la pala cargadora trabaja al 100% de su potencia nominal, mientras que los dúmperes trabajan a un 60% de su potencia nominal. Si suponemos que son necesarios 0,066 m<sup>3</sup>/s por kW se tiene:

$$Q_{min} = [(6 \times 234 \times 0,60) + (136)] \times 0,066 = 65 \text{ m}^3/\text{s}$$

❖ *Ventilación de polvo:*

En el avance con minadores o máquinas rozadoras se produce una gran cantidad de polvo que tiene que ser ventilado. Para ellos, se ha de disponer de sistemas de captación de polvo que, por m<sup>2</sup> de sección, han de aspirar a razón de 0,4 a 0,6 m<sup>3</sup>/s de aire según el contenido en sílice del material excavado. Para ello, el sistema principal de ventilación será soplante aportando un caudal superior de aire fresco desde el exterior del túnel, que el caudal necesario en la ventilación aspirante.

El caudal de aire que se debe aspirar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q \geq K \times S$$

Donde,

Q: Caudal de aire limpio ( $m^3/s$ )

S: Sección de la galería o túnel ( $m^2$ )

K: Constante en función del contenido en sílice del material excavado. 0,4-0,5-0,6 para contenidos bajo-medio-alto en  $SiO_2$

La sección de excavación es  $S=55 m^2$ , y en cuanto al constante de sílice, se considerará el material más desfavorable a excavar. Como hay dos tramos de rocas areniscas y rocas volcánicas a lo largo del trazado del túnel, puede haber alto contenido en sílice, luego se considera el valor de la constante  $k=0,6$ .

El sistema de ventilación aspirante deberá aspirar un caudal mínimo en el frente del siguiente valor:

$$Q \geq 0,6 \times 55 = 33 \frac{m^3}{s}$$

Para que el aire suministrado por el sistema de ventilación soplante pueda ventilar el túnel también, el caudal de aire aportado tendrá que ser superior al caudal que necesita el sistema de ventilación aspirante en el frente de trabajo. Para ello, se considerará un caudal de aporte 20% mayor al que se necesita aspirar.

En este caso, el caudal de aire a aportar por el ventilador soplante será el siguiente:

$$Q = 1,2 \times 33 \frac{m^3}{s} = 40 \frac{m^3}{s}$$

❖ *Caudal necesario*

El caudal necesario en el punto más desfavorable será de  $65 m^3/s$ , marcado por la necesidad de diluir los gases de los escapes de los motores diesel.

$$Q_{min} = 65 \frac{m^3}{s}$$

#### 8.2.4. Alquiler de camiones

Las tarifas de los equipos de carga y transporte se han consultado en la “Base de Precios de Edificación y Urbanización del País Vasco edición 2015”, donde se han obtenido los siguientes precios/hora.

##### *Precio pala cargadora*

La pala cargadora neumática que está disponible en las Bases de Precios tiene una potencia de 213 CV, es decir, 159 kW, por lo que sería el más próximo a la pala cargadora que se ha seleccionado para realizar los cálculos de desescombro (136 kW).

El precio unitario por hora se muestra en la siguiente tabla:

Código	Ud.	Texto resumen	Precio
MMMT.4ba	h	Crgra neum art 213 CV 2500 l	54,84 €
Cargadora sobre neumáticos artiuclada, de dos ejes motrices, de 213 CV con cuhara de 3500 l, para una altura de descarga de 3,05 m y un alcance de 1,28 m, i/conductor, consumos y mantenimiento.			

**Tabla 23. Precio unitario del alquiler de la pala cargadora. Fuente: Bases de Precios de Urbanización y Edificación del País Vasco.**

Teniendo en cuenta que la pala cargadora se alquilará durante aproximadamente 413 días (14 meses), se calculará el coste que supondrá:

$$\text{Gasto alquiler pala cargadora} = \frac{54,84 \text{ €}}{h} \times \frac{24 h}{1 d} \times \frac{30 d}{mes} \times 14 \text{ mes} = 552.787,2 \text{ €}$$

$$\text{Gasto alquiler pala cargadora} = 552.787,2 \text{ €}$$

### *Precio dúmper articulado*

El dúmper articulado que está disponible en las Bases de Precios tiene una capacidad de carga de 25 t, por lo que sería el más próximo al dúmper que se ha seleccionado para realizar los cálculos de desescombro (24 t).

El precio unitario por hora se muestra en la siguiente tabla:

<b>Código</b>	<b>Ud</b>	<b>Texto resumen</b>	<b>Precio</b>
MMTG.1d	h	Camión dúmper 25 t 16 m <sup>3</sup> tracc tot	25,96 €
Camión dúmper con caja de 16 m <sup>3</sup> de capacidad y 25 t de carga máxima, de tres ejes y tracción total, i/conductor, consumos y mantenimiento.			

**Tabla 24. Precio unitario del alquiler del dúmper. Fuente: Bases de Precios de Urbanización y Edificación del País Vasco.**

A diferencia que con la pala cargadora, a medida que las obras van avanzado se necesitarán más dúmperes, por lo que el gasto mensual relativo al alquiler de dúmperes irá aumentando. En la tabla 25, se muestra en número de dúmperes que se necesitan por cada tramo.

<b>Tramo</b>	<b>Tiempo en avanzar el tramo (d)</b>	<b>Necesidad de dúmperes por tramo</b>
1	14,72	2,0
2	17,61	2,0
3	45,86	2,0
4	56,75	3,0
5	1,36	3,0
6	5,87	3,0
7	3,82	3,0
8	2,73	3,0
9	1,91	3,0
10	6,85	3,0
11	3,82	3,0
12	83,16	4,0
13	43,95	5,0
14	11,74	5,0
15	15,29	5,0
16	45,01	6,0
17	20,94	6,0
18	25,87	6,0
19	6,16	6,0

**Tabla 25. Tiempo destinado al desescombro por cada tramo.**

La excavación se llevará a cabo en 413 días. Considerando que se trabajan 30 días al mes, las labores se terminarán en 14 meses. En la tabla 26, se calcula el número de camiones que habría que calcular cada mes, teniendo en cuenta los datos de por cuantos días se necesita cada número de camiones, obtenido de la tabla 25. Después, se calcula la cantidad de horas de alquiler que supondrá el alquiler de estos considerando, considerando que el alquiler se hace por meses.

Mes	Nº de camiones a alquilar	Horas de alquiler de camiones al mes (h)	Precio alquiler dúmperes mensual (€)
1	2	1440	37382,4
2	2	1440	37382,4
3	3	2160	56073,6
4	3	2160	56073,6
5	3	2160	56073,6
6	4	2880	74764,8
7	4	2880	74764,8
8	4	2880	74764,8
9	5	3600	93456,0
10	5	4320	112147,2
11	6	4320	112147,2
12	6	4320	112147,2
13	6	4320	112147,2
14	6	4320	112147,2

Tabla 26. Precio de alquiler de dúmperes por cada mes.

