



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

CARACTERIZACIÓN DE LA RIPABILIDAD DE MATERIALES ANDESÍTICOS DEL TÚNEL DE BOMBOLÍ, EN LA LOCALIDAD DE TANDAPI (ECUADOR)

Grado en Ingeniería Civil

Trabajo Fin de Grado

Curso 2016-2017

Alumno: Adrián Suárez Rosagaray

Tutor: Francisco Javier Torrijo Echarri

Cotutor: Julio Garzón Roca

Valencia, Junio de 2017

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivo	3
1.2. Alcance	3
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Situación actual.....	4
3. LOCALIZACIÓN.....	4
4. ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	6
4.1. Introducción y antecedentes	6
4.2. Objeto del estudio.....	6
4.3. Condiciones geológico – geotécnicas e hidrogeológicas	6
4.3.1. Geología regional y unidades litológicas	6
4.3.2. Geomorfología	8
4.3.3. Riesgos asociados a la geomorfología	12
4.3.4. Geología estructural	17
4.3.5. Geología local	20
4.3.6. Hidrogeología	21
4.4. Estudio geotécnico	28
4.4.1. Trabajos de campo	28
4.4.2. Ensayos de laboratorio.....	41
4.4.3. Descripción geotécnica del terreno	42
4.5. CONCLUSIONES.....	69
5. ESTUDIO DE SOLUCIONES.....	71
5.1. Objeto del estudio.....	71
5.2. Estudio de recomendaciones de excavación para el terreno	71
5.3. Métodos de estimación de excavación de los materiales andesíticos	73
5.3.1. Criterios de excavabilidad	74
5.4. Estudio de diferentes alternativas	79
5.4.1. Condicionantes técnicos	79
5.4.2. Alternativa 1: Perforación y voladura	80
5.4.3. Alternativa 2: Rozadoras	81
5.4.4. Alternativa 3: Retroexcavadoras con martillos hidráulicos.....	82
5.4.5. Alternativa 4: Tuneladoras	82
5.4.6. Elección del tipo de excavación.....	83
6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA	85
6.1. Objeto del estudio.....	85
6.2. Descripción general de la máquina.....	85
6.2.1. Elementos de la máquina	85
6.2.2. Tipos de rozadoras	86

6.2.3.	Formas de trabajo: Milling y Ripping.....	86
6.2.4.	Herramientas de corte	88
6.3.	Descripción de la solución seleccionada.....	91
6.4.	Valoración económica.....	92
7.	CONCLUSIONES.....	94
8.	REFERENCIAS.....	96

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se plantea como el Trabajo Final de Grado del autor, D. Adrián Suárez Rosagaray, estudiante de último curso del Grado en Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. Ha sido tutorizado por el profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D. Francisco Javier Torrijo Echarri y co-tutorizado por D. Julio Garzón Roca.

1.1. Objetivo

El TFG que se propone consiste en la elaboración de un estudio que comprende la caracterización de la ripabilidad de los materiales andesíticos del Túnel de Bombolí en la República del Ecuador para, posteriormente, analizar los resultados que se han obtenido y elegir la solución más adecuada para su excavación.

Los estudios realizados han sido los siguientes:

- Estudio Geológico – geotécnico.
- Estudio de Soluciones.
- Descripción de la solución adoptada (con su valoración económica).

1.2. Alcance

El alcance de dicho trabajo comprende los estudios, ya mencionados, de geología – geotecnia, de soluciones y la descripción de la solución elegida para realizar la excavación del túnel. Sin embargo, el presente estudio no trata el resto de estudios específicos que sí serían exigidos en la redacción de un proyecto real de ejecución de un túnel como pueden ser, por ejemplo, los citados a continuación:

- Estudio de Sostenimiento.
- Estudio de Seguridad y Salud.
- Estudio de Impacto Ambiental.
- Anejo justificación de precios.
- Cuadro de precios Nº 1 y Nº 2.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes

El proyecto de construcción de dicho túnel viene determinado por la ampliación a cuatro carriles de la carretera que une la localidad de Alóag con Santo Domingo, por encargo del Gobierno de la Provincia de Pichincha en 2006. Dicho encargo es declarado como emergencia por dicho Gobierno dada la sinuosidad en ciertos tramos de la vía y su correspondiente peligro. Además, el tráfico que soporta dicha carretera exigía esa ampliación de dos a cuatro carriles para mejorar la fluidez y evitar accidentes.

Así pues, se aprobó la ejecución de la mejora de la vía que constaría de diversas obras: la construcción de varios viaductos, la ampliación de la carretera en diversos tramos, los trabajos de mantenimiento de la vía y la construcción de varios túneles, siendo uno de ellos el Túnel de Bombolí, cuyo emplazamiento es el que se pretende estudiar.

2.2. Situación actual

En la actualidad el tramo de Alóag con Tandapi (localidad que se encuentra a la mitad del camino) ya cuenta con la ampliación (unos 46 km). Es en este tramo donde se encuentra ubicado el proyecto de construcción del Túnel de Bombolí (del que sólo se estudiará su excavación en el presente estudio). Aún falta ensanchar la vía entre Tandapi y Santo Domingo (casi 55 km), lo que ha provocado ciertas discrepancias entre las Provincias de Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas por haber priorizado un tramo antes que el otro, ya que cada extremo de la vía pertenece a una de las provincias mencionadas.

3. LOCALIZACIÓN

La construcción del Túnel de Bombolí se pretende realizar entre las abscisas 20+221 a 21+959 de la carretera que une la localidad de Alóag con Santo Domingo, en la República del Ecuador. Dicha vía es la Transversal Norte (E20), que atraviesa hasta 5 provincias del país, que consta de 336 km y cuyo paso entre las localidades mencionadas es el ramal central de la E20.



Figura 1. Localización de la República del Ecuador. Vista tomada desde Google Maps ©.

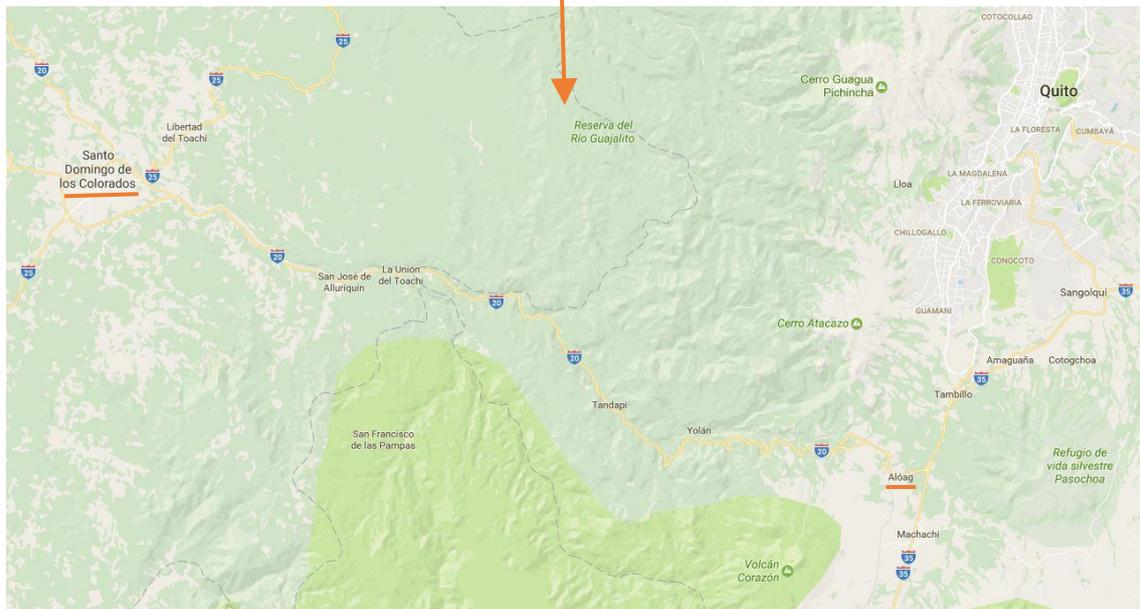
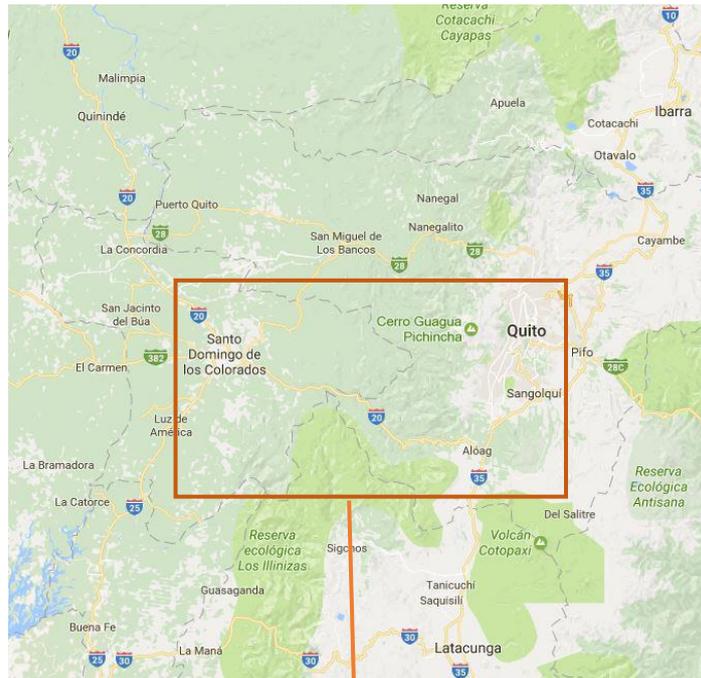


Figura 2. Tramo de la E20 entre Santo Domingo y Alóag. Vista tomada desde Google Maps ©.

4. ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

4.1. Introducción y antecedentes

El actual anejo comprende el estudio de las condiciones geológicas y geotécnicas que presenta el terreno donde se pretende realizar la construcción del Túnel de Bombolí, entre las abscisas 20+221 a 21+959 en la República del Ecuador.

El proyecto de construcción de dicho túnel viene marcado por la ampliación a cuatro carriles de la carretera que une la localidad de Alóg con Santo Domingo, por encargo del Gobierno de la Provincia de Pichincha.

4.2. Objeto del estudio

El objeto del presente estudio geológico-geotécnico es la caracterización geológica-geotécnica del emplazamiento donde se pretende construir el Túnel de Bombolí para posteriormente, en estudios siguientes, plantear distintos tipos de excavación que sean adecuados.

La finalidad del documento, pues, es la de analizar los datos obtenidos y desarrollar los siguientes aspectos:

- Desarrollo de un estudio geológico para definir la región en este ámbito.
- Descripción de la campaña geotécnica, incluyendo datos de sondeos y estudio geofísico.
- Descripción de los trabajos de laboratorio.
- Caracterización tenso-deformacional del macizo rocoso.
- Caracterización geomecánica y propiedades del macizo rocoso.
- Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso.

4.3. Condiciones geológico – geotécnicas e hidrogeológicas

En este apartado se presenta el marco geológico regional del lugar donde se ubica el proyecto. Se compone de capítulos referentes a los diversos campos de estudio de la geología.

4.3.1. Geología regional y unidades litológicas

Para definir el componente geológico del área de proyecto se realizó una recopilación bibliográfica de mapas que contienen información del período cretácico, del terciario y también de del cuaternario del área del proyecto. Dichos mapas son:

- Mapa Geológico de La Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° -1° S, escala regional 1:200000 generada por R.A. Hughes, R. Bermúdez y G. Espinel el 12/11/1998, en adelante Mapa Geológico 1.
- Mapa Geológico del Ecuador, escala 1:100000, hoja de Machachi, año 1978, realizada por la Dirección General de Geología y Minas, en adelante Mapa Geológico 2.

En el área donde se pretende realizar el proyecto del túnel de Bombolí, se encuentran hasta 4 unidades distintas:

CLASE	RANGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA POR RANGO DE PENDIENTE (Km ²)	ÁREA TOTAL DE ESTUDIO (Km ²)	PORCENTAJE (%)
1	0 - 5%	Suave a plana	0.05	0.82	5.86
2	5 - 15%	Suave a moderada	0.03		3.52
3	15 - 25%	Moderada	0.10		12.02
4	25 - 45%	Moderada a abrupta	0.23		27.95
5	45 - 75%	Abrupta	0.20		24.53
6	>75%	Muy Abrupta	0.21		26.12

Tabla 1. Cobertura por rangos de pendientes.

También se muestra una reducción del mapa de pendientes (los colores asociados con los rangos de pendientes son iguales a los de la Tabla 1):

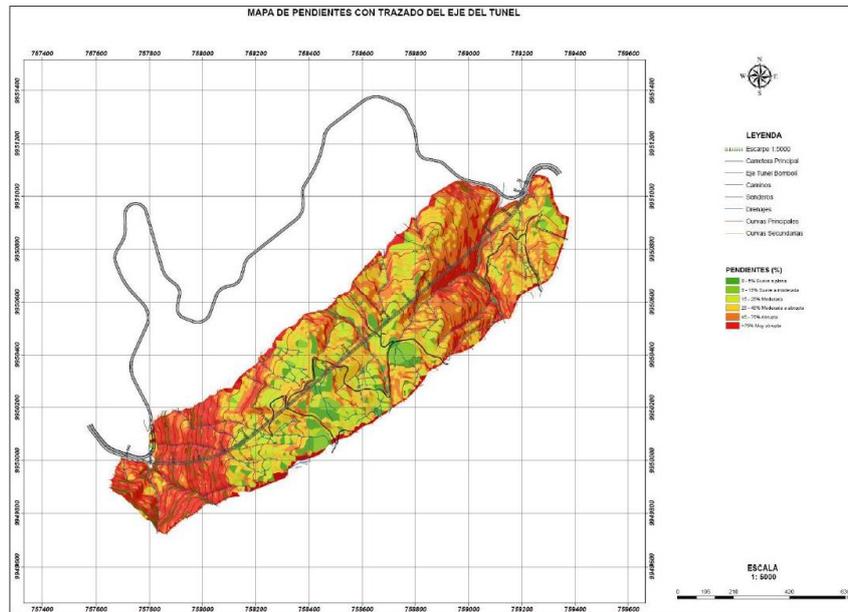


Figura 5. Mapa de pendientes. Trazado del eje del túnel. Escala 1:5000.

4.3.2.2. Red de drenaje

Para determinar los patrones de drenajes y sus características se identificó los sistemas de drenajes principales, afluentes, sentidos, densidad, entre otros.

La recopilación de los sistemas de drenajes principales y sus tendencias es la siguiente:

- Río Quitasol, corre en sentido E-W.
- Quebrada (arroyo) Chamilco, avanza en sentido N-S.
- Quebrada Chaquishcahuaycu, avanza en sentido SSE-NNW.
- Quebrada la Florida y la quebrada naciente en la hacienda Viracruz, drenan en sentido S-N.

Estos arroyos explotan los sistemas estructurales principales y secundarios presentes en el área del proyecto y los drenes secundarios se encauzan en depresiones formadas por la erosión normal de las laderas y en pequeñas estructuras.

Los patrones de drenaje, previamente mencionados, son configuraciones de las redes hídricas que presentan ciertos arreglos geométricos o irregulares, que permiten relacionar con sus propiedades hidrológicas o geo hidrológicas (superficial o subterráneo).

En este estudio, se obtuvieron 2 patrones de drenaje:

- Drenaje sub dentrítico, los cauces tienen una configuración casi paralela; se van agrupando sucesivamente dando la apariencia de un árbol ramificado. Suele ocurrir en suelos con permeabilidad baja, ya que poseen pocos poros, con lo que el agua atraviesa lentamente el perfil del suelo.
- Drenaje sub paralelo, los cauces tienen una configuración paralela, desembocando en un lugar común. Es claro en los sistemas de drenajes principales y presentan tendencias alineadas con cambios bruscos de dirección, lo que ha permitido el desarrollo de vertientes abruptas con laderas muy empinadas a escarpadas.

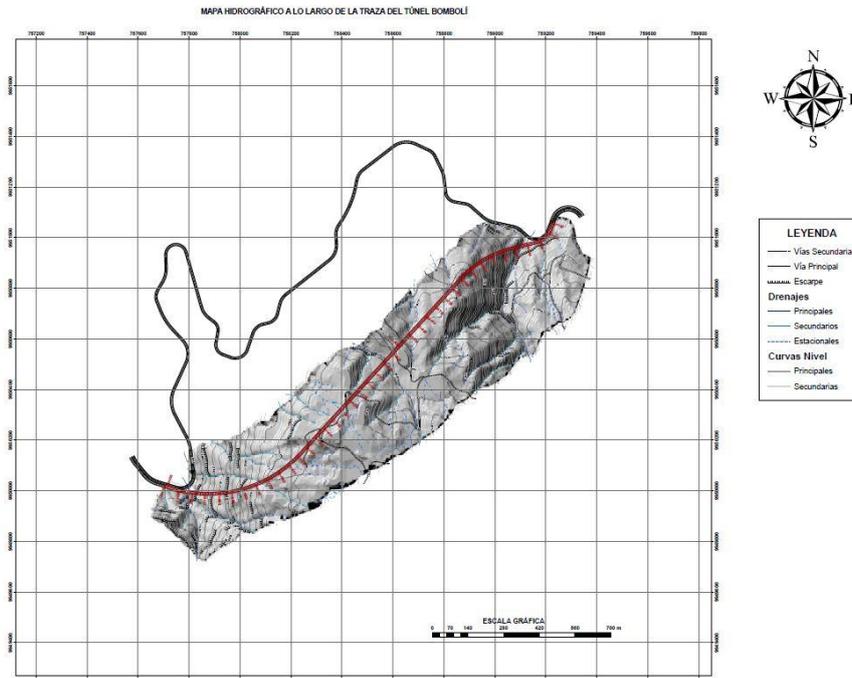


Figura 6. Mapa de redes hidrográficas. Escala 1:30000.

4.3.2.3. Unidades geomorfológicas

En base a los estudios realizados, se pretende clasificar las formas del relieve por unidades de paisaje, donde encontramos dos claros panoramas en todo el lugar: paisaje aluvial y paisaje volcánico.

Paisaje aluvial

- Vertientes abruptas (VA): forman arroyos profundos, en forma de V cerrados, escarpados, que dibujan formas lineales y curvas suavizadas que se ajustan conforme a las principales tendencias estructurales. Sus vertientes presentan laderas con inclinaciones muy abruptas y escarpadas.



Fotografía 1. Vertientes abruptas.

- Vertientes moderadas (VM): presentes en los nacimientos de los principales sistemas de drenajes. Los ejes de sus cauces muestran formas redondeadas a rectilíneas, con pequeños patrones dendríticos. Estas formas se desarrollan sobre los depósitos que cubren el sustrato rocoso y no admiten el depósito de materiales aluviales claros.



Fotografía 2. Vertientes moderadas.

Paisaje volcánico

- Relieves muy abruptos a escarpados (VE): formados por la disección profunda del río Quitasol, al norte del área del proyecto. Algunas vertientes forman acantilados, sub-verticales y escarpados, resultando su acceso difícil. Son superficies susceptibles a caída de bloques y al desarrollo de fenómenos de remoción en masa. Este relieve se ha desarrollado en el sustrato rocoso competente que comprende depósitos volcano clásticos coherentes, flujos lávicos y basamento. Su cobertura vegetal es moderada a densa.



Fotografía 3. Relieve escarpado.

- Relieve volcánico erosionado (RVE): se sitúa sobre un sustrato rocoso de depósitos piroclásticos depositados sobre flujos lávicos y materiales sedimentarios. Exhibe superficies con pendientes moderadas a muy abruptas y sus líneas de cumbre son alineadas y curvas, con cimas con formas de V invertidas.



Fotografía 4. Relieve volcánico erosionado.

- Relieve volcánico suavemente disectado (RD): su superficie presenta una topografía suavemente ondulada. Esta zona es estable, pero en algunas riberas de arroyos se presentan antiguos deslizamientos rotacionales de pequeñas dimensiones. Son terrenos utilizados para actividades pastoriles.



Fotografía 5. Relieve volcánico suavemente disectado.

4.3.3. Riesgos asociados a la geomorfología

Atendiendo a la definición de geomorfología como rama de la geografía física y de la geología que tiene como objeto el estudio de las formas de la superficie terrestre, en este apartado se encuentran principalmente dos riesgos geológicos (uno interno y otro externo) vinculados a ella: el volcanismo y los fenómenos de remoción en masa.

4.3.3.1. Volcanismo

La presencia de materiales volcánicos conservados tanto en las cimas como en relieves moderados evidencia una actividad volcánica notable en sus proximidades.

La mayor cantidad de aporte de materiales piroclásticos y lávicos procede del complejo volcánico el Corazón, aunque parte de materiales piroclásticos procede de otros volcanes próximos. Para identificar las fuentes volcánicas con incidencia en el proyecto, se realiza el siguiente listado con sus detalles:

Volcán	Tipo	Coordenadas		Altura
		Latitud	Longitud	msnm
Atacazo	Potencialmente antiguo	0°21'24''S	78°37'08''W	4457
Corazón	Extinto o dormido	0°31'53''S	78°39'36''W	4790
Iliniza Sur	Potencialmente activo	0°39'45''S	78°42'58''W	5248
Almas Santas	Extinto o dormido	-	-	3745
Cotopaxi	Activo	0.68 S	78.43 W	5911

Tabla 2. Localización de los centros volcánicos y estado de actividad. Fuente: Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

Los volcanes potencialmente activos, Atacazo y Iliniza Sur, se ubican al oeste del área estudiada, en la cordillera Occidental, mientras que el volcán Cotopaxi, activo se sitúa más al oriente.

La ubicación de los volcanes con respecto al área estudiada se presenta en la siguiente figura:

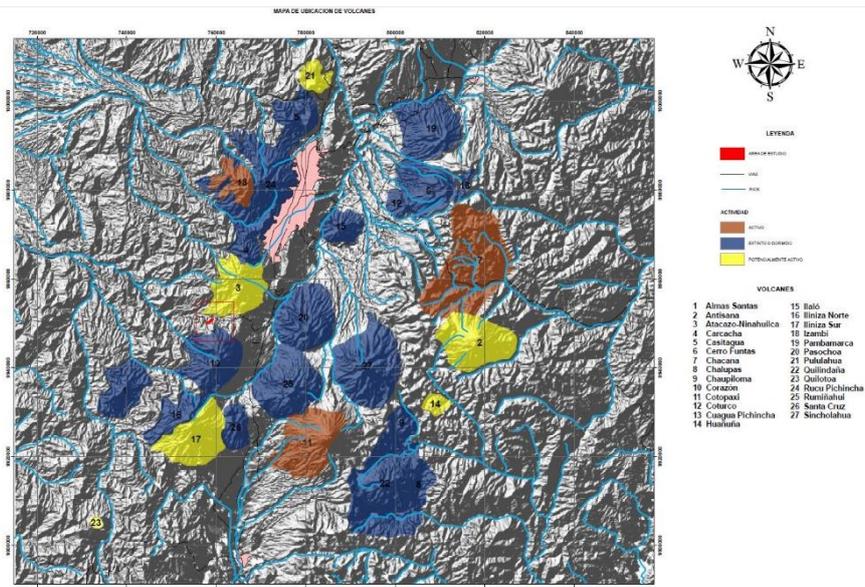


Figura 7. Mapa de ubicación de volcanes. Escala 1:1000000. Fuente: Dirección Nacional de Defensa Civil de Ecuador.



Figura 8. Vista del volcán Cotopaxi y del Volcán Corazón. Vista aérea tomada desde Google Earth ©.

Se debe determinar el mayor peligro, aparentemente, al que está expuesto el área de proyecto, que es una posible erupción del Cotopaxi.

Volcán Cotopaxi

El volcán Cotopaxi se localiza en las, ya mencionadas, coordenadas: 0.68 S y longitud 78.43W, con un cono levantado en los últimos 5000 años, altura de 5911 msnm, una base de 16x19 km, erigiéndose como el centro volcánico activo más grande de Ecuador. Se encuentra cubierto por un casquete glaciar con un área de 14 km² y un volumen de 0.7 km³.



Fotografía 6. Volcán Cotopaxi.

Este estratovolcán activo, localizado a 60 km al Sureste de Quito, a 37.8 km del área de proyecto presenta un periodo de actividad o entre dos erupciones sucesivas (de gran magnitud) de 117 ± 70 años, siendo su última gran erupción en 1877, con lo que la probabilidad de que ocurra un evento volcánico de gran magnitud en un período de 50 años es alto.

En los últimos 2000 años de actividad del volcán se registran 18 procesos eruptivos importantes, de los que 12 se han clasificado con índices de explosividad volcánica (VEI) de nivel 4. Dichos episodios volcánicos se vieron acompañados por emisiones de cenizas, flujos piroclásticos, flujos lávicos y lahares originados por el deshielo del casquete glaciar.

Con todo ello, los productos directos asociados a una potencial erupción volcánica del Cotopaxi son los siguientes:

- Proyección hacia el aire de elementos piroclásticos. Peligros asociados a depósitos de caída provenientes del volcán en el cantón son bajos.
- Flujos o avalanchas piroclásticas calientes, que recorran ladera abajo a lo largo de drenajes y puedan alcanzar altas velocidades.
- Flujos lávicos que generalmente se encauzan a lo largo de drenajes naturales.

El agua producto de la fusión del casquete glaciar se drenaría por los arroyos que se han citado en apartados previos. Es de particular relevancia indicar que los drenajes por donde se encauzarían los lahares no afectarían el área de proyecto. En cambio, si pueden proyectarse cenizas de dicha erupción al área de proyecto.

4.3.3.2. Fenómenos de remoción en masa

Procesos geomorfológicos por el cual el suelo, el regolito y la roca se mueven hacia abajo atraídos por la gravedad. Intrínsecos al peligro, su estudio es obligatorio para evitar posibles accidentes. Se identificaron 2 tipos de movimientos en masa:

- Caída y colapsos de bloques.
- Deslizamientos.

Caída de bloques

La caída de bloques se origina por el despegue de suelo o roca de laderas con inclinaciones mayores a 75°, que entran en caída libre inmediatamente a su desprendimiento; fenómeno condicionado por las características de los sistemas estructurales de los materiales.

