



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO BASADO EN LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA POR MÉTODOS EMPÍRICOS DEL TÚNEL VIAL UBICADO EN EL KILÓMETRO 98 + 100 DE LA CARRETERA CASCAS – CONTUMAZÁ”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Hugo Alexander Castañeda Guzmán

Asesor:

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñón

Cajamarca - Perú

2018

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Rafael Napoleón Ocas Boñón, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA DE MINAS, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis del estudiante:

- *Castañeda Guzmán, Hugo Alexander*

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: “*Propuesta de Sostenimiento basado en la Caracterización por Métodos Empíricos del Túnel de vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá*” para aspirar al título profesional de: Ingeniero de Minas por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñón
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis del estudiante: *Hugo Alexander Castañeda Guzmán* para aspirar al título profesional con la tesis denominada: “*Propuesta de Sostenimiento basado en la Caracterización por Métodos Empíricos del Túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá*”.

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán
Jurado
Presidente

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León
Jurado

Ing. Oscar Arturo Vázquez Mendoza
Jurado

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis queridos padres César y Consuelo por brindarme su apoyo, comprensión, amor y educación a lo largo de esta hermosa carrera. También se la dedico a toda mi familia que influyó en mí, para que yo siga adelante en el cumplimiento de mis metas.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes.

Un agradecimiento muy especial a mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

Agradezco a mi asesor por su gran apoyo para la realización y culminación de mi tesis.

Un agradecimiento a todo mis profesores por todo el apoyo brindado y por los conocimientos que me transmitieron a lo largo de mi carrera.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	2
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	16
CAPÍTULO III. RESULTADOS	38
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	54
ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de campo para realizar el levantamiento.....	20
Tabla 2: Datos de laboratorio para calcular la densidad de la muestra.....	25
Tabla 3: Clasificación geomecánica RMR.....	27
Tabla 4: Corrección por orientación de las discontinuidades respecto al eje del túnel.....	29
Tabla 5: Calidad de los macizos rocosos en relación al índice RMR (Bieniawski 1989).....	30
Tabla 6: Sostenimientos a partir del índice RMR.....	34
Tabla 7: Resumen actualizado de los valores recomendados para el factor ESR de determinación de nivel de seguridad.....	35
Tabla 8: Datos y cálculo de la resistencia de las muestras.....	39
Tabla 9: Valor del RMR de cada estación geomecánica.....	40
Tabla 10: Datos de campo de las discontinuidades y la falla presentes en el túnel.....	46
Tabla 11: Caracterización de la roca andesita.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del Túnel en estudio.	19
Figura 2: Datos obtenidos en cada Estación Geomecánica.	21
Figura 3: Muestra de roca extraída del Túnel.	22
Figura 4: Ensayo a la compresión simple de las muestras.	23
Figura 5: Tomando el peso de la muestra.	25
Figura 6: Gráfico general para estimar el GSI a partir de observaciones geológicas.	33
Figura 7: Ábaco para determinar empíricamente el sostenimiento propuesto por Barton y Bieniawski. Barton & Grimstad, 2000.	36
Figura 8: Obtención de la resistencia a compresión simple mediante el Martillo Schmidt.	38
Figura 9: Determinación del tipo de sostenimiento.	45
Figura 10: Nueva determinación del tipo de sostenimiento.	50

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Relación para encontrar la resistencia de la roca.	23
Ecuación 2: Relación para hallar el valor del peso específico.	25
Ecuación 3: Cálculo de RQD.	28
Ecuación 4: Relación para encontrar el valor ϕ	30
Ecuación 5: Correlación hecha por Bieniawski para encontrar el índice Q.	31
Ecuación 6: Correlación hecha Barton para encontrar el índice Q.	31
Ecuación 7: Relación para hallar el diámetro equivalente.	35

RESUMEN

La presente investigación de tesis está desarrollada dentro del departamento de Cajamarca, provincia de Contumazá, distrito de Contumazá en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá; tiene objetivo realizar una propuesta de sostenimiento para la estabilidad del túnel basado en la caracterización del macizo rocoso.

Así mismo, cabe indicar que dicho estudio realizado ha permitido obtener los parámetros y propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso del túnel que presenta un tipo de roca ígnea volcánica: andesita. Consecuentemente obtener directamente la calidad de la roca y su clasificación geomecánica mediante los índices RMR de Bieniawski y Q de Barton, lo cual, será un indicador importante para la propuesta del sostenimiento a utilizar.

La caracterización geomecánica de la zona del túnel dio como resultado la calidad del macizo rocoso, según RMR_{89} , una roca buena (II) y con la correlación hecha con el Q indica una roca media o regular a buena. Por con siguiente, se aplicará el sostenimiento de acuerdo a los sistemas de clasificación controlando los peligros por desprendimiento de rocas y elevando el factor de seguridad en el túnel carretero.

Palabras clave: Macizo rocoso, caracterización geomecánica, sostenimiento.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Dentro del amplio mundo de la ingeniería está la construcción de los túneles en roca y suelos, su uso tiene diversos propósitos, siendo uno de ellos en el tema de transporte, es por lo cual se ha intensificado su construcción. Los túneles se aplican tanto para construcciones civiles y también se utilizan en el campo de la minería; estas obras subterráneas de carácter lineal cuyo objetivo es el de comunicar dos puntos reduciendo tiempos de viajes. Los túneles carreteros cada vez su construcción aumenta debido a la necesidad que tiene el país de expandirse en la construcción de vías de comunicación terrestre.

Los proyectos de túneles son importantes dentro de nuestro país ya que se dan por la necesidad de superar un obstáculo natural debido a la variable topografía con la que se cuenta; Según el plano de susceptibilidad a los movimientos en masa del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del 2010 (ver anexo n.º 1) y el análisis realizado muestra a las áreas con susceptibilidad alta a muy alta alcanzan el 27% del territorio nacional, estos sectores corresponden a materiales de calidad muy baja a media y laderas con fuertes pendientes (entre 30° y 45°), muy meteorizadas y alteradas, con presencia de discontinuidades con orientaciones desfavorables (Villacorta, Fidel, & Zavala Carrión, 2012). Por lo tanto en las regiones de nuestro país es frecuente la caídas de rocas (desprendimientos y derrumbes) y deslizamientos que son generados por precipitaciones pluviales periódicas, estos provocan desastres directamente a las obras públicas de infraestructura vial que sirven para poder enlazar ciudades o lugares de importancia y facilitar el transporte entre las mismas, para agregar en el año 2017 en la zona costera central y norte del Perú se presentó un evento climático excepcional

denominado “Niño Costero”, caracterizado por la ocurrencia de fuertes precipitaciones pluviales que activaron varios movimientos en masa en la región La libertad y parte de Cajamarca (Gonzáles Sales, La Torre Borda, Medina Allecca, & Ramos Cabrera, 2017).

La zona evaluada del túnel comprende el tramo crítico inestable representando un alto riesgo para la población y economía de la región. Entre las obras públicas realizadas por el estado peruano se encuentra la construcción de túneles carreteros que representa un gran problema por la accidentada geografía a causa de grandes sistemas montañosos que están presentes en el territorio, es lo que ha dado origen a este tipo de construcciones. Se presenta el Túnel de comunicación ubicado aproximadamente en el Km 98 + 100 de la Carretera (Trocha Carrozable) Cascas – Contumazá de 32 metros de largo, fue construido de forma artesanal por la población, está hecho en roca fracturada sin ningún control geomecánico dando como resultado la inestabilidad del mismo, además en el tramo se observa taludes inestables (caída de rocas ocurren principalmente en las estaciones climáticas de lluvias) que podrían acarrear accidentes mortales de la población al usar esta vía de acceso; para tener una mejor perspectiva del peligro que representa este túnel, en el informe: Estadística de Accidentes Mortales en el Sector Minero, se observa que el 30 % de los accidentes es por desprendimiento de rocas (Ministerio de Energía y Minas, 2018). Es por ello la necesidad de realizar un estudio de caracterización geomecánica del macizo rocoso para proponer un diseño de sostenimiento de acuerdo a los sistemas RMR₈₉ y Q de Barton para reducir los riesgos de inestabilidad y desprendimientos de rocas; usando los software especializados de la mano con el trabajo de campo en el sector de estudio.

Esta investigación ofrecerá la información pertinente a las comunidades aledañas y también al mismo Ministerio de Transportes y Comunicaciones sobre el grado de inestabilidad y el conocimiento del riesgo existente en esta estructura y que tipo de sostenimiento requiere este túnel o el nuevo diseño de la excavación. Por lo tanto los beneficiados será toda la población en general de las regiones que se trasporten en vehículos por esta vía terrestre de comunicación.

Antecedentes

Chura (2016), en su tesis titulada: “Caracterización geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica administrativa Ana María – La Rinconada” para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, presentado a la escuela profesional de Ingeniería de Minas – UNA – Puno, en la metodología considera su investigación del tipo descriptivo y llega a las siguientes conclusiones: según el RMR_{89} de Bieniawski, da como resultado una calidad de tipo III, roca regular en pizarra y calidad buena tipo II en cuarcita, el dominio estructural de la caracterización geomecánica en ambas calidades de rocas se muestra es un mecanismo de falla de tipo cuña, debido a un comportamiento de discontinuidades de dos a tres familias presentes. Y los valores del índice Q de Barton, están muy estrechamente relaciona a la calidad de roca, sugiriendo el tipo de sostenimiento a utilizar, el cual da como resultado aplicar un sostenimiento por refuerzo activo de pernos de anclaje con longitudes de 1.8 metros (6 pies), a un espaciado que interactúan entre 1.5 a 3 metros, empernados de forma puntual o sistemática sin refuerzo de concreto lanzado.

Rodríguez y Villanueva (2016), en su tesis “Caracterización geomecánica del macizo rocoso en la ampliación del túnel exploratorio Karen Milagros, región Amazonas,

2016” para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, presentado a la escuela profesional de Ingeniería de Minas, UPN – Cajamarca, en la metodología considera su investigación del tipo descriptivo, correlacional y aplicada; y en cuyas conclusiones indica: Se elaboró secciones geomecánicas y plano geomecánico del nivel 2370, lográndose identificar la secuencia transicional de macizos rocosos de mala calidad con valores de RMR entre 35 y 36 a macizos rocosos de buena calidad con valores de RMR entre 63 y 66. Y el tipo de sostenimiento según la geomecánica será la colocación de pernos de anclaje sistemático cada 1.50 metros x 1.50 metros, con un diámetro de 22 mm, en una longitud de 1.80 metros; con mallas electro soldada galvanizada 2”x2” No 10.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la propuesta de sostenimiento adecuada basado en la caracterización geomecánica por métodos empíricos del túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer el sostenimiento basado en la caracterización geomecánica por métodos empíricos del túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización del macizo rocoso del túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá.
- Determinar el tipo de sostenimiento de adecuado del túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá.

- Realizar la Zonificación geomecánica a lo largo del túnel vial ubicado en el kilómetro 98 + 100 de la carretera Cascas – Contumazá.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Realizando una caracterización geomecánica permitirá determinar la calidad del macizo rocoso para proponer un tipo de sostenimiento para el túnel vial.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La descripción, medición de parámetros y propiedades del macizo rocoso del túnel mediante la observación directa, toma de datos y el análisis permitirán hacer una evaluación geomecánica de la roca.
- El tipo de sostenimiento adecuado para el macizo rocoso del túnel dependerá de la calidad de la roca presente en el túnel.
- Mediante la zonificación geomecánica se evaluará el macizo rocoso y obtendrá las características estructurales de las discontinuidades y la calidad de la masa rocosa.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El presente proyecto de investigación identificado como una propuesta de sostenimiento mediante una caracterización geomecánica al macizo rocoso basado por métodos empíricos es una investigación aplicada del tipo descriptivo, correlacional y explicativa, que se caracteriza por describir las características a tomar en cuenta en su aplicación.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población

Macizo rocoso del túnel vial ubicado en el Km 98 +100 de la carretera Cascas – Contumazá.

Muestra

Macizo rocoso del túnel vial ubicado en el Km 98 +100 de la carretera Cascas – Contumazá.

Materiales e instrumentos

Los instrumentos para la recolección de datos para la caracterización geomecánica del macizo rocoso son:

- Formatos de registro.
- Mapa Geológico del cuadrángulo de Cajamarca (anexo n.º 2).
- Ábacos y tablas.
- Libreta de campo.

Equipos para toma de datos:

- GPS, se tomó las coordenadas UTM del túnel y su altitud en msnm en la que se encuentra.

- Martillo Schmidt, con él se obtuvo el valor de número de rebotes aplicado perpendicularmente a la cara de la roca.
- Brújula Brunton, permitió tomar los datos de azimut y buzamiento de las discontinuidades presente en el macizo rocoso; adicionalmente con la ayuda de la brújula también se realizó el levantamiento topográfico del túnel.
- Flexómetro, intervino en la medición del levantamiento topográfico separación entre diaclasas.

Preparación de muestras para ensayos y equipos de ensayo de rocas.

- Cortadora de muestras.
- Balanza electrónica con precisión a Balanza sensible a 0.5 gr y con capacidad de 5000 gr o más.
- Estufa capaz de mantener una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Equipo de compresión uniaxial.