*Gasto total del alquiler dúmperes articulados = 1.121.472 €*

*Gasto total maquinaria = 1.121.472 € + 552.787,2 € = 1.674.259,2 €*

***Gasto total maquinaria = 1.674.259,2 €***

### 8.2.5. Impacto ambiental

La cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite por cada gramo de gasoil consumido es de 3,17 g, es decir, que las emisiones son de 3,17 g de CO<sub>2</sub> / g combustible. Anteriormente se ha calculado que el consumo de combustible total, teniendo en cuenta la pala cargadora y los dúmperes necesarios para ello, es de 59.072 kg. Por lo tanto, realizando los cálculos de conversión, se obtiene el siguiente resultado de emisión:

$$Emisión\ de\ CO_2 = 59.972\ kg\ gasoil \times \frac{3,17\ g\ de\ CO_2}{g\ gasoil} = 190.111,2\ kg\ de\ CO_2$$

$$Emisión\ de\ CO_2 = 190.111,2\ kg\ de\ CO_2$$

### 8.2.6. Gasto total de desescombro: dúmper articulado y pala cargadora

Gasto alquiler maquinaria= 1.674.259,2 €

Volumen de material total a excavar= 95.232,5 m<sup>3</sup>

Volumen de material a desescombrar= 133.325,5 m<sup>3</sup>

Suma de coste desescombro	1.674.259,2 €
13% Gastos generales	217.653,7 €
6% Beneficio Industrial	100.455,6 €
Suma de G.G y B.I	318.109,3 €
21% IVA	351.594,4 €
<b>Total coste desescombro</b>	<b>2.343.962,9 €</b>

El presupuesto del desescombro mediante dúmperes articulados y pala cargadora asciende a DOS MILLONES TRESCIENTOS CUARENTA Y TRES MIL NOVECIENTOS SESENTA Y DOS EUROS CON NUEVE CÉNTIMOS.

El coste de desescombro por m<sup>3</sup> de material a transportar, será el siguiente:

$$Coste\ desescombro\ por\ m^3 = \frac{2.343.962,9\ €}{133.325,5\ m^3} = 17,6\ \frac{€}{m^3}$$



## **9. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESESCOMBRO Y TRANSPORTE CON CINTA TRANSPORTADORA**

### **9.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA CINTA**

En este apartado se dimensionará la cinta transportadora que sea capaz de evacuar el material excavado de manera continua hasta el acopio provisional del exterior.

Se definirá los parámetros principales que debe tener la cinta para así, determinar la potencia de accionamiento que debe tener el motor del tambor motriz. Para ello, se empleará la siguiente bibliografía:

- ❖ LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Tercera edición. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A., 2000. (ISBN 84-921708-1-6).
- ❖ INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. *Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto*. Madrid: Editorial ITGE, 1991. (ISBN 84-7840-081-8).
- ❖ ALONSO SANCHEZ, Teresa. Apuntes de la asignatura: Transporte y Almacenamiento en Minería. Tema: cintas transportadoras. Curso 2 de Máster en Ingeniería de Minas, 2017.

#### **9.1.1. Datos de partida**

Para dimensionar la cinta transportadora, como datos de partida, hay que tener en cuenta las características del material a manipular, el tonelaje horario a transportar, perfil de la ruta de transporte y frecuencia de cambios de situación.

### *Características del material a manipular*

Se espera tener una granulometría uniforme, con un material de densidad de  $1,894 \text{ t/ m}^3$ . Por el otro lado, la roca del túnel, al ser excavado mediante una rozadora, resultará fragmentada obteniendo así un material con una granulometría relativamente uniforme y con tamaños máximos de bloques de aproximadamente 125 mm.

El minador se encarga de que el material a desescombrar no exceda de la granulometría máxima recomendada, incluso cuando se generan bloques grandes de escombro. Por ejemplo, cuando se atraviesan zonas muy diaclasadas, una vez que el material esté en el suelo, el equipo los tritura antes de recogerlos y dirigirlos a la cinta transportadora.

### *Tonelaje horario a transportar:*

Para dimensionar la cinta hay que tener en cuenta el tonelaje horario máximo esperado y el tonelaje medio durante la excavación del túnel.

El tonelaje horario máximo esperado, teniendo en cuenta los avances medios calculados previamente es del 103,7 t/h. De todas formas, hay que dimensionar la cinta transportadora para un tonelaje horario notablemente superior, ya que puntualmente se puede dar cargas punta con una producción incluso mayor que el doble debido a terrenos con un RMR bajo y la resistencia a compresión simple reducido.

### *Perfil de la ruta de transporte:*

Para el dimensionamiento de la cinta, se considerará la longitud total del túnel, es decir, teniendo en cuenta el tramo realizado mediante cut and cover, ya que la cinta deberá llegar hasta el depósito temporal donde se acopiará el escombro antes de ser trasladado al vertedero correspondiente. Por lo tanto, la longitud del túnel será de 1831,5 m. Se necesitarán instalar una cinta transportadora fija, que se irá prolongando a medida que

avance el túnel cada 50 metros, hasta lograr una longitud máxima de 1775 m, y también, una cinta auxiliar de 50 metros, que permitirá el avance de dicha longitud.

En la tabla 27, se muestran los tramos que hay con distintas pendientes y el desnivel correspondiente a estos tramos.

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Ángulo de inclinación (°)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Desnivel (m)</b>	<b>Ascendente / Descendente</b>
2,5	1,45	466	11,8	Descendente
0,5	0,28	1212,5	6	Ascendente
3,5	2	153	5,4	Ascendente

**Tabla 27. Características del trazado transversal.**

### ***Frecuencia de cambios de situación:***

El grado de la movilidad de la cinta será de 50 metros, gracias a una cinta transportadora auxiliar que permitirá un avance de esa longitud. Cada 50 m habrá que colocar un nuevo bastidor y alargar la cinta fija.

Por lo tanto, se instalarán dos cintas; la cinta transportadora fija que tendrá una longitud de 1775 m y la cinta transportadora auxiliar que tendrá una longitud de 50 m.

### **9.1.2. Dimensionamiento de la cinta 1: cinta fija**

#### ***Ancho de banda***

Se considerará que los fragmentos del material serán uniformes y que el tamaño máximo de bloque será de 125 mm, por lo tanto, el ancho de banda que le correspondería sería de 600 mm, pero para que evitar un incremento de números de averías y problemas operativos se seleccionará un ancho de banda de 800 mm.

Anchura de banda (mm)	Fragmentos uniformes	Material con 80% de finos
400	75	125
500	100	175
650	125	250
<b>800</b>	150	300
1000	200	375
1200	300	450
1400	300	600
1600	375	600
1800	450	600
2000	450	600

Tabla 28. Tamaños máximo de bloques recomendados. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.

### *Velocidad de la banda*

Para una anchura de banda de 800 mm, la velocidad típica para una roca dura es de 2,7 m/s, como se muestra en la tabla 29.

Anchura de banda (mm)	Suelos	Rocas
400	1,5	-
500	2,2	1,7
650	2,7	2,5
800	3,0 – 3,5	<b>2,7</b>
1000	3,0 – 3,5	3,0
1200	3,5 – 4,0	3,0
1400	3,5 – 4,0	3,0
1600	4,0	3,0
1800	4,0	3,0
2000	4,0	3,0

Tabla 29. Velocidades de las bandas (m/s). Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.

### *Ángulo de carga*

Por el otro lado, el ángulo de carga se estima que será de 15 °, correspondiente a materiales de fluencia media.

### *Ángulo de artesa*

Se considerará un ángulo de artesa de 20°. Aunque los ángulos de artesa normalmente suelen ser de 30° y 35°, en cintas de pequeña capacidad se suele utilizar el ángulo de 20°.

### *Capacidad de la cinta transportadora*

Con los datos anteriores, se accederá a la tabla 30, donde se puede comprobar que la capacidad de la cinta es de 172 t/h para una velocidad de 1 m/s y una densidad de material de 1 t/m<sup>3</sup>.

Ángulo de carga	Anchura de banda (mm)	Ángulo de artesa
		20° (t/h)
15°	400	36
	500	61
	650	109
	800	<b>172</b>
	1000	277
	1200	408
	1400	563
	1600	744
	1800	949
	2000	1180

**Tabla 30. Capacidad de las cintas con ángulo de carga de 15°. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

### *Inclinación de la cinta transportadora*

Cuando la banda está inclinada, la capacidad será en general menor y se obtendrá multiplicando la capacidad por un coeficiente K dependiente del ángulo de inclinación de la cinta  $\delta$ .

El tramo de mayor inclinación  $t$  es de  $2^\circ$ , por lo tanto, según la tabla 31, el coeficiente K será 1 y la capacidad no sufrirá variación.