Los flujos expuestos en taludes sub-verticales en la región presentan al menos tres sistemas de discontinuidades. Concretamente en la zona, existen bloques irregulares con dimensiones variables, que pueden desprenderse de los bordes superiores de las laderas y de los escarpes. Se trata de un fenómeno común en el lado sur del área de proyecto, en los bordes occidentales y en las vertientes abruptas y sobre el emboquille de entrada del túnel de Bombolí.



Fotografía 7. Talud escarpado, posible caída de bloques.

Deslizamientos

Se han delimitado 7 deslizamientos, 2 situados a los extremos del emboquille de entrada y los restantes 5 en el emboquille de salida.

Los ubicados en el emboquille de entrada son antiguos, apagados, con una superficie con inclinaciones abruptas, cubiertos por una vegetación densa; sus escarpes principales están cubiertos por una vegetación espesa y exponen saltos sub-verticales, mientras que los secundarios siguen trazados menos claros. Parte de estos deslizamientos están siendo removidos, lo que crea inestabilidad en los terrenos superiores. Son deslizamientos de tipo rotacional, aunque las superficies de deslizamientos no son muy claras.



Fotografía 8. Deslizamiento rotacional en el emboquille de entrada.

Sobre el emboquille de entrada del túnel de Bombolí se disponen deslizamientos rotacionales antiguos, conservados por las prominentes formas que delimitan su extensión. Este deslizamiento es suspenso y presenta un escarpe principal discontinuo con saltos decimétricos y grietas en la masa desplazada. También se observan filtraciones de agua en la superficie de falla. Es un material que también ha de ser removido.



Fotografía 9. Deslizamiento rotacional en el emboquille de salida.

4.3.4. Geología estructural

Comprende el estudio de las fallas regionales y el estudio estructural local, que incluye el análisis de las estructuras locales y de la fractura del macizo rocoso en el túnel.

4.3.4.1. Geología estructural regional

Los Andes septentrionales ecuatorianos se encuentran en el denominado Bloque Nor-andino, cuya geodinámica es controlada por la compleja interacción entre las placas convergentes Nazca, Sudamericana (SOAM) y Caribe, también siendo de relevancia los movimientos de la placa Cocos.

En la siguiente ilustración se puede observar la localización de las placas previamente citadas en la zona a estudiar:



Figura 9. Situación de las placas tectónicas cercanas.

Según Kellogg & Bonini (1985) y Mora *et al* (1995), el Bloque Nor-andino se podría considerar como independiente de la placa SOAM, que sí se encuentra fija mientras que el Bloque se desplaza con una velocidad de 6-10 mm/año. Este desplazamiento en el Ecuador y Sur de Colombia, se daría a lo largo de las fallas intracontinentales Pallatanga, Calacalí y Chingual-La Sofía.

Otro elemento importante en el contexto geodinámico, es la cordillera sísmica de Carnegie. Se trata de una dorsal asísmica, resultado del movimiento de la placa de Nazca sobre el punto caliente de Galápagos (causante de la existencia del volcanismo de las islas). Su aparición (colisión y acoplamiento) ha influenciado en la actividad sísmica, volcánica y de deformación en los Andes, y concretamente al Bloque Nor-andino. Es cercana a la zona de subducción, próxima al país y que se extiende por el resto de continente americano, el llamado *Anillo de Fuego del Pacífico*. Se adjunta una figura donde se puede observar su situación respecto al país:



Figura 10. Detalle de la zona de subducción al oeste de la región. Vista aérea tomada desde Google Earth ©.

El área de estudio probablemente se encuentra sobre el basamento formado por la Unidad Yunguilla, que presenta contactos fallados con las Unidades Silante al Oeste y Pallatanga al Este. Estos contactos son interpretados como fallas inferidas que avanzan Norte-Sur en proximidades a la zona de estudio.

Este grupo de fallas marca el límite oriental de estas secuencias. Estas fallas pueden corresponder al complejo de fallas entre el punto al oeste de Alóag y la línea Ecuatorial. El plegamiento de la Unidad Silante ha conformado anticlinales y sinclinales de gran escala que corresponden a fracturas neotectónicas, pero no hay evidencias claras de fractura o desplazamiento.

4.3.4.2. Formación de fallas local

La tectónica de la zona y su estructuración depende principalmente de dos sistemas de fallas del área:

- Fallas del sistema transcurrente dextral y sinextral.
- Sistemas de fallas cuaternarias.

Fallas del sistema transcurrente dextral

El área de proyecto se dispone en un régimen compresivo con desplazamiento lateral dextral principal con una dirección aproximada N30°E, al cual se conjugan fallas oblicuas y transversales sinestrales. Es previsible que se presenten cabalgamientos en dirección similar a las fallas transversales.

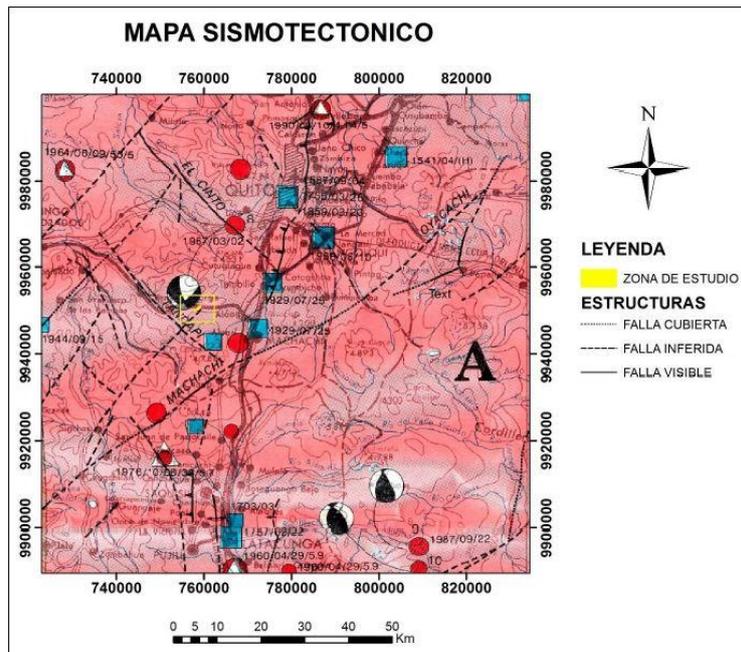


Figura 11. Mapa sismotectónico del Ecuador. Escala 1:1000000. Fuente: Dirección Nacional de Defensa Civil de Ecuador.

Sistemas de fallas cuaternarias

Las estructuras próximas al área de proyecto son las siguientes:

- Falla El Cinto (al Norte del área de proyecto): afecta los depósitos cuaternarios de los volcanes Pichincha y Atacazo. Posee una longitud aproximada de 20 km.
- Falla Tandapi (al lado occidental del área de proyecto): controla el curso derecho del río Pilatón, donde existen terrazas aluviales y de flujo piroclástico de volcanes cercanos. Longitud aproximada de 16 km.
- Falla Machachi (ubicada al oriente del área de proyecto): provoca depósitos de loess, piedra pómez y ceniza cuaternaria del volcán Cotopaxi. Forma crestas de presión y menores asociados a fallas inversas y normales menores. Posee una longitud aproximada de 33 km.

4.3.4.3. Geología estructural local

Se encuentran los siguientes lineamientos, que han sido interpretados de forma que se observan las siguientes tendencias: el sistema principal E1 corresponde a lineamientos con tendencias entre $N10^{\circ} - 20^{\circ}E$ y con la cuarta familia E4 con dirección $N50^{\circ} - 60^{\circ}E$, pueden ser el resultado de la transcurrencia principal. La familia secundaria E2, con una tendencia contenida entre $N0^{\circ}$ y $10^{\circ}W$, con la tercera familia E3 ($N30^{\circ} - 40^{\circ}W$), pueden corresponder a familias conjugadas a la transcurrencia principal.

Se presentan tres familias de juntas (discontinuidades), las principales con una tendencia entre $N20^{\circ} - 30^{\circ}E$ (J1) y $N10^{\circ}$ y $20^{\circ}W$ (J2), y la secundaria con un sentido entre $N80^{\circ}E$ y $S80^{\circ}E$ (J3). Se puede concluir que la familia de juntas J1 presenta tendencias similares al sistema principal de lineamientos (E1), y que pueden ser el resultado de la transcurrencia dextral andina, mientras que la familia de juntas J2 presenta tendencias próximas al de las familias secundaria de los lineamientos (E2), y que pueden ser el resultado de la acción del régimen tensional sinetral conjugados a la principal transcurrencia.

Se realizó el diagrama de polos para proyectar los polos y delimitar sus concentraciones, asociándoles en familias estructurales medias.

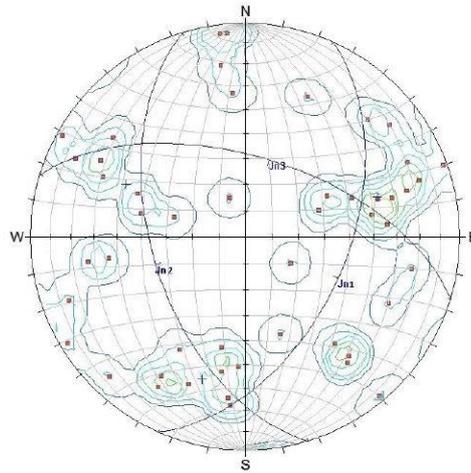


Figura 12. Concentración de polos y familias de juntas principales.

Del diagrama de círculos máximos se obtuvo las siguientes tendencias medias de fracturas:

- Primera familia de juntas, Jn1. $017/59 \pm 18$
- Segunda familia de juntas, Jn2. $253/54 \pm 24$
- Tercera familia de juntas, Jn3. $114/51 \pm 21$

Se recomienda utilizar las tendencias de estas familias de discontinuidades para el análisis de la posible formación de cuñas durante la etapa de construcción del túnel.

4.3.5. Geología local

Incluye la descripción de las principales unidades lito estratigráficas localizadas en superficie y la descripción de cada litotipo.

El emboquille de entrada del túnel de Bombolí presenta un sustrato rocoso compuesto por tobas brechosas con contacto superior discordante con un flujo de lava de composición andesítica piroxénica. Esta toba presenta una resistencia de roca muy blanda a suelo duro, conformando taludes estables, sub-verticales y escarpados, masivos, con fracturas con espaciamentos métricos y superficies onduladas rugosas. La toba presenta una matriz limosa (70%) con bajo contenido de arcilla, de color verde amarillenta, con plasticidad baja, compacidad muy densa, dilatancia media, que envuelve a gránulos de rocas volcánicas y pómez de varias tonalidades entre blanco, rojo, negro y gris, con formas sub-angulosas, gravas finas con formas sub-angulosas a angulosas de andesitas de varias coloraciones con resistencias de rocas muy duras y de pómez suaves. Es recomendable tratar a este material como un suelo tipo limo arenoso con arcilla, saturado, con consistencia de suelo duro.

Atención a los flujos lávicos que generalmente presentan contactos escoráceos, porosos, moderadamente meteorizados, que constituyen tramos con elevada infiltración, con alto grado de fracturación. Dentro de ellos, se exponen tramos cizallados completamente fracturados.

En el emboquille de salida del túnel de Bombolí, se presenta una secuencia que comprende areniscas tobáceas y tobas, con compacidades medias, de mala calidad y un lahar con pésimas características geomecánicas. Este material se proyecta a más de 70m desde el emboquille de

entrada al interior del túnel. Sobre estos materiales, en superficie, se dispone un deslizamiento rotacional suspenso, que debe ser retirado previo a la etapa de construcción. Se recomienda su reubicación.

En la construcción del túnel se prevé cruzar flujos lávicos con un RMR de III (estimado), flujos piroclásticos, lahares, areniscas (areniscas, tobas, limolitas, limos y arcillas), escorias y andesitas escoriáceas.

En el estudio se encuentran las siguientes recomendaciones para la definición del comportamiento de los materiales y su clasificación geotécnica:

- Los flujos lávicos se los debe tratar como tales, considerando que en tramos con alta fracturación o presencia de fallas se presentarán caudales importantes de agua
- A los flujos piroclásticos, aglomerados, escorias y lahares, se recomienda tratarlos como elementos granulares, para la definición de sus parámetros geotécnicos.
- Las areniscas, tobas, limolitas, limos y arcillas se aconseja trabajar como sedimentos; mientras que a las tobas brechosas como suelos duros o rocas muy blandas.

Las diversas muestras tomadas se presentan en un apartado posterior.

4.3.6. Hidrogeología

Se presenta el marco hidrogeológico regional del lugar donde se ubica el proyecto y se recogen las interpretaciones hidrogeológicas locales en función de la geomorfología, geología estructural y geología local.

4.3.6.1. Hidrogeología regional

La zona de proyecto se encuentra muy próxima a la cordillera occidental del país, con cimas que oscilan de los 2600 hasta los 4200 msnm. Se trata de una cordillera con sistemas acuíferos locales asociados con rocas piroclásticas y sedimentos clásticos consolidados y no consolidados.

Así pues, se volverán a estudiar las unidades litológicas, esta vez en términos de parámetros hidrogeológicos para conocer el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

Unidad Pallatanga (Cretácico – Superior)

A pesar de su poca permeabilidad primaria, debido al fuerte tectonismo al que ha sido sometido su conjunto presenta moderada permeabilidad secundaria en el orden de 10^{-3} cm/s.

Unidad Yunguilla (Cretácico – Maastrichtiano)

De acuerdo a la caracterización litológica, esta unidad correspondería a una secuencia de material fino con baja permeabilidad, en el orden de 10^{-5} a 10^{-7} cm/s.

Unidad Silante (Oligoceno – Eoceno Superior)

Compuesta por una secuencia volcánica andesítica intercada con canales de arenisca y conglomerados, cuya permeabilidad es considerada media en el orden de 10^{-3} hasta 10^{-5} cm/s.

Depósitos Cuaternarios

Formados por tobas, cenizas, flujos piroclásticos, lahares y flujos de lava andesítica, con permeabilidad baja en el orden de 10^{-5} a 10^{-7} cm/S. Además, se presentan depósitos piroclásticos poco consolidados, cuya permeabilidad moderada es del orden de 10^{-3} cm/s.

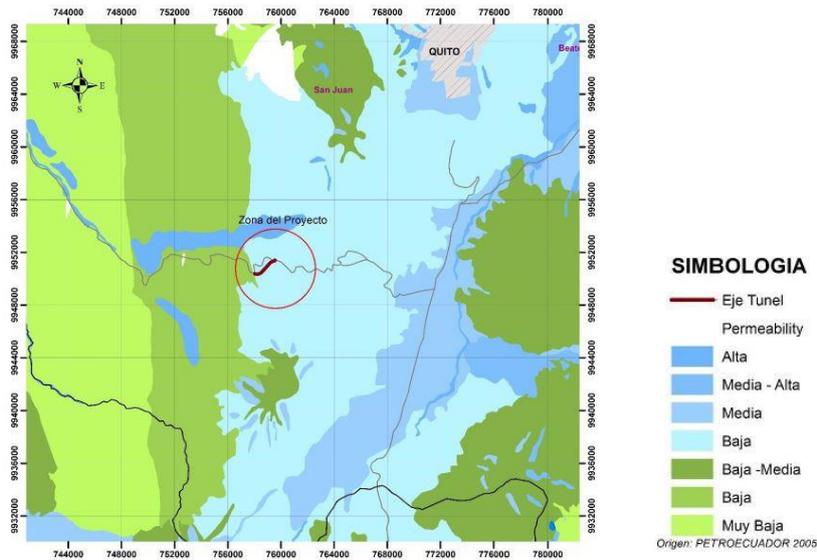


Figura 13. Mapa hidrogeológico de la zona.

4.3.6.2. Hidrogeología local

De acuerdo con las características geológicas e hidrogeológicas de la zona se han definido cuatro niveles con similares características hidrogeológicas.

Nivel 1

El nivel correspondiente a los *depósitos volclásticos (Dp)* corresponde a un aglomerado clasto soportado, con matriz limo arcillosa con arena, incluye gravas finas a cantos, hasta bloques con diámetro de 1,15m, de andesitas, cuya permeabilidad se ha establecido en $2,4$ a $6,21 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

Nivel 2

El Nivel correspondiente a las *brechas tobáceas cremas (Qb)*, corresponde a los depósitos masivos, matriz soportada y líticos de rocas volcánicas y de pómez. Se comporta como un acuitardo con valores de permeabilidad de $1,5 \cdot 10^{-5}$ cm/s.

Nivel 3

El nivel correspondiente a los *flujos de lava*, incluyen todos los depósitos que corresponden a lavas andesíticas fracturadas con permeabilidad de $1,04 \cdot 10^{-3}$ a $2,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

El nivel de *flujos piroclásticos* presenta permeabilidad media. Se consideran depósitos que favorecen a la infiltración.

El nivel de las *zonas de cizalla*, que se encuentran entre las zonas de fallas que han sido deformados y triturados por los esfuerzos regionales, creando zonas con alta permeabilidad.

Nivel 4

El nivel de las *tobas*, que incluye materiales finos considerados de permeabilidad baja que podría considerarse como base del sistema analizado.

4.3.6.3. Balance hidrológico en la zona de estudio

Estimación del caudal disponible

En función del balance hidrológico en las cuencas aportantes al proyecto, se ha determinado que el caudal de agua disponible estaría estimado en zona de tránsito del agua subterránea, que en términos de caudal será aproximadamente 110 m³/s, lo que corresponde a un caudal específico de 0,018 l/s/m².

Medición del caudal

De acuerdo a la presencia de agua durante la perforación se ha estimado que existen diferentes caudales para diferentes litologías: en brechas, el caudal es casi nulo o ausente; los depósitos de escoria presentan un caudal de 1,1 l/s; en los depósitos de lava el caudal se presenta de forma distinta en función del grado de fracturación (en lavas compactadas, alrededor del 4,3 l/s pero en lavas fracturadas, se puede llegar a los 7,2 l/s); en zonas de falla el caudal aumenta a 18 l/s.

Concluyendo, el agua transita por las zonas más permeables (primarias o secundarias) y se encontrará mayor caudal en zonas de debilidad o zonas de falla.

Estimación del caudal infiltrado en el túnel

El caudal infiltrado en el túnel se ha estimado en 253 l/s, pudiendo variar de acuerdo a las características reales de las rocas en el momento de la excavación.

4.3.7. Apéndice: Toma de muestras

Se adjuntan las 10 muestras con las que se ha podido realizar el estudio geológico del área de proyecto.

Muestra: RPC-1

Esta muestra presenta un alto contenido de lapilli de pómez, con formas sub-redondeadas; está compuesta de un 30% de pómez y de líticos andesíticos en un 15%, con formas sub-angulosas y su matriz en un 55% compuesta de ceniza (vidrio volcánico) de color gris amarillenta con plasticidad nula y compacidad baja.

Nombre de la Roca: Lapilli



Fotografía 10. Lapilli.

Muestra: RPS-4

La roca expuesta en superficie fresca se exhibe moderadamente meteorizada, con fractura con superficie irregular rugosa, con pátinas de óxido, con coloración habana, resistencia de roca blanda, masiva, densidad media. Es matriz soportada, con permeabilidad y porosidad baja, comprende un 80% de matriz y 20% de líticos de composición volcánica (andesitas y de pómez). Su matriz es limo arenosa con bajo contenido de arcilla, color habano, con plasticidad nula, compacidad muy densa, dilatancia media, que envuelve gránulos de rocas volcánicas de tonalidad gris oscuro, pómez y fragmentos de minerales como anfíbol y biotita de forma angulosa a redondeadas y gravas gruesas esporádicas con diámetros de hasta 5cm, con formas sub-angulosas de andesitas marrón rojizas y aglomerados tobáceos blanquecinos, con resistencias de rocas blandas.

Nombre de la Roca: Toba lítica



Fotografía 11. Toba lítica.

Muestra: RPE-01

La roca en superficie fresca presenta una coloración habana, con fractura con superficie irregular rugosa, resistencia de roca blanda, densidad media, con ligeras pátinas óxido. La roca se muestra masiva, matriz soportada, con permeabilidad y porosidad baja, comprende un 70% de matriz y un 30% de líticos de rocas volcánicas y pómez. Su matriz es limo arenosa con bajo contenido de arcilla, habana, con plasticidad nula, compacidad muy densa, dilatancia media, que envuelve gránulos (20%) de rocas volcánicas y de pómez de varias tonalidades entre blanco, rojo, negro y gris, de forma sub-angulosas, y gravas finas en un 10%, con formas sub-angulosas a angulosas de andesitas de varias coloraciones con resistencias de rocas muy duras y de pómez con resistencias blandas.

Nombre de la Roca: Brecha tobácea



Fotografía 12. Brecha tobácea.

Muestra: PSS-02

Roca color gris claro, masiva, densidad alta, con fracturas con superficies ondulada rugosa, con pocas vesículas y resistencia de roca muy dura. La superficie expuesta presenta meteorización ligera con una leve decoloración de su matriz. Su textura es porfirítica, hipocristalina, con una matriz afanítica gris clara moderadamente silicificada, su matriz se presenta en un 40% con un 60% de fenocristales.

- Minerales principales: Plagioclasas (38%), Piroxenos (15%), Anfíboles (5%)
- Minerales accesorios: Clorita: 1%, Epidota: 1%

Nombre de la Roca: Andesita piroxénica



Fotografía 13. Andesita piroxénica.

Muestra: RPS-6

Roca color café rojizo, masiva, con densidad media a alta, fractura irregular a semi concoidea rugosa, con resistencia de roca muy dura. La superficie expuesta presenta meteorización ligera con una decoloración de la matriz. Su textura es porfirítica con minerales de plagioclasa de hasta 4mm, con una matriz de tonalidad rojiza, afanítica en un 67%, con un 37% de fenocristales.

- Minerales principales: Plagioclasas (20%), Piroxenos (augitas) (8%), Anfíboles (6%)
- Minerales secundarios: Cuarzo (3%)

Nombre de la roca: Andesita piroxénica



Fotografía 14. Andesita piroxénica.

Muestra: PCQ-4

Roca color gris clara, masiva, con densidad alta, con fracturas con superficie irregular rugosa, con resistencia de roca muy dura. La superficie expuesta presenta meteorización ligera con una decoloración de su matriz. Su textura es porfirítica con 60%, y fenocristales en un 40%. Su matriz presenta moderada silicificación. Con superficies con pátinas de óxidos y su meteorización el ligera.

- Minerales principales: Plagioclasas (23%), Piroxenos (augita) (10%), Anfíboles (5%)
- Minerales accesorios: Clorita (2%)

Nombre de la roca: Andesita piroxénica



Fotografía 15. Andesita piroxénica.

Muestra: PE-1

Roca color gris claro, masiva, densidad alta, con fracturas con superficies semi-concoidea a irregular rugosa, con resistencia de roca dura. La muestra presenta una meteorización ligera con una leve decoloración café claro de su matriz. Su textura es porfirítica, hipocristalina, con una matriz afanítica altamente silicificada, en un 40%, con un 60% de fenocristales.

- Minerales principales: Plagioclasas (35%), Piroxenos (14%), Anfíboles (5%), Cuarzo (5%)
- Minerales secundarios: Clorita (1%)

Nombre de la roca: Andesita piroxénica



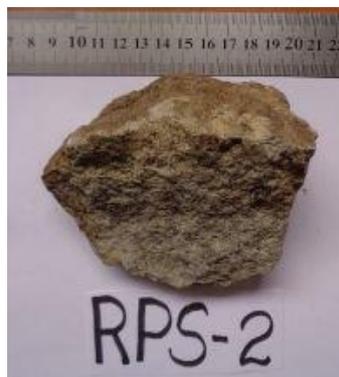
Fotografía 16. Andesita piroxénica.

Muestra RPS-2

Roca color gris clara, masiva, densidad media a alta, con fractura irregular a semi concoidea rugosa, con resistencia de roca dura. La superficie expuesta presenta meteorización ligera con una leve decoloración marrón de su matriz, así mismo, oxidación en las partes expuestas da una coloración anaranjada. Su textura es porfirítica, hipocristalina, con una matriz afanítica gris clara vítrea en un 65%, con un 35% de fenocristales. Presenta microestructuras paralelas entre sí, cerradas sin relleno.

- Minerales principales: Plagioclasas (20%), Anfíboles (10%), Piroxenos (2%)
- Minerales secundarios: Cuarzo (2%)
- Minerales accesorios: Clorita (1%)

Nombre de la roca: Andesita hornblédica



Fotografía 17. Andesita hornblédica.

Muestra: RPS-1

Roca masiva, de baja densidad, superficie altamente meteorizada, de coloración gris con ligera tonalidades marrón, con pátinas de óxido, fractura irregular rugosa, resistencia de roca blanda, en superficie fresca presenta una tonalidad marrón.

Roca de grano fino, bien seleccionada, con fragmentos esporádicos de rocas, cuarzo y minerales máficos y siálicos, con gránulos de pómez, no permeable, porosidad y permeabilidad baja, presenta un cemento arcillo limoso de coloración marrón. La roca es no plástica con compacidad muy densa, dilatancia media a lenta.

Nombre de la roca: Toba



Fotografía 18. Toba.

Muestra: RPS-1A

Roca masiva, de baja densidad, con superficie altamente meteorizada, de tonalidad café anaranjado, con pátinas de óxido y una tenue presencia de limo, con fractura con superficie irregular rugosa, de porosidad y permeabilidad baja, y resistencia es de roca blanda.

Arenisca de grano medio a fino, mal seleccionada, con fragmentos de cuarzo, rocas y plagioclasas, con un cemento arcilloso, altamente meteorizada.

Nombre de la roca: Arenisca tobácea



Fotografía 19. Arenisca tobácea.

4.4. Estudio geotécnico

En este apartado se detallará la descripción geotécnica del terreno así como los reconocimientos realizados para tal fin:

- Registros de perforación (sondeos).
- Ensayos geofísicos.
- Resultados de laboratorio.
- Información geológica e hidrogeológica, ya detallada previamente.

4.4.1. Trabajos de campo

Para poder recopilar una cantidad suficiente de datos que ofrezca resultados satisfactorios en la posterior caracterización geotécnica de los materiales se han realizado registros de perforación e investigaciones geofísicas.

4.4.1.1. Perforaciones a rotación

Para examinar el terreno se ejecutaron diez perforaciones a rotación con recuperación continua de testigos de roca y suelo (PTB-1, PTB-2, PTB-3, PTB-3A, PTB-4, PTB-5, PTB-6, PTB-7, PTB-8 Y PTB-9).