Métodos Descriptivos:

- **Análisis geomecánico**

Se procede a la visualización y observación en la excavación del macizo rocoso realizando la descripción geomecánica de las discontinuidades (incluye medición de parámetros incluidos en la clasificación geomecánica RMR), seguidamente se realiza la colección de datos y análisis e interpretación de los datos obtenidos para la clasificación de masas rocosas de acuerdo a parámetros de la roca.

- **Toma de muestras**

Se extrae muestras representativas para trasladarlos al laboratorio y hacer los ensayos respectivos. Se hace la estimación de:

Peso específico.

Resistencia a la compresión uniaxial.

- **Clasificación Geomecánica**

Para clasificar el macizo rocoso se realiza el análisis de los parámetros del mismo.

Este trabajo se lleva a cabo con la ayuda de los sistemas de clasificación como el RMR, Q y GSI, así determinar la calidad de la roca que caracteriza al túnel en estudio.

- **Sostenimiento**

Se propondrá en base a la evaluación geomecánica del macizo rocoso del túnel y de acuerdo con los sistemas de clasificación: RMR y Q.

2.3. Procedimiento

2.3.1. Determinación de la zona de estudio

Ubicación

Políticamente el túnel carretero en estudio se ubica en el departamento de Cajamarca, provincia de Contumazá, distrito de Contumazá. Se puede usar como referencia el puente Contumazá ubicado a 50 metros del túnel en la carretera Cascas – Contumazá (ver anexo n.º 3). La altitud al que se encuentra es a los 2729 msnm y tiene las siguientes coordenadas UTM:

Este: 742734

Norte: 9180576

Zona: 17

Datum: WGS84

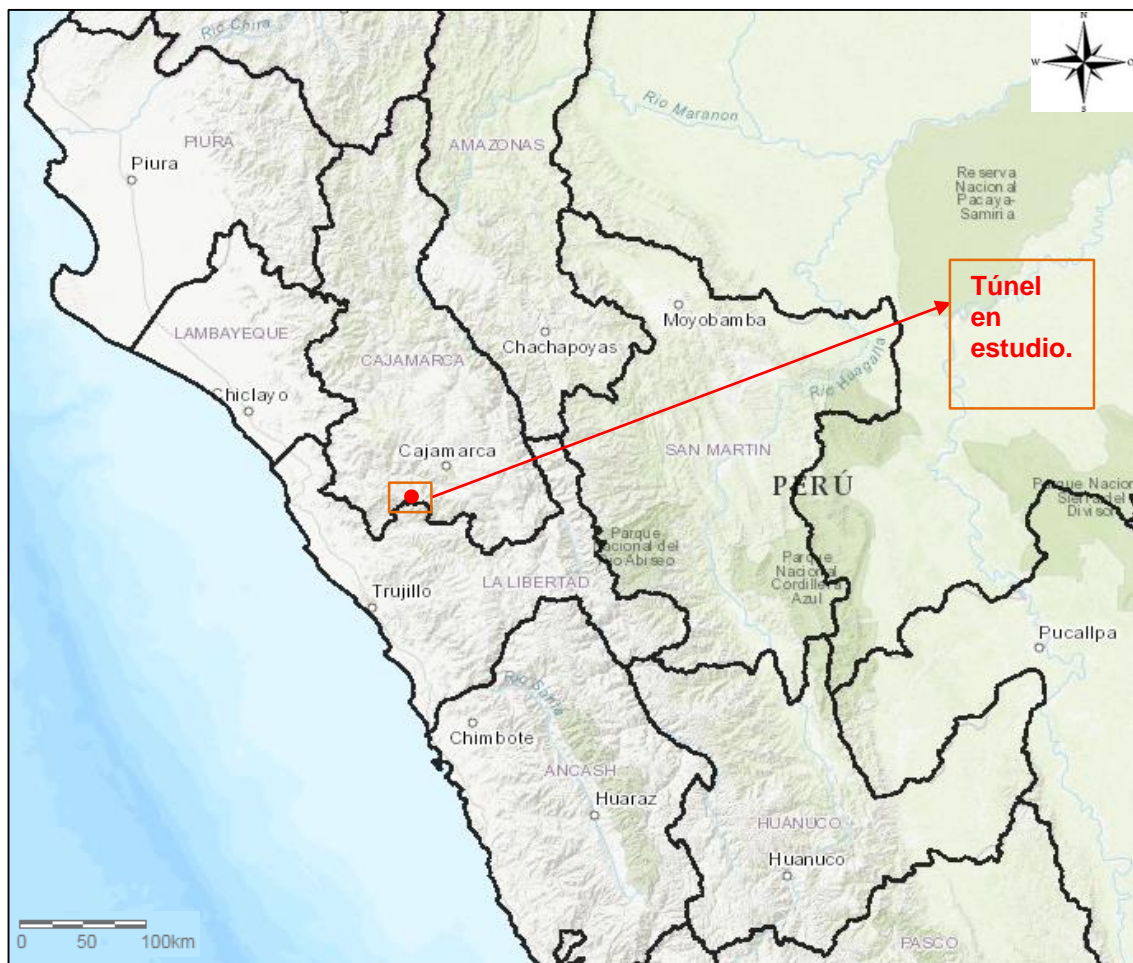


Figura 1: Ubicación del Túnel en estudio. Obtenido del GEOCATMIN (Sistema de Información Geológico y Catastral Minero); el punto rojo indica el túnel que se está evaluando.

Para mayores detalles se muestra algunas fotografías del túnel en el anexo n.º 4.

Accesibilidad

Para llegar al túnel se lo puede realizar desde el distritito de Chilete con un tiempo de viaje de 1 hora y 30 minutos, pasando por el distrito de Contumazá (está a unos 25 minutos de viaje al túnel). De Cajamarca al Túnel está a 3 horas y 15 minutos, pasando por el distrito de Chilete y por el distrito de Contumazá. También se puede llegar desde la provincia de Cascas haciendo un recorrido al distrito de Contumazá.

2.3.2. Levantamiento topográfico del túnel

Consiste en la representación gráfica del túnel, el cual se realizó con la ayuda de los siguientes instrumentos: GPS, brújula Brunton, flexómetro y jalones. En la tabla se muestra los datos recolectados que fueron ingresados al formato Excel para posteriormente pasarlo al AutoCAD 2018 y así obtener el plano. El punto de arranque o de referencia (BM: Bench Mark) para el levantamiento tiene las siguientes coordenadas UTM: Este: 742734 y Norte: 9180576.

Tabla 1:
Datos de campo para realizar el levantamiento.

PUNTOS	AZIMUT	DISTANCIA (m)	DISTANCIA PERPENDICULAR (m)	DISTANCIA DERECHA (m)	DISTANCIA IZQUIERDA (m)
BM - P1	259 ⁰	15	5.90	1.76	-
			8.60	-	3.78
			15.00	-	4.10
P1 - P2	235 ⁰	15	5.00	1.27	2.80
			10.00	2.70	1.27
			15.00	3.85	-
P2 - P3	254 ⁰	15	2.00	3.45	0.70
			4.00	2.95	1.20
			6.00	2.50	1.66
			8.00	2.25	2.03
			10.00	1.48	3.45
			12.00	1.14	-
15.00	-	-			

Nota: P1, P2 y P3: los puntos dentro del túnel medidos con flexómetro; m: metros, - indica que no se midieron la distancia porque que no contemplaban al túnel.

2.3.3. Estaciones geomecánicas (E.G.)

Realizado a lo largo de la longitud del túnel (32 metros) cada 10 metros de distancia en la zona más representativa del macizo rocoso, por lo tanto se realizaron 3 estaciones geomecánicas. En cada estación se tomaron los datos de azimut, buzamiento y los parámetros de clasificación del RMR (Separación entre diaclasas, longitud de la discontinuidad, abertura, rugosidad, relleno, alteración) y presencia de

agua como se presenta en la siguiente tabla. En el anexo n.º 5 se aprecia la toma de rumbo y buzamiento de las discontinuidades.

ESTACIONES GEOMECAICAS					PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN DEL RMR						
NÚMERO DE E.G.	FAMILIA DISCONTINUIDADES	AZIMUT	RUMBO	BUZAMIENTO	SEPARACIÓN DE DIACLASAS (m)	LONGITUD DE DISCONTINUIDAD (m)	ABERTURA (mm)	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	
01	FM 01	126°	S54°E	23°	0.22	2.20	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Inalterada	
		128°	S52°E	81°	0.25	2.40					
		117°	S63°E	80°	0.20	4.00					
	FM 02	31°	N31°E	89°	0.40	0.80	> 5	Ligeramente rugosa	Blando	Inalterada	
		36°	N36°E	87°	0.30	1.50					
					0.20	2.40					
	0.38	1.45									
	FM 03	297°	N63°W	20°	0.30	1.30	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Inalterada	
					0.34	1.15					
0.20					1.32						
02	FM 01	29°	N29°E	88°	0.22	2.50	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Inalterada	
					0.30	2.30					
					0.25	2.80					
					0.20	1.75					
	FM 02	120°	S60°E	89°	0.26	0.92	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Inalterada	
					0.15	1.30					
					0.16	2.00					
	FM 03	260°	S80°W	27°	0.20	1.87	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Inalterada	
					0.22	2.34					
	03	FM 01	144°	S36°E	11°	0.16	4.10	1 a 5	Ligeramente rugosa	Blando	Inalterada
						0.18	3.80				
						0.20	4.30				
FM 02		147°	S33°E	85°	0.30	4.05	1 a 5	Ligeramente rugosa	Ninguno	Ligeramente alterada	
					0.25	0.80					
					0.20	2.00					
FM 03		286°	N74°W	86°	0.30	2.20	1 a 5	Ligeramente rugosa	Blando	Ligeramente alterada	
					0.25	2.50					
					0.20	2.00					

Figura 2: Datos obtenidos en cada Estación Geomecánica. FM 01, FM 02 y FM 03: familias de discontinuidades identificadas; m: metros; mm: milímetros; °: grado sexagesimal.

La roca presente en todo el macizo rocoso del túnel es determinada mediante la observación, análisis y la extracción de muestras es el tipo de roca ígnea: la andesita., según el Geocatmin en el Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cajamarca – Carta Geológica del Perú 1: 100 000 es una roca volcánica perteneciente al Grupo Calipuy

- Volcánico San Pablo (Ti-vsp) como se puede apreciar en la figura que se muestra a continuación:



Figura 3: Muestra de roca extraída del Túnel.

2.3.4. Ensayos en campo y laboratorio realizados a las muestras de roca intacta

Se realizaron ensayos para la determinación de la resistencia de la roca y para hallar el peso específico de la de la misma.

Martillo Schmidt

Se llevó a cabo en la zona de estudio y la aplicación del martillo tipo L fue de forma perpendicular a la cara de la discontinuidad en la realización del ensayo (ver anexo n.º 6), se tomó la medida de 10 percusiones por cada estación geomecánica, es decir, 30 percusiones en total; tomando los valores del número de rebotes. Este instrumento cuenta con certificado de calibración. El número de rebotes registrados por cada estación geomecánica fueron:

- E.G. 01: 58, 58, 56, 56, 54, 54, 53, 53, 58, 58, se procede a eliminar los 5 valores más bajos, obteniendo 56, 58, 58, 58, 58 cuyo valor de rebote medio es 57.6.
- E.G. 02: 52, 53, 58, 58, 54, 54, 56, 56, 60, 60, se eliminan los 5 valores de rebote más bajos, quedando 56, 58, 58, 60, 60, cuyo valor de rebote medio es 58.4.

- E.G. 03: 54, 54, 56, 53, 53, 54, 56, 58, 58, 60, eliminando los valores más bajos: 56, 56, 58, 58, 60, cuyo valor de rebote medio es 57.6.

El valor promedio obtenido del número de rebotes es 57.87.

Ensayo a la compresión simple

El ensayo se llevó a cabo con el equipo de laboratorio de Ingeniería de Minas de la Universidad Privada del Norte, llamado Unidad Semiautomática de Carga Axial, se ensayaron 3 muestras cúbicas de 2 pulgadas de arista. Se detalla mediante las fotos como se produjo la deformación de las muestras:



Figura 4: Ensayo a la compresión simple de las muestras.

Los datos registrados del equipo ya mencionado en los procedimientos de la carga ejercida en cada muestra arroja valores, cuyas unidades esta kN. Para el cálculo de la resistencia a la compresión simple se aplicó la relación:

Ecuación 1: Relación para encontrar la resistencia de la roca.

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Donde:

σ_c = Resistencia compresiva de la roca (Kg/cm²)

F = Carga última de rotura de la probeta (Kg)

A = Área de la probeta (cm²)

Ensayo para determinar el peso específico

Equipo utilizado:

- Balanza sensible a 0.5 gr y con capacidad de 5000 gr o más.
- Cesta con malla de alambre.
- Depósito con agua, para sumergir la cesta de alambre y un dispositivo para suspenderla del centro en la escala de la balanza.
- Estufa capaz de mantener una temperatura de 110 °C ± 5 °C.

Se sigue el siguiente procedimiento en laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Privada del Norte:

- Se pesó la muestra en la balanza, luego se puso la muestra en la cesta de alambre y el dispositivo que va sujeta al centro de la escala de la balanza para sumergirlo dentro de un depósito con agua. Se va tomando el peso de la pantalla en la balanza (el peso se tiene que estabilizar).
- La muestra se retira de la cesta de alambre y se coloca dentro estufa hasta un lapso de 24 horas.
- Luego se retira de la estufa y se vuelve a pesar la muestra.