$\delta^\circ$	k
2	1
4	0,99
6	0,98
8	0,97
10	0,95
12	0,93
14	0,91
16	0,89
18	0,85
20	0,81
22	0,76
24	0,71
26	0,66
28	0,61
30	0,56

**Tabla 31. Coeficiente dependiente de la inclinación de la banda. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en minería a cielo abierto.**

### *Corrección de los resultados*

Corrigiendo la capacidad de la cinta para una velocidad de 2,7 m/s y una densidad de roca de  $1,894 \text{ t/m}^3$  resulta:

$$C = 172 \times \frac{2,7}{1} \times \frac{1,894}{1} = 879,6 \text{ t/h}$$

La capacidad de esta cinta es excesiva para el volumen de material necesario a desescombrar, pero no conviene disminuir el ancho de la banda ni el ángulo de carga. Por lo que se podría disminuir la velocidad de la cinta a 1 m/s, de forma que la capacidad de la cinta transportadora sería el siguiente:

$$C = 172 \times \frac{1,894}{1} = 325,8 \text{ t/h}$$

Esta capacidad de la cinta estará sobredimensionada para la producción media de la rozadora, pero será capaz de afrontar cargas puntuales que se pudiesen ocasionar. Además, es la capacidad mínima que puede tener una cinta con un ancho de banda de 800 mm.

Por otra parte, la velocidad de la cinta sería la adecuada basándose en la siguiente tabla que relaciona velocidades admisibles de la cinta para cada aplicación concreta.

<b>Aplicaciones</b>	<b>Velocidad de la cinta (m/s)</b>
Casos especiales	0,5
Caudales pequeños de material que deben protegerse (cinta de choque)	<b>0,5-1,5</b>
Aplicaciones standard (canteras de grava)	1,5-3,5
Flujos elevados a grandes distancias	3,5-6,5
Aplicaciones especiales. Apiladores	6,5 y mayores

**Tabla 32. Velocidades de cinta recomendadas para diferentes aplicaciones. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en minería a cielo abierto.**



***Potencia de accionamiento de la cinta transportadora (Pa)***

A continuación se calculará la potencia de accionamiento y la potencia de motor correspondiente para una anchura de banda de 800 mm y una longitud de cinta de 1775 m.

**Potencia para mover la cinta en vacío (Pv)**

La potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s (Pv), para una longitud de cinta de 630 m es de 7,3 kW como se puede ver la tabla 33.

Ancho (mm)	Longitud cinta (m)
	630
400	4
500	5,3
650	7,3
800	<b>9,5</b>
1000	12,3
1200	15,6
1400	17,7
1600	21,1
1800	23,3
2000	26

**Tabla 33. Potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Se corrige la potencia para la longitud de diseño:

$$Pv = 9,5 \text{ kW} \times \frac{1775 \text{ m}}{630 \text{ m}} = 26,8 \text{ kW}$$

Potencia para mover la roca horizontalmente (Ph)

Para una longitud de cinta de 1775 m y una capacidad de 320 t/h se requiere una potencia para mover la roca horizontalmente (Ph) de 14,6 kW.

Capacidad (t/h)	Longitud cinta (m)
40	1,9
60	2,9
100	4,6
160	7,3
200	9,3
250	11,6
320	<b>14,6</b>
400	18,5
500	23,1
630	29,1

**Tabla 34. Potencia para mover la roca horizontalmente. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Se corrige la potencia para la capacidad y para la longitud de la cinta transportadora:

$$Ph = 14,6 \text{ kW} \times \frac{325,8 \frac{t}{h}}{320 \frac{t}{h}} \times \frac{1775 \text{ m}}{630 \text{ m}} = 41,9 \text{ kW}$$

Potencia para elevar o descender la roca (Pe)

Aunque se estima que las inclinaciones que tiene el trazado del túnel, probablemente, no exigirán una necesidad mayor de potencia para transportar el material debido a la mínima inclinación del trayecto, se tendrá en cuenta a la hora de hacer los cálculos ya

que el desnivel en los tramos llega a ser considerable según el “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”.

Por lo tanto, se considerará la potencia para elevar o descender la roca (Pe) correspondiente a cada tramo que se muestra a continuación, y entre estos, se considerará el caso más desfavorable. Se utilizarán los datos de la tabla 35.

Capacidad (t/h)	Elevación (m)		
	5	6,3	12,5
40	0,5	0,7	1,4
63	0,8	1	2,1
100	1,3	1,6	3,2
160	2,1	2,7	5,5
200	2,7	3,4	6,8
250	3,4	4,2	8,5
320	<b>4,4</b>	<b>5,4</b>	<b>10,9</b>
400	5,4	6,8	13,6
500	6,9	8,5	17
630	8,5	10,6	21,3

**Tabla 35. Potencia para elevar o descender la roca. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Para una producción de 320 t/h, los resultados de la tabla y los resultados corregidos son los que se muestran en la tabla 34, realizándose las correcciones de la misma forma que en los casos anteriores.

Pendiente (%)	Ángulo de inclinación (°)	Longitud (m)	Desnivel (m)	Ascendente / Descendente	Pe (kW) Tabla	Pe (kW) corregido
2,5	1,45	466	11,8	Descendente	10,9	10,5
0,5	0,28	1212,5	6	Ascendente	5,4	5,2
3,5	2	153	5,4	Ascendente	4,4	4,8

**Tabla 36. Potencia para elevar la roca corregida.**

La potencia que se considerará para elevar o descender la roca será el del valor más elevado, siendo está suficiente para todos los tramos del túnel.

$$P_e = 10,5 \text{ kW}$$

#### Potencia de accionamiento total

Por lo tanto, la potencia total será la suma de todas las potencias anteriores:

$$P_a = P_v + P_h + P_e = 26,8 + 41,9 + 10,5 = 79,2 \text{ kW}$$

#### Potencia mínima del motor

La potencia mínima del motor se debe calcular teniendo en cuenta la potencia de accionamiento de la cinta y la eficiencia de accionamiento del motor.

$$M_p = \frac{P_t}{f}$$

Donde,

f: Eficiencia de accionamiento (95%)

El tamaño que se seleccionará será el de tamaño más próximo, por exceso, del siguiente valor que esté disponible en la tabla 37.

$$M_p = \frac{79,2 \text{ kW}}{0,95} = 83,4 \text{ kW}$$

kW	kW	kW	kW
0,37	5,5	45	200
0,55	7,5	55	220
0,75	11	75	250
1,1	15	<b>90</b>	280
1,5	18,5	110	315
2,2	22	132	355
3,0	30	150	400
4,0	37	185	

**Tabla 37. Listado de los valores de las potencias de los motores normalizados. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Se seleccionará un motor de la estación motriz con una potencia de 90 kW.

***Potencia del motor de la cinta transportadora 1 = 90 kW***

### **9.1.3. Cálculo de la cinta transportadora 2: auxiliar**

Se contará con una cinta de una longitud de 50 metros móvil a donde se realizará la descarga del material directamente desde la cinta que lleva incorporado la rozadora, y que permitirá avances de 50 metros antes de colocar los bastidores y alargar la cinta principal fija.

Las características de la cinta serán las mismas que para el caso anterior, variándose sólo la potencia de accionamiento de la misma.

*Potencia de accionamiento de la cinta transportadora*

Potencia para mover la cinta en vacío ( $P_v$ )

Empleando las mismas tablas de potencias, para un ancho de banda de 800 mm y una longitud de cinta de 40 la potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s ( $P_v$ ), será de 1,3 kW.