El objetivo de esta investigación es verificar y correlacionar los valores obtenidos en el perfil geo-eléctrico (explicado posteriormente) además de completar aquellos parámetros que el ensayo geofísico no haya sido capaz de obtener.

A continuación, se muestra una tabla que incluye la ubicación y alcance de los sondeos ejecutados:

UBICACIÓN SONDEOS EJECUTADOS					
SONDEO	COORDENADAS		COTA (msnm)	PROF. (m)	ABSCISA
	E	N			
PTB-1	757836	9949989	2605	148	21+960
PTB-2	758108	9950062	2932.18	127.7	21+668.5
PTB-3	758427	9950298	2977.25	70	21+270.5
PTB-3A	758629	9950470	2932.2	25	21+005
PTB-4	759205	9950998	2724	70	20+220
PTB-5	759121	9950966	2718	110	20+310
PTB-6	758706	9950536	2930	83	20+940
PTB-7	758176	9950095	2936	302	21+610
PTB-8	758644	9950587	2923.3	162.5	20+932.9
PTB-9	758785	9950747	2885.3	206	20+719.7

Tabla 3. Ubicación de los sondeos ejecutados en la traza del túnel. Coordenadas proyectadas en el sistema de referencia WGS-84, Zona 17S.

Ahora se procede a realizar una introducción de cada sondeo, con una breve clasificación geomecánica de los materiales que aparecen en cada uno de ellos.

PTB-1

Este sondeo alcanzó 148 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Tobas: Matriz limo arenosa, de compacidad densa, dilatancia media, resistencia en seco media, plasticidad baja y porosidad y permeabilidad baja, envuelve clastos de origen volcánico, grises, con diámetros entre 0.03-0.1 m, resistencias de rocas muy duras.

Andesitas escoriáceas: Presentan tramos completamente fracturados, su coloración es rojiza y gris, la resistencia es de rocas muy duras. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas. A continuación se enlista sus características:

- Espaciamientos: 0.05-0.2m.
- RQD: 10-15%.
- Rellenos: Areno-limoso.
- Rugosidad: Plana ondulada rugosa.
- Meteorización: Medianamente Meteorizada.

Andesitas gris verdosas: Presentan tramos con baja y moderada fracturación, y tramos completamente fracturados que corresponde a niveles escoriáceos fracturados y fallados. La coloración de la roca es gris verdosa, la resistencia es de rocas muy duras, debido a su silificación. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas afiladas.

- Espaciamientos: 0.03-2.1 m
- RQD: 10-100 un RQD dominante del 76%.
- Rellenos: Areno limosa en zonas de proximidades a las fallas; las rocas que presentan menor grado de fracturación no muestra relleno.
- Rugosidad: Rugosa a ligeramente rugosa.
- Meteorización: Medianamente a ligeramente meteorizada.

PTB-2

Este sondeo alcanzó 127.7 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Limo: Con alto contenido de materia orgánica (raíces), de coloración café claroamarillento, porosidad y permeabilidad media a baja y plasticidad baja, humedad alta.

Lapilli: 80% de matriz de coloración marrón y >20% de gravas finas compuestas esencialmente de pómez blanquecina, humedad alta, porosidad y permeabilidad media.

Escoria: Presentan tramos completamente fracturados y con moderada fracturación, su coloración es rojiza y gris, la resistencia es de roca muy dura. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas. A continuación se enumeran sus características:

- Espaciamientos: 0.05-1.5m.
- RQD: Promedio 28%.
- Relleno: Areno-limoso.
- Rugosidad: Plana ondulada a rugosa.
- Meteorización: Medianamente meteorizada.

Andesitas Piroxénica: Presentan tramos con baja y alta fracturación, zonas de falla, porosidad y permeabilidad alta, resistencia de la roca baja, densidad media a baja. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas afiladas.

- Espaciamientos: 0.05-1.1 m.
- RQD: 40%.
- Relleno: Areno Limosa en zonas de mayor fracturación.
- Rugosidad: Rugosa a ondulada.
- Meteorización: Medianamente a ligeramente meteorizada.

Lahar: Matriz limo arenosa, con clastos volcánicos sub-angulares, permeabilidad y porosidad media, plasticidad baja, resistencia en seco baja.

Brecha Tobácea: Matriz limo arenosa con compacidad densa, dilatancia media, resistencia en seco media, plasticidad baja, porosidad y permeabilidad baja, envuelve clastos volcánicos grises con diámetros entre 0.05-0.15 m, resistencia de roca muy dura.

PTB-3

Este sondeo alcanzó 70 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Limo, arena y pómez: Presenta intercalaciones y mezcla de pómez con sedimentos, limo con alto contenido de materia orgánica, de coloración café claro-amarillento con compacidad media, porosidad y permeabilidad media a baja y plasticidad baja, humedad alta.

Toba: Matriz limo arenosa, color marrón, presenta un alto grado de oxidación, clastos de origen ígneo, tamaños menor a 2 cm esencialmente de pómez blanquecina, humedad alta, porosidad y permeabilidad media, compacidad media, plasticidad baja.

Escoria: Presentan tramos completamente fracturados, con tonalidades gris oscura y resistencia de roca media. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas. A continuación se enlista sus características:

- Espaciamientos: 0.05-0.2m.
- RQD: 15%.
- Rellenos: Areno-limoso.
- Rugosidad: Rugosa.
- Meteorización: Altamente meteorizada.

Andesitas Escoriácea: Presentan tramos con baja, y completamente fracturados, porosidad y permeabilidad alta, resistencia de la roca media-dura, densidad media. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas afiladas.

- Espaciamientos: 0.05-0.2 m.
- RQD: 40%.
- Relleno: Limo arenoso en zonas con superficies con patinas de óxidos.
- Rugosidad: Rugosa a ondulada.
- Meteorización: Medianamente en roca intacta y altamente meteorizada en las zonas de falla.

PTB-3A

Este sondeo alcanzó 25 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Limo arenoso: Humedad alta, compacidad baja, porosidad y permeabilidad baja a media, presenta materia orgánica.

Arena limosa: Clastos erráticos, compacidad baja a media, porosidad y permeabilidad media, humedad media.

Limo: Presenta clastos sub-angulares de composición volcánica, compacidad media, permeabilidad y porosidad baja, presenta humedad.

PTB-4

Este sondeo alcanzó 79 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Toba arenosa: Matriz areno limosa con bajo contenido de arcilla, con compacidad muy densa, resistencia en seco media a alta, dilatancia media, plasticidad baja a nula, con gránulos de pómez y gravas finas volcánicas, angulosas a sub-angulosas. Su porosidad y permeabilidad es baja, su resistencia esta entre un suelo duro y una roca blanda.

Arenisca: Buena selección de color gris oscura, compacidad media, dilatancia rápida, plasticidad nula, resistencia en seco baja, con porosidad y permeabilidad media a alta.

Limo: Mezcla de arena fina con algo de arcilla, color marrón, plasticidad baja, dilatancia media a lenta, resistencia en seco media a dura con gránulos volcánicos esporádicos, compacidad densa.

Toba limosa con arena y algo de arcilla: tonalidad marrón, masiva, compacidad muy densa, plasticidad baja a nula, baja porosidad e impermeable, conforme descendemos el contenido de arena aumenta al igual que su porosidad y permeabilidad.

Brecha tobácea: Matriz soportada, tipo limo arenosa con bajo contenido de arcilla (en un 72%), de color café claro anaranjado, que envuelve el siguiente contenido clástico: Gravas finas 11%,

gravas gruesas 10%, guijos en un 4% y 3% de cantos, de clastos volcánicos, fragmentos de rocas cloritizadas y de pómez, con formas sub-angulosas a sub- redondeadas, resistencia en seco media, plasticidad baja y porosidad y permeabilidad baja.

Lahar: Con matriz arenosa suelta de grano medio con limo, color gris oscuro, que envuelven clastos angulosos de andesitas gris oscuras y claras, con formas subredondeadas a sub-angulosas, con pátinas de óxidos y resistencias de rocas muy duras. Presentan diámetros entre gravas y cantos de 25cm, en un 29%, del total de la roca, la matriz presenta plasticidad baja, dilatancia media a lenta, resistencia en seco media a dura.

PTB-5

Este sondeo alcanzó 110 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Andesita hornblédica escoriácea: Presenta tramos con fractura moderada, aberturas abiertas con relleno limo arenoso rojizo. Sus fracturas son onduladas rugosas, con pátinas de óxidos. Su resistencia es de roca muy dura.

Escoria: Presentan tramos moderada a completamente fracturados, color rojiza y gris, resistencia de roca muy dura y suave, meteorización moderada a alta.

Andesitas piroxénica: Presentan tramos con fracturas irregulares formando aristas angulosas afiladas.

- Espaciamientos: 0.05-0.7m.
- RQD: 50%.
- Rellenos: Arena limoso.
- Rugosidad: Rugosa a ligeramente rugosa.
- Meteorización: Ligeramente meteorizada.

PTB-6

Este sondeo alcanzó 83 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Suelo, Lapilli y arena: Bajo contenido de arcilla de tonalidad oscura compacidad baja, porosidad y permeabilidad media-alta, plasticidad baja, humedad alta, contenido de materia orgánica.

Toba brechosa: Matriz limo arenoso, color marrón, presenta un alto grado de oxidación, compacto, clastos de origen ígneo, tamaño menor a 3 cm esencialmente de pómez blanquecina, humedad alta, porosidad y permeabilidad media, compacidad media.

Andesitas piroxénica: Presentan tramos fracturados con spaciamientos hasta de 0.05m. La coloración de la roca es gris clara, la resistencia es de roca muy dura. Su fractura es irregular y conforma aristas angulosas afiladas, así mismo, presenta meteorización alta en algunos tramos.

- Espaciamientos: 0.05-0.5m.
- RQD: 30%.
- Rellenos: Arena limoso.
- Rugosidad: ondulada rugosa a lisa.
- Meteorización: moderada a altamente meteorizada

Lahar: Con matriz arenosa suelta de grano medio, color gris oscuro, que envuelven clastos angulosos de andesita de tonalidad gris clara, formas sub-redondeadas a subangulosa, y resistencia de roca dura. Presentan diámetros entre gravas hasta cantos de 10cm, en un 20%, del total de la roca, la matriz presenta plasticidad baja, dilatancia media a lenta, resistencia en seco media a dura.

Andesitas escoriáceas: Presentan tramos con fracturación dando espaciamentos aproximadamente 0.05m, su coloración es gris en ciertos sectores presenta tonalidad negruzca, la resistencia es de rocas muy duras. Su fractura es irregular.

- Espaciamentos: 0.05-0.45m.
- RQD: 25%.
- Rellenos: Areno-limoso, nulo.
- Rugosidad: Ondulada rugosa, ondulada lisa.
- Meteorización: Medianamente meteorizada.

Escoria: Presenta completamente triturada, con meteorización alta formando resistencia de roca media. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas. A continuación se enlista sus características:

- Espaciamentos: 0.02-0.08m.
- RQD: 10%.
- Rellenos: Areno-limoso.
- Rugosidad: Rugosa.
- Meteorización: Altamente meteorizada.

PTB-7

Este sondeo alcanzó 302 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Suelo: Material limoso de compacidad densa, resistencia en seco media, plasticidad baja y porosidad y permeabilidad baja con dilatancia media.

Lapilli: Bajo contenido de arcilla de tonalidad clara compacidad baja, porosidad y permeabilidad media-alta, plasticidad baja, humedad alta, contenido de materia orgánica.

Limo: Compacidad densa a media, presenta contenido bajo de arcilla y arena, humedad alta, compacidad baja, porosidad y permeabilidad baja a media.

Andesitas piroxénicas escoriáceas: Presentan tramos completamente fracturados, su coloración es rojiza y gris, la resistencia es de rocas muy duras. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas con patinas de óxidos. A continuación se enlista sus características:

- Espaciamentos: 5 – 10cm.
- RQD: 10%.
- Rellenos: limo.
- Rugosidad: ondulada rugosa.
- Meteorización: moderada.

Andesitas piroxénicas: Presentan tramos con baja y alta fracturación, la coloración de la roca es gris, la resistencia es de rocas muy duras, debido a su silificación en ciertos tramos. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas afiladas, superficies con patinas de óxidos.

- Espaciamientos: 5 – 30cm.
- RQD: 30%.
- Rellenos: óxidos.
- Rugosidad: plana rugosa.
- Meteorización: ligera.

Lahar: Matriz limo arenosa con compacidad densa, dilatancia media, resistencia de la matriz en seco baja, plasticidad baja, porosidad y permeabilidad media.

Escoria: Presentan tramos con alta y moderada fracturación, su coloración es gris rojiza, la resistencia es de roca muy dura. Su fractura es irregular y conforman aristas angulosas.

- Espaciamientos: 5 – 10cm.
- RQD: 10%.
- Relleno: limo, óxidos.
- Rugosidad: plana rugosa.
- Meteorización: moderada.

Brecha tobácea: Matriz limo arenosa con compacidad densa, dilatancia media, resistencia en seco media, plasticidad baja, porosidad y permeabilidad baja, envuelve clastos volcánicos grises con diámetros entre 0.5-0.3 m, resistencia de roca muy dura.

Flujo piroclástico: Con matriz arenosa suelta de grano medio, que envuelven clastos angulosos de andesita de tonalidad gris clara, y resistencia de roca dura. Presentan diámetros entre gravas hasta cantos de 15 a 50cm, en un 30%, del total de la roca, la matriz presenta plasticidad baja, dilatancia media a lenta.

PTB-8

Este sondeo alcanzó 162.5 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Suelo: Limo arenoso, color café, compacidad baja, permeabilidad y porosidad media, plasticidad baja, presenta clastos volcánicos con resistencia de roca dura.

Toba brechosa: Matriz limo arcillosa, color marrón, presenta un alto grado de oxidación, compacto, clastos de origen ígneo, tamaño menor a 3 cm esencialmente de pómez blanquecina, humedad alta, porosidad y permeabilidad baja, compacidad media a baja.

Arena: Granulometría media, color gris oscura, porosidad y permeabilidad alta, compacidad baja, plasticidad baja, presenta fragmentos volcánicos menores a 2,0 cm de diámetro con resistencia de roca dura.

Lahar: Presenta matriz arena limosa de color gris rojizo, plasticidad baja, permeabilidad y porosidad media a baja, envuelven a clastos de composición andesítica con resistencia de roca dura con diámetros menores a 25,0 cm de diámetro, intercalaciones de estratos centimétricos de escoria.

Escoria: Composición andesítica piroxénica, color gris rojiza, vesicular, densidad baja a media; altamente meteorizada, con resistencia de roca blanda.

- Espaciamientos: 10-20.
- RQD: 10%.

- Rellenos: Sin relleno.
- Rugosidad: Rugosa.
- Meteorización: Moderada a alta.

Brecha volcánica: Ligeramente silicificada, color rojiza a grisácea, presenta clastos sub redondeados de hasta 4,0 cm de diámetro con resistencia de roca dura, así como minerales de cuarzo y plagioclasas redondeadas, densidad media, vesicular; meteorización moderada.

Andesitas piroxénicas: Silicificada de tonalidad grisácea con resistencia de roca dura y superficies ondulada rugosa, densidad alta con presencia de vetillas carbonatadas.

- Espaciamientos: 10-50.
- RQD: 20%.
- Rellenos: Sin relleno.
- Rugosidad: Plana rugosa.
- Meteorización: Moderada.

PTB-9

Este sondeo alcanzó 206 metros de profundidad, que permite realizar el siguiente resumen geotécnico:

Suelo: Limo arenoso, color café, compacidad baja, permeabilidad y porosidad media, plasticidad baja, dilatancia media a rápida presenta clastos volcánicos con resistencia de roca dura.

Lahar: Presenta matriz arena de color gris, plasticidad baja, permeabilidad y porosidad media, dilatancia rápida, envuelven a clastos de composición andesítica con resistencia de roca dura con diámetros menores a 22,0 cm de diámetro con resistencia d roca dura, intercalaciones de estratos centimétricos de escoria.

Andesita piroxénica escoriácea: Color gris rojiza, vesicular, densidad media, meteorización moderada, con resistencia de roca dura.

- Espaciamientos: 10 a 50 cm.
- RQD: 10% a 50%.
- Rellenos: Sin relleno.
- Rugosidad: Ondulada rugosa.
- Meteorización: moderada a alta.

Escoria andesítica: Composición andesítica, vesicular; meteorización moderada a alta.

4.4.1.2. Ensayos geofísicos

Para determinar ciertos parámetros necesarios en el diseño del túnel se realizan investigaciones geofísicas, dada su capacidad de recolección de datos. Pero es un método indirecto y como se ha explicado en la parte anterior necesita de técnicas directas de investigación como complemento.

Tomografía eléctrica

Permite determinar las variaciones de resistividad del terreno mediante el paso de una corriente eléctrica, inducida por una fuente externa. El resultado se plasma en un perfil resistivo que permite discriminar unidades estratigráficas, estructuras y alteraciones.

Para conseguir el perfil geológico mediante esta técnica primero se han de recopilar los datos tomados mediante la implantación de una línea de tomografía eléctrica, que se implementan al mapa de la zona resultando así:

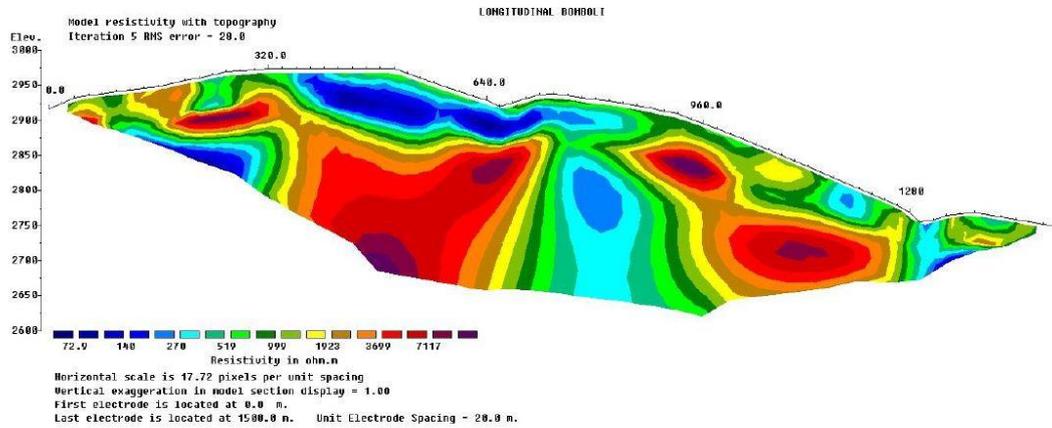


Figura 14. Sección geofísica de tomografía eléctrica.

Gracias a esta interpretación y tras la inversión de los valores de la resistividad aparente, se obtiene el resultado de la transformación de intervalos de resistividad y estructura en geología acorde con el propio marco geológico.

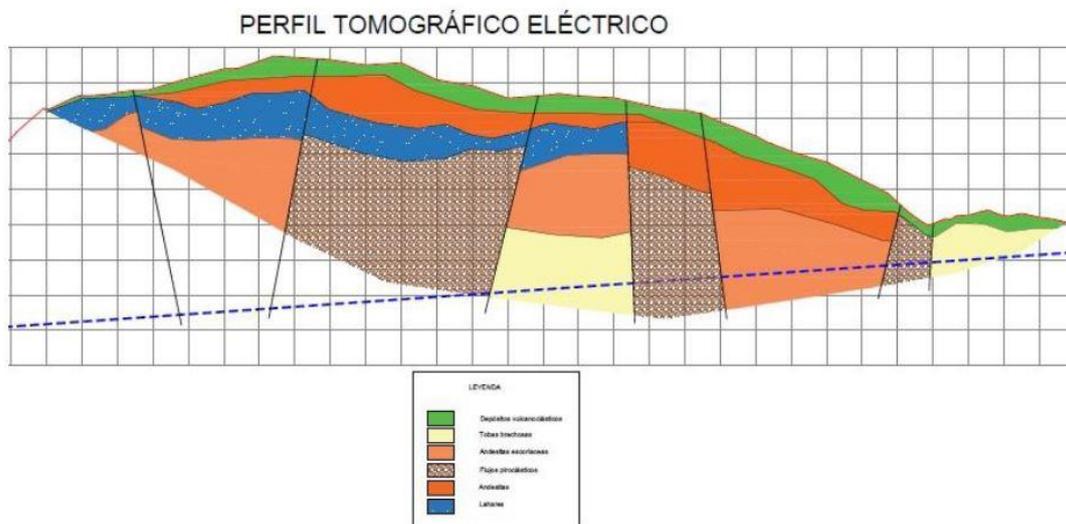


Figura 15. Sección geológica obtenida de la interpretación de la línea tomográfica eléctrica.

Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Esta técnica es igual a la usada en la tomografía eléctrica aunque la investigación está limitada a la vertical del punto ensayado. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

SONDEOS ELÉCTRICO VERTICALES	
TIPO DE MATERIAL	RESISTIVIDAD ($\Omega \cdot M$)
Materiales superficiales (arcillosos)	<100
Materiales superficiales (aireados)	Orden de 2000
Brechas tobáceas	Orden de 250 [60, 400]
Lahares	>600
Escorias y escorias tobáceas	>3000
Andesitas	Orden de 4000 [400,13000]
Flujos piroclásticos	Orden de 300 [130,2000]
Tobas	Orden de 900 [130,1400]
Sustrato de tipo lutítico y con arenisca	>12000

Tabla 4. Valores de resistividad de cada tipo de material.

Método sísmico

Se aplican técnicas activas (sísmica de refracción) y pasivas (sismo resistente), que registran vibraciones inducidas y naturales en el terreno, lo que permite determinar la conformación del sustrato y su definición sismo tectónica.

De la **sísmica de refracción** se han obtenido una serie de niveles geofísicos que se separan mediante interfaces de limitación en base a la velocidad de transmisión de las ondas elásticas surgidas de tal efecto. Se han definido un total de 5 niveles diferenciados separados por 4 interfaces y que se pueden correlacionar con materiales o series geológicas.

De menor a mayor velocidad de transmisión de la onda elástica, presentan los siguientes resultados:

- Nivel geofísico 1: Presenta una baja compactación con velocidades de ondas entre los 300 m/s y los 900 m/s. El valor medio de la capa se puede estimar entre 550 y 650 m/s, lo que indica que se trata de materiales no compactos de tipo suelo, relleno superficial y rellenos artificiales. La potencia de la capa es muy variable pasando desde unos metros hasta poder superar los 15 metros. Por último, se trata de una capa formada por materiales sin compactación, así pues, fácilmente movibles mediante acción humana.
- Nivel geofísico 2: Presenta una mayor compactación con velocidades sísmicas del orden de 1200 m/s pudiendo llegar a 1700 m/s como máximo y cuyo valor medio ronda los 1400 m/s. Esto indica que aún se trataría de materiales poco compactos. Las superficies limitantes son muy alabeadas y aparecen potencias desde los 10 metros hasta los 25 metros. Al igual que el nivel anterior, no presenta problemas de excavación.
- Nivel geofísico 3: Presenta una compactación ya importante con capas de diferente configuración y cuya continuidad lateral puede variar. Las velocidades de ondas varían de 1800 a 2000 m/s, siendo el primer dato su valor modal. El material que se correlacionaría con este nivel es de suelos vulcanosedimentarios, suelos de alteración y

suelos muy compactos de tipo tobáceo. La excavación de este tipo de material aún es posible mediante equipos pesados y de potencia elevada, pero empieza a ser dificultoso.

- Nivel geofísico 4: Tanto el nivel 4 como el 5 se relacionan con sustratos rocosos afectados o no por la meteorización u otras alteraciones. En este nivel, las velocidades de ondas oscilan entre los 2000 m/s y los 2500 m/s, con rangos medios cercanos a los 2300 m/s. Los materiales en este nivel se encuentran en el límite de la cementación. Lo más probable es que se trate de tobas y materiales sedimentados por procesos volcánicos o de sedimentación secundaria por removilización. Equivaldría a un sustrato rocoso con un grado de alteración III a IV (según la clasificación del I.S.R.M.). La potencia es muy variable y va desde unos pocos metros hasta superar los 20 metros en ciertas zonas. En este nivel se llega a la zona marginal que, si bien es ripable (y depende en qué zonas) se precisará de equipos neumáticos de potencia elevada.
- Nivel geofísico 5: En el último nivel aparecen velocidades de transmisión de la onda elástica por encima de los 2500 m/s y su espesor no se puede determinar pues no se conoce la interfaz inferior. Estos valores tan altos indican una elevada compactación y se identifican con un sustrato rocoso con alteraciones II a III (I.S.R.M.). Pese a ello, estos velocidades no alcanzan valores de no excavabilidad, aunque no elude la cuantía económica que se presupone alta, pues será dificultoso.

Se adjunta la tabla de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (*International Society for Rocks Mechanics: I.S.R.M.*), que evalúa el grado de meteorización de las rocas:

Grado de meteorización	Término descriptivo	Descripción
VI	Suelo residual	Todo el material se ha convertido en suelo cambiar de emplazamiento. Se ha perdido la estructura y la textura. Cambio de volumen apreciable.
V	Completamente meteorizado	El material está completamente meteorizado, pero mantiene intacta la estructura original de la roca
IV	Fuertemente meteorizado	Se ha meteorizado más del 50 por 100 del material. La roca, que puede estar sana o decolorada, está en fragmentos discontinuos.
III	Moderadamente meteorizado	Se ha meteorizado menos del 50 por 100 del material. La roca puede estar sana o decolorada, presentándose en grandes fragmentos.
II	Ligeramente meteorizado	El material presenta un aspecto decolorado u oxidado tanto en las discontinuidades como en la propia roca. La resistencia de la roca es algo menor que la de la roca sana
I	Sano	No se aprecia ningún signo visible de meteorización. Puede admitirse una ligera decoloración.

Tabla 5. Clasificación del grado de meteorización de las rocas. Fuente: I.S.R.M.

También se adjunta una tabla que proporciona ayuda a la hora de conocer la excavabilidad según el orden de velocidad de las ondas sísmicas.