Todos los datos tomados se apuntan para luego realizar los cálculos pertinentes a este ensayo. En la figura se aprecia la toma de peso de las muestras:



Figura 5: Tomando el peso de la muestra.

Los datos de obtenidos en laboratorio de Ingeniería Civil se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2:

Datos de laboratorio para calcular la densidad de la muestra.

PESO ESPECÍFICO			
ID	DESCRIPCION	UND	1
A	Peso Saturado Superficialmente seco de la muestra en aire.	gr	1522.9
B	Peso Saturado Superficialmente seco de la muestra en agua.	gr	880.40
C	Volumen de masa + volumen de vacío, C = A – B	gr	642.50
D	Peso Seco de la muestra (en estufa a 105 °C ± 5 °C)	gr	1508.7
E	Volumen de masa, E = C - (A - D)	cm ³	628.30
H	Peso Específico aparente (base seca), H = D / E	gr/cm ³	2.40

Nota: Unidades gr: gramos; cm³: centímetros cúbicos.

Para el cálculo del peso específico se utiliza la ecuación:

Ecuación 2: Relación para hallar el valor del peso específico.

$$\gamma = \frac{m}{V} * g = \rho * g$$

Donde:

γ = Peso específico (kN/m³)

m = Masa de la muestra (gr)

v = Volumen de la muestra (cm³)

g = Gravedad de la tierra (9.81 m/seg²)

2.3.5. Procedimientos de cálculos de los sistemas de clasificación geomecánica de la roca.

Sistema RMR₈₉

Después de obtener los datos de la descripción geomecánica de las discontinuidades, es decir, los parámetros suficientes para evaluar la calidad del macizo rocoso, se procede a calcular el índice RMR, que fue desarrollado por Bieniawski en 1973 y modificado posteriormente hasta llegar al sistema de clasificación Geomecánica o valoración de la masa rocosa RMR (Rock Mass Rating) de 1989, siendo el más actual y completo. La versión de 1989 propone seis parámetros para clasificar el macizo rocoso:

1. Resistencia a compresión uniaxial del material rocoso.
2. Valor de designación de la calidad de la roca (RQD).
3. Espaciamiento de las discontinuidades.
4. Condición de las discontinuidades.
5. Condiciones del agua subterránea.
6. Orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989).

Los parámetros de clasificación del macizo rocoso se pueden medir cuantitativamente con valores, como se muestra en la tabla:

Tabla 3:
Clasificación geomecánica RMR.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro >5 mm	Relleno blando <5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-02	02-0,5	> 0 ,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

Nota: MPa: megapascuales; %: porcentaje; mm: milímetros, m: metros; min: minutos.

Análisis de cada parámetro del RMR:

- **Resistencia a compresión uniaxial del material rocoso** su determinación se lleva cabo en laboratorio de Ingeniería de minas de la Universidad Privada del Norte con el equipo Unidad Semiautomática de Carga Axial, contando para este ensayo con 3 muestras cúbicas de 2 pulgadas de arista. Y también se utiliza el martillo de Schmidt o Esclerómetro para encontrar la resistencia de la roca, la metodología que se utilizará será de acuerdo al anexo n.º 7.
- **Valor de designación de la calidad de la roca (RQD)**, a falta de testigos de perforaciones se recurre a otra manera de hallar su valor. El RQD se puede estimar a partir del espaciamiento promedio de las discontinuidades, según la ecuación de Priest y Hudson (1976):

Ecuación 3: Cálculo de RQD.

$$RQD = 100 * e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1)$$

Donde λ : número de discontinuidades identificadas en el macizo rocoso por metro lineal.

- **Espaciamiento de las discontinuidades**, para determinarlo se utiliza un flexómetro y se mide de forma perpendicular entre los planos de discontinuidad.
- **Condición de las discontinuidades**, su determinación se realizará mediante la valorización del estado de las discontinuidades RMR de Bieniawski de la figura 6, utilizando para la medición flexómetro, en el caso de rugosidad y la alteración de las discontinuidades con la observación en campo.
- **Condiciones del agua subterránea**, se aplicará la técnica de determinación de las filtraciones mediante la valorización de agua en el RMR de Bieniawski de la figura 6.

- **Orientación de las discontinuidades**, se mide la orientación de las familias de discontinuidades que presenta el macizo rocoso dentro del mapeo geomecánico, para ello se hará uso de la Brújula Brunton.

Los parámetros medidos en este sistema se muestran en el anexo 8.

Una vez obtenidas las puntuaciones de haber aplicado los cinco parámetros de clasificación de la figura anterior, al valor obtenido se le resta un factor de ajuste que está directamente relacionado con la orientación de las discontinuidades con respecto al eje del túnel (tabla 4). Una vez aplicada esta corrección finalmente se obtiene un valor numérico con el cual se clasifica el macizo rocoso de acuerdo a su calidad desde roca muy mala hasta roca muy buena, en valores de 0 a 100 y por clases va desde clase I hasta clase V (ver tabla 5).

Tabla 4:
Corrección por orientación de las discontinuidades respecto al eje del túnel.

<i>Corrección por la orientación de las discontinuidades</i>						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	- 0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Cimentaciones	- 0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	- 0	- 5	- 25	- 50	- 60
<i>Orientación de las discontinuidades en el túnel</i>						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20°. Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buzamiento de 45°-90°	Buzamiento de 20°-45°	Buzamiento de 45°-90°	Buzamiento de 20°-45°	Buzamiento de 45°-90°	Buzamiento de 20°-45°	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media		Desfavorable

Tabla 5:
Calidad de los macizos rocosos en relación al índice RMR (Bieniawski 1989).

Clase	Calidad	Valoración	Tiempo promedio de autosoporte	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interna
I	Muy Buena	100-81	20 años para 15 m de vano.	> 0,4	>45°
II	Buena	80-61	1 año para 10 m de vano.	0,3 - 0,4	35°- 45°
III	Media	60-41	1 semana para 5 m de vano.	0,2 - 0,3	25°- 35°
IV	Mala	40-21	1 hora para 2.5 m de vano.	0,2	5°- 25°
V	Muy mala	< 20	30 minutos para 1 m de vano.	< 0,1	< 15°

Nota: MPa: megapascales.

En la tabla se observa que de acuerdo la calidad de roca se puede asignar la cohesión y el ángulo de fricción interna. Además Bieniawski 1989 propone una ecuación para calcular el ángulo de fricción interna:

Ecuación 4: Relación para encontrar el valor ϕ .

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (deg)}$$

Sistema Q de Barton

El proceso para obtener este índice es necesario tener el valor del RMR de las evaluaciones de los E.G. Este sistema fue desarrollado por Barton, Lien y Lunde en el año 1974, en el Norwegian Geotechnical Institute (NGI) basados en el estudio de análisis de cientos de casos de túneles construidos principalmente en Escandinavia. Propusieron un índice de calidad para túneles (Q) como un sistema de clasificación para la estimación del sostenimiento de la roca en túneles. Es un sistema de clasificación cuantitativo basado en la valoración numérica de la calidad del macizo rocoso (Palmström & Stille, 2000).

Para esta investigación se utilizará la correlación existente entre el RMR y Q propuestos por Barton y Bieniawski para hallar el valor numérico del Q y así determinar la calidad de roca:

Ecuación 5: Correlación hecha por Bieniawski para encontrar el índice Q.

$$\text{RMR} \approx 9 \ln Q + 44 \quad (\text{Bieniawski, 1989}) \quad Q \approx e^{\frac{(\text{RMR}-44)}{9}}$$

Ecuación 6: Correlación hecha Barton para encontrar el índice Q.

$$\text{RMR} \approx 15 \ln Q + 50 \quad (\text{Barton, 1995}) \quad Q \approx 10^{\frac{(\text{RMR}-50)}{15}}$$

Este sistema propone una valoración de la clase de roca de la siguiente forma:

- 0.001 y 0.01: roca excepcionalmente mala
- 0.01 y 0.1: roca extremadamente mala
- 0.1 y 1: roca muy mala
- 1 y 4: roca mala
- 4 y 10: roca media
- 10 y 40: roca buena
- 40 y 100: roca muy buena
- 100 y 400: roca extremadamente buena
- 400 y 1 000: roca excepcionalmente buena.

Sistema GSI

El Geological Strength Index (Índice de Resistencia Geológica: GSI), fue desarrollado por Hoek (1995) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR (no adecuado para rocas débiles) y poder evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown. El GSI se basa en la evaluación de la litología, estructura y estado de las superficies de discontinuidades en el macizo rocoso y es estimado a partir de un examen visual del macizo rocoso expuesto en afloramientos, en superficies excavadas, tales como desmonte de carreteras, y frentes de avance de túneles y en testigos de sondeos (Hoek, Marinos, & Marinos, 2007).

La cuantificación del GSI se basa en observaciones geológicas realizadas en campo con la ayuda del gráfico de la figura siguiente, evaluando la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades, cuyo valor puede estar entre 0 – 100, definiendo cinco clases de macizo rocoso como se describen a continuación:

- Macizos de calidad Muy Mala, Clase V, GSI de 0 a 20.
- Macizos de calidad Mala, Clase IV, GSI de 20 a 40.
- Macizos de calidad Regular, Clase III, GSI de 40 a 60.
- Macizos de calidad Buena, Clase II, GSI de 60 a 80.
- Macizos de calidad Muy Buena, Clase I, GSI de 80 a 100.

La determinación del GSI de las 3 estaciones se encontró mediante la figura siguiente, mediante observaciones geológicas del macizo rocoso del túnel como se ve en el anexo 9.

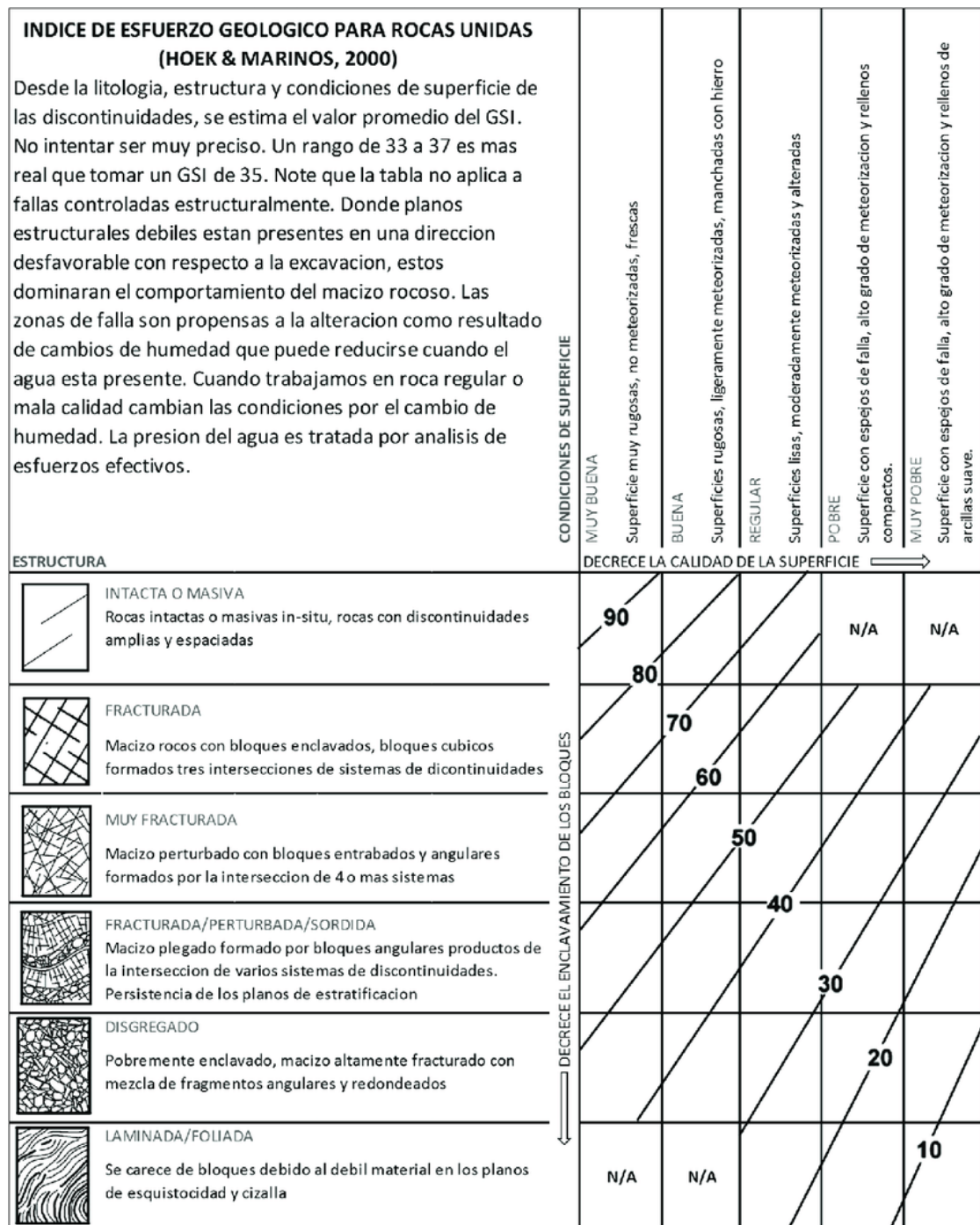


Figura 6: Gráfico general para estimar el GSI a partir de observaciones geológicas.