Ancho (mm)	Longitud cinta (m)
400	0,5
500	0,7
650	1
800	<b>1,3</b>
1000	1,6
1200	2
1400	2,3
1600	2,8
1800	3,1
2000	3,4

**Tabla 38. Potencia para mover las cintas en vacío con una velocidad de 1 m/s. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Realizando la corrección correspondiente a la longitud de la cinta y a la capacidad de transporte, se obtiene el siguiente valor de potencia:

$$P_v = 1,3 \text{ kW} \times \frac{50 \text{ m}}{40 \text{ m}} = 1,62 \text{ kW}$$

Potencia para mover la roca horizontalmente ( $P_h$ )

La potencia para mover la roca horizontalmente ( $P_h$ ), en cambio, se calcula partiendo de una capacidad de 320 t/h y una longitud de cinta de 40 m. Según los datos de la tabla 39, el valor de la potencia será de 1,9 kW.

Capacidad (t/h)	Longitud cinta (m)
	40
60	0,4
100	0,6
160	1
200	1,2
250	1,5
320	<b>1,9</b>
400	2,4
500	3,1
630	3,9

**Tabla 39. Potencia para mover la roca horizontalmente. Fuente: López Jimeno. Manual de Túneles y Obras Subterráneas.**

Realizando la corrección, el valor de la potencia es la siguiente:

$$P_h = 1,9 \text{ kW} \times \frac{325,8 \frac{t}{h}}{320 \frac{t}{h}} \times \frac{50 \text{ m}}{40 \text{ m}} = 2,42 \text{ kW}$$

Por el otro lado, se considerará una cinta transportadora horizontal, ya que al tener 50 metros el desnivel del terreno no es considerable y además, se colocará a una altura superior que la cinta transportadora fija, por lo que no necesitara una elevación del material. Por lo tanto,  $P_e$  será nulo.



Potencia total de accionamiento

La potencia total de accionamiento será la que se muestra a continuación:

$$P_t = P_v + P_h = 1,62 + 2,42 = 4,14 \text{ kW}$$

Potencia mínima del motor

La potencia mínima del motor debe ser:

$$M_p = \frac{P_t}{f} = \frac{4,14 \text{ kW}}{0,95} = 4,36 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la potencia de motor que le corresponderá del listado de los valores de las potencias de los motores normalizados correspondiente a la tabla 37, será de 5,5 kW.

***Potencia del motor de la cinta transportadora 2 = 5,5 kW***

### ***Selección de rodillos***

La banda transportadora se traslada sobre rodillos. Las estaciones de rodillos del ramal superior serán abarquillados, en forma de artesa, y se componen por de tres rodillos. El rodillo recto que soporta la banda plana en el ramal superior solamente se utiliza para el transporte del material en piezas o cajas. Los rodillos laterales en cambio, se utilizan para favorecer la alineación e la banda.

Los rodillos en el ramal inferior, ramal de retorno, también se utilizan para favorecer el retorno y suelen tener un ligero ángulo de avance.

Según la tabla 40, como el ancho de la banda es de 800 mm y la densidad del material de 1,894 t/m<sup>3</sup>, la separación entre los rodillos del ramal superior sería de 1100 mm, mientras que la separación entre los rodillos de retorno sería de 3000 mm.

Ancho de banda (mm)	Densidad Kg/m <sup>3</sup> )				Separación rodillos de retorno
	450	900	1200/1500	2000/2400	
	Separación rodillos de ida (mm)				
500	1650	1500	1500	1300	3000
650	1525	1370	1200	1225	3000
800	1525	1370	1200	1060	3000
1000	1525	1370	1200	1060	3000
1200	1370	1200	1200	1060	2750
1400	1300	1100	1100	1000	2750

**Tabla 40. Separación de rodillos en función de ancho de banda y densidad. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”.**

Se supondrá un diámetro de rodillo de 89 mm, porque el peso a transportar es reducido, y se considera que sería suficiente, ya que la cinta funcionará a su capacidad total solamente en contadas ocasiones durante periodo muy cortos.

Anchura de la banda (mm)	Diámetro del rodillo (mm)	Pesos			
		1 sección	2 secciones	3 secciones	5 secciones
800	89	6,7	7,4	<b>8,3</b>	9
	108	9,8	10,6	11,6	12,4
	133	13,3	14,2	15,6	16,3

**Tabla 41. Pesos de los órganos giratorios del ramal superior. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.**

Anchura de la banda (mm)	Diámetro del tubo (mm)	Diámetro del disco (mm)	Pesos (kg)	
			1 sección	2 secciones
800	63,5	150	11,7	13,2

Tabla 42. Pesos de los órganos giratorios del ramal inferior con rodillos de discos (kg). Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.

El peso de los rodillos portantes será de 8,3 kg, mientras que el peso de los rodillos de retorno será de 11,7 kg.

### Rodillos de la cinta transportadora 1

Por lo tanto, el número de rodillos superiores para la cinta transportadora 1 considerando que cada estación tendrá 3 rodillos en forma de artesa, será el siguiente:

$$1775 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = n^{\circ} \text{rodillos} \times 89 \text{ mm} + (n^{\circ} \text{rodillos} - 1) \times 1100 \text{ mm}$$

$$n^{\circ} \text{rodillos} = 1493,8 \text{ rodillos}$$

$$n^{\circ} \text{ rodillos ramal superior} = 3 \times n^{\circ} \text{rodillos} = 4482 \text{ rodillos D89x167mm.}$$

$$n^{\circ} \text{ rodillos ramal superior} = 4482 \text{ rodillos 89x167mm}$$

De estos rodillos, 6 rodillos que se encuentran en la zona de carga de material serán rodillos amortiguadores recubiertos en caucho, tendiendo las mismas dimensiones que el resto de los rodillos del ramal superior, D70x167mm.

El número de rodillos inferiores será el siguiente:

$$1775 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = n^{\circ} \text{rodillos} \times 89 \text{ mm} + (n^{\circ} \text{rodillos} - 1) \times 3000 \text{ mm}$$

**$n^{\circ}$ rodillos ramal inferior = 576 rodillos D89x800mm.**

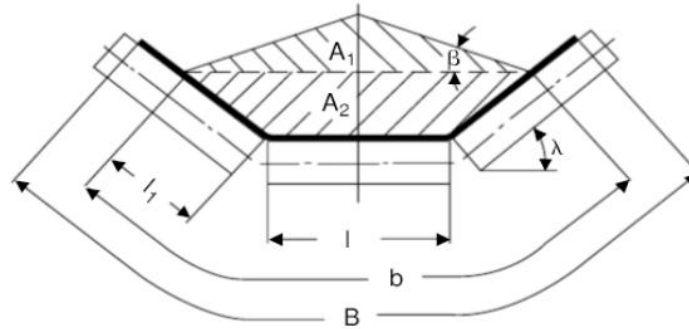


Figura 20. Sección transversal del material sobre la banda en una configuración de rodillos en artesa. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.

### **Rodillos de la cinta transportadora 2**

El tipo de rodillo será el mismo que para la cinta 1, ya que tiene el mismo ancho de banda y transporta el mismo material. Por lo tanto, los resultados serán los siguientes:

$$50 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = n^{\circ}\text{rodillos} \times 89 \text{ mm} + (n^{\circ}\text{rodillos} - 1) \times 1100 \text{ mm}$$

$$n^{\circ}\text{rodillos} = 43 \text{ rodillos}$$

$$n^{\circ} \text{ rodillos ramal superior} = 3 \times n^{\circ}\text{rodillos} = 129 \text{ rodillos D89x167mm.}$$

**$n^{\circ}$  rodillos ramal superior = 129 rodillos D89x167mm**

Como en la cinta 1, 6 de los rodillos del ramal superior que se encuentran en la zona de carga de material serán rodillos amortiguadores recubiertos en caucho.