CRITERIO GENERAL DE RIPABILIDAD SEGÚN VELOCIDAD DE LAS ONDAS SÍSMICAS	
VELOCIDAD SÍSMICA (m/s)	EXCAVABILIDAD
<1500	Rocas excavables con mototraíllas, excavadoras o tractores. No precisan voladura.
1500-2000	Ripado fácil. Excavación de estratos sin volar, algo difícil para excavadoras o tractores con riper.
2000-2500	Ripado algo costoso. Voladuras ligeras (grandes longitudes de retacado, bajos consumos específicos).
2500-3000	Se precisan voladuras ligeras. Prevoaduras.
>3000	Voladuras importantes (esquemas de perforación cerrados, pequeñas longitudes de retacado, altos consumos específicos)

Tabla 6. Criterio general de ripabilidad basado en la velocidad de las ondas sísmicas. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

Por otro lado, la técnica **sismo resistente** precisa la medida de los valores de transmisión de la onda elástica secundaria (V_s). Además, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) proporciona unos parámetros de las zonas sísmicas, en las que se establecen valores de la aceleración de la gravedad para un correcto diseño y posterior construcción de la obra. El capítulo 2 de esta Norma es el que hace referencia a lo citado anteriormente, siendo equivalente a la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE).

La Norma proporciona un mapa en el que se muestra visualmente los diferentes grados de intensidad sísmica, pudiéndose observar que el rango está comprendido entre 0.15g y más de 0.5g, debido a encontrarse en una zona activa.

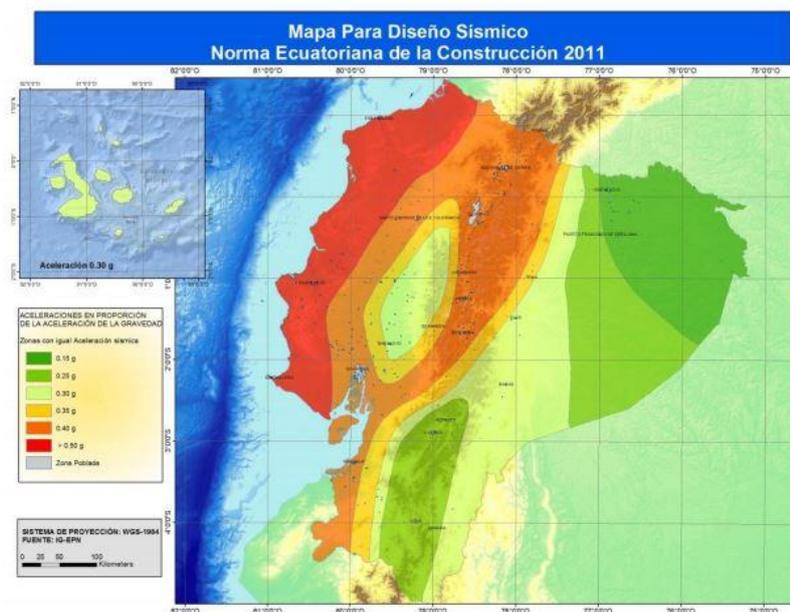


Figura 16. Mapa de Ecuador con las zonas sísmicas de diseño. Fuente: NEC-2016.

La zona donde se ubica el proyecto se encontraría según el mapa con una aceleración de 0.4g con lo que, según la tabla adjunta inferior, correspondería a una Zona V, en un área de intensidad sísmica ALTA.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 7. Valores de aceleración (factor Z) para las zonas de Ecuador. Fuente: NEC-2016.

También se adjunta la clasificación de los perfiles de suelo con la que, mediante los resultados obtenidos, se pueda clasificar el lugar.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ 100 kPa $> S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa

F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H >3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.5 m con índice de Plasticidad IP >75)
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H >30m)
	F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.
F6—Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Tabla 8. Clasificación de los perfiles de suelo. Fuente: NEC-2016.

Así pues, los resultados obtenidos serían los siguientes:

VALORES DE LA V_{530} Y CLASIFICACIÓN DEL TERRENO EN FUNCIÓN DE LA NEC-11					
UBICACIÓN	COORDENADAS		V_{530} (m/s)	CLASIF.	VALOR DE g
	E	N			
S.R.R.-1	758095	9950034	825	B	0.4
S.R.R.-2	758315	9950234	389	C	0.4
S.R.R.-3	758416	9950342	595	C	0.4
S.R.R.-4	758652	9950597	254	D	0.4
S.R.R.-5	758871	9950845	552	C	0.4
S.R.R.-6	759147	9950914	442	C	0.4

Tabla 9. Clasificación del perfil de suelo de los diversos ensayos realizados.

4.4.2. Ensayos de laboratorio

Se han extraído muestras de los núcleos de perforación de varios sondeos y de taludes donde se prevén las obras para los emboquilles de accesos.

El muestreo sigue los procedimientos establecidos en las Normas ASTM D5079 y ASTM D4220-95. La ASTM son las siglas de *Association for Testing and Materials*, una organización de normas internacionales de gran prestigio que, por ejemplo, está entre los mayores contribuyentes técnicos de la Organización Internacional de Normalización (ISO: *International Organization for Standardization*).

A estas muestras se les ha practicado ensayos de estado, clasificación y resistencia, con el propósito de determinar las propiedades físicas y mecánicas de las unidades estratigráficas que atravesará el túnel. A continuación se citan los ensayos efectuados:

Ensayos de identificación y clasificación:

- Clasificaciones SUCS.
- Límite líquido.
- Límite plástico.
- Índice de plasticidad.
- Granulometría por tamizado.
- Láminas delgadas.

Ensayos de estado:

- Humedad natural.
- Densidad natural.
- Peso específico.

Ensayos de resistencia:

- Corte directo UU.
- Compresión simple.
- Compresión simple con medidas de módulos.
- Tracción indirecta.
- Carga Puntual.

Se adjuntan varias tablas en el apéndice donde se observan los resultados de dichos ensayos, además del perfil geomecánico.

Ensayo CERCHAR

El ensayo de rayado CERCHAR (*Centre D' Etudes et Recherches de Charbonnages de France*, 1986) es uno de los procedimientos más utilizados para evaluar en laboratorio la abrasividad de las rocas.

Está vinculado al índice de abrasividad CERCHAR (CAI) que se usa para evaluar la capacidad de desgaste de las rocas. Dicho índice proviene de la realización del ensayo y su valor se determina mediante una aguja de acero, de una forma y calidad específicas, que es rascada 10 milímetros sobre la superficie de la probeta, midiendo a continuación el desgaste producido. El índice CAI es calculado como un valor medio de 2 a 5 ensayos individuales a partir del diámetro plano de desgaste de las agujas.

4.4.3. Descripción geotécnica del terreno

4.4.3.1. Aspectos generales

La caracterización geotécnica se ha desarrollado de forma que se ha asociado a cada material los valores de los diversos parámetros geotécnicos, siempre del lado de la seguridad.

Los materiales que se han estudiado en este apartado son:

- Andesitas.
- Tobas brechosas.
- Areniscas, tobas y limolitas.
- Aglomerados, flujos piroclásticos y lahares.
- Zonas de fallas. (No es un material pero se introduce de igual manera dada su importancia por la alta actividad sísmica)

Se han clasificado los macizos rocosos según los índices de calidad de Bieniawski (1989) y Barton *et al.* (1974). A partir de éstos índices y del índice GSI (Hoek, 1994; Hoek *et al.*, 1992 y 1995) se ha obtenido la curva de resistencia intrínseca aplicando el criterio generalizado de rotura de Hoek y Brown (1980a y b, 1988), según lo sugerido por Hoek *et al.* (2002).

Una vez obtenidos los parámetros de Hoek y Brown, pueden calcularse los valores de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno del macizo rocoso ya que existe una relación para un determinado nivel de presión de confinamiento, la curva de resistencia intrínseca envolvente de los estados tensionales últimos definidos por el criterio de rotura, puede sustituirse por una recta definida por el ángulo de rozamiento (ϕ') y la cohesión (c'), según la propuesta de Serrano y Olalla (1994a y b) y Hoek *et al.* (2002). Para la realización de estas estimaciones se ha utilizado el programa RocLab, de la compañía Rocscience Inc.

Además de este ajuste que sigue la tangente de la curva de rotura, es posible efectuar el ajuste para un intervalo de presión de confinamiento mediante una recta de Mohr-Coulomb, secante a la curva de rotura de Hoek y Brown. Este segundo ajuste es más conservador y según Hoek (1995 y 2000) y Hoek *et al.* (2002) resulta más adecuado para taludes.

Hoek (1983, 1994) y Hoek *et al.* (2002) proponen el siguiente criterio generalizado de resistencia intrínseca para macizos rocosos:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left[m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a$$

Siendo:

- m_b : valor reducido del parámetro de resistencia intrínseca de la roca intacta m_i .
- σ'_1 : tensión efectiva principal mayor.
- σ'_3 : tensión efectiva principal menor.
- σ_{ci} : resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- a y s : parámetros de resistencia intrínseca del macizo rocoso.

La estimación de m_b , a y s puede realizarse a partir del “*Geological Strength Index*” (GSI) según las propuestas de Hoek (1994) y Hoek *et al* (1992, 1995 y 2002), basadas en las Priest y Brown (1983):

$$m_b = m_i \cdot e^{\left[\frac{GSI-100}{28-14D}\right]} \quad a = \frac{1}{2} + \left[\frac{1}{6} \cdot \left(e^{\left[\frac{-GSI}{15}\right]} - e^{\left[\frac{-20}{3}\right]} \right) \right] \quad s = e^{\left[\frac{GSI-100}{9-3D}\right]}$$

Siendo:

- m_i : el parámetro de resistencia intrínseca de la roca intacta deducido de ensayos triaxiales o de las referencias bibliográficas publicadas por Hoek (1983, 1995 y 2000).
- D : factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso durante su excavación. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

El módulo de deformación del macizo rocoso (E_m) viene dado según la expresión (Hoek y Diederichs, 2006):

$$E_m(GPa) = E_i \cdot \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left[\frac{60+15D-GSI}{11}\right]}} \right]$$

Siendo:

- E_i : módulo de deformación de la roca intacta.

4.4.3.2. Índices de calidad a calcular

Como se ha indicado previamente, la clasificación geomecánica se basa en los índices de calidad de Bieniawski y Barton. Ante la presencia de diversos casos, para aumentar la rapidez de análisis lectora, se procede a explicar el desarrollo de las distintas clasificaciones, además de la obtención de los parámetros GSI, m_i y D :

RMR (Bieniawski)

Clasificación geomecánica presentada por Bieniawski. Permite hacer una clasificación de las rocas y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un vano. Su resultado final es el índice RMR, que es la suma de las valoraciones extraídas de los seis parámetros siguientes:

- La resistencia a compresión simple del material.
- El RQD (*Rock Quality Designation*).
- El espaciamiento de las discontinuidades.
- El estado de las discontinuidades.

- La presencia de agua.
- La orientación de las discontinuidades.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE		
ÍNDICE DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL (MPa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE RCS (MPa)	VALORACIÓN
>10	>250	15
4-10	100-250	12
2-4	50-100	7
1-2	25-50	4
-	5-25	2
-	1-5	1
-	<1	0

Tabla 10. Valoración en la clasificación de Bieniawski a partir de la resistencia a compresión simple. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

ÍNDICE RQD		
RQD	CALIDAD DE LA ROCA	VALORACIÓN
90-100%	Muy buena	20
75-90%	Buena	17
50-75%	Regular	13
25-50%	Pobre	8
<25%	Muy pobre	3

Tabla 11. Valoración en la clasificación de Bieniawski a partir del índice RQD. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

ESPACIAMIENTO DISCONTINUIDADES	
ESPACIAMIENTO (m)	VALORACIÓN
>2	20
0.6-2.0	15
0.2-0.6	10
0.06-0.2	8
<0.06	5

Tabla 12 Valoración en la clasificación de Bieniawski a partir del espaciamiento de las discontinuidades. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

ESTADO DISCONTINUIDADES					
PARÁMET.	VALORACIÓN				
Longitud de la discontinuidad	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave

	6	5	3	1	0
Relleno	No hay	Relleno duro	Relleno duro	Relleno blando	Relleno blando
		<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
	6	4	2	2	0
Alteración	No hay	Ligeram. alterado	Moderad. alterado	Muy alterado	Descom puesto
	6	5	3	1	0

Tabla 13. Valoración en la clasificación de Bieniawski a partir del estado de las discontinuidades. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

PRESENCIA O NO DE AGUA FREÁTICA						
PRESENCIA DE AGUA	Caudal en 10 m de túnel	Nulo	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
	σ_w/σ_3	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
	Estado	Seco	Ligeram. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
VALORACIÓN		15	10	7	4	0

Tabla 14. Valoración en la clasificación de Bieniawski a partir de la presencia o no de agua freática. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable
VALORACIÓN PARA	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 15. Corrección debido a la orientación de las discontinuidades en la clasificación de Bieniawski. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Mediana	Mala	Muy mala
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años 15 metros	6 meses 8 metros	1 semana 5 metros	10 horas 2.5 metros	30 minutos 1 metro
Cohesión (MPa)	>0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	<0.1
Rozamiento	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

Tabla 16. Clasificación según el criterio de Bieniawski. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

Índice Q (Barton)

El índice de Barton es un índice de calidad que sirve para catalogar los macizos rocosos. Se basa en los siguientes parámetros:

- RQD
- Número de familias de juntas (Jn)
- Rugosidad de las juntas (Jr)
- Meteorización de las juntas (Ja)
- Presencia de agua (Jw)
- SRF (*Stress Reduction Factor*)

Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

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

Los valores de los parámetros se clasifican según las siguientes tablas:

DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO	R Q D	OBSERVACIONES.
Muy pobre	0-25	Para R.Q.D < 10 se puede tomar R.Q.D. = 10 en la ecuación de Q.
Pobre	25-50	
Medio	50-75	
Bueno	75-90	
Muy Bueno	90-100	

Tabla 17. Clasificación del RQD según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

DESCRIPCIÓN	Jn
Roca masiva	0.5-1
Una familia de diaclasas.	2
Una familia de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales.	3
Dos familias de diaclasas.	4
Dos familias de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales	6
Tres Familias.	9
Tres familias de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales.	12
Cuatro o más familias de Diaclasas, roca muy fracturada.	15
Roca triturada terrosa.	20
En boquillas, se utiliza 2 Jun y en Túneles 3 Jun	

Tabla 18. Valores del parámetro Jn según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

❖ Contacto entre las 2 caras de las diaclasas con poco desplazamiento lateral de menos de 10 cm.	Jr
▪ Juntas discontinuas.	4
▪ Juntas Rugosa o irregular ondulada.	3
▪ Suave ondulada.	2
▪ Espejo de falla, ondulada,	1.5
▪ Rugosa o irregular, plana.	1.5
▪ Suave plana.	1
▪ Espejo de Falla, plano.	0.5
❖ No existe contacto entre las 2 caras de las diaclasas cuando ambas se desplazan lateralmente.	Jr
▪ Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de las Diaclasas.	1
▪ Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las 2 caras de las diaclasas.	1

Nota: si el espaciado de la familia de las diaclasas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_n en una unidad.

Para diaclasas con espejos de falla provisto de lineaciones, si están orientadas favorablemente, se puede usar $J_r=0.5$

Tabla 19. Valores del parámetro J_r según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

DESCRIPCIÓN	J_w	Presión del agua Kg/cm ²
- Excavaciones secas o de influencia poco importante.	1	<1
- Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las Diaclasas.	0.66	1-2.5
- Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las Diaclasas.	0.33*	2.5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo.	0.1-0.2*	>10
- Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0.05-0.1*	>10
Los valores presentados con el Signo * son solo valores estimados. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w		

Tabla 20. Valores del parámetro J_w según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

DESCRIPCIÓN	J_a	θ'
Contacto entre las 2 caras de las Diaclasas		
Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes sanas.	0.75	25-30
Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	2	25-30
Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja		

fricción como caolinita, clorita, talco yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 o 2 mm.	4	8-16
Contactos entre 2 caras de la Diaclasa con < de 10 cm desplazamiento lateral.		
Partículas de Arena, roca desintegrada libre de arcilla.	4	25-30
Fuertemente sobreconsolidados rellenos de minerales arcillosos no blandos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de esp.	6	16-24
Sobreconsolidación media a baja, blandos, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de < de 5 mm de espesor.	8	12-16
Rellenos de arcilla expansiva, de espesor continuo de 5 mm. El valor J_a dependerá del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8-12	6-12
No existe contacto entre las 2 caras de la diaclasa cuando esta cizallada.		
Zonas o bandas de roca desintegrada o manchada y arcilla.	6-8-12	6-24
Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fricción de arcilla no blandas.	5	6-24
Granos arcillosos gruesos.	13-20	6-24

Tabla 21. Valores del parámetro J_a según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

1.-Zona débil que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques.		SRF	
A. Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor.		10	
B. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación < 50 m.).		5	
C. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. (Profundidad de excavación > 50 m.).		2.5	
D. Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor. (Cualquier profundidad).		7.5	
E. Sólo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla (Profundidad de excavación < 50 m.)		5	
F. Sólo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla. (Profundidad > 50 m).		2.5	
G. Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.		5	
2.-Rocas competentes con problemas tensionales en las rocas	σ_2/σ_1	σ_3/σ_1	SRF
H. Tensiones pequeñas cerca de la superficie.	> 200	>13	2.5
I. Tensiones medias.	200-10	13-0.33	1.0
J. Tensiones altas estructura muy compacta, favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
K. Explosión de roca suave (roca Masiva).	5-2.5	0.33-0.16	5-10
L. Explosión de roca fuerte (roca masiva.)	<2.5	<0.16	10-20

σ_c y σ_t son las resistencias a la compresión y tracción respectivamente de la roca, σ_1 es el esfuerzo principal máximo que actúa en la roca.	
3.-Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostática.	SRF
M. Presión de Flujo suave.	5-10
N. Presión de flujo intensa.	10-20
3.-Roca expansiva, actividad expansiva química dependiendo de la presencia del agua.	S.R.F
O. Presión Expansiva suave.	5-10
P. Presión expansiva intensa.	10-15
Observaciones al SRF: Reducir los valores del SRF en un 25 a 50% si las zonas de rotura solo influyen pero no interceptan a la excavación. En los casos que la profundidad de las clave del túnel sea inferior a la altura del mismo se sugiere aumentar el SRF de 2.5 a 5. Para campos de tensiones muy anisótropos cuando $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reducir el σ_c y σ_t a $0.8 \sigma_c$ y $0.8 \sigma_t$.	

Tabla 22. Valores del parámetro SRF según su descripción. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

TIPO DE ROCA	VALOR DE Q
Excepcionalmente mala.	0,001 - 0,01
Extremadamente mala.	0,01 - 0,1
Muy mala.	0,1 - 1
Mala.	1 - 4
Media.	4 - 10
Buena.	10 - 40
Muy buena.	40 - 100
Extremadamente Buena.	100 - 400
Excepcionalmente Buena.	400 - 1000

Tabla 23. Clasificación de Barton de los macizos rocosos según su índice de calidad Q. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

Parámetro GSI

La determinación del parámetro GSI (Índice de Resistencia Geológica) se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso. El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, sólo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

La determinación del GSI se hace a partir de la siguiente tabla en la que se ingresa desde 2 puntos diferentes, uno horizontal: referente al tamaño y el contacto entre bloques, composición y estructura; el ingreso vertical es referente a las condiciones de las discontinuidades, se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales.

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del Índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos contenidos fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arenosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Tabla 24. Caracterización del macizo rocoso en base a su grado de fracturación y estado de las juntas. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

Parámetro D

Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como aquellos esfuerzos que aparezcan en la excavación provocan una alteración del macizo rocoso. Esta alteración es medida con el índice D que varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

Para la obtención del parámetro D, podemos observar la siguiente tabla en las que se definen las condiciones del macizo rocoso y el parámetro D asociado.

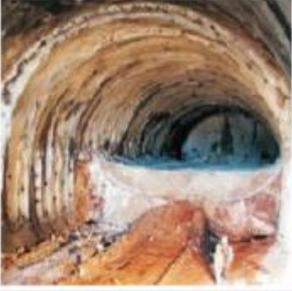
Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Tabla 25. Guía para estimar el parámetro D . Fuente: Hoek (2006)Parámetro m_i

Para la determinación del parámetro m_i podemos seguir el criterio de Hoek representado en la siguiente tabla, en la que según el tipo de roca (sedimentaria, ígnea o metamórfica), su clase y grupo y su textura obtenemos diferentes parámetros de m_i .

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Medía	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
	No Clásticas		←----- Grauwaca -----→ (18)			
			←----- Creta -----→ 7			
			←----- Carbón -----→ (8 - 21)			
Carbonatos		Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8		
Químicas			Yeso 16	Anhidrita 13		
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 - 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas		Claras	Granito 33	Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Oscuras	Granodiorita (30)	Dacita (17)	
	Extrusivas Piroclásticas		Diorita (28)	Andesita 19		
		Gabbro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)		
		Norita 22				
		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)		

Tabla 26. Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca. Fuente: "Estimación de macizos rocosos en la práctica" (E. Hoek)

4.4.3.3. Andesitas

Dentro de estos materiales se agrupan (ya han sido definidas en el estudio geológico):

- Andesitas escoriáceas hornblédicas.
- Andesitas piroxénicas.



Fotografía 20. Vista de la andesita piroxénica. Sondeo PTB-01.

Caracterización tenso-deformacional de la roca intacta

Los parámetros medios que se obtienen para la roca intacta son los siguientes:

- RQD = 70%.
- Juntas rugosas.
- Goteo (pequeños rezumes y flujos en zonas fracturadas).
- Densidad aparente media: $\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$.
- Resistencia media a compresión simple: $\sigma_{ci} = 177 \text{ MPa}$.
- Resistencia a tracción: $\sigma_T = 9 \text{ MPa}$.
- Módulo de deformación elástico: $E_i = 71000 \text{ MPa}$.
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.11$

Caracterización geomecánica y propiedades del macizo rocoso

Con los datos obtenidos previamente y siguiendo los métodos explicados en el apartado 4.3.2 se obtiene un valor del RMR corregido de Bieniawski de 60 (Clase III o Media), un GSI de 55 y una Q de Barton de 7.

Obtenido el GSI, se puede calcular la curva de resistencia intrínseca característica de este material, según el criterio de rotura de Hoek y Brown, previo cálculo de los índices "a", "m_b" y "s".

Para andesitas Hoek propone tomar para la roca intacta $m_i = 25$, con lo que se obtiene, considerando una excavación bien controlada y con poco daño a las rocas circundantes del túnel (D=0) y un espesor de cobertera de 319 m, un valor de m_b de 5.011. Los parámetros "a" y "s" obtienen unos valores de 0.504 y 0.0067 respectivamente.

La obtención de los parámetros anteriores para el macizo rocoso es función de la calidad del mismo. Para un macizo rocoso descomprimido estos valores vienen dados por las expresiones de Hoek y Brown (1980 y 1988) y, por tanto, resulta la curva de resistencia intrínseca para este material reflejada en la Figura 14.

El parámetro tensional K es 0'7, lo que nos indica un estado tensional bajo, con una tensión horizontal máxima $\sigma_3 \text{max}$ de 4'9 MPa.

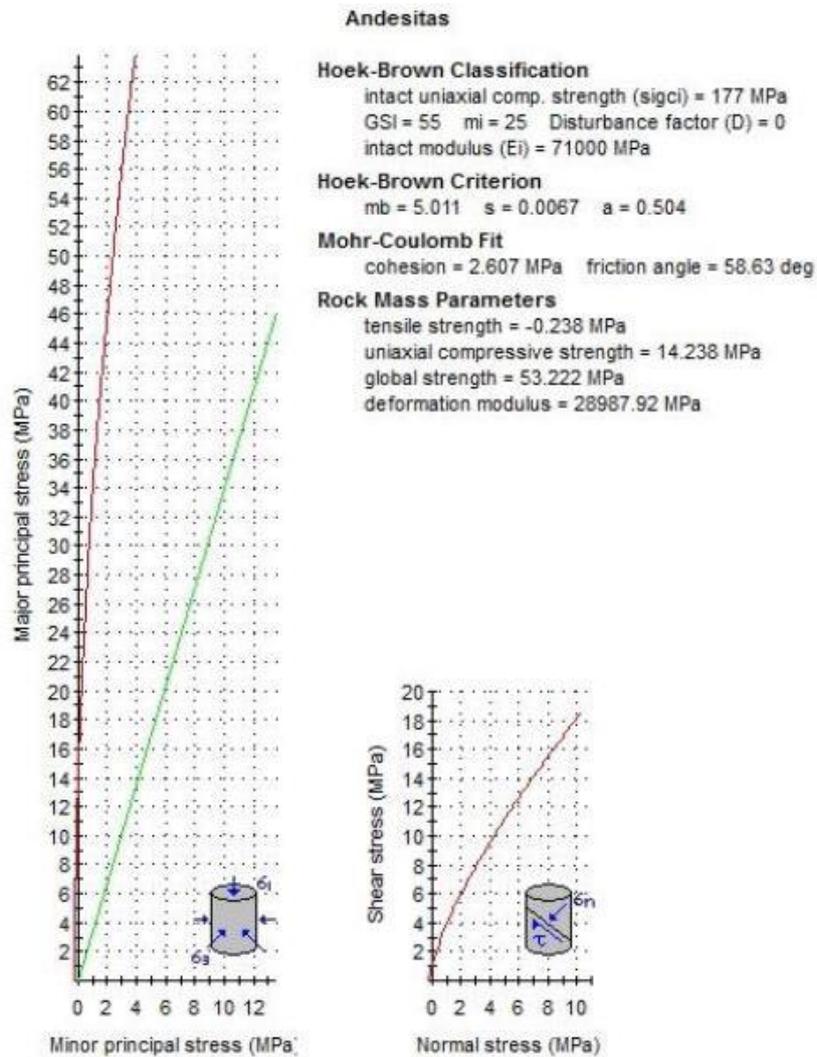


Figura 17. Análisis de comportamiento geomecánico del macizo rocoso constituido por los materiales andesíticos. Obtenido mediante RocLab.

El comportamiento resistente del material es del tipo frágil, ya que la envolvente de tensiones principales (en rojo) queda sobre la línea Mogi (en verde).

Los parámetros tenso-deformacionales del macizo rocoso que se obtienen son:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0.24$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 14.24$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 53.22$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 29000$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso (Figura 15):

- Cohesión efectiva: $c' = 2.6$ MPa.
- Ángulo de rozamiento interno efectivo: $\varphi' = 59^\circ$.