2.3.6. Propuesta del tipo de sostenimiento

Se basará en los 2 sistemas de clasificación RMR y Q:

Sostenimiento a partir del RMR de Bieniawski 1989

Este sistema proporciona recomendaciones para el sostenimiento de túneles, este soporte está idealizado para una sección en herradura de 10 m de diámetro y que soporta una presión de $< 25 \text{ MPa}$ (250 kg/cm^2) equivalente a un recubrimiento de 100 m y asumiendo una $\gamma = 2.7 \text{ T/m}^3$ excavado según el método convencional de perforación y voladura (Bieniawski, 1989).

Obtenido el RMR de cada Estación geomecánica se procede a evaluar el tipo de sostenimiento que se propone en esta investigación de acuerdo a la clase de roca determinada, la siguiente figura corresponde al soporte permanente y no al temporal o soporte primario.

Tabla 6:
Sostenimientos a partir del índice RMR.

CLASE DE MASA ROCOSA	EXCAVACIÓN	SOSTENIMIENTO		
		Pernos de roca (20 mm de diámetro, completamente inyectados)	Hormigón proyectado convencional	Cerchas Metálicas
Muy Buena RMR: 81-100	Sección completa. Avance de 3 m.	Generalmente no se quiere ningún sostenimiento excepto pernos para refuerzo local.		
Buena RMR: 61-80	Sección completa. Avance de 1-15 m. Soporte completo a 20 m del frente	Pernos locales en el techo, 3 [m] de largo y espaciado de 2,5 m con malla ocasional.	50 mm en el techo donde fuera necesario.	Ninguno
Media RMR: 41-60	Avance y destroza. Avances de 1,5 a 3 m. Completar sostenimiento a 10 m del frente.	Empernado sistemático de 4 m de largo, espaciados de 1,5 a 2 m en el techo y paredes con malla en el techo.	50 - 100 mm en el techo y 30 mm en las paredes.	Ninguno
Mala RMR: 21-40	Avance y destroza. Avances de 1.0 a 1.5 m. Sostenimiento inmediato del frente. Completar sostenimiento a menos de 10 m del frente.	Empernado sistemático de 4 a 5 m de largo, espaciados de 1 a 1,5 m en el techo y paredes con malla.	100 a 150 mm en el techo y 100 mm en las paredes.	Marcos ligeros a medianos separados 1,5 m, donde sea requerido.
Muy mala RMR: < 20	Fases múltiples. Avances de 0,5-1,5 m. Sostenimiento simultaneo con la excavación: hormigón proyectado tan pronto como sea posible después de la voladura	Empernado sistemático de 5 a 6 m de largo, espaciado 1 a 1,5 m en el techo y paredes con malla. Instalación de pernos en el piso o contrabóveda	150 - 200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente.	Marcos medianos a pesados espaciados a 0,75 m con encostillado de acero y marchavantes de ser necesario sea requerido. Cerrar la sección.

Nota: m: metros; mm: milímetros.

Sostenimiento a partir del Q de Barton 1974

Encontrado el valor numérico del índice Q se determina la clase de roca que presenta el túnel para luego recomendar el sostenimiento basado en la anchura equivalente del túnel y la calidad de la roca. En relación al valor del índice Q para los requerimientos en la estabilidad y soporte de las excavaciones subterráneas, Barton et al. (1974) define un parámetro adicional a la que llamaron la dimensión equivalente (D_e) de la excavación, cuya relación es la siguiente:

Ecuación 7: Relación para hallar el diámetro equivalente.

$$D_e = \frac{\text{Anchura, Diámetro o Altura (m)}}{ESR}$$

En la ecuación hay un coeficiente ESR que depende del tipo de excavación como se puede notar en la tabla siguiente:

Tabla 7:
Resumen actualizado de los valores recomendados para el factor ESR de determinación de nivel de seguridad.

TIPO DE EXCAVACIÓN	ESR
A Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B Galenas mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1.6-2.0
C Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1.2-1.3
D Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0.9-1.1
E Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0.3-0.8

Según la tabla de acuerdo al tipo de excavación nos ubicamos en el apartado C y D, los cuales incluyen para nuestro estudio los túneles de carretera, entonces se escogerá el valor correspondiente.

Se cuenta con los valores del De y la clase de roca, ahora se realiza en el ábaco de la
 figura 10 una intercesión (De: línea horizontal y clase de roca: línea vertical) para
 determinar la categoría de sostenimiento a usar.

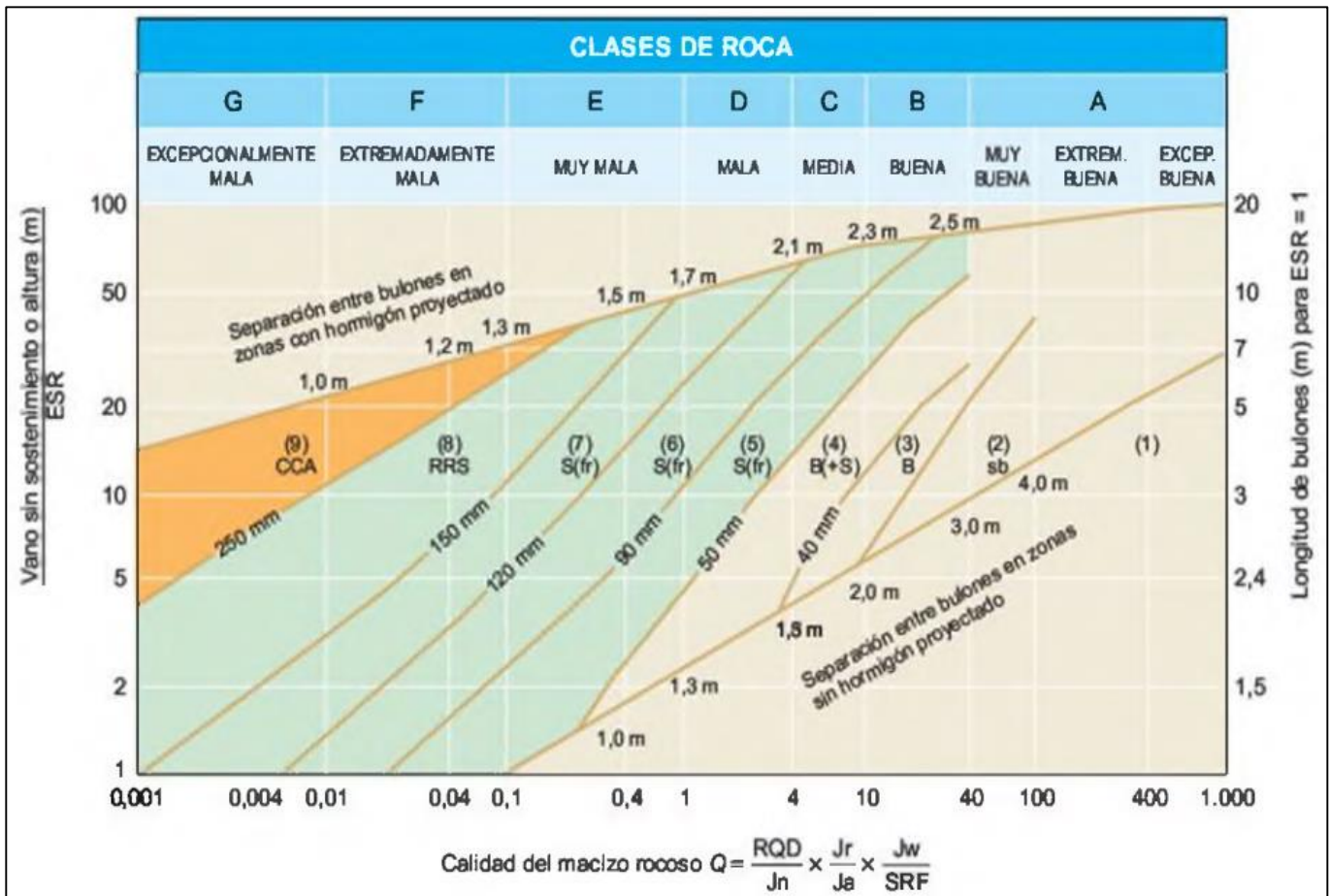


Figura 7: Ábaco para determinar empíricamente el sostenimiento propuesto por Barton y Bieniawski. Barton & Grimstad, 2000. RQD: “Rock Quality Designation”; Jn: factor de diaclasado; Jr: factor de rugosidad de la diaclasa; Ja: factor de alteración de la diaclasa; Jw: factor de reducción por presencia de agua en la diaclasa; SRF: “Stress Reduction Factor; m: metros; mm: milímetros.

Categorías de sostenimiento:

1. Sin sostenimiento.
2. Bulonado puntual, sb.
3. Bulonado sistemático, B.
4. Bulonado sistemático con hormigón proyectado, 40-100 mm, B+S.
5. Hormigón proyectado con fibras, 50-90 mm y bulonado S(fr)+B.
6. Hormigón proyectado con fibras, 90-120 mm y bulonado, S(fr)+B.

7. Hormigón proyectado con fibras, 120-150 mm y bulonado, S(fr)+B.
8. Hormigón proyectado con fibras, >150 mm con bulonado y arcos armados reforzados con hormigón proyectado, D(fr)+RRS+B.
9. Revestimiento de hormigón, CCA.

De las categorías de sostenimiento se observa símbolos que se van a describir e indicar que significa:

- S (fr) + B: Hormigón proyectado con refuerzo de fibras de acero y bulonado sistemático.
- S: Hormigón proyectado sin fibras (sin reforzar).
- RRS: Arcos armados reforzados con hormigón proyectado (Reinforced Ribs of Shotcrete).
- CCA: Hormigón en masa a sección completa (Cast Concrete Arches).

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En el túnel de estudio, después del procesamiento de datos obtenidos en campo y laboratorio, se obtuvo los resultados siguientes:

3.1. Parámetros de la roca

La resistencia de la roca

Se halló de 2 maneras para hacer una comparación:

- **Martillo Schmidt**

La forma de aplicación del martillo fue perpendicular a la cara de la roca, se encuentra la resistencia con los datos: la densidad de la roca: 2.40 gr/cm^3 , el valor de número de rebotes: 57.87 y el ábaco para hacer la correlación:

Cálculo del peso específico de la muestra mediante la ecuación:

$$\gamma = \frac{2.40 \text{ gr}}{\text{cm}^3} \times \left(\frac{100\text{cm}}{1 \text{ m}}\right)^3 \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{gr}} \times \frac{9.81 \text{ m}}{\text{seg}^2} \times \frac{1}{1000} = 23.54 \text{ kN/m}^3$$

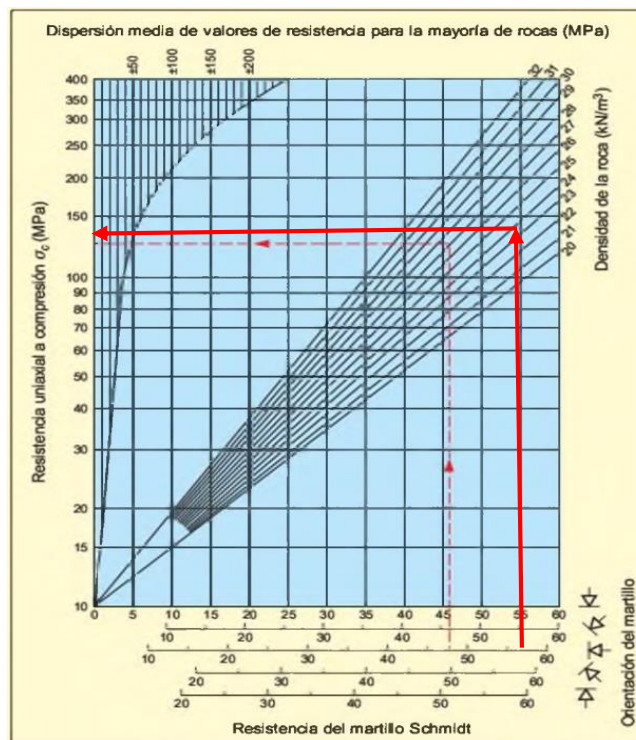


Figura 8: Obtención de la resistencia a compresión simple mediante el Martillo Schmidt.

El valor de la resistencia compresión simple de la roca como se puede observar en el ábaco cuya correlación da un valor de $\sigma_c = 140$ MPa que indicaría según el ISRM (1981) clasifica como una roca muy dura (anexo n.º 10).

- **Ensayo a la compresión simple o uniaxial**

Este ensayo arrojó los datos de la siguiente tabla. La resistencia se obtuvo mediante la ecuación 1:

Tabla 8:

Datos y cálculo de la resistencia de las muestras.

MUESTRA CÚBICA	MASA (gr)	DIMENSIONES (cm)	CARGA EN kN	CARGA EN Kg	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (Kg/cm ²)
M 01	315.42	2.5	184.6	18823.96	6.35	2964.40
M 02	311.16	2.5	167	17029.26	6.35	2681.77
M 03	310.97	2.5	202.33	20631.91	6.35	3249.12

Nota: gr: gramos; cm: centímetros; kN: kilonewton; Kg: kilogramos.