El número de rodillos inferiores será el siguiente:

$$50 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = n^{\circ} \text{rodillos} \times 89 \text{ mm} + (n^{\circ} \text{rodillos} - 1) \times 3000 \text{ mm}$$

$$n^{\circ} \text{rodillos ramal inferior} = 18 \text{ rodillos D89x800mm.}$$

### *Selección de banda*

Cálculo de las tensiones en la banda

#### *Fuerza tangencial de accionamiento*

La fuerza tangencial de accionamiento en el tambor motriz se calcula con la siguiente expresión:

$$F = \frac{75 \text{ Pa}}{v}$$

Donde,

F: Fuerza tangencial en el tambor de accionamiento (kp)

Pa: Potencia de accionamiento en el tambor de accionamiento (CV)

v: velocidad de la banda (m/s)

La potencia de accionamiento en el tambor de accionamiento calculado tiene un valor de 79,2 Kw, es decir, 106,2 CV, y la velocidad de la banda es de 1 m/s. Sustituyendo estos valores en la fórmula, el valor de la fuerza tangencial en el tambor de accionamiento será el siguiente:

$$F = \frac{75 \times 106,2}{1} = 80.393,4 \text{ kp} = 788,4 \text{ kN}$$

*Tensiones mínimas*

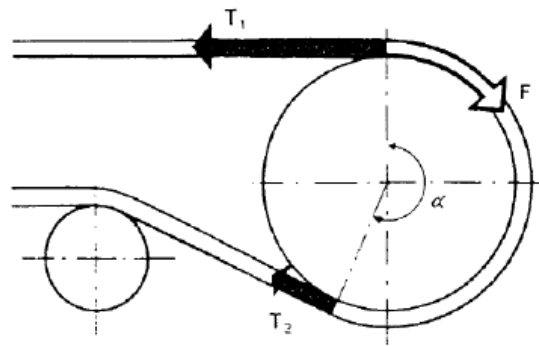
Debido a la acción de la fuerza de accionamiento y el rozamiento entre el tambor y la banda, se producen tensiones en la banda a la entrada y a la salida del tambor motriz. La diferencia entre ambas tensiones será la fuerza de accionamiento  $F$  calculado.

$$t_1 - t_2 = F$$

Donde,

$t_1$ : Tensión a la entrada

$t_2$ : tensión a la salida



**Figura 21. Trasmisión de potencia del tambor motriz a la banda. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.**

La tensión 1 y la tensión 2 se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$t_1 = F \left( 1 + \frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1} \right)$$

$$t_2 = F \left( \frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1} \right)$$

Donde,

$\mu$ : Coeficiente de rozamiento entre tambor y banda

$\alpha$ : Arco de contacto del tambor de accionamiento (rad)

Se puede considerar que el ambiente de funcionamiento será un ambiente sucio debido a la humedad y al polvo que puede contener el escombro, de todas formas, se seleccionará un coeficiente de rozamiento de 0,3 teniendo en cuenta que el recubrimiento del tambor será de ranuras en goma.

Condiciones de funcionamiento	Recubrimiento del tambor			
	Tambor de virola de acero desnudo y lisa	Ranuras en goma	Ranuras en poliuretano	Ranuras en cerámica
Funcionamiento en seco	0,35 a 0,4	0,4 a 0,45	0,35 a 0,4	0,4 a 0,45
Funcionamiento en ambiente húmedo limpio (agua)	0,1	0,35	0,3	0,35 a 0,40
Funcionamiento en ambiente sucio, húmedo, con hielo o arcilla	0,05 a 0,1	0,25 a 0,3	0,2	0,35

**Tabla 43. Coeficientes de adherencia banda-tambor, bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”.**

En la tabla 44, se obtendrá el resultado de  $e^{\mu\alpha}$ , suponiendo que el valor de  $\alpha$  será de  $180^\circ$ , correspondiente a un accionamiento simple.

Tabla de valores de $e^{\mu\alpha}$						
Valor de $\alpha$ (grados)	Valor de $\mu$					
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
180	1,60	1,87	2,19	2,57	3,00	4,82
190	1,64	1,94	2,29	2,70	3,19	5,25
200	,169	2,01	2,39	2,85	3,39	5,73
210	1,73	2,08	2,50	3,00	3,61	6,23
220	1,78	2,16	2,61	3,16	3,83	6,82
230	1,83	2,23	2,73	3,33	4,08	7,43
240	1,87	2,31	2,85	3,51	4,33	8,13
390	2,78	3,90	5,48	7,71	10,83	30,05
420	3,00	4,33	6,25	9,02	13,01	39,05

Tabla 18: Valores de  $e^{\mu\alpha}$

Tabla 44. Valores de  $e^{\mu\alpha}$ . Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”.

$e^{\mu\alpha}$  tendrá un valor de 2,57, y F un valor de 788,4 kN. Por lo tanto, sustituyendo estos valores en las ecuaciones se obtendrán los valores de las tensiones.

$$t1 = 788,4 \text{ kN} \left( 1 + \frac{1}{2,57 - 1} \right) = 1290,6 \text{ kN}$$

$$t2 = 788,4 \left( \frac{1}{2,57 - 1} \right) = 502,2 \text{ kN}$$

### Momento de arranque

En el momento de arranque y frenado se originan sobretensiones debidas a la inercia del sistema, y el conjunto motriz debe ser capaz de transmitir y la banda de soportar.

La tensión de la banda que abandona el tambor debe superar, en el momento de arranque, el valor t2 en un porcentaje del orden de un 30 a un 60 %, ya que en ese momento el esfuerzo motor alcanza también un valor máximo superior en un 30 % el F.



$$t_{2A} = (1,3 - 1,6) \times t_2 = 652,9 \text{ kN} - 803,5 \text{ kN}$$

Las especificaciones de fabricación de la banda determinan tomando como base la tensión de entrada en el tambor, T1, que es el valor máximo en cintas horizontales o ascendentes. Por lo tanto, se seleccionará una banda que soporte una tensión tangencial superior a 1291 kN.

Se seleccionará una banda con armazón textil de tipo normal, porque las bandas con armazones metálicas se suelen emplear especialmente en grandes instalaciones donde se van a soportar grandes sobrecargas. Además, la tensión de la banda se comprenderá entre 2.500-3.200 kg/m, por lo que según la tabla 45, será una banda de textil ligera.

Campo de utilización	Tensión de banda en kg/m de
Bandas textiles ligeras	2.500 ~ 3.200
Bandas textiles de resistencia	3.000 ~31.500
Bandas de cables de acero	10.000 ~63.000

**Tabla 45. Campo de utilización de las bandas, en función de la tensión en kg/m de ancho de la misma. Fuente: López Jimeno. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería Cielo Abierto.**

Para determinar el espesor de recubrimiento superior e inferior, se empleará la tabla 46, donde establece un espesor de recubrimiento superior de 4-8 mm y un espesor de recubrimiento inferior de 2-3 mm, para material de escombro de piedra. Por lo tanto, se seleccionará un valor medio, siendo el recubrimiento superior de 6 mm, y el inferior de 3 mm.

Aplicaciones	Material	Espesor recubrimiento superior [mm]	Espesor recubrimiento inferior [mm]
<b>Bandas textiles</b>			
Bandas transportadoras portátiles	Material menudo a granel	2	1
Bandas transportadoras de fangos	Material liviano en trozos	2	1
Instalaciones subterráneas y a la intemperie	Hulla, potasa, gravilla, mineral fino, escombros, estériles	2-4	2
Instalaciones subterráneas y a la intemperie	Carbón bruto, minerales, piedra, escombros	4-8	2-3
Bandas alimentadoras		4-8	2-3
Bandas transportadoras para excavadoras y apiladoras, rotopalas y "scrappers"	Carbón en trozos gruesos, escombros, piedra mineral, estériles	8-12	2-4
Bandas alimentadoras		8-12	2-4

Tabla 46. Espesores de recubrimientos de bandas recomendados para diferentes aplicaciones.

Fuente: Apuntes de la asignatura "Transporte y Almacenamiento en Minería".