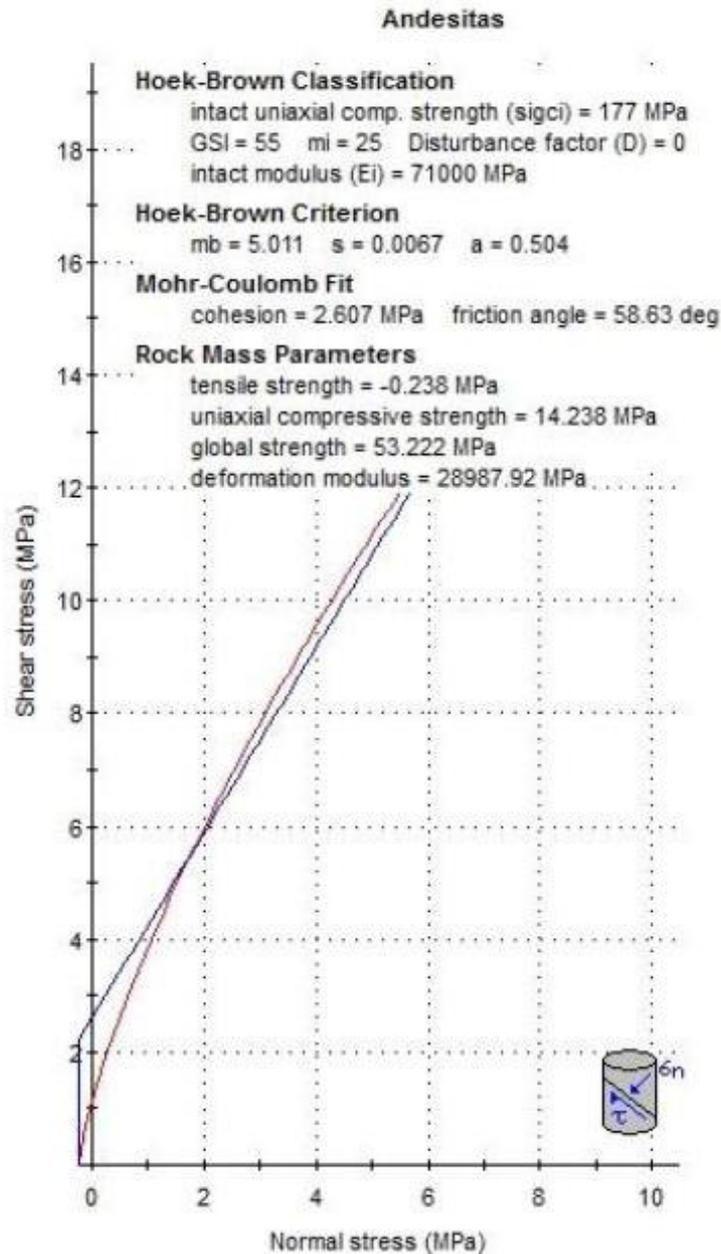


Figura 18. Obtención de los parámetros de resistencia de las andesitas según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Obtenido mediante RocLab.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad entre 10^{-4} y 10^{-5} cm/s. La porosidad de estos materiales es secundaria, y es originada por la fracturación en la etapa de enfriamiento de los flujos lávicos y por las estructuras originadas por el tectonismo regional.

4.4.3.4. Tobas brechosas

Dentro de estos materiales se agrupan (ya han sido definidas en el estudio geológico):

- Brechas tobáceas marrón rojizas.
- Tobas brechosas.
- Andesitas fracturadas.

Tobas brechosas



Fotografía 21. Vista de la toba brechosa. Sondeo PTB-04.

Caracterización tenso-deformacional de la roca intacta

Los parámetros medios que se obtienen para la roca intacta son los siguientes:

- Juntas onduladas rugosas.
- Goteo (pequeños rezumes).
- Densidad aparente media: $\gamma = 1.7 \text{ t/m}^3$.
- Resistencia media a compresión simple: $\sigma_{ci} = 5 \text{ MPa}$.
- Módulo de deformación elástico: $E_i = 1490 \text{ MPa}$.
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.17$

Caracterización geomecánica y propiedades del macizo rocoso

Con los datos obtenidos previamente y siguiendo los métodos explicados en el apartado 4.3.2 se obtiene un valor del RMR corregido de Bieniawski de 35 (Clase IV o Mala), un GSI de 30 y una Q de Barton de 1.

Obtenido el GSI, se puede calcular la curva de resistencia intrínseca característica de este material, según el criterio de rotura de Hoek y Brown, previo cálculo de los índices "a", "m_b" y "s".

Para tobas brechosas Hoek propone tomar para la roca intacta $m_i = 19$, con lo que se obtiene, considerando una excavación mecánica o a mano (sin voladura), en un macizo rocoso de pobre calidad, una deformación mínima de la roca circundante al túnel (D=0) y un espesor de cobertera de 338 m, un valor de m_b de 1.560. Los parámetros "a" y "s" obtienen unos valores de 0.552 y 0.0004 respectivamente.

La obtención de los parámetros anteriores para el macizo rocoso es función de la calidad del mismo. Para un macizo rocoso descomprimido estos valores vienen dados por las expresiones de Hoek y Brown (1980 y 1988) y, por tanto, resulta la curva de resistencia intrínseca para este material reflejada en la Figura 16.

El parámetro tensional K es 0'7, lo que nos indica un estado tensional bajo, con una tensión horizontal máxima $\sigma_3 \text{max}$ de 4'4 MPa.

Tobas brechosas**Hoek-Brown Classification**intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 5 MPaGSI = 30 m_i = 19 Disturbance factor (D) = 0

intact modulus (Ei) = 1490 MPa

Hoek-Brown Criterion m_b = 1.560 s = 0.0004 a = 0.522**Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 0.365 MPa friction angle = 24.23 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.001 MPa

uniaxial compressive strength = 0.086 MPa

global strength = 0.764 MPa

deformation modulus = 121.26 MPa

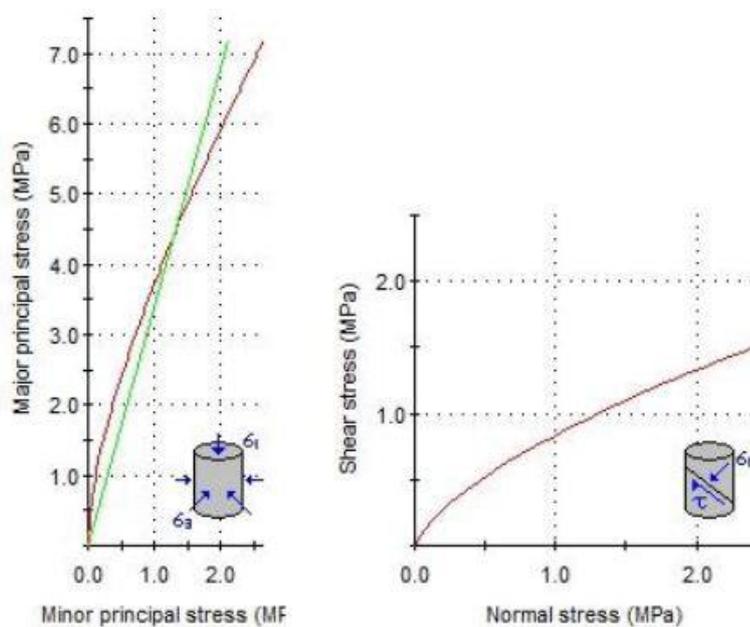


Figura 19. Análisis de comportamiento geomecánico del macizo rocoso constituido por las tobas brechosas. Obtenido mediante RocLab.

El comportamiento resistente del material es del tipo frágil que progresa a dúctil a tensiones principales mayores a 4.5 MPa.

Los parámetros tenso-deformationales del macizo rocoso que se obtienen son:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0.001$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 0.09$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 0.76$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 120$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso (Figura 17):

- Cohesión efectiva: $c' = 0.37$ MPa.
- Ángulo de rozamiento interno efectivo: $\varphi' = 24^\circ$.

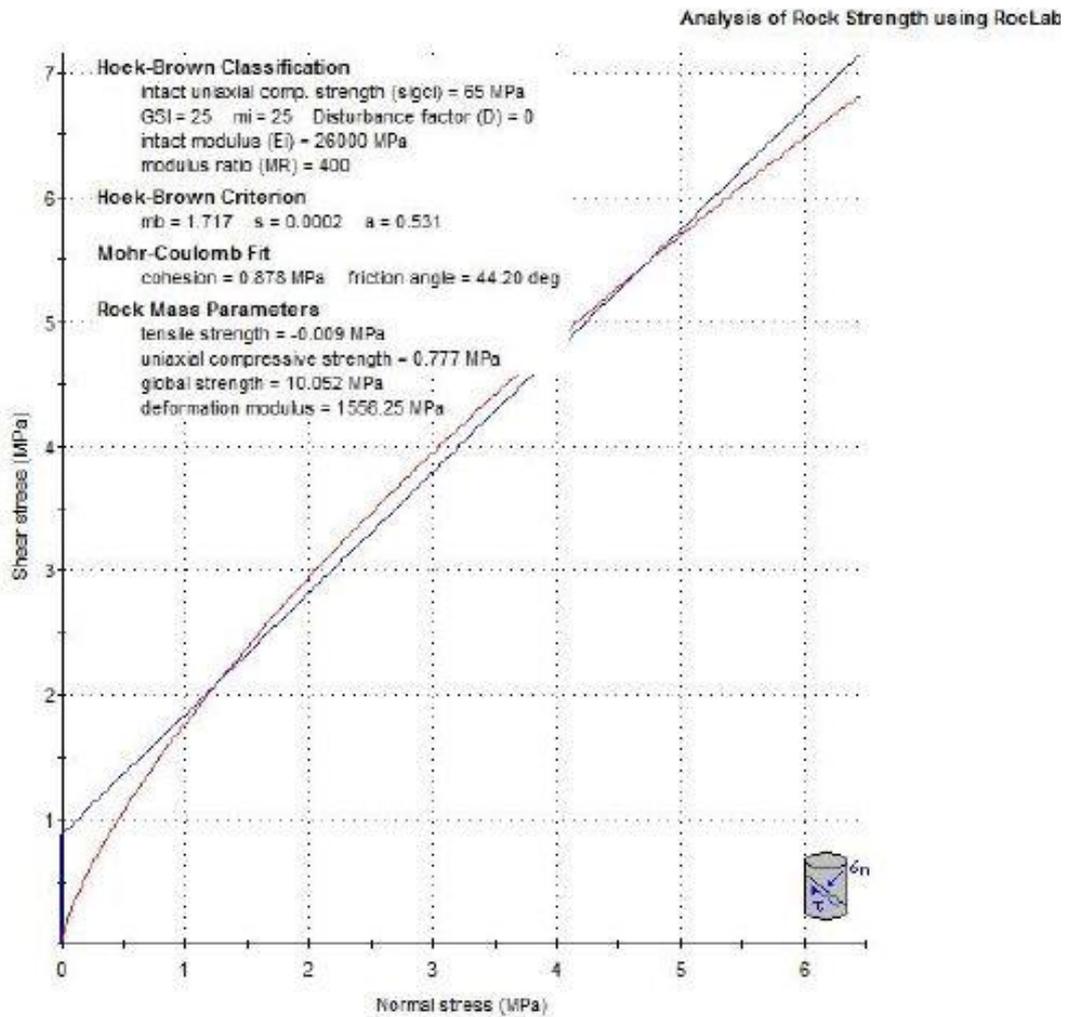


Figura 20. Obtención de los parámetros de resistencia de las tobas brechosas según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Obtenido mediante RocLab.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad entre 10^{-4} y 10^{-6} cm/s, lo que implica una permeabilidad que varía de medianamente permeable a impermeable. La porosidad de estos materiales es primaria, debido a su contenido granular.

Andesitas fracturadas



Fotografía 22. Vista de la andesita fracturada. Sondeo PTB-05.

Caracterización tenso-deformacional de la roca intacta

Los parámetros medios que se obtienen para la roca intacta son los siguientes:

- RQD = 30%.
- Juntas rugosas.
- Goteo (pequeños rezumes y flujos en zonas fracturadas).
- Densidad aparente media: $\gamma = 2.4 \text{ t/m}^3$.
- Resistencia media a compresión simple: $\sigma_{ci} = 65 \text{ MPa}$.
- Resistencia a tracción: $\sigma_T = 8 \text{ MPa}$.
- Módulo de deformación elástico: $E_i = 24000 \text{ MPa}$.
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.11$

Caracterización geomecánica y propiedades del macizo rocoso

Con los datos obtenidos previamente y siguiendo los métodos explicados en el apartado 4.3.2 se obtiene un valor del RMR corregido de Bieniawski de 30 (Clase IV o Mala), un GSI de 25 y una Q de Barton de 1.

Obtenido el GSI, se puede calcular la curva de resistencia intrínseca característica de este material, según el criterio de rotura de Hoek y Brown, previo cálculo de los índices "a", "m_b" y "s".

Para andesitas fracturadas Hoek propone tomar para la roca intacta $m_i = 25$, con lo que se obtiene, considerando una excavación bien controlada y con poco daño a las rocas circundantes del túnel (D=0) y un espesor de cobertera de 330 m, un valor de m_b de 1.717. Los parámetros "a" y "s" obtienen unos valores de 0.531 y 0.0002 respectivamente.

La obtención de los parámetros anteriores para el macizo rocoso es función de la calidad del mismo. Para un macizo rocoso descomprimido estos valores vienen dados por las expresiones de Hoek y Brown (1980 y 1988) y, por tanto, resulta la curva de resistencia intrínseca para este material reflejada en la Figura 18.

El parámetro tensional K es 0'7, lo que nos indica un estado tensional bajo, con una tensión horizontal máxima $\sigma_3 \text{max}$ de 4'3 MPa.

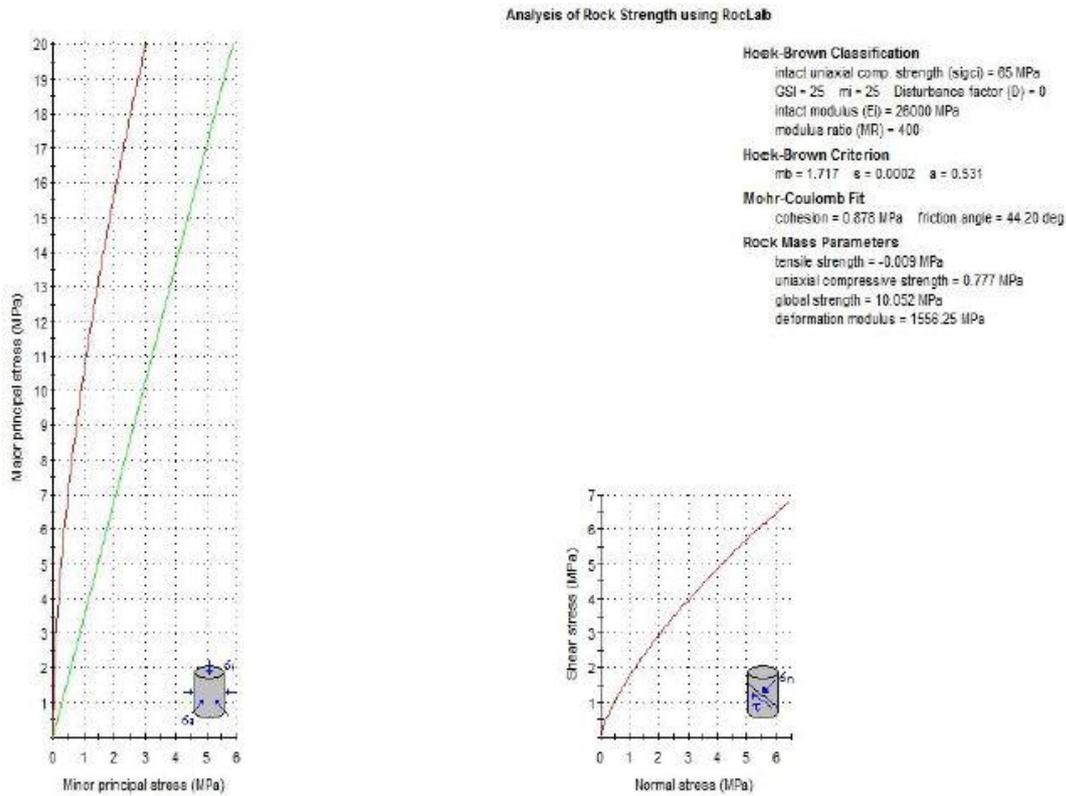


Figura 21. Análisis de comportamiento geomecánico del macizo rocoso constituido por las andesitas fracturadas. Obtenido mediante RocLab.

El comportamiento resistente del material es del tipo frágil, ya que la envolvente de tensiones principales (en rojo) queda sobre la línea Mogi (en verde).

Los parámetros tenso-deformacionales del macizo rocoso que se obtienen son:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0.009$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 0.78$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 10.05$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 1550$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso (Figura 19):

- Cohesión efectiva: $c' = 0.88$ MPa.
- Ángulo de rozamiento interno efectivo: $\varphi' = 44^\circ$.

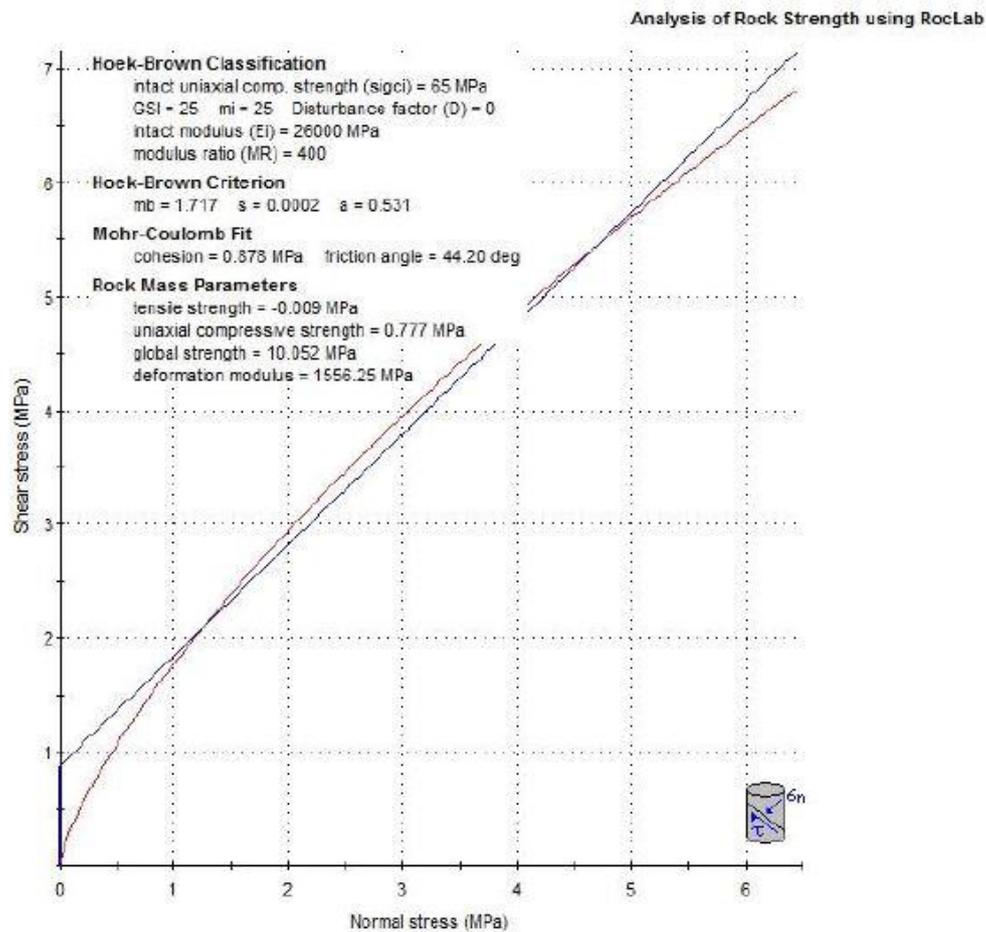


Figura 22. Obtención de los parámetros de resistencia de las andesitas fracturadas según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Obtenido mediante RocLab.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad cercano a 10^{-4} cm/s, permeable. La porosidad de estos materiales es secundaria, originada por fracturas por enfriamiento y por el tectonismo regional.

4.4.3.5. Areniscas, tobas y limolitas

Dentro de estos materiales se agrupan (ya han sido definidas en el estudio geológico):

- Areniscas tobáceas y tobas arenosas.



Fotografía 23. Vista de tobas arenosas. Sondeo PTB-04.

Caracterización tenso-deformacional de la roca intacta

Los parámetros medios que se obtienen para la roca intacta son los siguientes:

- Goteo (pequeños rezumes).
- Densidad aparente media: $\gamma = 1.5 \text{ t/m}^3$.
- Resistencia media a compresión simple: $\sigma_{ci} = 17 \text{ MPa}$.
- Módulo de deformación elástico: $E_i = 5940 \text{ MPa}$.
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.2$

Caracterización geomecánica y propiedades del macizo rocoso

Con los datos obtenidos previamente y siguiendo los métodos explicados en el apartado 4.3.2 se obtiene un valor del RMR corregido de Bieniawski de 32 (Clase IV o Mala), un GSI de 27 y una Q de Barton de 0,7.

Obtenido el GSI, se puede calcular la curva de resistencia intrínseca característica de este material, según el criterio de rotura de Hoek y Brown, previo cálculo de los índices "a", "m_b" y "s".

Para grauvacas Hoek propone tomar para la roca intacta $m_i = 18$, con lo que se obtiene, considerando una excavación mecánica o a mano (sin voladura), en un macizo rocoso de pobre calidad, una deformación mínima de la roca circundante al túnel (D=0) y un espesor de cobertera de 137.1 m, un valor de m_b de 1.327. Los parámetros "a" y "s" obtienen unos valores de 0.527 y 0.0003 respectivamente.

La obtención de los parámetros anteriores para el macizo rocoso es función de la calidad del mismo. Para un macizo rocoso descomprimido estos valores vienen dados por las expresiones de Hoek y Brown (1980 y 1988) y, por tanto, resulta la curva de resistencia intrínseca para este material reflejada en la Figura 20.

El parámetro tensional K es 0'7, lo que nos indica un estado tensional bajo, con una tensión horizontal máxima $\sigma_3 \text{max}$ de 1.7 MPa.

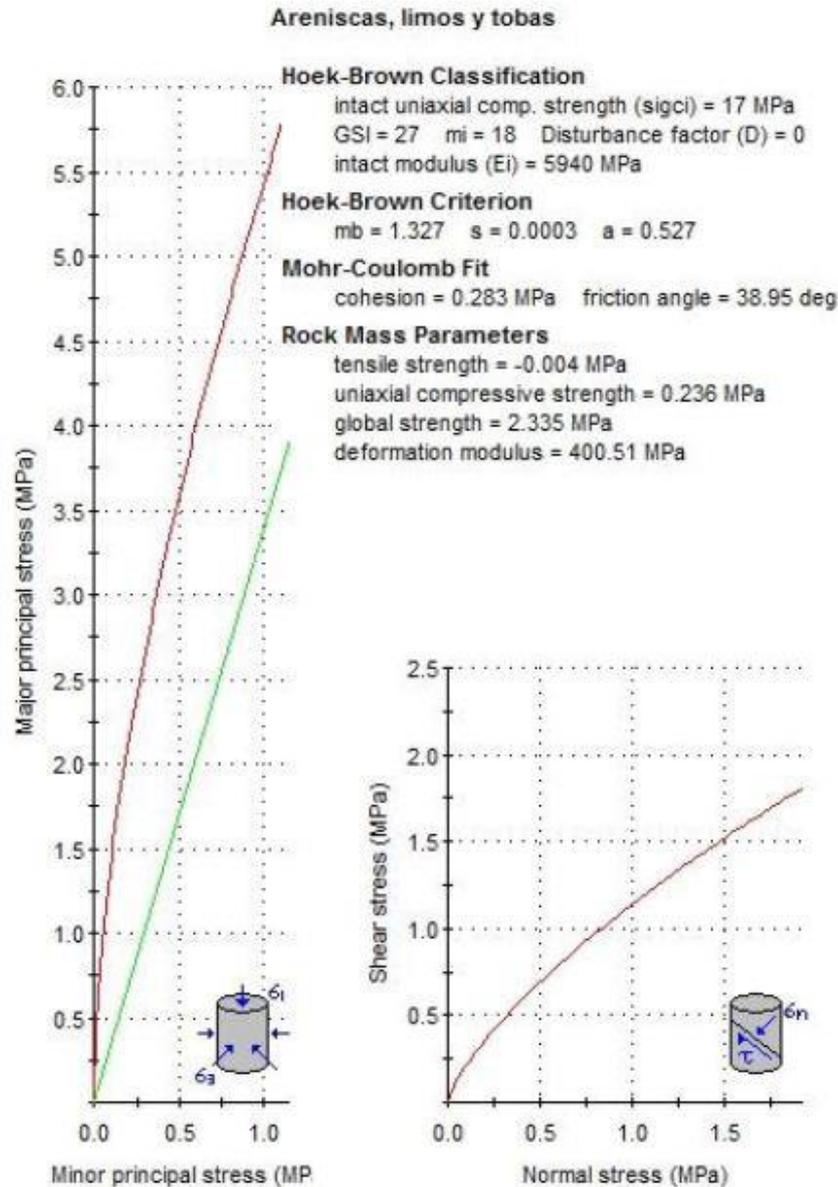


Figura 23. Análisis de comportamiento geomecánico del macizo rocoso constituido por areniscas, tobas y limos. Obtenido mediante RocLab.

El comportamiento resistente del material es del tipo frágil, ya que la envolvente de tensiones principales (en rojo) queda sobre la línea Mogi (en verde).

Los parámetros tenso-deformationales del macizo rocoso que se obtienen son:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0.004$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 0.24$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 2.34$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 400$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso (Figura 21):

- Cohesión efectiva: $c' = 0.28$ MPa.
- Ángulo de rozamiento interno efectivo: $\varphi' = 39^\circ$.