El valor promedio de las 3 muestras de la resistencia es 2965.10 Kg/cm², cuyo valor se tendrá que convertir a MPa por cuestiones para cálculos.

$$\sigma_c = \frac{2965.10 \text{ Kg}}{\text{cm}^2} \times \left(\frac{100}{1 \text{ m}}\right)^2 \times \frac{9.81 \text{ m}}{\text{seg}^2} \times \frac{1 \text{ MPa}}{1000000} = 290.88 \text{ MPa}$$

Este valor según el anexo n.º 10, Bieniawski (1973) clasifica a la roca de resistencia a la compresión simple como muy alta y el ISRM (1981), lo clasifica como extremadamente dura.

3.2. Sistemas de clasificación de la roca

- **Sistema RMR**

Este índice se encontró para cada estación geomecánica, se considera la resistencia a la compresión simple el valor de 290.88 MPa porque es la misma roca presente en todo el macizo rocoso del túnel (andesita). El RQD % es encontrado con la ecuación 3.

Datos: E.G. 1: 6 discontinuidades por metro lineal, E.G. 2: 8 discontinuidades por metro lineal Y E.G. 3: 7 discontinuidades por metro lineal.

Se procede a calcular de la siguiente manera:

$$RQD = 100 * e^{-0.1*6} * (0.1 * 6 + 1) = 87.81 \%$$

$$RQD = 100 * e^{-0.1*8} * (0.1 * 8 + 1) = 80.88 \%$$

$$RQD = 100 * e^{-0.1*7} * (0.1 * 7 + 1) = 84.42 \%$$

Los resultados del RQD representan que el macizo rocoso es de calidad buena. La tabla siguiente presenta los demás parámetros se hallaron mediante visualización directa y medición en el túnel recopilados en la figura 2, en el parámetro N 3 se realizó un promedio de las mediciones hechas igualmente para la longitud de la discontinuidad, es necesario especificar qué las condiciones del agua subterránea: la presencia de agua fue seca, cabe indicar que esto puede cambiar en los meses de lluvias y haciendo variar la puntuación.

Tabla 9:
Valor del RMR de cada estación geomecánica.

SITEMA RMR		ESTACIONES GEOMECAICAS						
		E.G. 01		E.G. 02		E.G. 03		
N	PARAMETROS	VALOR DESCRIPCION	PUNTUACION	VALOR DESCRIPCION	PUNTUACION	VALOR DESCRIPCION	PUNTUACION	
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa) Compresión simple	290.88 MPa	15	290.88 MPa	15	290.88 MPa	15	
2	RQD %	87.81	17	80.88	17	84.42	17	
3	Separación entre diaclasas	0.28	10	0.22	10	0.23	10	
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	1.85	4	2.02	4	2.83	4
		Abertura	1-5 mm	1	>5 mm	0	1-5 mm	1
		Rugosidad	ligeramente rugosa	3	ligeramente rugosa	3	ligeramente rugosa	3
		Relleno	relleno blando < 5 mm	2	Ninguno	6	relleno blando < 5 mm	2
		Alteración	inalterada	6	inalterada	6	ligeramente alterada	5
5	Condiciones del agua subterránea	seco	15	ligeramente húmedo	15	ligeramente húmedo	15	
PUNTAJE TOTAL			73	76	72			

Nota: MPa: megapascales; mm: milímetros; m: metros.

Seguidamente, el puntaje total de cada E.G. se tiene que restar un factor de ajuste que se encuentra relacionado con la orientación de las discontinuidades con respecto al eje del túnel (la dirección del túnel tiene un rumbo de N21⁰E) basados en la tabla 4, las discontinuidades están en cualquier dirección siendo desfavorable, por lo tanto en su corrección de acuerdo a su dirección y buzamiento para túneles se le asigna una puntuación de 10. Al aplicar el factor de ajuste se obtiene una valoración de del índice RMR:

$$\text{E.G. 1: } 73 - 10 = 63$$

$$\text{E.G. 2: } 76 - 10 = 66$$

$$\text{E.G. 3: } 72 - 10 = 62$$

Estos valores de acuerdo a la tabla 3 Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR están en el rango de 61 a 80 esto indica que la roca pertenece a una clase II, calidad buena.

Además este resultado obtenido, también sirve para poder definir la cohesión y el ángulo de fricción interna siendo 0.3 - 0.4 MPa en promedio 0.35 MPa y 35⁰ – 45⁰ respectivamente. La demostración del cálculo del ángulo de fricción interna basado en la en valor de RMR se da mediante la ecuación 4:

$$\phi = 5 + \frac{63}{2} = 36.5^0, 38^0 \text{ y } 36^0, \text{ respectivamente por cada estación geomecánica.}$$

- **Sistema Q**

La determinación del valor aproximado de este sistema, será mediante la correlación existente en el RMR y el Q de Barton. El valor obtenido del promedio del RMR de cada E.G. es 63, cada valor de RMR obtenidos se reemplazará en las ecuaciones 5 y 6 como se muestra a continuación y así obtener de forma aproximada el valor del Q:

$$Q \approx e^{\frac{(63-44)}{9}} = 8.26; e^{\frac{(66-44)}{9}} = 11.52; e^{\frac{(62-44)}{9}} = 7.39$$

$$Q \approx 10^{\frac{(63-50)}{15}} = 7.36; 10^{\frac{(66-50)}{15}} = 11.66; 10^{\frac{(62-50)}{15}} = 6.31$$

Estos valores aproximados obtenidos: $Q = 8.26, 11.52, 7.39$ y $Q = 7.36, 11.66, 6.31$; para E.G. 1 y 3 según este sistema de clasificación pertenece a una valoración del rango 4 a 10 que indican una clase de roca media o regular y la E.G. 2 indicaría que está en el rango de 10 a 40 indicando una roca buena.

- **Sistema GSI**

Al evaluar este sistema a través de observaciones geológicas con la ayuda de la figura 6 se determina que la estructura del macizo rocoso esta fracturada en bloques (Macizo rocoso poco alterado consistente en bloques cúbicos formado por 3 sistemas ortogonales de discontinuidades y muy bien unidos entre sí) y tiene un estado superficial buena (rugosa, ligeramente meteorizada, superficies teñidas de óxido), esta relación nos indicaría un valor de GSI de 80, 75 y 75 en cada estación geomecánica.

Para cálculos se considera los valores criterios de rotura del macizo rocoso basado en *el criterio de Hoek-Brown generalizado* se puede calcular m_i, m_b, S y a ; fue mediante el promedio del GSI de las 3 estaciones: 77.

Donde:

m_b es un valor reducido de la constante del material m_i ,

s y a son constantes del macizo rocoso.

Los estas constantes fueron obtenidos mediante el software RocData para la roca andesita cuya resistencia a compresión simple es de 290.88 MPa

Hoek-Brown Classification:

Intact uniaxial compressive = 290.88 MPa

GSI = 77; $m_i = 25$; Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion

$m_b = 10.995$ $s = 0.0776$ $a = 0.501$

Además también se puede calcular *el módulo de deformación o módulo de Young* según Bieniawski (1978) que analizó un número de casos históricos y propuso la siguiente relación para estimar el módulo de deformación in situ, E_m , a partir de RMR:

E_m [GPa]= $2RMR-100$ para $RMR > 50$

E_m [GPa]= $2 * 63-100 = 126-100 = 26$ GPa

E_m [GPa]= $2 * 66-100 = 132-100 = 32$ GPa

E_m [GPa]= $2 * 62-100 = 124-100 = 24$ GPa, estos valores de deformación de la roca están calculados por cada estación geomecánica.

Dentro de los valores encontrados mediante ensayos y cálculos se afirma que dichos cálculos son correctos, pues, se encuentran dentro del rango de valores que se muestra en el anexo 11 (Alejano Monge & Ramírez Oyanguren, 2004).

3.3. Tipo de sostenimiento

- **Según el RMR**

Para una calidad de roca buena según el valor de $RMR = 63$ según tabla 5 el Sostenimientos a partir del índice RMR propuesto por Bieniawski, 1989.; realizado una excavación Sección completa, avance de 1-15 m y soporte completo a 20 m del frente se propone un sostenimiento con:

Tipo de Sostenimiento del túnel para roca Buena, clase II según RMR:

- ❖ *Pernos de roca (20 mm de diámetro, completamente inyectados):* Pernos locales en el techo, 3 [m] de largo y espaciado de 2,5 m con malla ocasional.
- ❖ *Hormigón proyectado convencional:* 50 mm en el techo donde fuera necesario.
- ❖ *Cerchas Metálicas:* No requiere.

• **Según el Q de Barton**

La calidad de roca obtenida mediante la correlación de RMR Y Q indica que es una clase de roca media. Para proponer un tipo de sostenimiento por este sistema es necesario contar con datos como el ancho, diámetro y altura del túnel. Barton propone usar la anchura equivalente del túnel y la calidad de la roca. Se posee datos del túnel: Ancho promedio = 4.30 m y Altura promedio = 4.29 m

Se tomará el dato de ancho promedio como propone Barton para introducirlo en el parámetro adicional: dimensión equivalente (De) de la excavación, para ello se utilizará la ecuación 7. Se observa en la relación que se necesita el coeficiente ESR que depende del tipo de excavación, se puede obtener este factor en la tabla 7, nos ubicamos en el apartado C y valor promedio del ESR = 1.25 según el tipo de excavación que se tiene, en este caso es un túnel de carretera secundaria. Ahora si se procede a calcular el valor del De:

$$De = \frac{\text{Anchura (m)}}{ESR} = \frac{4.30}{1.25} = 3.44$$

Ahora se usa la figura 10: Ábaco para determinar empíricamente el sostenimiento propuesto por Barton y Bieniawski:

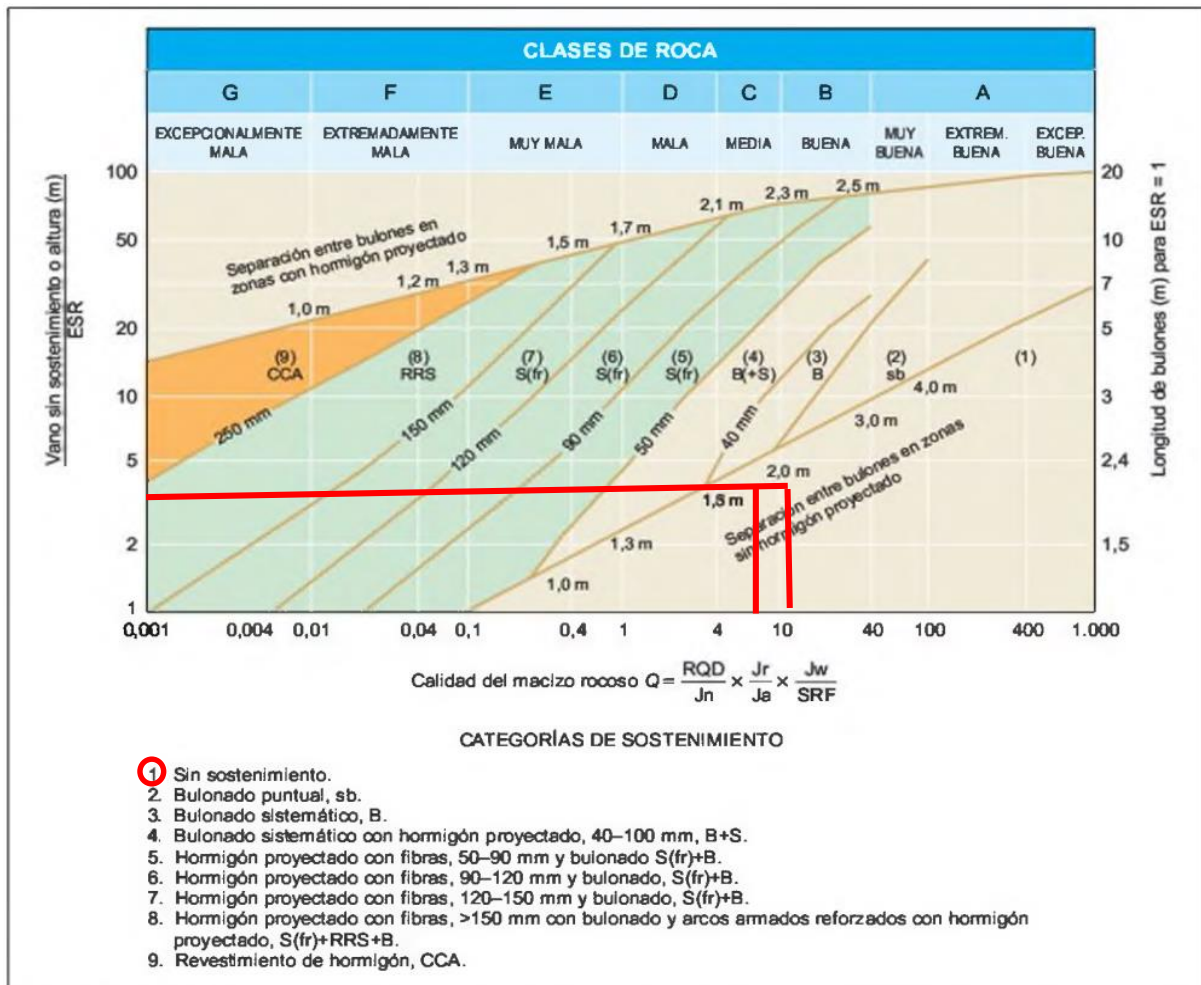


Figura 9: Determinación del tipo de sostenimiento.