Armazón NºCapas y tipo de tejido	Resistencia a la rotura Kg/cm de ancho	Peso [kg/m <sup>2</sup> ]
3 EP-125/50	400	4
4 EP-125/50	500	5,5
3 EP-160/65	500	4,5
4 EP-160/65	630	6,0
3 EP-200/80	630	6,0
4 EP-200/80	800	7,5
3 EP-250/80	800	6,5
4 EP-250/80	1000	8,0
4 EP-315/80	1250	9,0
4 EP-400/100	1600	10,5

Tabla 47. Diferentes bandas textiles comerciales con su denominación y características. Fuente:

Apuntes de la asignatura "Transporte y Almacenamiento en Minería".

La banda seleccionada es el 3 EP-125/50, porque como se puede comprobar en la siguiente tabla 49, al diámetro de tambor calculado le corresponde una cinta de estas características.

### *Selección de tambor*

El tambor motriz estará colocado en la cabeza.

La norma DIN-22101, establece como diámetro mínimo del tambor de accionamiento para bandas textiles, el resultado de la siguiente expresión:

$$D = \frac{360 \times F}{P \times \pi \times \alpha \times B}$$

Donde,

D: Diámetro de tambor motriz (m).

F: Fuerza de accionamiento en tambor motriz (kN)

P: Capacidad de transmisión tambor/banda (1.600:2.000 kg/m<sup>2</sup>. En subterráneas, hasta 3.500)

$\alpha$ : Ángulo abrazo en tambor motriz (°)

B: Ancho de la banda (m)

$$D = \frac{360 \times 788,4}{2000 \times \pi \times 180 \times 0,8} = 0,314 \rightarrow 314 \text{ mm}$$

Diámetros de tambores normalizados												
200	250	320	400	500	630	800	1.000	1.250	1.400	1.600	1.800	2.000

**Tabla 48. Diámetro de tambores normalizados. . Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”**

De la tabla de los diámetros de tambores normalizados se escogerá un diámetro de 400 mm, porque la banda que se ha escogido es 3 EP-125/50, y según la tabla 49, a esta banda le correspondería mínimo un diámetro de tambor de 400 mm.

Tipo de Lona	Diámetro mínimo del tambor motriz (mm.)					
	Número de lonas					
	2	3	4	5	6	7
EP-100	320	400	500	630	800	1.000
EP-125	320	400	500	630	800	1.000
EP-160	400	500	630	800	800	1.000
EP-200	400	630	800	1.000	1.250	1.400
EP-250	400	630	800	1.000	1.250	1.400
EP-315	500	800	1.000	1.250	1.400	1.600
EP-400	630	1.000	1.250	1.400	1.600	-
EP-500	800	1.000	1.400	1.600	-	-
EP-630	1.000	1.400	1.600	-	-	-

**Tabla 49. Diámetros mínimos de tambores. Fuente: Apuntes de la asignatura “Transporte y Almacenamiento en Minería”**

#### **9.1.4. Resumen de los resultados principales**

En la siguiente tabla, se muestra el resultado de los parámetros principales de la cinta transportadora, con los que se ha determinado la potencia de accionamiento que tiene que tener el motor del tambor motriz.

Características	Cinta transportadora 1	Cinta transportadora 2
Capacidad de la cinta	326,5 t	
Ancho de la banda	800 mm	
Longitud entre ejes	50 m	
Ángulo de carga	15°	
Ángulo de artesa	20°	
Velocidad de la banda	1 m/s	
Potencia accionamiento	79,2 kW	4,14 kW
Potencia del motor	90 kW	5,5, kW

**Tabla 50. Resultados de los parámetros principales de la cinta transportadora.**

## 9.2. CÁLCULO DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN

### 9.2.1. Plazo de ejecución de la obra

El cálculo de el tiempo que se dedicará a la excavación del túnel se calculará de la misma manera que para la alternativa anterior.

Sabiendo los datos del rendimiento de avance de cada tramo y su longitud, se puede saber cuánto tiempo llevará excavar el túnel en su totalidad. Después, multiplicando la longitud de los tramos por los rendimiento de avance de excavación, se podrá conocer en cuántos días se realizará la excavación de cada tramo. Sumando todos los resultados, se obtendrá el número aproximado de días en los que se realizará la excavación subterránea.

<b>Tramo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Avance medio (m/turno)</b>	<b>Tiempo en avanzar el tramo (d)</b>
1	U-4	26,5	1,3	10,12
2	U-2	90	3,7	12,11
3	U-3	120	1,9	31,53
4	U-2	290	3,7	39,01
5	U-4	10	5,3	0,94
6	U-2	30	3,7	4,04
7	U-3	10	1,9	2,63
8	U-4	20	5,3	1,88
9	U-3	5	1,90	1,31
10	U-2	35	3,72	4,71
11	U-3	10	1,90	2,63
12	U-2	425	3,72	57,17
13	U-3	115	1,90	30,22
14	U-2	60	3,72	8,07
15	U-3	40	1,90	10,51
16	U-2	230	3,72	30,94
17	U-1	85	2,95	14,40
18	U-1	105	2,95	17,79
19	U-1	25	2,95	4,24

**Tabla 51. Tiempo en avanzar cada tramo con desescombro mediante cinta transportadora.**

Según las estimaciones realizadas, la excavación del túnel se llevará a cabo en un periodo aproximado de **284** días.

### **9.2.2. Coste instalación de la cinta**

El costo de la inversión inicial de la cinta transportadora se ha calculado teniendo en cuenta los datos de las cintas transportadoras de gran longitud minera, considerando que la cinta estará sometido a un ambiente de mucho polvo y humedad.

Los precios por unidad y precio total se muestran en la tabla 51, donde el precio del bastidor, banda y resto de los elementos está referida para una cinta con 1000 mm de ancho de banda. Por lo tanto, el resultado de la inversión que supone la cinta transportadora estará sobredimensionada, pero será suficiente para realizar una comparativa aproximada entre los costes que suponen ambas alternativas de desescombro propuestas.

<b>Elemento</b>	<b>Precio/unidad</b>	<b>Cinta transportadora</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio total</b>
Bastidor metálico, banda de 1000 mm y resto de los elementos.	300 €/m	1	1775 m	532.500 €
		2	50 m	15.000 €
Estaciones motrices	600 €/kw	1	90 kw	54.000 €
		2	5,5 kw	3.300 €
<b>Total</b>				<b>604.800 €</b>

**Tabla 52. Coste de inversión inicial de la instalación.**

### ***Transporte y montaje***

Para saber el coste orientativo que tendrá el transporte y montaje de los elementos, se ha cogido como referencia los precios del presupuesto de la empresa Integring Procesos S.L para un proyecto de una cinta transportadora de similares características. En este caso, el transporte y montaje de la instalación supone el 30% del presupuesto total.

$$\text{Precio del transporte y montaje} = 0,3 \times 604.800 \text{ €} = 181.440 \text{ €}$$

$$\text{Precio del transporte y montaje} = 181.440 \text{ €}$$

### 9.2.3. Condicionamiento sobre la ventilación

Cuando la excavación de un túnel se realiza mediante rozadora y el desescombro del material se lleva a cabo mediante cinta transportadora, el único factor a tener en cuenta a la hora de dimensionar el ventilador, es la necesidad de caudal de aire fresco en el frente de avance para ventilar el polvo generado por la máquina. Como se ha podido comprobar en el cálculo del caudal de aire fresco del ventilador en el caso de que el desescombro se realice mediante pala y camiones, el resto de los condicionantes (velocidad de aire de retorno, número de personas en el frente...) exigen un caudal inferior a la que exige el empleo de la rozadora en el frente de avance.

Este caudal de aire fresco necesario será el mismo que el calculado en la alternativa anterior porque el equipo minador es el mismo.