Areniscas, limos y tobas**Hoek-Brown Classification**

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 17 MPa
 GSI = 27 m_i = 18 Disturbance factor (D) = 0
 intact modulus (E_i) = 5940 MPa

Hoek-Brown Criterion

m_b = 1.327 s = 0.0003 a = 0.527

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.283 MPa friction angle = 38.95 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.004 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.236 MPa
 global strength = 2.335 MPa
 deformation modulus = 400.51 MPa

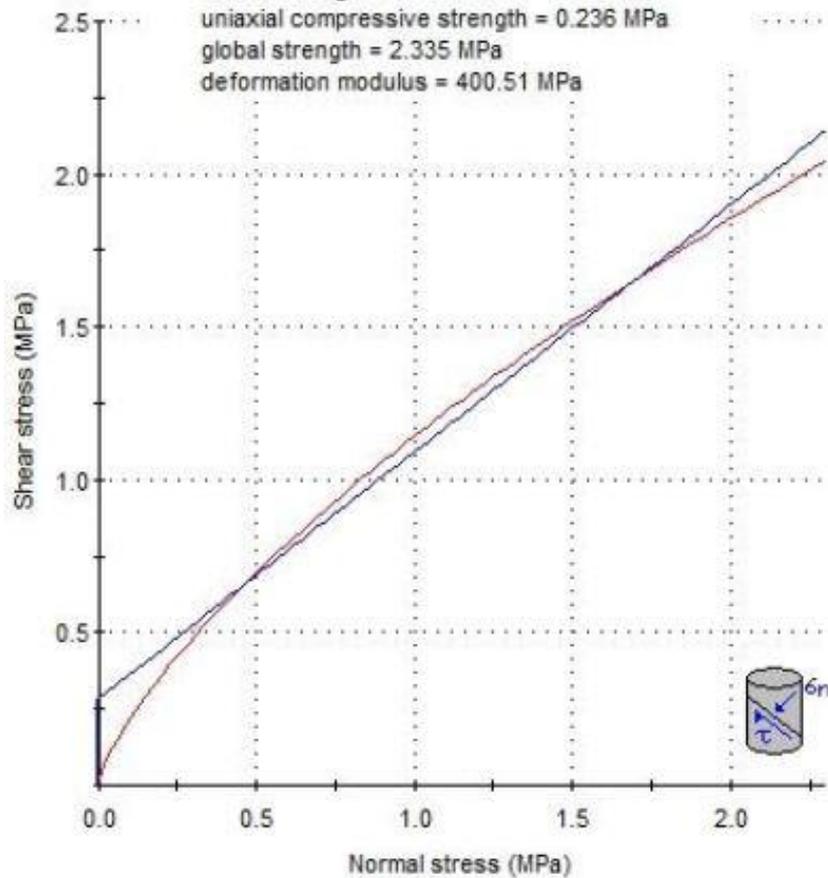


Figura 24. Obtención de los parámetros de resistencia del macizo de areniscas, tobas y limos según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Obtenido mediante RocLab.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad entre 10^{-4} y 10^{-5} cm/s, lo que implica una permeabilidad que varía de semi-permeable a impermeable. La porosidad de estos materiales es primaria y es originada por la porosidad intergranular del depósito.

4.4.3.6. Aglomerados, flujos piroclásticos y lahares

Dentro de estos materiales se agrupan (ya han sido definidas en el estudio geológico):

- Aglomerados volcánicos.
- Lahares.

- Flujos piroclásticos.
- Escorias.



Fotografía 24. Vista de lahar. Sondeo PTB-02.



Fotografía 25. Vista de escoria de composición andesítica. Sondeo PTB-01.

Caracterización geotécnica

Para el cálculo de los parámetros geotécnicos que caracterizan este material (densidad relativa, ángulo de rozamiento y módulo de deformación), consideramos un valor de NSPT = 50 golpes (establecido como valor representativo de este material por la experiencia existente), un valor de densidad $\gamma = 2.1 \text{ t/m}^3$, de densidad saturada $\gamma_{\text{sat}} = 2.2 \text{ t/m}^3$.

Densidad relativa

La densidad relativa puede calcularse, según la fórmula:

$$D_r = 25 \cdot N^{0.44} \cdot P_{VM}^{-0.13} \quad \text{Torrijo (2006)}$$

Siendo:

- D_r : Densidad relativa.
- N : valor del SPT.
- P_{VM} : presión vertical efectiva en el punto de ensayo, en KPa.

Con todo ello, y a las profundidades del túnel, se obtienen valores de densidad relativa superiores a $D_r = 45\%$.

Ángulo de rozamiento interno

Para calcularlo podemos utilizar varias correlaciones:

- Schmertmann (1977) $\varphi' = 38 + 0.08 \cdot Dr$ (1)
- Giuliani y Nicoll (1982) $tg(\varphi') = 0.575 + 0.361 \cdot Dr^{0.866}$ (2)
- Muromachi (1974) $\varphi' = 20 + 3.5 \cdot \sqrt{N}$ (3)

Considerando un valor de $Dr = 45\%$ y de $NSPT = 50$ golpes se obtienen los siguientes resultados:

- (1) $\varphi' = 42^\circ$
- (2) $\varphi' = 37^\circ$
- (3) $\varphi' = 45^\circ$

Tomando el valor más conservador de los calculados, y reduciéndolo por la alta heterogeneidad del material y por la sobrevaloración del golpeo que pueden inducir los bloques de mayor tamaño, el ángulo de rozamiento interno característico del material aglomerático es de $\varphi' = 37^\circ$.

Desde el punto de vista de conservador se toma un valor de 37° y un valor equivalente de cohesión de 0.003 MPa y un coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$.

Módulo de deformación

Para el cálculo de los módulos de deformación se pueden seguir las siguientes correlaciones:

- Wrech y Nowatzki (1986) $E = 2.22 \cdot N_{SPT} \cdot 0.888$ (MPa)
- D'Appolonia et al. (1970) $E = 7.56 \cdot N_{SPT} + 187.5$ (kg/cm^2)
- Bowles (1988) $E = 7.5 + 0.5 \cdot N_{SPT}$ (KPa)

Por experiencia existente en este tipo de material y vista la formulación anterior se toma un valor medio del módulo de $E = 100$ MPa.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad entre 10^{-3} y 10^{-4} cm/s, lo que implica una permeabilidad que varía de muy permeable a semipermeable. La porosidad de estos materiales es primaria y es originada por la porosidad intergranular del mismo.

4.4.3.7. Zonas de fallas

Se incluye a las zonas de cizalla, alta fracturación que constituyen en los tramos más singulares de debilidad del macizo rocoso, con un RMR menor a 20 y en el cálculo geotécnico se lo trata como materiales elementos granulares sueltos.



Fotografía 26. Vista de la zona de cizalla. Sondeo PTB-01.

Así, a partir de los materiales testificados en los sondeos y de la experiencia existente sobre este tipo de materiales se reconoce un terreno constituido fundamentalmente roca andesítica altamente fracturada con resistencia de roca blanda y tramos cizallados representados con resistividades bajas.

Los tramos de andesita falladas se exhiben altamente fracturadas, con RQD menores a 20, RMR menor a 20, caracterizada como un macizo rocoso de muy baja calidad. Estos tramos se constituyen en vías por donde pueden circular importantes caudales de agua. Los tramos cizallados engloban: tobas y flujos piroclásticos, con una matriz limosa y arena limosas, saturadas, con comportamiento de suelos blandos.

Caracterización geotécnica

Para el cálculo de los parámetros geotécnicos que caracterizan este material (densidad relativa, ángulo de rozamiento y módulo de deformación), consideramos un valor de NSPT = 25 golpes (establecido como valor representativo de este material por la experiencia existente), un valor de densidad $\gamma = 1.9 \text{ t/m}^3$.

Densidad relativa

La densidad relativa puede calcularse, según la fórmula:

$$D_r = 25 \cdot N^{0.44} \cdot P_{VM}^{-0.13} \quad \text{Torrijo (2006)}$$

Siendo:

- Dr: Densidad relativa.
- N: valor del SPT.
- P_{VM} : presión vertical efectiva en el punto de ensayo, en KPa.

Con todo ello, y a las profundidades del túnel, se obtienen valores de densidad relativa superiores a $D_r = 33\%$.

Ángulo de rozamiento interno

Para calcularlo podemos utilizar varias correlaciones:

- Schmertmann (1977) $\varphi' = 38 + 0.08 \cdot Dr$ (1)
- Giuliani y Nicoll (1982) $tg(\varphi') = 0.575 + 0.361 \cdot Dr^{0.866}$ (2)
- Muromachi (1974) $\varphi' = 20 + 3.5 \cdot \sqrt{N}$ (3)

Considerando un valor de $Dr = 45\%$ y de $NSPT = 50$ golpes se obtienen los siguientes resultados:

- (1) $\varphi' = 40^\circ$
- (2) $\varphi' = 35^\circ$
- (3) $\varphi' = 38^\circ$

Tomando el valor más conservador de los calculados, y reduciéndolo por la alta heterogeneidad del material y por la sobrevaloración del golpeo que pueden inducir los bloques de mayor tamaño, el ángulo de rozamiento interno característico de este material es de $\varphi' = 35^\circ$.

Desde el punto de vista de conservador se toma un valor de 35° y un valor equivalente de cohesión de 0.002 MPa y un coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$.

Módulo de deformación

Para el cálculo de los módulos de deformación se pueden seguir las siguientes correlaciones:

- Wrech y Nowatzki (1986) $E = 2.22 \cdot N_{SPT} \cdot 0.888$ (MPa)
- D'Appolonia et al. (1970) $E = 7.56 \cdot N_{SPT} + 187.5$ (kg/cm^2)
- Bowles (1988) $E = 7.5 + 0.5 \cdot N_{SPT}$ (KPa)

Por experiencia existente en este tipo de material y vista la formulación anterior se toma un valor medio del módulo de $E = 60$ MPa.

Caracterización de la permeabilidad del macizo rocoso

Esta formación presenta un coeficiente de permeabilidad entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s, lo que implica una permeabilidad que varía de permeable a semipermeable. La porosidad de estos materiales es primaria y es originada por la porosidad intergranular del depósito.

4.5. CONCLUSIONES

De la caracterización geotécnica realizada se puede concluir lo siguiente:

- El terreno es heterogéneo, lo que seguro condicionará la excavación, pues cada material presenta unos parámetros geomecánicos distintos.
- El terreno está compuesto tanto de materiales con calidad buena como de otros con calidad muy mala e, incluso, algunos están "fuera de clase".
- De todos los materiales presentes en el terreno, las andesitas son las que presentan una mayor Resistencia a Compresión Simple (177 MPa), con lo que parece lógico que el estudio de la excavación sea en referencia a ellas, pues será el que condicione la excavación.
- El cuadro resumen con los parámetros geomecánicos más importantes es el siguiente:

CUADRO RESUMEN TIPOS DE ROCA Y PARÁMETROS GEOMECÁNICOS					
MATERIAL	RMR	Q (CALIDAD)	GSI	R.C.S. (MPa)	R. TRACCIÓN (MPa)
Andesitas	60	7 (Buena)	55	177	9
Tobas brechosas	35	1 (Muy mala)	30	5	-
Andesitas fracturadas	30	1 (Muy mala)	25	65	8
Areniscas, tobas y limolitas	32	0.7 (Muy mala)	27	17	-
Zonas de fallas	<20	FC	FC	-	-

Tabla 27. Cuadro resumen tipos de roca y sus parámetros geomecánicos.

5. ESTUDIO DE SOLUCIONES

5.1. Objeto del estudio

El objeto del presente estudio de soluciones es relacionar los resultados de la caracterización geológico – geotécnica, en especial los parámetros obtenidos de las clasificaciones geomecánicas, con los diferentes métodos de estimación de la excavación de la obra a realizar para poder obtener unas alternativas a estudiar y, posteriormente, realizar la elección adecuada de la maquinaria de excavación.

5.2. Estudio de recomendaciones de excavación para el terreno

A partir de la caracterización geomecánica y geotécnica del terreno realizada en el Capítulo nº 4, se han planteado distintos tipos de excavación. En un principio, se ha seguido la recomendación de Bieniawski (1989), que asocia a cada tipo de terreno el tipo de excavación, válido para túneles tipo con sección en herradura, con anchura máxima de 10 metros y una tensión vertical máxima de 25 MPa:

- Terreno Clase II ($61 < RMR < 80$):
 - Excavación: En avance. Sección completa. Avance de 1 a 1,5 metros.
- Terreno Clase III ($41 < RMR < 60$):
 - Excavación: En avance y destroza. Avance de 1,5 a 3 metros.
- Terreno Clase IV ($21 < RMR < 40$):
 - Excavación: En avance y destroza. Avance de 1,0 a 1,5 metros.
- Terreno Clase V ($20 < RMR$):
 - Excavación: En múltiples fases, con pases de 0,5 a 1,5 metros en fase de avance.

Se presenta un resumen con los materiales presentes donde se va a excavar el tramo del túnel y sus resultados en las clasificaciones geomecánicas, así como la clase de terreno y el tipo de excavación recomendada por Bieniawski (1989). Las andesitas, al estar en el límite de Clase de Terreno, se ha optado por los pases de avance de la Clase II, iguales a los de la clase IV.

CUADRO RESUMEN TIPOS DE ROCA Y TIPO EXCAVACIÓN					
MATERIAL	RMR (CLASE)	Q (CALIDAD)	GSI	EXCAVACIÓN	
				FASES	PASES AVANCE (m)
Andesitas	60 (III)	7 (BUENA)	55	Avance	1.0 – 1.5
Tobas brechosas, areniscas, andesitas fracturadas	35 – 30 (IV)	1 (MUY MALA)	30 - 25	Avance y destroza	1.0 – 1.5
Flujos piroclásticos, aglomerados, lahares, escorias	≤ 20 (V)	FC	FC	Múltiple	0.5 – 1.5
Fallas y zonas de cizalla	≤ 20 (V)	FC	FC	Múltiple	0.5 – 1.5

Tabla 28. Cuadro resumen de tipos de roca y estimación de la excavación. FC (Fuera de Clase).

Según Romana (2000a), la excavación de los materiales va a poder realizarse mediante voladura o rozadora de tipo medio para los materiales rocosos (andesitas) y mediante pala excavadora y puntualmente martillo para aglomerados, lahares y flujos piroclásticos, tobas brechosas, areniscas y limolitas, como se puede observar en la siguiente figura.

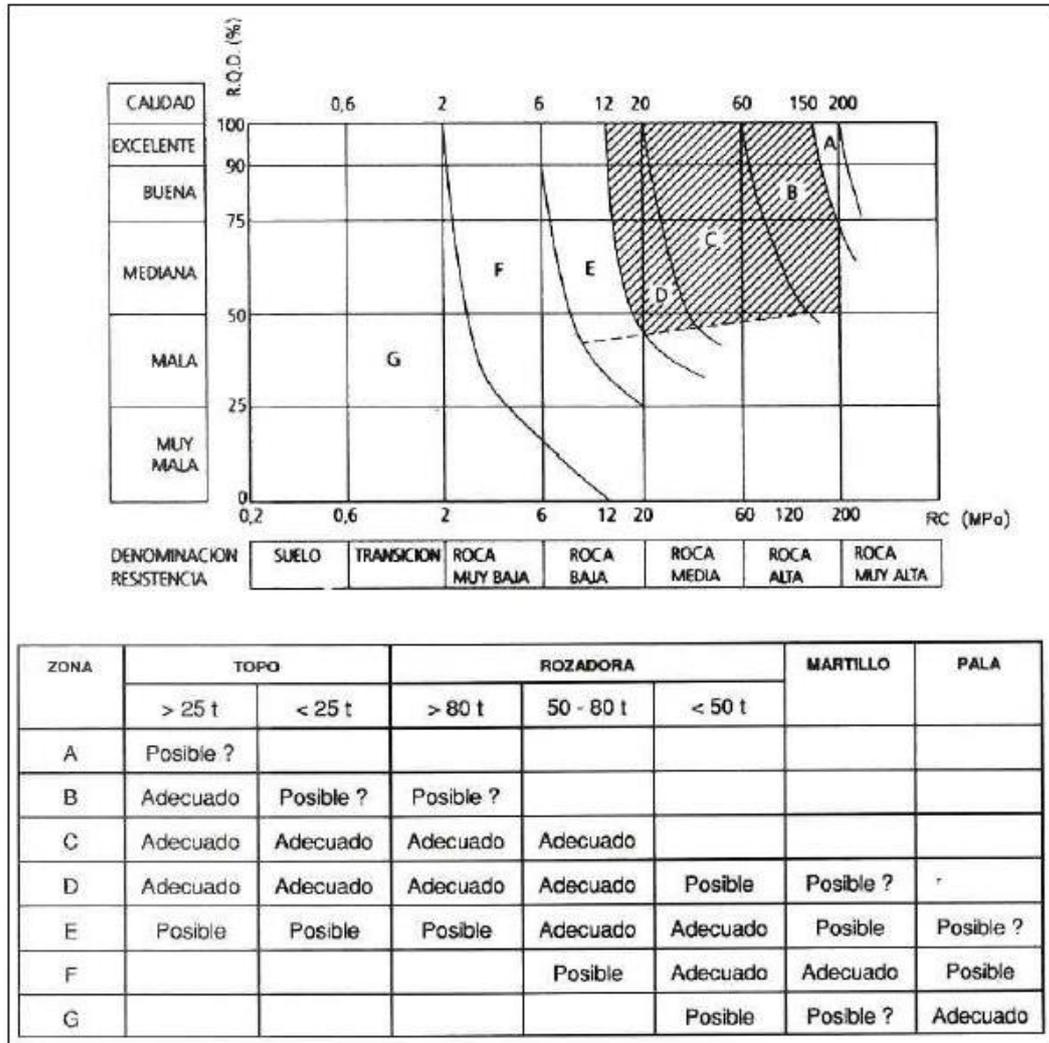


Figura 25. Recomendaciones de excavabilidad para túneles. Fuente: Romana (2000a)

En cuanto a estabilidad de la excavación, la resistencia y fracturación de los materiales indican la posibilidad de excavación en avance y destroza, con las siguientes longitudes de pase:

- Sección tipo I (Andesita): longitud de pase del orden de 4 m.
- Sección tipo II (Toba brechosas, areniscas tobáceas, tobas, limolitas y andesitas fracturadas): longitud de pase del orden de 1'0 m.
- Sección tipo III (Aglomerado, flujos piroclásticos, lahares y andesitas alteradas): longitud de pase del orden de 0,75m.
- Sección tipo IV y V (Zonas de falla y emboquille): longitud de pase del orden de 0'75 m.

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	
		MÁXIMA	RECOMENDADA			
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA	TBM ABIERTO VOLADURAS ROZADORA	
90	I b		≥ 5			
80	II a	16.0	≥ 5			
70	II b	9.5	4/6			
60	III a	6.0	3/4			
50	III b	4.0	2/3			
40	IV a	2.5	1/2			GALERÍA DE AVANCE GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABO VEDA ESCUDO FRESADO ESCARIFICACIÓN/PALA
30	IV b	1.75	1			
20	V a	1.0	0,5/0,75			
10	V b		0,5			
0						

Notas:

- 1 La unidad para el pase es el metro (m)
- 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
- 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
- 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

Figura 26. Recomendaciones de longitudes de pase según clase de terreno. Fuente: Romana (2000b)

5.3. Métodos de estimación de excavación de los materiales andesíticos

En este punto se pretende obtener una visión general acerca de la selección del método de excavación mediante la ayuda de los métodos de estimación de la misma (y su correspondiente estudio). A partir de este momento, se estudiarán únicamente los materiales andesíticos: las andesitas (agrupando sus distintos tipos) y las andesitas fracturadas (por su característica fractura que implica un cambio de comportamiento respecto a la “no rota”).

Las características del terreno condicionarán la excavabilidad pudiendo realizarse la excavación mediante medios mecánicos en suelos no cementados y rocas muy meteorizadas o, sino es ese caso, mediante ripado o voladura. Cabe destacar el concepto de ripabilidad, que es concretamente el alcance del TFG (ripabilidad de los materiales andesíticos) porque la elección de una u otra técnica está condicionada por ella, dada su importante repercusión económica en el proyecto de obra del túnel.

Una roca es ripable cuando puede ser excavada por medios mecánicos sin utilizar explosivos. Depende de los siguientes parámetros del macizo:

- Resistencia a compresión simple de la roca.
- Resistencia a tracción.
- Velocidad de propagación de ondas sísmicas en el medio rocoso.
- Grado de fracturación del macizo (RQD).
- Características de las discontinuidades: espaciado, continuidad, abertura, etc.
- Estructura y estratificación de la roca, alternancia de niveles de distinta competencia, etc.

La excavabilidad de un túnel en roca dependerá también de:

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Dureza y abrasividad.
- Fracturación.
- Índices de calidad geomecánica.

Para ello, como se ha indicado al inicio del apartado, se han aplicado distintos criterios o métodos para estimar la excavabilidad y que dependen de los anteriores parámetros. Como se podrá observar, dichos criterios se complementan entre ellos.

Los criterios que se han estudiado han sido los relacionados a la excavación de taludes (los más usados por regla general), junto a dos criterios introducidos a lo largo del siglo XX, que son únicamente para excavación de túneles en roca: el índice Schimazek y el índice Cerchar.

5.3.1. Criterios de excavabilidad

5.3.1.1. Velocidad de ondas sísmicas

Del estudio geofísico estudiado en el Capítulo nº 4 se vuelve a mostrar la tabla que nos muestra el criterio general de ripabilidad según las velocidades de las ondas sísmicas:

CRITERIO GENERAL DE RIPABILIDAD SEGÚN VELOCIDAD DE LAS ONDAS SÍSMICAS	
VELOCIDAD SÍSMICA (m/s)	EXCAVABILIDAD
<1500	Rocas excavables con mototraíllas, excavadoras o tractores. No precisan voladura.
1500-2000	Ripado fácil. Excavación de estratos sin volar, algo difícil para excavadoras o tractores con riper.
2000-2500	Ripado algo costoso. Voladuras ligeras (grandes longitudes de retacado, bajos consumos específicos).
2500-3000	Se precisan voladuras ligeras. Prevoladuras.
>3000	Voladuras importantes (esquemas de perforación cerrados, pequeñas longitudes de retacado, altos consumos específicos)

Tabla 29. Criterio general de ripabilidad basado en la velocidad de las ondas sísmicas. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo.

Además, de dicho estudio se puede concluir que las andesitas se encuentran en el nivel geofísico 4, donde las velocidades de ondas oscilan entre los 2000 m/s y los 2500 m/s, con rangos medios cercanos a los 2300 m/s. En este nivel, además, se encuentran en el límite de la cementación y con un grado de alteración III a IV, es decir, de moderadamente meteorizado a fuertemente meteorizado.

Según el criterio general de ripabilidad según las velocidades de ondas sísmicas, al encontrarnos en el rango 2000 – 2500, la excavación constaría de “*ripado algo costoso y/o voladuras ligeras*”.

5.3.1.2. Índice de excavabilidad de HADJIGEORGIU y SCOBLE

Este índice nos muestra la facilidad de excavación “*propia mente dicha*”. Este índice se basa en la resistencia de la roca a carga puntual, cuyo valor es la resistencia a compresión simple dividido por 24, el índice de juntas/m³ (Jv), el estado de alteración y la disposición estructural relativa. Cada uno de estos parámetros obtiene una valoración recogida en “*Ingeniería Geológica de González de Vallejo*”, que son los valores que se usarán en la siguiente fórmula y de cuyo valor final Hadjigeorgiou y Scoble sugieren la facilidad de excavación:

Índice de excavabilidad HADJIGEORGIU y SCOBLE

$$IE = (Is+Bs) \cdot W \cdot Js$$

Andesitas	
IE	22.4
Is = Resist. de la roca a carga puntual (PLT)	25
Bs = Índice tamaño bloque	15
W = Índice alteración	0.8
Js = Índice disposición estructural relativa	0.7

Facilidad de excavación	Fácil
-------------------------	-------

Parámetros	Estado/Valor	Valoración
Resistencia bajo carga puntual Is50 (Mpa)	7.375	25
Tamaño de bloque Jv (juntas/m ³)	13.636	15
Alteración	Moderada	0.8
Disposición estructural relativa	Favorable	0.7

Andesitas fracturadas	
IE	19.6
Is = Resist. de la roca a carga puntual (PLT)	20
Bs = Índice tamaño bloque	15
W = Índice alteración	0.8
Js = Índice disposición estructural relativa	0.7

Facilidad de excavación	Muy fácil
-------------------------	-----------

Parámetros	Estado/Valor	Valoración
Resistencia bajo carga puntual Is50 (Mpa)	2.708	20
Tamaño de bloque Jv (juntas/m ³)	25.758	15
Alteración	Moderada	0.8
Disposición estructural relativa	Favorable	0.7

Tabla 30. Facilidad de excavación de los materiales andesíticos. Fuente: Elaboración propia.

Visto el resultado, el índice nos indica que sí se podrá realizar la excavación sin necesidad de voladura, dado que resultará “fácil” en el caso de las andesitas y “muy fácil” en de las andesitas fracturadas.

5.3.1.3. Excavabilidad en función de la resistencia

Basándose en la resistencia uniaxial y el espaciado de las discontinuidades se puede diferenciar la excavación por voladuras y la excavación por medios mecánicos en la siguiente figura:

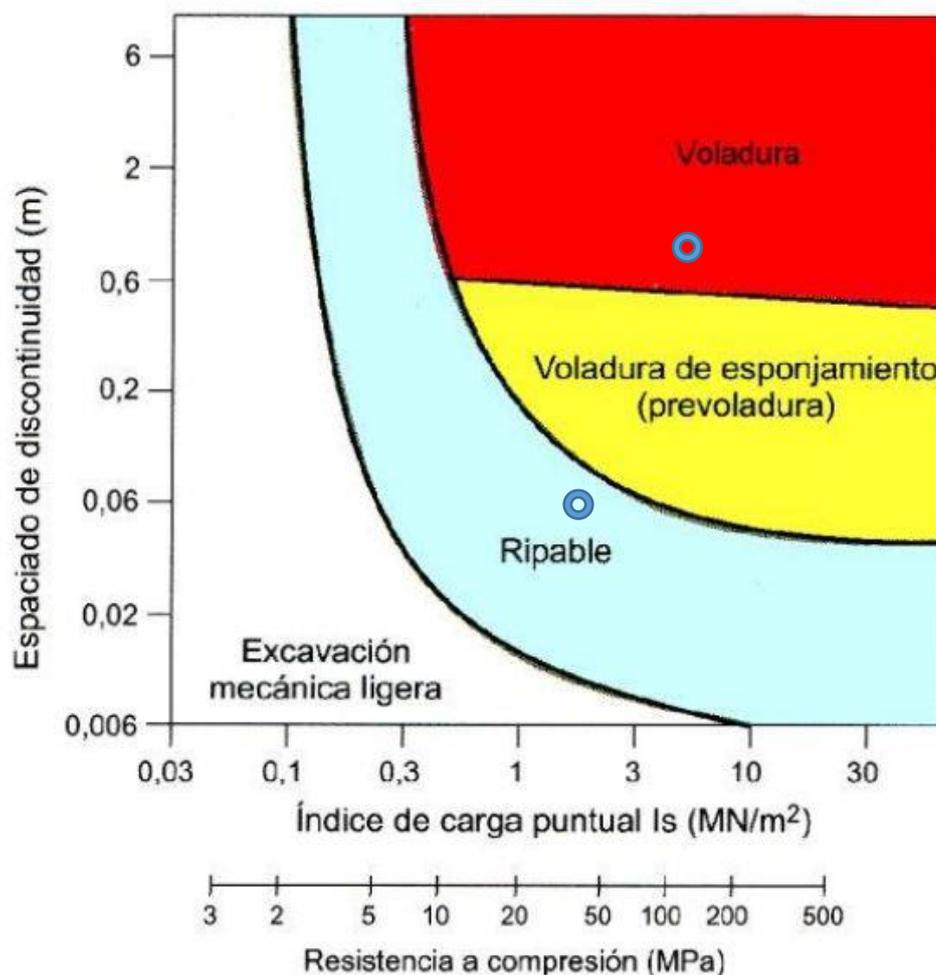


Figura 27. Clasificación de rocas para su excavabilidad. Fuente: Franklin (1974).