Observando la figura se tiene una línea roja vertical y línea horizontal trazados desde valores aproximados según cálculos realizados, la intersección muestra una categoría de sostenimiento 1: indica que no necesita sostenimiento este tipo de roca de acuerdo a su De y clase de roca.

Tipo de sostenimiento del túnel para roca media, según Q de Barton:

❖ **Categoría 1.** Sin sostenimiento.

Ver anexo 12 sobre Secciones típicas de túneles y sus denominaciones para verificar si el ancho de la excavación es la correcta.

3.4. Plano estructural del túnel

Para representar este plano es necesario mostrar la tabla 10 con los datos tomados en campo. Se detectó una falla y consecuentemente discontinuidades principales que rigen al túnel, se indica que en el plano estructural representado (anexo 13) se representó las discontinuidades más pronunciadas y que influyen en la estructura del túnel; también es necesario recalcar que hay muchas más discontinuidades que tienen las orientaciones similares e iguales a las discontinuidades principales del túnel. Con respecto a la falla única detectada y representada está dentro del macizo rocoso del túnel y en la parte superficial del mismo, como se puede notar en el anexo n.º 13, dicha falla ha sufrido un desplazamiento estructural tanto en la parte interna como externa. Como dato adicional el túnel tiene una pendiente de 5° y la dirección del túnel tiene un rumbo de N21⁰E.

*Tabla 10:
Datos de campo de las discontinuidades y la falla presentes en el túnel.*

DISCONTINUIDADES	AZIMUT	RUMBO	BUZAMIENTO
D1	294 ⁰	N66 ⁰ W	84 ⁰
D2	202 ⁰	S22 ⁰ W	86 ⁰
D3	195 ⁰	S15 ⁰ W	80 ⁰
D4	10 ⁰	N10 ⁰ E	86 ⁰
D5	288 ⁰	N72 ⁰ W	78 ⁰
D6	202 ⁰	S22 ⁰ W	82 ⁰
D7	205 ⁰	S25 ⁰ W	83 ⁰
F1	330 ⁰	N30 ⁰ W	35 ⁰

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

La caracterización del macizo rocoso se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 11:
Caracterización de la roca andesita.

N	PARÁMETROS	VALORES	CLASIFICACIÓN UNIDADES
ESTACION GEO MECÁNICA 1	x: 742770	y: 9180588	z: 2729
	RQD %	87.81	Buena (75-90)
	RMR	63	Buena II (61-80)
	C	0.35	MPa
	Φ	36.5 ⁰	
	Q	7.81	Media(4-10)
	GSI	80	
	Módulo de Young	26	GPa
ESTACION GEO MECÁNICA 2	x: 742760	y: 9180583	z: 2729
	RQD %	80.88	Buena (75-90)
	RMR	66	Buena II (61-80)
	C	0.35	MPa
	Φ	38 ⁰	
	Q	11.59	Buena(10-40)
	GSI	75	
	Módulo de Young	32	GPa
ESTACION GEO MECÁNICA 3	x: 742750	y: 9180579	z: 2729
	RQD %	84.42	Buena (75-90)
	RMR	62	Buena II (61-80)
	C	0.35	MPa
	Φ	36 ⁰	
	Q	6.85	Media(4-10)
	GSI	75	
	Módulo de Young	24	GPa

Nota: MPa: megapascales; GPa: gigapascales; Φ : ángulo de fricción interna; C: cohesión.

La caracterización geomecánica realizada en la formación de la roca ígnea andesita, elaborado en el proyecto se logra obtener la calidad de la roca, hecho en estaciones distribuido estratégicamente en 03 zonas representativas (estaciones geomecánicas) a lo largo del túnel en estudio y como resultados nos indican que el macizo rocoso en las estaciones 1 a 3, da como calidad de roca regular (II) con un RMR por encima de 61 con un comportamiento del macizo rocoso de tres familias de discontinuidades existentes. La zonificación geomecánica de las estaciones está dada por 03 familias de discontinuidades que están en distintas direcciones; para ello se recomienda se

utilizar programas de Rocscience como el software Dips y Unwedge, con el objetivo de determinar posibles fallas en cuña dentro de la excavación y así diseñar el sostenimiento a utilizar.

Con respecto a tipo de sostenimiento determinado con los sistemas de clasificación geomecánica de Bieniawski y Barton:

- El sostenimiento establecido por el sistema RMR de Bieniawski (1989) propone un tipo de sostenimiento para aplicar al macizo rocoso de acuerdo al valor del RMR encontrado para una roca de calidad buena (clase II) se aplica:

Pernos de roca (20 mm de diámetro, completamente inyectados): Pernos locales en el techo, 3 [m] de largo y espaciado de 2,5 m con malla ocasional.

Hormigón proyectado convencional: 50 mm en el techo donde fuera necesario.

Cerchas Metálicas: No requiere.

Esta propuesta de sostenimiento es el que se debe de usar y aplicar al túnel en estudio, es lo ideal que se propone pero está sujeto al nivel de experiencia que tiene el ingeniero en temas de sostenimiento.

Para elección de los pernos de roca (propiedades y procedimiento de instalación) se recomienda revisar el Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea - Manual de Sostenimiento: Pernos de Roca, Cables, Cintas, Concreto y Gata (2004).

- El sostenimiento encontrado mediante el sistema Q de Barton Según la evaluación con el ábaco de la intersección del diámetro equivalente y la clase de roca se obtuvo una categoría de sostenimiento 1 que indica que no requiere sostenimiento, es decir, sin sostenimiento (figura 9). Este resultado se debe a las dimensiones incorrectas del túnel, al utilizar el ancho de la excavación

promedio: 4.30 m para encontrar el valor de D_e nos arroja 3.44, este valor es bajo por lo que haría con la intersección de la clase de roca media, dar como resultado una categoría 1. Es por eso que se recurre al Manual de Carreteras: túneles, muros y obras complementarias (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) y donde se indica que la distancia de cada carril es como mínimo de 3.60 m, la berma para túneles rurales se deberá disponer de una distancia mínima de 1.20 m a cada lado del carril; entonces la nueva calzada será de 6 m. además contará con una acera de 75 cm de ancho mínimo cada lado y también está presente el gábillo para el paso de los vehículos por su altura, cuya altura mínima es de 5.50 m más un espacio para la instalación de los elementos auxiliares de 1.00 – 1.50 m; de lo anterior se deduce la anchura del túnel que recomienda Barton para utilizar en el cálculo del D_e sería 7.50 m solo con un carril ; calcularemos el nuevo valor de D_e mediante la ecuación 7:

$$D_e = \frac{\text{Anchura (m)}}{ESR} = \frac{7.50}{1.25} = 6$$

Este valor encontrado de 6 y la clase de roca media o regular para la E.G. 1 y 3, y clase buena en la E.G. 2, por lo que las nuevas intersecciones darían el tipo de sostenimiento a usar para la excavación. En la figura 10 que se muestra a continuación se presenta la determinación de la categoría de sostenimiento según el sistema Q.

Los resultados obtenidos para E.G. 1 y 2 son:

Tipo de sostenimiento del túnel para roca media, según Q de Barton:

- ❖ *Categoría de sostenimiento 3: bulonado sistemático, B. El rango de separación entre bulones va desde 1.5 m a 2 m.*

Y para la E.G. 2 resulta:

Tipo de sostenimiento del túnel para roca buena, según Q de Barton:

- ❖ *Categoría 1. Sin sostenimiento.*

Para las zonas E.G. 1 y 3 necesitan sostenimiento, la distancia a utilizar entre bulones los determinará el ingeniero encargado de aplicar el sostenimiento del túnel debido a su experiencia. Y para la E.G. 2 indicaría que la roca es autoportable y no requiere sostenimiento. Se afirma que tanta la altura como la anchura del túnel es muy estrecha para el paso de los vehículos, lo que se debe hacer es un nuevo diseño de excavación del túnel para un correcto desplazamiento de vehículos.

Por cuestiones de seguridad, es recomendable que los túneles sean como mínimo de 2 carriles, no obstante en casos debidamente justificados, la autoridad competente podrá autorizar la ejecución de proyectos de túneles con un solo carril. Se indica que se tomó la distancia de un solo carril de acuerdo a lo mencionado.

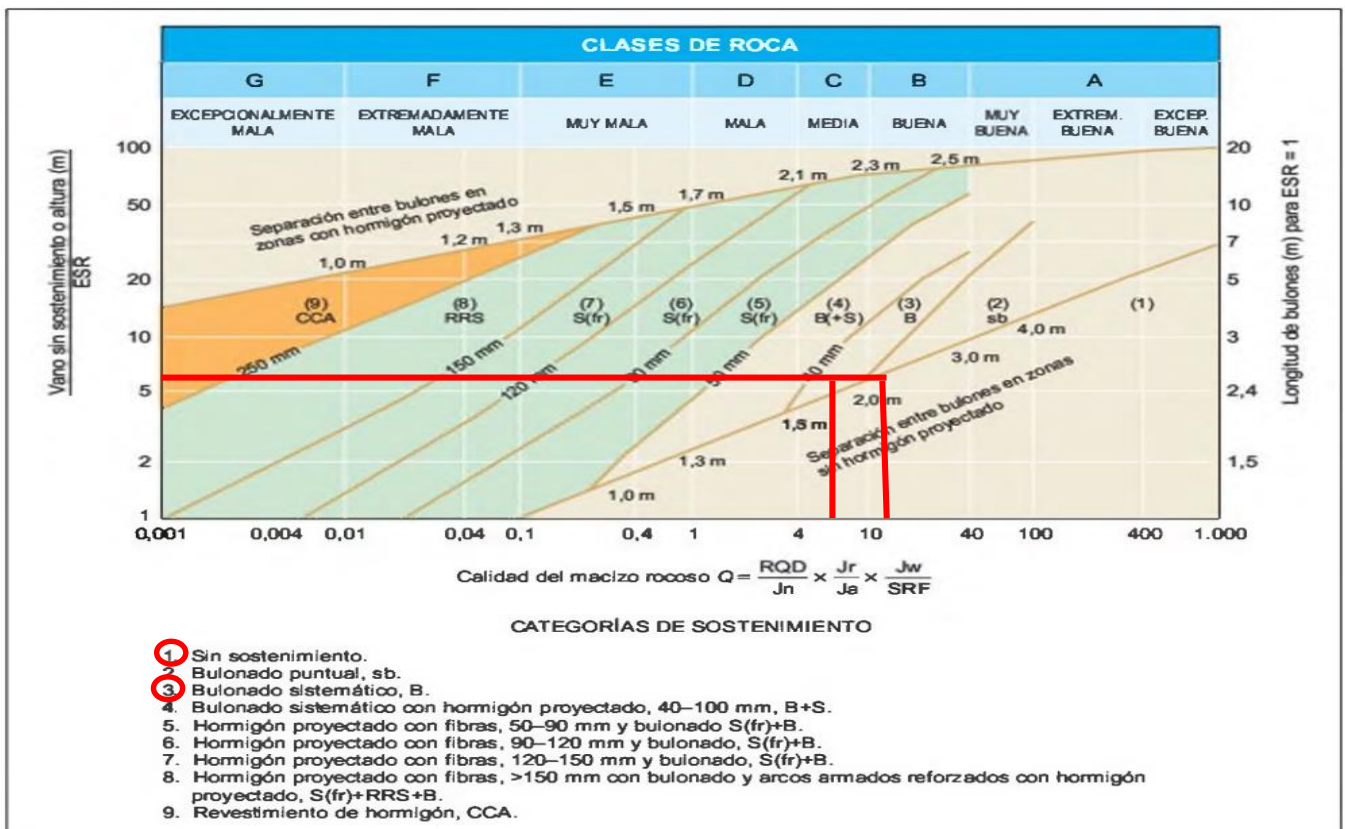


Figura 10: Nueva determinación del tipo de sostenimiento.

De lo evaluado se recomienda realizar un diseño para esta excavación basados en manuales de diseño de túneles para así contar con un túnel de dimensiones correctas y permitir la movilización de los vehículos de manera adecuada y segura. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones debe dar mayor valor a los criterios de seguridad sobre los criterios económicos en este túnel, ya que este tipo de excavaciones son de alto riesgo que puede traer consigo pérdidas de vidas humanas.

Para realizar un contraste del tipo de sostenimiento con el diseños del túnel para aplicar dicho sostenimiento se avaluó la excavación mediante el software Phase2 versión 8.0 que es un poderoso programa 2D para análisis de elementos finitos y análisis de esfuerzos para excavaciones subterráneos o de superficie en roca o suelo. El software puede ser utilizado para una amplia gama de proyectos de ingeniería y diseño. Se presenta en el anexo n.º 14 la excavación con el tipo de sostenimiento simulado y el factor de seguridad evaluado para la estabilidad del macizo rocoso.