Por lo tanto, en este caso, el ventilador soplante debería suministrar un caudal de 40 m<sup>3</sup>/s de aire fresco para que el ventilador aspirante pudiese aspirar un caudal del 33 m<sup>3</sup>/s.

$$Q = 40 \frac{m^3}{s}$$

### 9.2.4. Consumo energético

La potencia total de las dos cintas transportadoras es el siguiente:

$$P = 90 + 5,5 = 95,5 \text{ kW}$$

La energía consumida por la cinta transportadora será de 1528 kWh/día, teniendo en cuenta que se realizan dos turnos de trabajo de 12 horas, y considerando que el sostenimiento se llevará a cabo en un tiempo de 4 horas por cada turno.

$$E = P \times t = 95,5 \text{ kW} \times 16 \frac{h}{día} = 1528 \text{ kWh/día}$$



Para saber el gasto económico que esto supondría, se aplicará el precio medio de la energía (kWh) comercializada por la empresa Iberdrola durante el año 2017, que tiene un valor de 0,12060 €/kWh. Se tendrá en cuenta que la obra se llevará a cabo en 284 días.

$$\text{Gasto energético} = \frac{1528 \text{ kWh}}{\text{día}} \times 284 \text{ días} \times \frac{0,12060 \text{ €}}{\text{kWh}} = 52.335 \text{ €}$$

$$\text{Gasto energético} = 52.335 \text{ €}$$

### 9.2.5. Impacto ambiental

Para calcular el impacto ambiental que producirá la cinta transportadora instalada, se tendrá en cuenta que, según la Red Eléctrica de España, por cada kWh de funcionamiento se emite una cantidad de 267 g de CO<sub>2</sub>.

Por lo tanto, sabiendo que el gasto energético diario de la cinta es de 1528 kWh, se calculará la cantidad de CO<sub>2</sub> que emitirá en todo el proceso de excavación que llevará aproximadamente 284 días, suponiendo que se pueda ascender a 10 meses.

$$\text{Emisiones } CO_2 = \frac{267 \text{ g de } CO_2}{\text{kWh}} \times \frac{1528 \text{ kWh}}{\text{día}} \times \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} \times 10 = 122.393 \text{ kg } CO_2$$

$$\text{Emisiones } CO_2 = 122.393 \text{ kg } CO_2$$

### 9.2.6. Gasto total de desescombro: cinta transportadora

Gasto energético total = 52.335 €

Gasto inversión cintas transportadoras = 604.800 €

Transporte y montaje = 181.400 €

Gasto total antes de impuestos = 786.200 €

Volumen de material total a excavar = 95.232,5 m<sup>3</sup>

Volumen de material a desescombrar = 133.325,5 m<sup>3</sup>

Suma de coste desescombro	786.200 €
13% Gastos generales	102.206 €
6% Beneficio Industrial	47.172 €
Suma de G.G y B.I	149.378 €
21% IVA	165.102 €
<b>Total coste desescombro</b>	<b>1.100.680 €</b>

El presupuesto del desescombro mediante cinta transportadora asciende a UN MILLON CIEN MIL SEISCIENTOS OCHENTA EUROS.

Coste de desescombro por m<sup>3</sup> de material a transportar:

$$\text{Coste desescombro por } m^3 = \frac{1.100.680 \text{ €}}{133.325,5 m^3} = 8,25 \frac{\text{€}}{m^3}$$

## 10. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS

### 10.1. RESULTADOS DE LOS FACTORES DE COMPARACIÓN

En la tabla 53, se reúnen los resultados de los factores comparativos de ambas alternativas.

Criterio de comparación	Sistema de desescombro	
	Pala + dúmper	Cinta transportadora
Coste desescombro por m <sup>3</sup> de material	17,6 €	8,25 €
Plazo ejecución de la obra	413 días	284 días
Impacto ambiental (Emisión de CO <sub>2</sub> )	190.111,2 kg CO <sub>2</sub>	122.393 kg CO <sub>2</sub>
Necesidad de caudal de ventilación	65 m <sup>3</sup> /s	40 m <sup>3</sup> /s

**Tabla 53. Tabla comparativa de los factores críticos de ambas alternativas.**

#### 10.1.1. Coste de desescombro por m<sup>3</sup>

Como se puede ver en la tabla comparativa 53, desescombrar un metro cúbico de escombro mediante dúmperes articulados resulta dos veces más caro que hacerlo mediante la alternativa de la cinta transportadora. Esto se debe al gran gasto que supone el alquiler de la maquinaria de desescombro a medida que el túnel va avanzando, ya que el tiempo de ciclos va aumentando proporcionalmente, necesitando de esta manera mayor número de camiones para desescombrar el mismo volumen de escombro.

La diferencia entre ambos precios por m<sup>3</sup> es muy grande, haciéndolo un factor muy importante a la hora de seleccionar un método u otro. De esta forma, la cinta transportadora sería la opción más económica.

### **10.1.2. Plazo de ejecución de la obra**

El plazo de ejecución del túnel es un factor muy importante a la hora de seleccionar una alternativa de desescombro, ya que alargar el proceso de las labores más de lo necesario puede suponer un sobrecoste muy grande del presupuesto. Esto significaría un mayor tiempo contratando al personal de trabajo, mayor consumo energético, mayor gasto de la maquinaria... entre otros factores.

Comparando el plazo de ejecución de la obra que supondría la selección de desescombro, sería mucho más ventajosa el sistema de desescombro mediante cinta transportadora. En este caso, el periodo destinado a la excavación sería de 284 días, mientras que con el sistema de dúmperes articulados, el periodo ascendería a 413 días.

La diferencia de tiempo es muy considerable, resultando la mejor opción con diferencia en lo que se refiere a este criterio, la cinta transportadora.

### **10.1.3. Impacto ambiental**

Incluso en lo que se refiere al medio ambiente, el sistema de desescombro de la cinta transportadora resulta la opción más respetuosa, emitiendo una cantidad inferior de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que los dúmperes y la pala cargadora.

La cantidad de CO<sub>2</sub> que emite la cinta transportadora es de 122.393 kg, mientras que la cantidad correspondiente a la maquinaria de carga y transporte es de 190.111,2 kg de CO<sub>2</sub>, habiendo una diferencia de 67.718,9 kg de CO<sub>2</sub> entre ambas opciones. Por consiguiente, en cuanto al impacto ambiental, se considera la mejor opción el empleo de cinta transportadora.

#### **10.1.4. Necesidad de caudal de aire en la ventilación**

Por último, el empleo de dúmperes articulados y pala cargadora exige un mayor caudal de aire fresco en el frente de avance para poder diluir los gases de los motores de combustión interna, exigiendo un ventilador más potente que para la alternativa opuesta.

El caudal de aire fresco que se necesita cuando el desescombro se realiza mediante dúmperes es del 65 m<sup>3</sup>/s, 25 m<sup>3</sup>/s mayor que cuando se instala la cinta transportadora. La diferencia de necesidad de caudal es suficientemente grande como para tenerlo en cuenta, ya que el sistema de dúmperes exigirá un ventilador más potente, además de una instalación de ventilación más costosa y un gasto energético mensual mayor.

#### **10.2. OTRAS CONSIDERACIONES DETERMINANTES**

Aparte de los factores que se han discutido en el apartado anterior, hay que tener en cuenta que el sistema de recogida del material excavado del minador, es decir, los brazos recolectores que alimentan la cinta transportadora de la rozadora, puede tener problemas debidos al agua de infiltración del macizo rocoso. Estos brazos recolectores tienden a atascarse cuando el material contiene una cantidad de agua considerable.