Como se puede observar en la figura, según esta clasificación las andesitas (que cuentan con un índice de carga puntual de 7.375 y un espaciado de discontinuidad de 1 metro) entrarían en el ámbito de requerir voladura, mientras que las andesitas fracturadas (con índice de carga puntual de 2.71 y espaciado de discontinuidad de 0.06 m) serían ripables.

Además, también se puede estimar la rozabilidad (facilidad para excavar un túnel con rozadoras) en función de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa y la resistencia a tracción:

- Rocas fácilmente rozables: $\sigma_t / \sigma_{ci} < 0.1$
- Rocas difícilmente rozables: $\sigma_t / \sigma_{ci} > 0.1$

EXCAVABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA

Andesitas			Estimación de la rozabilidad
R.C.S.	σ_{ci} (Mpa)	177	Rocas fácilmente rozables
R.T.	σ_T (Mpa)	9	

Andesitas fracturadas			Estimación de la rozabilidad
R.C.S.	σ_{ci} (Mpa)	65	Rocas difícilmente rozables
R.T.	σ_T (Mpa)	8	

Tabla 31. Estimación de la rozabilidad en los materiales andesíticos. Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.4. Excavabilidad en función de la abrasividad

Aparece por primera vez la abrasividad, que es la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante el proceso de rozamiento. Tiene mucha importancia en el comportamiento de cualquier medio mecánico de excavación, ya que la velocidad a la que se reemplaza o repara la herramienta de corte y el tiempo de inactividad de la máquina influyen en los costos totales.

Hay dos índices que evalúan la abrasividad: el índice Schimazek y el índice Cerchar.

Índice Schimazek

El método de Schimazek, que se basa en una fórmula donde intervienen la resistencia a tracción, el tamaño medio del grano de mineral y el porcentaje de cuarzo equivalente, depende de éste último aspecto, que es complicado de calcular y puede dar diversas dificultades. Es de gran importancia para valorar el desgaste de los cabezales de los equipos de perforación y excavación.

La fórmula de cuarzo equivalente es la siguiente:

$$\text{Cuarzo equivalente} = 1 * Q + 0.3 * F + 0.04 * P + 0.03 * C$$

Siendo:

- Q: contenido en cuarzo (%).
- F: contenido en feldespato (%).
- P: contenido en minerales arcillosos (%).
- C: contenido en carbonatos (%)

El valor del contenido en cuarzo equivalente se ha obtenido de la media de los valores obtenidos en el estudio de la composición modal de las distintas muestras de materiales andesíticos. Así pues, estos son los resultados:

ÍNDICE SCHIMAZEK ($F = Q \cdot d_{50} \cdot \sigma T$)

Andesitas	
F = Coeficiente de abrasividad (N/mm)	0.227
F (en kp/cm)	0.231
Q = Contenido en cuarzo equivalente en minerales abrasivos (%)	1.682
d50 = Diámetro medio del cuarzo (cm)	0.015
σT = Resistencia a tracción (N/mm ²)	9

Rozabilidad	Muy buena
-------------	-----------

Andesitas fracturadas	
F = Coeficiente de abrasividad (N/mm)	0.202
F (en kp/cm)	0.206
Q = Contenido en cuarzo equivalente en minerales abrasivos (%)	1.682
d50 = Diámetro medio del cuarzo (cm)	0.015
σT = Resistencia a tracción (N/mm ²)	8

Rozabilidad	Muy buena
-------------	-----------

Tabla 32. Estudio de la rozabilidad de los materiales andesíticos. Fuente: Elaboración propia.

El índice Schimazek relaciona, pues, el grado de abrasividad con la rozabilidad indicándonos que el uso de rozadoras sería muy propicio, pero no especifica la clasificación de la abrasividad a partir del cálculo del coeficiente F como sí lo hace el índice Cerchar, que se explicará a continuación.

Índice Cerchar

Se ha determinado mediante el ensayo Cerchar, que estima la abrasividad. El ensayo consiste en medir el diámetro (décimas de milímetro) de la superficie circular producida por el paso de una aguja en una muestra. De las muestras estudiadas (todas andesitas) se puede concluir lo siguiente:

Muestra	Índice Cerchar (CAI)	Abrasividad de rocas a partir de CERCHAR
Promedio TB	2.47	Poco abrasiva
Promedio TT	2.41	Poco abrasiva
Promedio VC	2.309	Poco abrasiva
Promedio total	2.391	Poco abrasiva

Tabla 33. Estudio de la abrasividad de los materiales andesíticos. Fuente: Elaboración propia.

El resultado medio de los valores CAI evidencia una abrasividad que no llega a 2,5 donde empezaría una abrasividad media, aunque diferentes muestras sí llegan a superarlo pudiéndose ver que el promedio TB posee un valor muy cercano a 2,5.

5.3.1.5. Índice de ripabilidad de SINGH y DENBY

Combinándose con el índice de Hadjigeorgiou, este índice nos mostrará la ripabilidad del macizo rocoso estudiado. Éste índice se basará en la resistencia a tracción del macizo rocoso, del grado de alteración, del grado de abrasividad y del espaciado de las discontinuidades. Al igual que en el anterior índice, cada parámetro recibe una valoración, siendo el índice total la suma de las

valoraciones, lo que nos mostrará el resultado sugerido por Singh y Denby. En el cálculo se ha optado por un grado de abrasividad bajo, que es el que se ha obtenido del índice Cerchar:

Índice de ripabilidad SINGH y DENBY

IR = Suma Valoraciones

Andesitas	
Índice ripabilidad	61
Resistencia a la tracción (Mpa)	10
Grado de alteración	10
Grado de abrasividad	6
Espaciado de las discontinuidades	35

Ripabilidad	Difícil
Tipo retroexcavadora recomendada	Pesada
Potencia (kW)	250 - 350
Peso (t)	35 - 55

Parámetros	Estado/Valor	Valoración
Resistencia a tracción (Mpa)	9	10
Grado de alteración	Moderado	10
Grado de abrasividad	Bajo	6
Espaciado de las discontinuidades (m)	1	35

Andesitas fracturadas	
Índice ripabilidad	41
Resistencia a la tracción (Mpa)	10
Grado de alteración	10
Grado de abrasividad	6
Espaciado de las discontinuidades	15

Ripabilidad	Moderada
Tipo retroexcavadora recomendada	Media
Potencia (kW)	150 - 250
Peso (t)	25 - 35

Parámetros	Estado/Valor	Valoración
Resistencia a tracción (Mpa)	8	10
Grado de alteración	Moderado	10
Grado de abrasividad	Bajo	6
Espaciado de las discontinuidades (m)	0.06	15

Tabla 34. Estudio de la ripabilidad de los materiales andesíticos. Fuente: Elaboración propia.

De este resultado se observa que la ripabilidad, a pesar de una excavabilidad "fácil", será difícil en las andesitas, algo que concuerda con el criterio de excavabilidad de las velocidades de ondas sísmicas, y algo menos dificultoso en las andesitas fracturadas, evidenciándose la diferencia entre ellas.

5.4. Estudio de diferentes alternativas

En este apartado se procede al estudio de los métodos más utilizados para la excavación de túneles en roca, que son la perforación y voladura y la excavación mecanizada (ya sea rozadoras, retroexcavadoras con martillos hidráulicos o tuneladoras), siendo éstas las alternativas a estudiar. Pero antes de ello, se introducen los condicionantes técnicos que influirán en la elección final del tipo de excavación.

5.4.1. Condicionantes técnicos

Como se ha mencionado, se van a describir los condicionantes técnicos que supeditan la elección final del método de excavación. Los condicionantes más importantes son los siguientes:

- De los distintos métodos de estimación de la excavabilidad estudiados se puede concluir que, en gran medida, todos coinciden en que es un macizo rocoso ripable.
- La excavación se pretende realizar con un procedimiento de forma continua lo que, a priori, obtendría una ventaja económica. Es decir, se prioriza la elección de un mismo método de excavación que sirva para el conjunto de materiales andesíticos.

5.4.2. Alternativa 1: Perforación y voladura

El arranque se efectúa con explosivos y se utiliza en rocas de alta resistencia, con velocidad sísmica del orden de $V_p > 2000 - 2500$ m/s, según las condiciones del macizo o cuando las rocas sean muy abrasivas. Es el método más usado y consiste en efectuar unos taladros en el frente de la excavación, cargarlos con explosivos y hacerlos detonar. Uno de los objetivos principales en una buena voladura es evitar un excesivo deterioro en la roca circundante a la excavación. Una voladura inadecuada da lugar a sobreexcavaciones, y caídas de bloques con problemas de estabilidad adicionales. Por ello es preciso efectuar voladuras controladas y técnicas como el precorte, voladuras suaves, etc., que minimicen el daño estructural al macizo. Los tipos de perforadoras son: rotopercutiva (a percusión o a rotación), neumática, hidráulica o con martillo en fondo.



Fotografía 27. Atlas Copco.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ALTERNATIVA 1	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Abarca un amplio rango de rocas (desde tipo medio hasta las de mayor dureza)	Cuanto mayor es la longitud del túnel, su rendimiento económico decrece
Buen avance controlado	Implica un cierto riesgo debido a las voladuras
Es un método versátil (se adapta bien a los cambios de sección, trazados en curva, etc.)	Se necesita a un técnico que controle las voladuras
No influye la abrasividad	Una voladura inadecuada da lugar a sobreexcavaciones o caídas de bloques
Rentable si la longitud es inferior a 1.5 km, dada su reducida inversión inicial	La R.C.S. de la roca debe ser superior a 80 MPa o sino deformará la roca

Tabla 35. Evaluación general de la Alternativa 1. Fuente: Propia.

5.4.3. Alternativa 2: Rozadoras

El arranque se efectúa por medios mecánicos mediante rozadoras, retroexcavadoras con martillos hidráulicos o máquinas tuneladoras. Las rozadoras consisten en unas máquinas de ataque puntual dotadas de un brazo que puede recorrer el frente de excavación, y en cuyo extremo se aloja un cabezal rotatorio provisto de picas, que se encargan del corte. Eficaz en rocas blandas o muy alteradas, terrenos de tránsito o suelos cohesivos y estables. Se suelen usar en suelos heterogéneos, ya que permite dirigir el esfuerzo de la máquina en función del terreno en cada punto.



Fotografía 28. Rozadora.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ALTERNATIVA 2	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Es un sistema que admite una alta mecanización	Su desgaste es mayor dependiendo de la abrasividad que presente el macizo rocoso
No altera prácticamente las características iniciales de la roca	Cuando el RMR del macizo sea superior a 90 se aconseja no usar este método
Presenta una mayor flexibilidad para adaptarse a cualquier cambio de terreno	El peso de la máquina exige una resistencia al hundimiento del terreno adecuada
Su instalación es fácil y económica y no precisa de grandes espacios	Si el contenido equivalente en cuarzo es alto deja de ser rentable
Permite efectuar la excavación en fases, lo que es decisivo en terrenos de mala calidad	Su rendimiento es menor al de las Alternativas 1 y 4

Tabla 36. Evaluación general de la Alternativa 2. Fuente: Propia.

5.4.4. Alternativa 3: Retroexcavadoras con martillos hidráulicos

Permiten la excavación mediante una herramienta de impacto, o martillo picador, situada en el extremo de un brazo articulado. Este método se emplea como auxiliar de las distintas alternativas planteadas.



Fotografía 29. Martillo hidráulico sobre retroexcavadora.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ALTERNATIVA 3	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Bajo coste	No es capaz de excavar rocas que presenten una resistencia media o alta
Gran movilidad (retroexcavadora de cadenas)	Tiene menor ritmo de avance que el resto de alternativas
Ajuste automático de potencia según el terreno	Produce una nube de polvo que afecta negativamente tanto a los operarios como a la propia máquina
Gran flexibilidad	Hay menor seguridad
Permite excavar las rocas blandas o fisuradas sin dañar la estructura en su conjunto	No se debe trabajar hacia los lados de las cadenas de la máquina

Tabla 37. Evaluación general de la Alternativa 3. Fuente: Propia.

5.4.5. Alternativa 4: Tuneladoras

Por otra parte, las tuneladoras (también llamadas TBM: *Tunnel Boring Machine*) excavan una sección completa de forma circular, mediante una cabeza giratoria dotada de discos o picas de corte, a la vez que son capaces de colocar un sostenimiento (si fuese necesario), ya sea de forma provisional o definitiva. Admiten una amplia gama de rocas, aunque con rendimientos peores en rocas de alta resistencia. No son muy recomendables en macizos rocosos heterogéneos, con fallas, zonas con aportes importantes de agua, terrenos plásticos o con altas tensiones. Pueden dividirse en dos grandes grupos: topes y escudos.



Fotografía 30. Tuneladora TBM.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ALTERNATIVA 4	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Buena calidad de producto	No es recomendable en terrenos heterogéneos y/o con presencia de fallas
Industrialización del proceso, que supone un mayor rendimiento	Le falta flexibilidad, ya que el sistema de trabajo es muy rígido
Mejores condiciones de seguridad y salud de los trabajadores	Es un método caro para túneles cortos
Excavan rocas duras o medianas sin demasiadas necesidades de sostenimiento	El tiempo de instalación (puesta y montaje en obra) es largo
Inversión justificada si los túneles son largos	El personal debe estar muy especializado

Tabla 38. Evaluación general de la Alternativa 4. Fuente: Propia.

5.4.6. Elección del tipo de excavación

En este apartado se procederá a elegir el tipo de excavación que parece más adecuado a la obra observando las ventajas e inconvenientes de las distintas alternativas frente a los condicionantes técnicos que se han estipulado.

Cabe explicar que el estudio sigue estando focalizado en el estudio de los materiales andesíticos, pues son los más determinantes, dada su resistencia, en cuanto a la elección del tipo de excavación pero que se elegirá teniendo en cuenta la heterogeneidad del terreno, un condicionante a tener muy en cuenta.

Así pues, en la elección del tipo más adecuado para la presente obra se puede concluir que, al tratarse de un túnel de 1.667 km y, como se acaba de comentar, con un terreno heterogéneo el uso de tuneladoras (alternativa 4) queda descartado. Por otro lado, el martillo hidráulico sobre retroexcavadora (alternativa 3) queda también descartado por no ser capaz de romper las andesitas ya que éstas tienen un valor de resistencia mayor al que puede fracturar el martillo, que está en el orden de unos 20 – 30 MPa.

Así pues, sólo queda decidir entre la perforación y voladura (alternativa 1) y el uso de rozadoras (alternativa 2). Lo preferible sería el uso de la alternativa 2 dado que, a priori, es más económico que la alternativa 1, además de que ésta precisa de un control técnico añadido y aumenta los riesgos de la obra.

El gran inconveniente en este caso respecto al empleo de voladuras es que no serviría para las andesitas fracturadas, ya que el RMR mínimo para su adecuado uso está en el orden de 40 y éstas presentan un RMR de 30. De esta manera, la elección de la alternativa 1 incumpliría el condicionante técnico relativo a realizar de forma continua todo el procedimiento de excavación, al menos, en los materiales andesíticos.

Ya en el apartado 2 (Recomendaciones de excavación), se observa que Romana (2000a) proponía el uso de rozadoras en los materiales andesíticos (dada su resistencia y RQD). Además, a esto se le une los criterios estudiados, donde Schimazek le proporciona una "rozabilidad muy buena" tanto en andesitas como andesitas fracturadas, ya que su coeficiente de abrasividad F no era muy alto. También el índice Cerchar le otorgaba una abrasividad más bien baja y, definitivamente, es el índice de Singh y Denby el que dictamina que la ripabilidad será difícil en las andesitas y moderada en las fracturadas, pero posible. También propone las características de las máquinas, donde la elección óptima en cuanto a potencia y peso sería una rozadora de 250 kW y 35 t, ya que serviría para los dos tipos de andesitas.

Un detalle en el cálculo del índice Schimazek que cabe señalar es que en el cálculo del cuarzo equivalente, las muestras estudiadas sólo constan de minerales arcillosos y como se explica en el "Manual de excavación de túneles con rozadoras" de López Jimeno *et al.* el método de Schimazek "*fue básicamente desarrollado para sedimentos clásticos...*", es decir, "*contienen siempre un porcentaje de cuarzo*". "*Si la muestra de roca no contiene cuarzo, el tamaño medio del grano de cuarzo será considerado como 0 y por tanto F también*".

También señala que "*para evaluar la abrasividad de las rocas cuando se utilizan picas de rozadoras o discos cortadores en las tuneladoras, se ha constatado que el valor del CAI es más apropiado*".

Así pues, se recuerda que las andesitas apenas cuentan con un porcentaje de cuarzo y podría ser ignorado el índice Schimazek, pero como nos dice que la rozabilidad es muy buena y el índice Cerchar nos indica poca abrasividad y no se contraindican, parece que lo más razonable, considerando lo esclarecido previamente, será la elección de **rozadoras** como medio de excavación.

6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA

6.1. Objeto del estudio

El objeto del presente documento es la descripción de la solución óptima para la correcta excavación del túnel en roca, siendo la elección final del estudio de soluciones la alternativa 2: Rozadoras.

6.2. Descripción general de la máquina

Las rozadoras, también llamadas minadoras, son máquinas de excavación que desarrollan el proceso de arranque mediante una cabeza giratoria provista de herramientas de corte de metal duro (picas) que inciden sobre la roca, y que va montada sobre un brazo articulado o extensible. Cuenta además con un sistema de recogida y transporte de escombros desde el frente hacia la parte posterior de la máquina y un conjunto de mecanismos que la dotan de movilidad, estabilidad, etc.

Posee una variedad de ventajas respecto al resto de tipos de excavación como son: la movilidad que poseen (que permite una fácil accesibilidad al frente), la versatilidad y la flexibilidad, pues se adaptan bien a diferentes cambios de secciones, formas y materiales a excavar. No necesitan un excesivo espacio para su montaje, la sobreexcavación es menor respecto al resto y poseen una elevada capacidad de arranque de materiales resistentes y nada o poco abrasivos.

6.2.1. Elementos de la máquina

- Cabezal giratorio que efectúa el rozado mediante picas de fricción
- Brazo articulado, unido por su parte inferior a cuerpo principal de la máquina
- Mesa recolectora para recogida de terreno excavado
- Sistema de desescombro mediante cintas transportadoras
- Equipo de traslación sobre orugas



Fotografía 31. Rozadora.

6.2.2. Tipos de rozadoras

A continuación se recopilan los principales tipos de rozadoras:

- Rozadoras de brazo: gracias al brazo rozador móvil es capaz de barrer todo el frente.
- Rozadoras de tambor: primero penetra y luego arranca en descenso; su uso está muy extendido en la minería de rocas blandas.
- Rozadoras de cadenas: la cabeza de corte consta de un cuerpo portador de una serie de cadenas de corte donde se colocan los elementos portapicas. Apenas se usan en la actualidad ya que se han sido superadas por las anteriores.
- Equipos especiales: son rozadoras especiales diseñadas para trabajos específicos como la excavadora con brazo cortador.
- Minadores a plena sección (Borer): este minador se caracteriza por disponer de dos rotores centrales y está diseñado específicamente para la explotación de rocas blandas.
- Minadores de superficie: se dividen en los que tienen el tambor de corte en fondo y los que lo tienen en su parte frontal y su uso está limitado a la superficie, como su propio nombre indica.

6.2.3. Formas de trabajo: Milling y Ripping

En las rozadoras donde toda la potencia del motor de corte y el peso de la propia máquina se aplican en un único punto o útil de corte, se distinguen dos sistemas de trabajo, según la configuración geométrica y movimiento de la cabeza de corte: cabeza de eje longitudinal o axial (milling) y la cabeza de eje transversal (ripping).

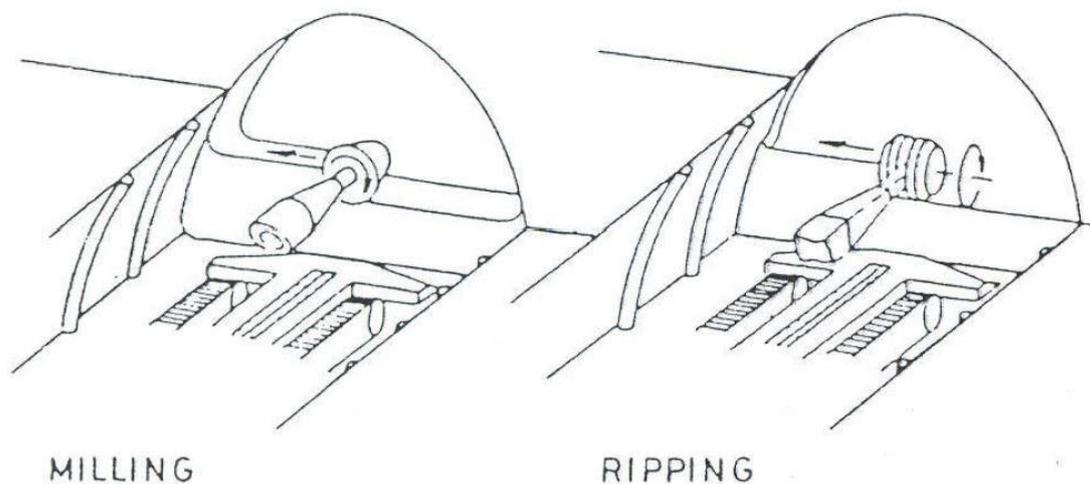


Figura 28. Formas de trabajo de las cabezas de corte.

6.2.3.1. Ataque frontal (*milling*)

En este diseño el eje de giro es perpendicular al frente de excavación, es decir, el ataque es frontal y, por ello, aprovecha mejor su empuje. Las velocidades típicas de la cabeza cortadora varían entre 45 y 100 r.p.m. La fuerza de corte se aplica lateralmente, por lo que no se aprovecha todo el peso del equipo como fuerza de reacción. En rocas duras se debe disponer de unos gatos o cilindros hidráulicos de apoyo para absorber los momentos de giro producidos por el brazo de corte.

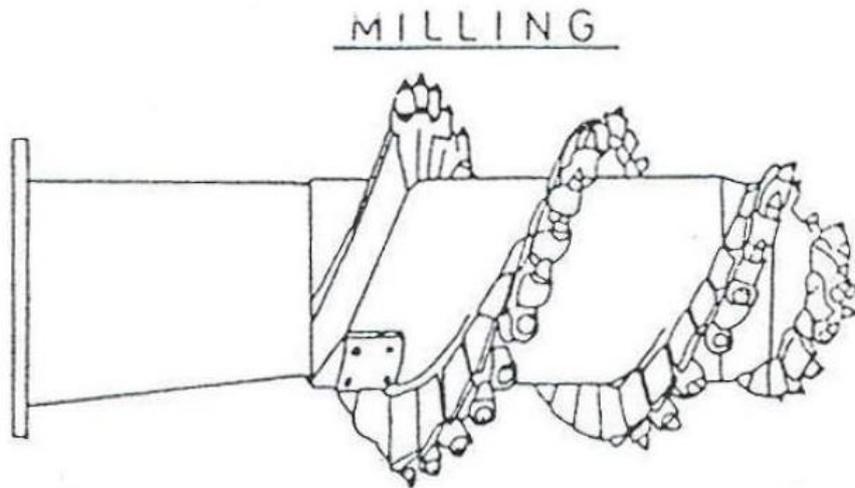


Figura 29. Cabeza de corte de eje longitudinal.

VENTAJAS DEL MILLING FRENTE AL RIPPING
Se adapta mejor a los contornos irregulares, produciéndose menos sobreexcavación, con lo que el perfilado es más perfecto
Desde el punto de vista mecánico la transmisión del motor a la cabeza es más simple
En rocas duras estratificadas o heterogéneas, la cabeza de corte se introduce en las zonas más blandas del frente lo que facilita la excavación lateral
La disposición de las picas es más sencilla, durante el proceso de corte y el movimiento de giro están orientadas en la misma dirección
El rendimiento es mayor, dado que la penetración es un poco más fácil excepto si es necesario anclar la máquina (se pierde tiempo y hace que baje la producción)

Tabla 369. Ventajas del milling. Fuente: Propia.

6.2.3.2. Ataque lateral (*ripping*)

Las cabezas giran alrededor de un eje paralelo al frente. Intervienen tres fuerzas en el arranque por parte de las picas. Las velocidades de las típicas de las cabezas varían entre 20 y 65 r.p.m. El par de corte es proporcionado por el motor que acciona la cabeza de corte. La fuerza horizontal se ejerce con el giro del brazo y la fuerza vertical con el peso de la rozadora.

El par de corte y la fuerza vertical aplicados en las picas realizan los surcos en la roca, mientras que la fuerza horizontal provoca la rotura de la misma entre ellos. Si la roca es blanda, las picas penetran con facilidad y varios útiles cortan simultáneamente, consiguiéndose un rendimiento elevado. Si la roca es muy dura, en cada instante solamente una pica está en contacto con el frente, aprovechando así toda la potencia del motor de corte, todo el peso de la máquina como fuerza de reacción y toda la fuerza de giro del brazo.