Es necesario hacer la recomendación para la selección del anclaje en la etapa de sostenimiento se debe de conocer la calidad de las propiedades físicas-mecánicas del perno a utilizar y cumplir los procedimientos indicados por el fabricante para su instalación, esto con el fin de que cumpla su función de sostener eficientemente, evitar el colapso de rocas y realizar un monitoreo periódico en el túnel donde se aplica.

4.2 Conclusiones

- La investigación realizada basada en la caracterización y evaluación geomecánica del macizo rocoso que conforma la zona del túnel, analizados en función al sistema RMR y Q de Barton permitió proponer un tipo de sostenimiento de acuerdo a la calidad de la roca detectada por cada sistema que se complementan entre sí.
- Los parámetros medidos y analizados fueron del sistema RMR, se midieron a base de observaciones geológicas, extracción de muestras y ensayos realizados. Se obtuvo: Resistencia de la matriz rocosa (MPa): se determinó mediante el ensayo a la compresión simple cuyo resultado en promedio de las 3 muestras ensayadas fue 290.88 MPa, lo que indica según Bieniawski una roca con resistencia muy alta. RQD fue encontrada con la ecuación de Priest y Hudson (1976) detectando el número de discontinuidades por metro lineal, el valor fue de 87.81% (roca buena). Separación entre diaclasas, las discontinuidades están separadas en promedio de 0.35 m. Condición de las discontinuidades: la longitud de la discontinuidad: 2.23 m, la abertura: 1-5 mm, la rugosidad: ligeramente rugosa, el relleno: relleno blando < 5 mm y la alteración: ligeramente alterada e inalterada. Condiciones del agua subterránea: no hubo presencia de agua estaba en estado seco, esto se debería a la no presencia de lluvias. Se obtuvo un valor RMR de 63, 66 y 63 aplicándole el factor de ajuste por la orientación de las discontinuidades respecto al eje del túnel, indicando una clase de roca II y su calidad buena. Analizando por el Q de Barton mediante la correlación existente entre RMR y Q, arrojó los valores 8.26 y 7.36 ubicándose entre 4 – 10 que representa a una clase de roca media o regular.

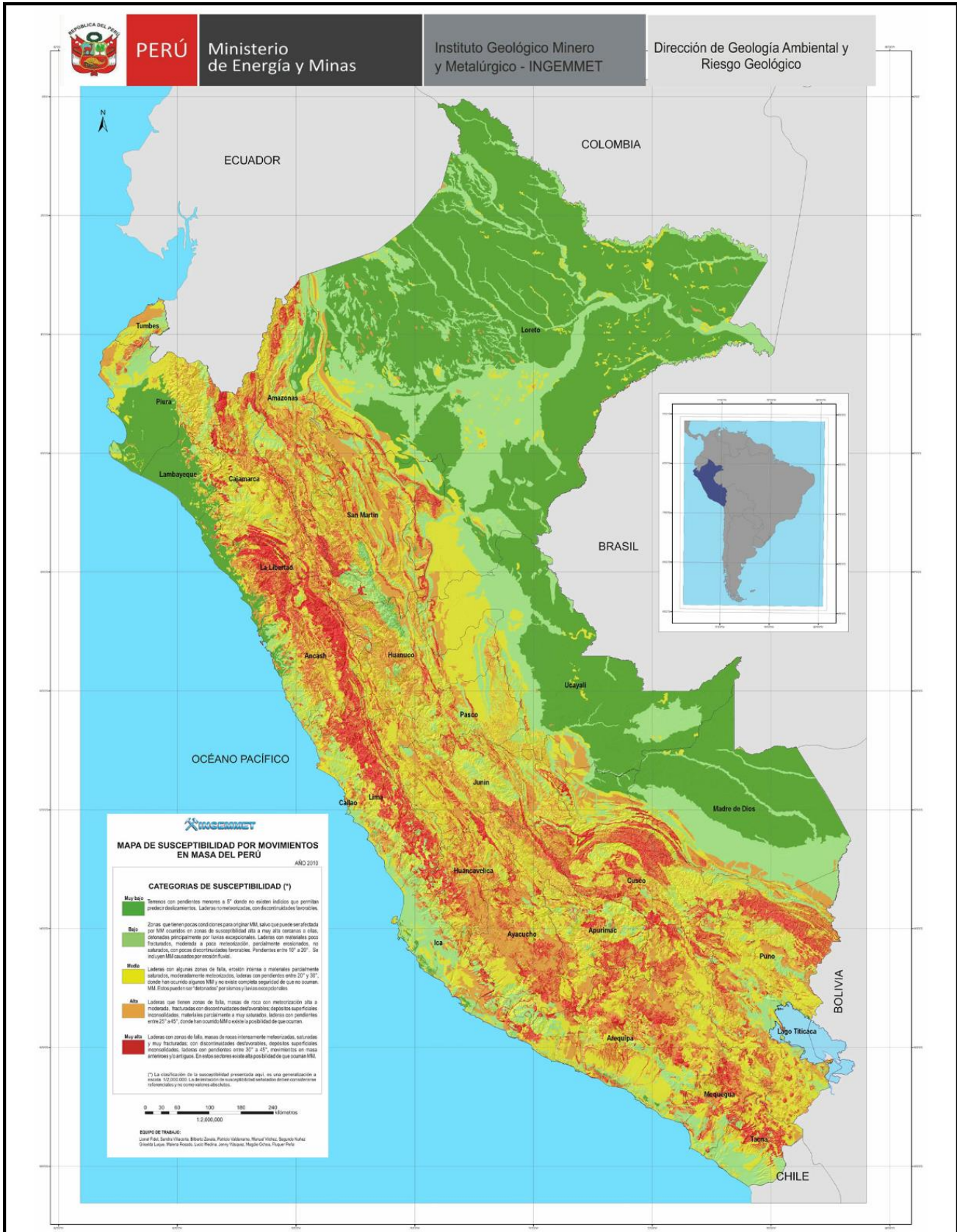
- Se determinó el tipo de sostenimiento mediante los dos métodos empíricos:
RMR: para las 3 estaciones se aplica Pernos de roca (20 mm de diámetro, completamente inyectados): Pernos locales en el techo, 3 [m] de largo y espaciado de 2,5 m con malla ocasional; Hormigón proyectado convencional: 50 mm en el techo donde fuera necesario y Cerchas Metálicas: No requiere
Q de Barton: para las estaciones 1 y 3: categoría de sostenimiento 3, es decir, bulonado sistemático, B. El rango de separación entre bulones va desde 1.5 m a 2 m. y para la estación 2: Sin sostenimiento.
- La zonificación geomecánica a lo largo del túnel se hizo mediante 3 estaciones geomecánicas donde se colectaron datos de las discontinuidades presentes como su rumbo, buzamiento y parámetros de clasificación del RMR. Se detectó un falla dentro del túnel y que está presente también fuera del túnel (hubo desplazamiento), presenta un rumbo de N30°W y su buzamiento es de 350. La roca presente es de génesis ígnea- volcánica perteneciente al Grupo Calipuy - Volcánico San Pablo (Ti-vsp), de una resistencia alta y calidad buena (II) y roca regular a buena, según los sistemas RMR Y Q de Barton respectivamente.

REFERENCIAS

- Alejano Monge, L., & Ramírez Oyanguren, P. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos y ingeniería de taludes*. Madrid.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Springer Verlag.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley & Sons.
- Ferrer Guijón, M., Gonzáles de Vallejo, L., Ortuño Abad, L., & Oteo Mazo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson.
- Gonzáles Sales, J. J., La Torre Borda, O., Medina Allecca, L., & Ramos Cabrera, W. (2017). *Peligros Geológicos y Geohidrológicos por el Niño Costero 2017 en la Region de La Libertad y Cajamarca: Análisis geológico, geomorfológico y de peligros en la ciudad de Trujillo*. Lima.
- Hoek, E., Marinos, P., & Marinos, V. (2007). *Ingeo Túneles: El índice de Resistencia Geológica, GSI: aplicaciones y limitaciones* (Vol. 12). (C. López Jimeno, Ed.) Madrid: Gráficas Arias Montano S.A.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Carreteras: túneles, muros y obras complementarias*. Lima.
- Palmström, A., & Stille, H. (2000). *Ingeo Túneles: La clasificación como herramienta en la ingeniería de rocas* (Vol. 15). (C. López Jimeno, Ed.) Madrid: Gráficas Arias Montano S.A.
- Villacorta, S., Fidel, L., & Zavala Carrión, B. (2012). *Mapa de Susceptibilidad de movimientos en masa del Perú*. Argentina.

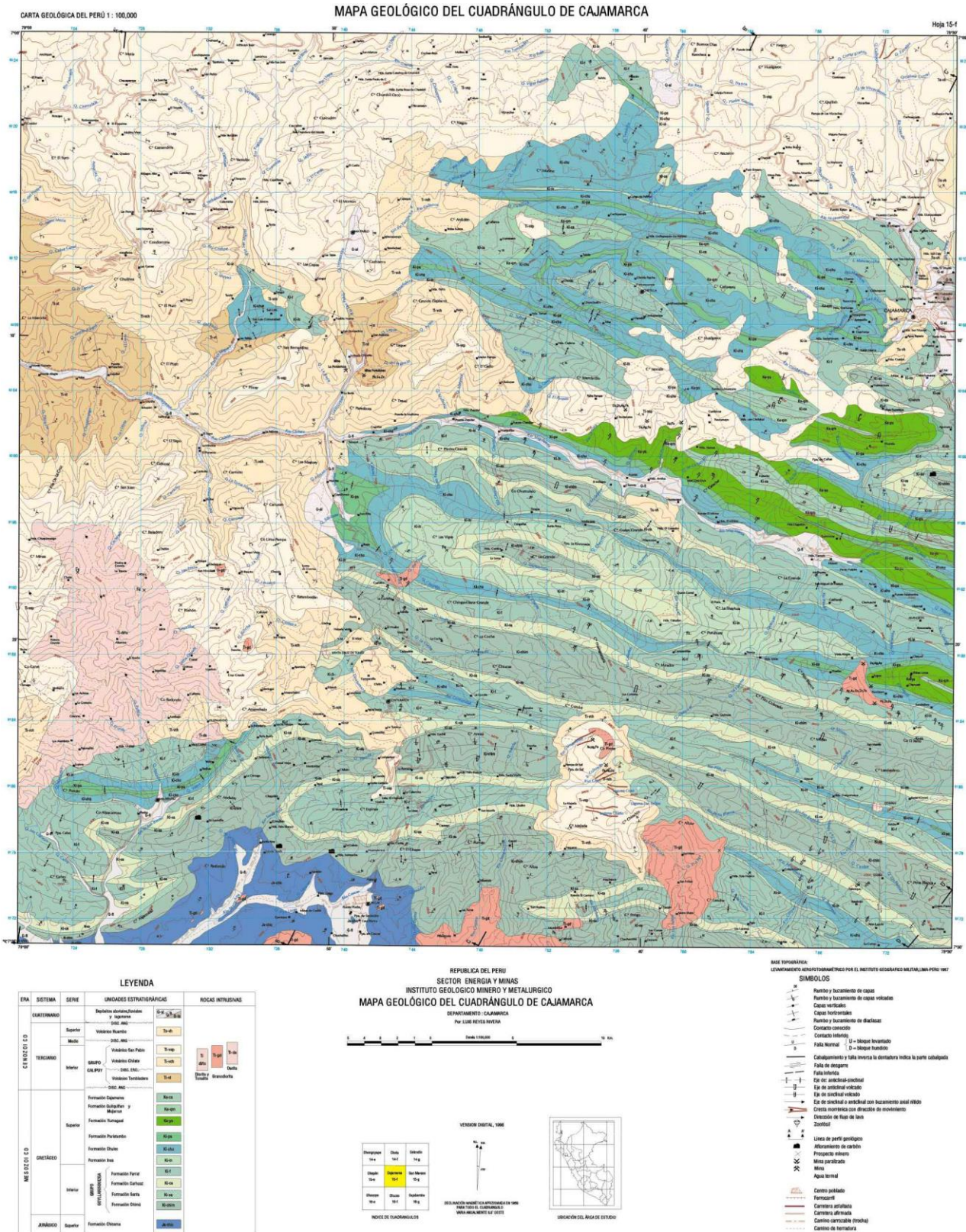
ANEXOS

ANEXO n.º 1. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú (2010).



Fuente: El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), 2010.

ANEXO n.º 2. Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cajamarca.



Fuente: GEOCATMIN (Sistema de Información Geológico y Catastral Minero).