Por lo tanto, antes de optar por una alternativa de desescombro, y observando las grandes diferencias que conlleva el empleo de la cinta transportadora o dúmperes, es esencial prever qué tipo de caudal de infiltración se puede esperar en el frente de trabajo. Si el caudal de agua no es significativo, la mejor opción sería la cinta transportadora, ya que, a pesar de la inversión inicial elevado, el coste final destinado a la evacuación del escombro resultaría la mitad que para la alternativa de los dúmperes. Por el otro lado, si el caudal es lo suficientemente grande como para predecir que se pueda producir problemas, se optaría por la alternativa de desescombro mediante camiones.

En este caso, según dice el “Proyecto de trazado del nuevo túnel de Artxanda”, *“Durante la fase de construcción, como consecuencia de la construcción del nuevo*

*túnel de Artxanda, se producirá una infiltración en el mismo de las aguas subterráneas y de las aguas de lluvia por la gran permeabilidad del terreno atravesado*”. También se ha podido comprobar esta afirmación en el apartado de hidrogeología.

Por ello, en lo que se refiere al problema derivado de las aguas de infiltración, la mejor opción de desescombro será mediante dúmperes.

Por otra parte, hay que dejar claro que en este caso sólo se está analizando el sistema de desescombro para el trayecto del túnel, depositando el escombro extraído en los acopios provisionales que se encuentran fuera del túnel. Pero para realizar un cálculo realista de desescombro, habría que considerar el transporte del material hasta el vertedero de Artxanda, donde se depositará el material permanentemente.

En este caso, los dúmperes en vez de despositar en los acopios provisionales, tendrían que transportar el material hasta el vertedero final, necesitándose así una cantidad considerablemente mayor de camiones para cubrir la demanda de desescombro debido al aumento de la longitud de la trayectoria.

No obstante, la cinta transportadora seguiría descargando el material fuera del túnel, en el acopio provisional, y este material tendría que ser transportado al vertedero definitivo mediante camiones carreteros.

En ambos casos, el precio de desescombro por m<sup>3</sup> de material aumentaría considerablemente, pero habría que analizar en qué medida ocurriría esto detalladamente.

## 11. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha realizado un análisis comparativo de dos sistemas de desescombro para un túnel de Bilbao con una longitud de 1731,5 metros, excavados en mina mediante rozadora.

Los factores de comparación que se han establecido para determinar cuál podría ser la opción más viable han sido los siguientes: coste de transporte por m<sup>3</sup> de escombros, plazo de ejecución del túnel, impacto ambiental generado y el caudal de aire fresco necesario en el frente de trabajo.

Después de dimensionar la flota de camiones y la cinta transportadora solamente para el trayecto correspondiente al túnel, se han calculado los factores mencionados y se ha podido deducir que, según los criterios establecidos, la cinta transportadora sería la opción más factible para realizar el desescombro. En cuanto a los resultados obtenidos, este método permitiría finalizar la ejecución del túnel aproximadamente 123 días antes que con la otra alternativa, el coste correspondiente al transporte por m<sup>3</sup> de escombros sería la mitad, y además, el impacto ambiental generado por la instalación sería inferior, al igual que el caudal de aire necesario en el frente de avance.

A priori se puede decir que la opción de la cinta transportadora engloba todas las características favorables que se han establecido como criterio de comparación, y que se debería seleccionar esta alternativa para desescombrar. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la razón principal por la que se ha propuesto la segunda alternativa ha sido el problema que suelen tener la cinta transportadora y los brazos recolectores del minador cuando la excavación se realiza en formaciones permeables.

En el túnel objeto de análisis se espera encontrar cantidades considerables de agua a lo largo de todo el trazado, ya que las formaciones atravesadas se consideran bastante permeables. Por ello, en lo que se refiere a trabajos en presencia de agua, el desescombro mediante pala cargadora y dúmperes articulados sería la opción más viable.

Por ello, es de gran importancia señalar que, a pesar de que la cinta transportadora presente numerosas ventajas, sería imprescindible realizar un estudio detallado sobre los caudales de agua que se pueden encontrar a lo largo del túnel, y cómo se vería afectado el rendimiento de desescombro de la cinta transportadora. De esta forma, se podría averiguar si merece la pena invertir en el sistema de transporte continuo.

De todas formas, analizando todos los aspectos mencionados, se considera que para el nuevo túnel de Artxanda la alternativa más favorable sería el sistema discontinuo, ya que resultaría la opción menos arriesgada. De esta manera, el rendimiento de desescombro no se vería afectado por la presencia de agua, y se evitaría el riesgo de tener que cambiar de sistema una vez que los labores del avance del túnel hayan comenzado.



## 12.BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Tercera edición. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A., 2000. (ISBN 84-921708-1-6)

LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Ingeo Túneles, serie: Ingeniería de Túneles*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A., 2000. (ISBN 9788493129224)

CORNEJO ÁLVAREZ, Laureano. *Excavación Mecánica de Túneles*. Madrid: Editorial Rueda, S.L., 1988. (ISBN 84-7202-050-6)

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. *Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto*. Madrid: Editorial ITGE, 1991. (ISBN 84-7840-081-8)

### PROYECTOS TÉCNICOS

PROYECTO CONSTRUCTIVO DEL TÚNEL DE ARTXANDA. Redactado por ESTEYCO. Bilbao, 2006.

PROYECTO DE TRAZADO DEL TÚNEL DE ARTXANDA. Redactado por IBERINSA. Zamudio, 2005.

### ARTÍCULOS

TORIJA, Miguel. Nuevos desarrollos en rozadoras. En: *Excavación Mecánica de Túneles con Equipos no Integrales*. BLM surface drilling and tunnelling. Sandvik Española S.A. Madrid.

### **TRABAJOS FIN DE MÁSTER - TRABAJOS FIN DE GRADO**

NISTAL DÍAZ, Pablo. Proyecto de voladura del túnel de Artxanda. Trabajo fin de grado. Universidad de Oviedo, Mieres, 2013. [Fecha de consulta: 05/03/2017].

MARTINEZ MORÁN, Paula. Análisis de las alternativas de avance con minador y mediante perforación y voladura en un túnel de carretera. Trabajo fin de grado. Universidad de Oviedo, Oviedo, 2015. [Fecha de consulta: 15/04/2017].

GONZÁLEZ PERNÍA, Pablo. Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a una cantera de caliza. Trabajo fin de máster. Universidad de Oviedo, Oviedo, 2014. [Fecha de consulta: 02/06/2017].

ALMELA FELIPE, Edgar. *Diseño de una cinta transportadora en una instalación de carga automática de coque*. Trabajo fin de grado. Universitat Jaume I, 2016. [Fecha de consulta: 20 /04/2017]

### **NORMATIVA**

Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.

Instrucciones Técnicas Complementarias del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.

ITC 04.7.01. Circulación de la corriente de aire.

ITC 04.7.02. Concentraciones límites de gases. Temperatura, humedad, clima.

ITC 04.5.04. Labores Subterráneas. Vehículos Automotores.

### ***PÁGINAS WEB***

Sandvik. [en línea] [fecha de consulta: 18/03/2017]. Disponible en:  
[www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com)

Caterpillar. [en línea] [fecha de consulta: 04/04/2017]. Disponible en: [www.cat.com](http://www.cat.com)

Ente Vasco de la Energía. [en línea][fecha de consulta: 15/03/2017]. Disponible en:  
[www.eve.eus](http://www.eve.eus).

### ***APUNTES DEL MÁSTER EN INGENIERÍA DE MINAS***

ALONSO SANCHEZ, Teresa. *Transporte y Almacenamiento en Minería*. Máster en Ingeniería de Minas. Curso 2016-2017.

RODRÍGUEZ DÍEZ, Rafael. DÍAZ AGUADO, Maria Belarmina. *Túneles, Diseño y Ejecución*. Máster en ingeniería de Minas. Curso 2016-2017.

TORAÑO ÁLVAREZ, Ángel Javier. DIEGO ÁLVAREZ, Isidro. *Ingeniería Minera y de Obras Civil*. Máster en Ingeniería de Minas. Curso 2016-2017.