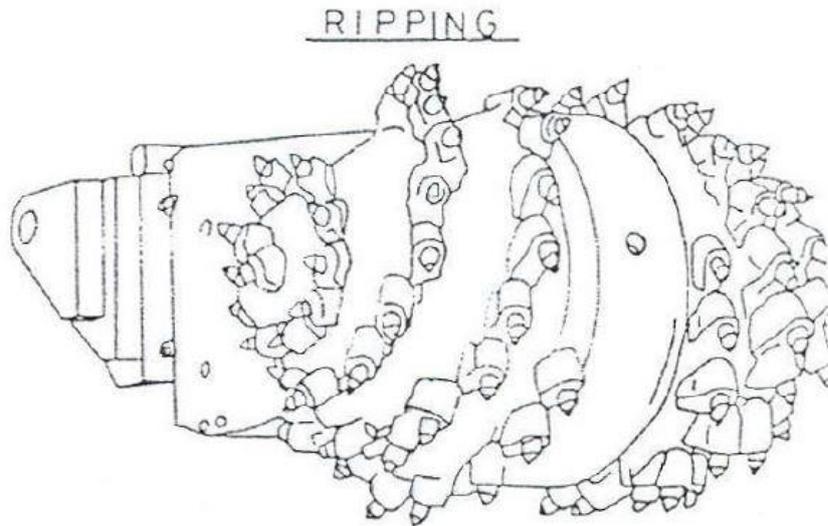


Figura 30. Cabeza de corte de eje transversal.

VENTAJAS DEL RIPPING FRENTE AL MILLING
La máquina es más estable por el esfuerzo simétrico sobre el eje
En rocas blandas la producción es mayor a causa de la doble cabeza
La rozadora se adapta mejor para contornos del frente regulares
El empuje sobre el frente resulta más fácil de conseguir (a igualdad de pesos de la máquina) debido al giro de las cabezas de corte hacia arriba
Se ven menos afectadas por cambios de roca y diferente dureza de la misma
El proceso de corte puede obtener mejores rendimientos en rocas con planos de discontinuidad o diaclasas

Tabla 40. Ventajas del ripping. Fuente: Propia.

6.2.4. Herramientas de corte

Las herramientas de corte o picas son las encargadas de efectuar la rotura o desgarramiento de la roca al aplicar en un punto de ella la energía desarrollada por la máquina. Juegan un papel importante en el proceso de trabajo ya que es el elemento sometido a mayor desgaste. Su geometría, disposición y material de que se compone, influyen enormemente en el rendimiento y durabilidad. Las picas están compuestas por un vástago o mango de acero, con formas diferentes según los tipos, que es la parte que se introduce en el bloque portapicas, y por la punta, en el extremo opuesto, que es el elemento de metal duro que va a estar en contacto con la roca.

Respecto a los tipos de herramientas, existen dos clases: las picas radiales y las picas tangenciales. En general, para rocas blandas se usan las picas radiales (tienen inclinación) y para rocas duras las picas cónicas (meramente tangenciales).

Las picas radiales se caracterizan por tener un filo de corte constituido por una pastilla de carburo de tungsteno o widia mientras que las tangenciales tienen una forma cónica y están especialmente diseñadas para soportar la fricción con la roca. Además, destacan por el resultado de su posición, que se traduce en una mayor durabilidad debido a la rotación de la pica sobre su eje.

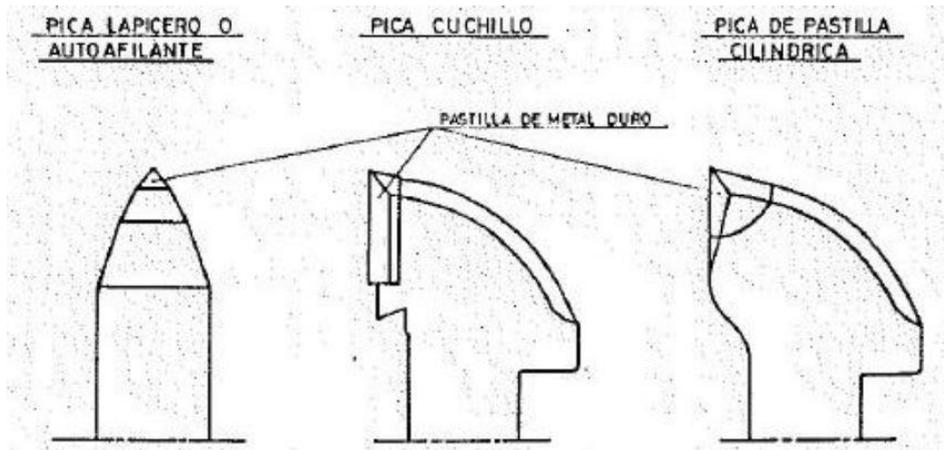


Figura 31. Tipología picas radiales.

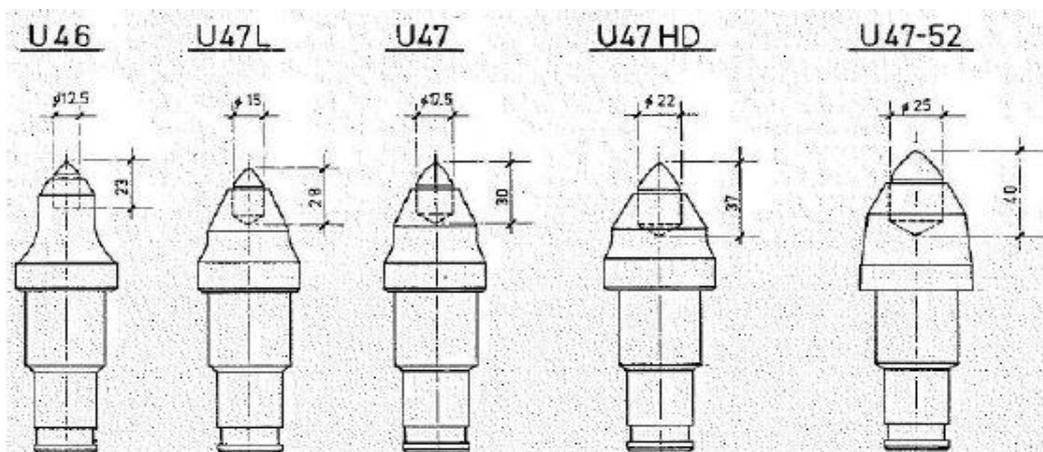


Figura 32. Tipología picas tangenciales.

Respecto al resto de aspectos relativos a las picas se destaca el consumo de picas y el criterio de elección del tamaño de las mismas aunque existen otros detalles como el portapicas y el corte con chorro de agua, dignos de mención.

- Los portapicas son elementos que, soldados a la cabeza de corte, permiten fijar a la misma el utillaje de corte. Las picas se pueden colocar por medio de sus mangos, con anillos de retención o por medio de grapas anulares de montaje rápido.
- La técnica del corte con un chorro de agua, que riega el frente, aparece en las rozadoras más modernas, que busca evitar la generación de polvo, que es fatal para la visibilidad.

6.2.4.1. Consumo y número de picas

En general, se puede decir que el número de picas con el que tiene que estar equipada una cabeza de corte debe ser el menor posible, pero con el mejor desarrollo, es decir, tantas picas como sean necesarias para obtener una forma de corte uniforme y con un funcionamiento suave y continuado de la máquina.

El aumento del número de picas ocasiona un descenso en el rendimiento de corte y propulsión, así como una mayor generación de polvo, mientras que la disminución en el consumo de picas es mínimo.

Por otra parte, una reducción importante del número de picas tiene como consecuencia un mayor esfuerzo específico para el resto de ellas, una reducción de vida útil y la aparición de vibraciones, dañinas para la cabeza de corte y el conjunto de la rozadora.

6.2.4.2. Criterio de elección del tamaño de picas

La longitud normal de cabeza de la pica (calibre) es de 64 a 68 milímetros. Este calibre ha demostrado su eficacia en condiciones difíciles de corte (resistencia superior a 100 MPa, como es el presente caso) mientras que para rocas más blandas una extensión de calibre de 130 milímetros obtendría un rendimiento de corte mayor.

En general, es más económico usar puntas de carburo de menor diámetro cuanto menor sea la resistencia de la roca, dado que gracias a una resistencia pequeña a la penetración, el rendimiento de corte es alto y el consumo de picas es aceptable.

Pero si la resistencia de la roca aumenta, es aconsejable utilizar puntas de carburo de mayor diámetro, ya que la vida de las picas en servicio es más crítica desde el punto de vista económico que la disminución del rendimiento de corte.

En la siguiente figura se adjunta un gráfico realizado por la empresa americana Kennametal, proveedora de herramientas y materiales industriales en la que se relaciona la resistencia a compresión simple del material con el consumo de picas, la eficiencia y las propias líneas curvas que marcan los diámetros a elegir de las puntas de las picas.

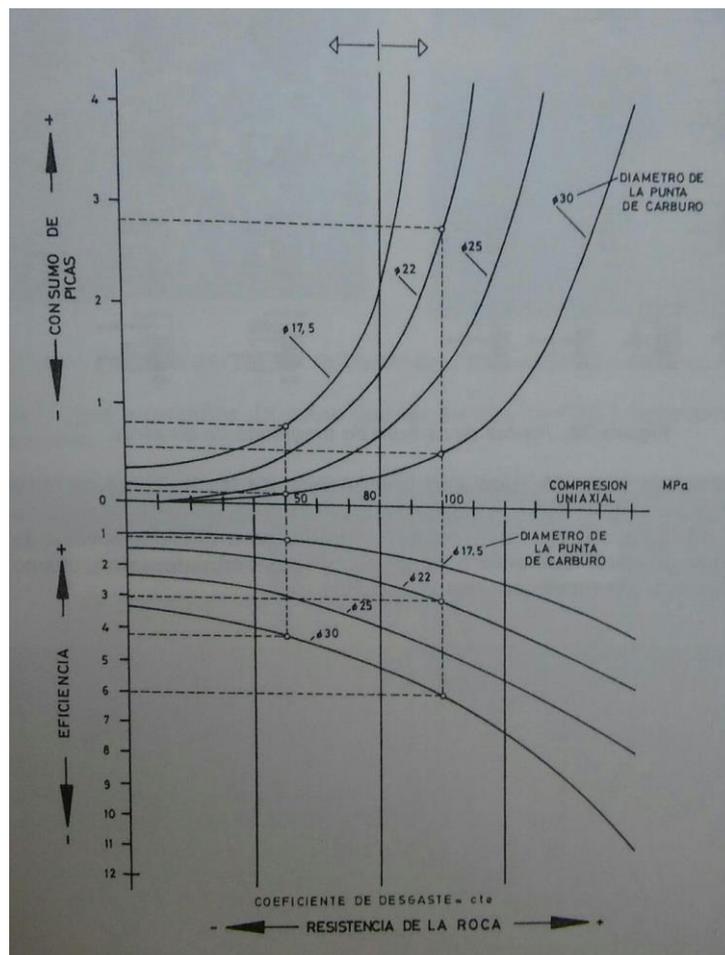


Figura 33. Consumo de picas y eficiencia de rozado en función de la R.C.S. y el diámetro de las puntas de las picas.
Fuente: Kennametal.

6.3. Descripción de la solución seleccionada

Se procede a describir la solución que se ha elegido recabando todo lo explicado anteriormente. Se recalca que es una elección a grandes rasgos de los aspectos generales más importantes. No todos los aspectos relativos han sido estudiados detalladamente pues superaría el alcance del presente TFG.

Expuesto esto, se opta por una rozadora de brazo, ya que su diseño permite movimientos del brazo a izquierda y derecha mientras que con unos cilindros hidráulicos se realiza la elevación y el descenso del mismo. Así pues, de los distintos tipos de rozadoras se escoge por su versatilidad además de ser el más adecuado dada la resistencia del material.

Por otra parte, habiendo determinado las ventajas entre las diferentes cabezas de corte y recordando la alta resistencia a compresión simple de las andesitas (170 MPa) se propone el uso de la cabeza de eje transversal (*ripping*). De las ventajas del *ripping* que determinan su elección se puede citar que se ven menos afectadas por cambios de roca y diferente dureza de la misma (se recuerda que el terreno es heterogéneo y que se consta de andesitas y andesitas fracturadas, cada una con su propia R.C.S.) y que obtiene un mejor rendimiento en rocas con planos de discontinuidad o diaclasas (también es el caso de terreno). Además, en el anterior Capítulo ya se concretó el uso de una rozadora con una potencia del orden de 250 kW (que serviría para el conjunto de materiales andesíticos) con un peso de 35 toneladas.

Respecto a las picas se plantea lo siguiente:

- Se usarán picas tangenciales, ya que son las idóneas para rocas duras.
- El ángulo de ataque (el que se marca en la figura) se recomienda que tenga un valor de 45° . Infiere en la rotación de la pica, la penetración en la roca y la economía de corte.

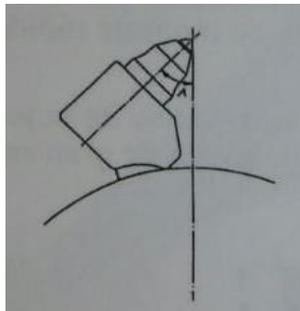


Figura 34. Ángulo de ataque. Fuente: Kennametal.

- El ángulo de oblicuidad (el que se muestra en la figura) debe tener un valor entre 5 y 10 grados. Combinado con el de ataque aumenta la tendencia giratoria de la pica cónica.

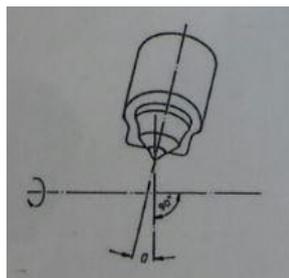


Figura 35. Ángulo de oblicuidad. Fuente: Kennametal.

- Como ya se ha explicado, el terreno presenta una alta resistencia con lo que, observando la figura 33, se plantea el uso de picas con un diámetro de 30 milímetros de la punta de la pica, siendo la única opción viable para el tratamiento de las andesitas y, por ende, al conjunto del terreno.
- Respecto al material de la pica, en la actualidad, la mayoría de puntas de picas son de carburo de tungsteno.



Fotografía 36. Ejemplos de distintas puntas de carburo de tungsteno de picas.

Por último se rememora la elección del método de excavación en el Capítulo 5: excavación en avance y destroza. Es el método de trabajo empleado tradicionalmente en el caso de grandes secciones, como se suelen plantear en la mayor parte de túneles carreteros.

6.4. Valoración económica

En este apartado se pretende obtener la valoración económica del proceso de excavación basándose en el precio por metro cubico, obtenido de la Base de Precios de la Construcción de España, utilizándolo como valor orientativo.

Se destaca que, al tratarse sólo de la propuesta de excavación, no se determina el presupuesto entero de un proyecto tan amplio como sería el proyecto de diseño de un túnel, por lo que lo propuesto en adelante es más bien un tanteo de la elección de la rozadora como maquinaria de excavación.

Así pues, la longitud del túnel de Bombolí propuesto es de 1667 m y la sección tipo que se plantea es la siguiente:

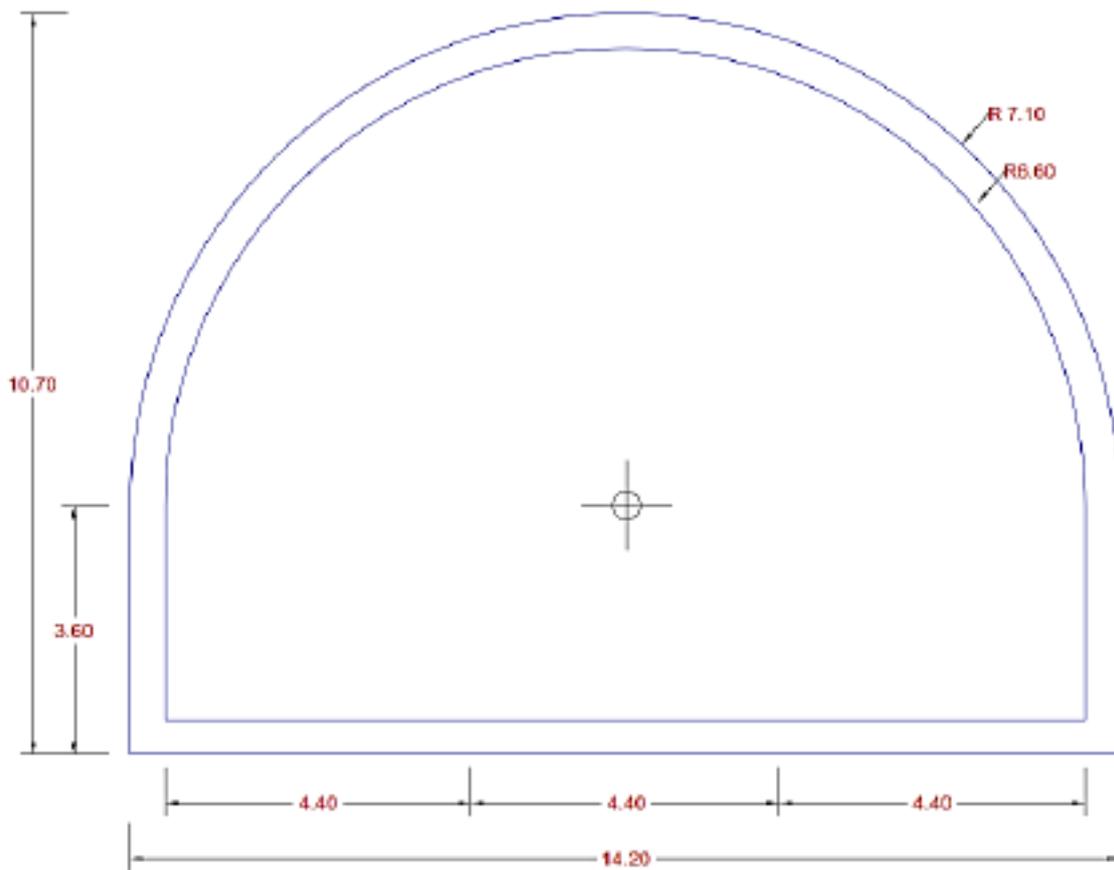


Figura 31. Sección tipo planteada. Fuente: Propia.

Esta sección sólo es utilizada como referencia para calcular el coste de la excavación y no se ha estudiado ni los emboquilles, sostenimiento, impermeabilización, auscultación o drenaje.

El área total de la sección propuesta es de 130.3038 m^2 que, junto a la longitud ya expuesta del túnel de valor 1667 m suponen un volumen total de 217216.435 m^3 . Como se ha mencionado, de diferentes estudios encontrados se ha encontrado el valor asociado, según la Base de Precios de la Construcción en España, a la partida en referencia a la excavación de un túnel mediante una rozadora (incluyendo también la carga y el transporte del material excavado), que asciende a un total de 40.38€ por metro cubico, con lo que el resultado final es 8771199.65 € .

7. CONCLUSIONES

La caracterización de la ripabilidad de los materiales andesíticos presentes en el emplazamiento donde se pretende construir el Túnel de Bombolí es crucial para un correcto desarrollo de la obra y, en este caso, para elegir el método más adecuado para el proceso de excavación.

Desde el punto de vista geológico las pendientes que se presentan en el terreno son adversas, pues las pendientes del tipo “moderada a abruptas” y “abruptas y muy abruptas” representan más del 75% de la superficie. Respecto a los principales riesgos geológicos cabe remarcar que, como gran parte del país de Ecuador, se encuentra en una zona marcada por la actividad sísmica y volcánica, debido a la Geología Estructural de la región que se encuentra cerca de la confluencia entre varias placas tectónicas y del llamado “Anillo de Fuego”, una de las mayores zonas de subducción del mundo. Se destaca que el volcán Cotopaxi, cercano al área de estudio, se calcula que entrará en una erupción de gran magnitud en los próximos 50 años. Además, pueden aparecer deslizamientos en la zona.

Continuando con la Geología Estructural, la zona se ve condicionada por la existencia de dos sistemas de fallas, que repercuten en la formación de tres familias de juntas en el estudio de la Geología Estructural local. De la Geología local se señala la presencia de las siguientes unidades litoestratigráficas: andesitas (agrupadas sus diversos tipos), andesitas fracturadas, tobas brechosas, areniscas, tobas, limolitas, aglomerados, flujos piroclásticos y lahares.

Por último, del estudio hidrogeológico se destaca que la permeabilidad de las unidades litológicas es moderada o, incluso, baja. La relevancia que adquiere dicho estudio está relacionado con la aparición de sistemas acuíferos en la cordillera, dada la cercanía con Los Andes, donde son frecuentes los glaciares. El área de estudio se ha dividido en 4 niveles, según la definición del material existente asociándoles los valores de permeabilidad estudiados.

Respecto a la Geotecnia, el estudio se ha centrado en calcular los diferentes parámetros geomecánicos y clasificarlos para poder realizar posteriormente un análisis de dichos resultados.

De la caracterización geotécnica se puede concluir que el terreno que se presenta es heterogéneo (dada la presencia de varias unidades litoestratigráficas que se han comentado en el estudio de la Geología local). Que dichas unidades litoestratigráficas, al ser estudiadas, han presentado diversos resultados y, en su mayoría, la calidad que presentan es “Muy mala”. Las andesitas son las que mejor calidad y RMR obtienen pero también son las que más resistencia presentan (hasta 177 MPa).

Concluida la descripción geotécnica, se realiza la caracterización de la ripabilidad de los materiales andesíticos, que han sido elegidos como referencia para ello ya que, como se acaba de mencionar, son los que más resistencia ofrecen. Para dicho fin, se efectúa el cálculo de varios índices que ayudarán a obtener una visión general acerca de la adecuada selección del método de excavación.

El término “ripable” define a aquella roca que puede ser excavada por medios mecánicos sin necesidad de utilizar explosivos, pero que en la acción de la propia excavación sufrirá un desgaste.

Los distintos índices que se han calculado ofrecen una serie de resultados del macizo rocoso estudiado. En el estudio de las velocidades de ondas sísmicas, que se ha realizado en la descripción geotécnica, ya se había concluido que la excavabilidad consistiría en un ripado algo

costoso. Del índice de Hadjigeorgiou y Scoble se obtiene que la facilidad de excavación es “Fácil” tanto para las andesitas como para las andesitas fracturadas. Del estudio de la excavabilidad en función de la abrasividad, probablemente el aspecto más importante respecto a la ripabilidad, pues es la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante el proceso de rozamiento, se obtienen dos resultados. Uno se adquiere del índice Schimazek, que augura una rozabilidad “Muy buena” y otro del índice Cerchar, muy importante en todo el estudio, ya que estima la abrasividad de las rocas, que considera que las andesitas son “Poco abrasivas”.

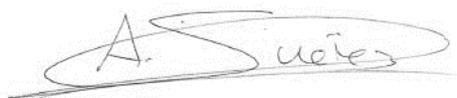
Expuestos los resultados obtenidos de los índices se pueden dictaminar los condicionantes técnicos para decidir el método de excavación. Los condicionantes que se dictaminan son dos: el macizo rocoso es ripable (con lo que no es obligatorio el uso de voladuras) y el procedimiento de la excavación se pretende continua, es decir, utilizando en todo momento el mismo método de excavación (lo que presuntamente sería más económico).

Concretados los condicionantes se explican las distintas alternativas con sus ventajas e inconvenientes. Dichas alternativas son: el uso de perforación y voladura, el uso de rozadoras, el uso de retroexcavadoras con martillos hidráulicos o el uso de tuneladoras. Observando las ventajas e inconvenientes expuestas a lo largo del epígrafe 5.4. “Estudio de diferentes alternativas”, se concluye que la tuneladora no es una elección adecuada debido a que no trabaja bien en terrenos heterogéneos y no es viable económicamente en un túnel corto (menor a 4 km, como es el Túnel de Bombolí) y que el martillo hidráulico sobre retroexcavadora no es capaz de romper las andesitas pues superan sobradamente su umbral de actuación. Además, las voladuras requieren un RMR mínimo de 40 en el lugar donde vayan a ser efectuadas y las andesitas fracturadas no cumplen dicho requisito dado que su RMR es de 30. Con todo lo anterior esclarecido, la solución más adecuada es la elección del uso de rozadoras.

La rozadora que se propone para la excavación debe ser una rozadora de brazo, que será más versátil y maniobrable. Se plantea un uso de cabeza de corte de eje transversal (*ripping*), con una potencia del orden de 250 kW y con un peso de 35 toneladas. Las puntas de las picas de la rozadora deberán tener un diámetro de 30 milímetros y deberían ser de carburo de tungsteno.

Por último, se realiza una valoración económica a grandes rasgos del proceso de excavación. Así pues, gracias a la sección de túnel planteada y a la longitud del túnel se ha podido determinar una estimación del volumen total cercano a un valor de 218000 m³, con lo que si una partida tipo de excavación con rozadora supone un precio de 40.38 €/ m³ en España, el montante del procedimiento ascendería a un valor cercano a los 8.8 millones de euros, es decir, un valor equivalente en Ecuador de unos 10 millones de dólares.

Valencia, Junio de 2017



Fdo: D. Adrián Suárez Rosagaray

8. REFERENCIAS

- Ministerio de Desarrollo Urbano y de Vivienda de Ecuador (2016). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*.
- ASTM (Association for Testing and Materials) (1995). *Norma D4220*.
- ASTM (Association for Testing and Materials). *Norma D5079*.
- Hoek et al. (1995). *Estimación de macizos rocosos en la práctica*.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer Gijón, M., Ortuño Abad, L., & Oteo Mazo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Romana Ruiz, M. (2000a). *Uso de clasificaciones geomecánicas en las boquillas de túneles*.
- López Jimeno, C., Arnaiz de Guezala, R., Torija Maillo, M., & García Bermúdez, P. (2013). *Manual de perforación en túneles*.
- López Jimeno, C., García Bermúdez, P., & Torija Maillo, M. (2012). *Manual de excavación de túneles con rozadoras*.
- Romana Ruiz, M. (2000a). *Uso de clasificaciones geomecánicas en las boquillas de túneles*.
- Ministerio de Fomento de España. (2016). *Base de precios de referencia de la Dirección General de Carreteras*.