ANEXO n.º 3. Punto de referencia: Puente Contumazá ubicado a 50 metros del túnel en estudio.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 4. Fotografías del túnel: ingreso del túnel Cascas-Contumazá.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

Fotografías del túnel: ingreso del túnel Contumazá-Cascas y vista panorámica.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 5. La toma de rumbo y buzamiento de las discontinuidades.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 6. Realizando el ensayo con el Martillo Schmidt de forma perpendicular a la cara de la discontinuidad.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

NEXO n.º 7. Ejemplo de cálculo de la resistencia con martillo Schmidt y ábaco de correlación



Ejemplo de cálculo de la resistencia a partir del martillo Schmidt

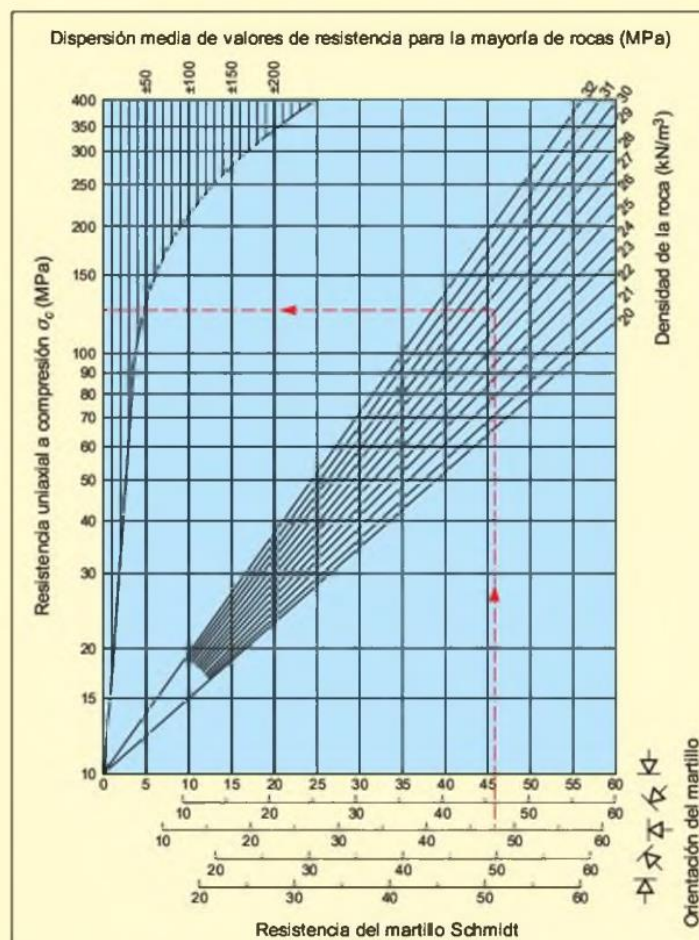
A partir de los datos de rebote obtenidos con el martillo Schmidt sobre matriz rocosa, calcular la resistencia a compresión simple de la roca, cuya densidad es 27 kN/m^3 .

Valores de rebote del martillo: 49; 46,5; 45,5; 45; 44,3; 50; 48,5; 46; 43,2; 44 (el martillo se ha aplicado perpendicularmente a una pared vertical durante el ensayo).

Solución: se calcula el valor del rebote medio con los datos de campo. Para ello de cada 10 valores se eliminan los cinco menores y se obtiene el valor medio con los cinco restantes (en caso de tener 12 valores se elimi-

nan 6). Por lo tanto, quedarían los siguientes valores para el cálculo de la media: 46, 46,5, 48,5, 49, 50 y se obtendría un valor del rebote medio igual a 48.

En función de la inclinación del martillo, se entra con el valor del rebote medio en el gráfico que aparece en este recuadro, desde el eje de abscisas hasta alcanzar el valor de la densidad de la roca estudiada. A partir de este punto, se traza una línea horizontal hasta cortar el eje de ordenadas, obteniendo de esta forma el valor de la resistencia a compresión simple de la roca, que será igual a 125 MPa.



Fuente: Ferrer et al., 2002.

ANEXO n.º 8. Medición de parámetros de RMR.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

Medición de parámetros de RMR.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 9. Evaluación del macizo con ayuda del gráfico general para estimar el GSI a partir de observaciones geológicas.



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 10. Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple.

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM(1981)	<i>Geological Society of London (1970)</i>	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1–5	Muy blanda	Blanda > 1,25	Muy baja	Sal, hitita, limolita, marga, toba, carbón.
5–12,5	Blanda	Moderadamente blanda		
12,5–25		Moderadamente dura		
25–50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50–100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100–200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Extremadamente dura	Muy alta
>250	Cuarcita, gabro, basalto.			

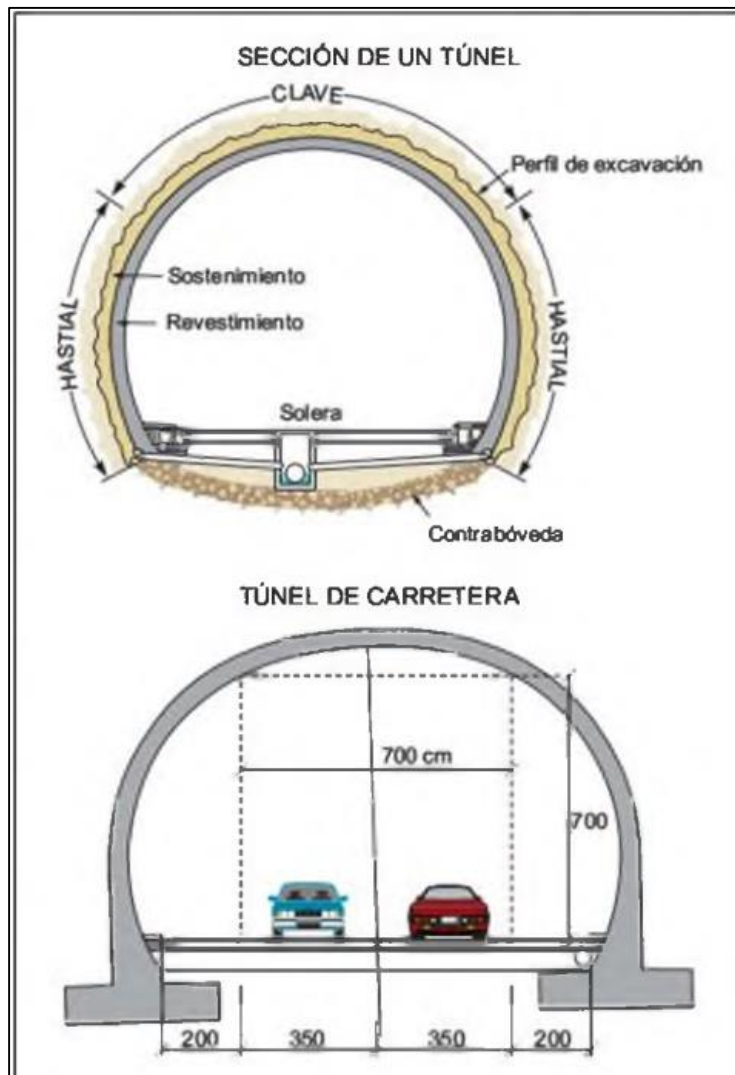
Fuentes: ISRM, 1981; Geological Society of London, 1970; Bieniawski, 1973.

ANEXO n.º 11. Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas.

ROCAS	DENSIDAD (Kg/m ³)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	COEFICIENTE DE POISON	RESITENCIA A LA COMPRESION (MPa)	RESISTENCIA A LA TRACCION (MPa)
Rocas batolíticas					
Granito granodiorita	2500-2750	30-70	0.12-0.25	120-280	4-7
Gabro	2920-3050	60-100	0.12-0.25	150-100	5-8
Rocas intrusivas					
Riolitas	2450-2600	10-20	0.1-0.2	80-160	5-9
Dacita	2500-2750	8-18	0.09-0.2	80-160	3-8
Andesita	2300-2750	12-35	0.11-0.2	40-320	5-11
Basalto	2750-3000	20-100	0.14-0.2	30-420	6-12
Diabasa	2900-3100	30-90	0.12-0.2	120-250	6-13
Tobas volcánicas	1300-2200	.....	0.1-0.2	5-60	0.5-4.5
Rocas sedimentarias					
Arenisca	2100-2500	15-17	0.07-0.12	10-120	1.5-6
Caliza de grano fino	2600-2850	50-80	0.1-0.2	50-200	4-7
Caliza de grano grueso	1550-2300	.....	0.12	4-60	1-3.5
Caliza	1550-2500	.....	0.07-0.12	49-200	1.5-5
Dolomita	2200-2700	20-30	0.08-0.2	15-200	2.5-6
Esquistos	2450-2750	.....	.....	.....	.....
Rocas metamórficas					
Mármol	2650-2750	60-90	0.11-0.2	50-180	5-8
Gneis	2600-2780	25-60	0.09-0.2	80-250	4-7

Fuente: Alejano Monge, L., & Ramírez Oyanguren, P. (2004)

ANEXO n.º 12. Secciones típicas de túneles y sus denominaciones.



Fuente: Ferrer et al., 2002.

ANEXO n.º 13. Falla presente en el túnel



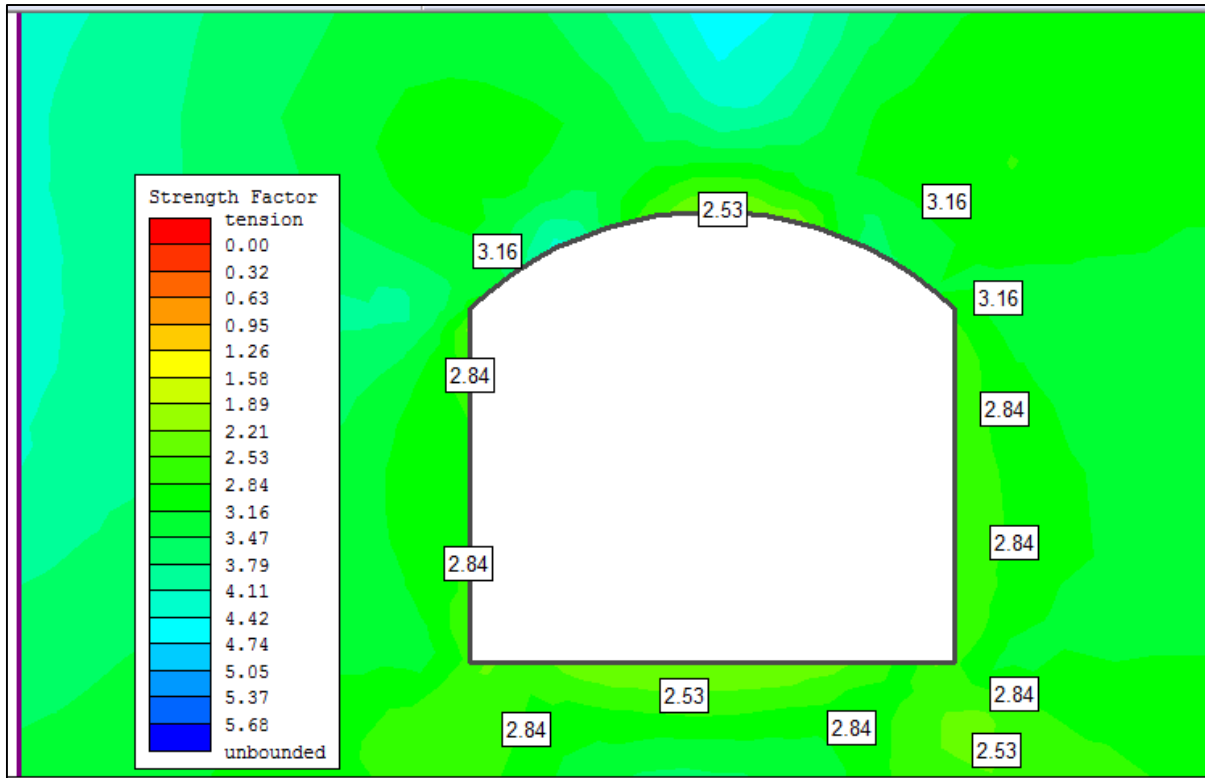
Fuente: Elaboración propia del tesista.

Falla presente en el túnel vista superficial.



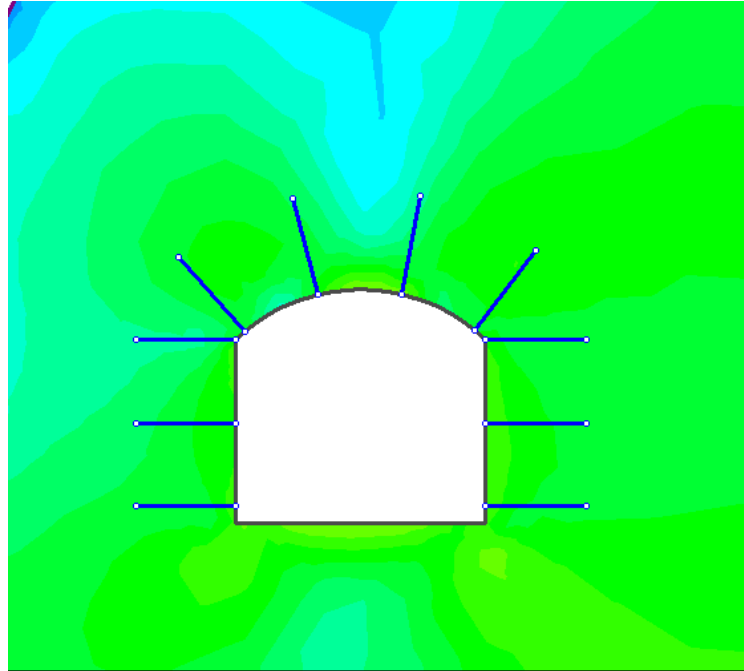
Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO n.º 14. Análisis de la excavación: factor de seguridad y diseño de sostenimiento
 con software Phase 2.



Fuente: Phase 2.

Análisis de la excavación: Sostenimiento con software Phase 2 simulado con pernos de anclaje en el túnel con medidas según el manual de MTC (2016).



Fuente: Phase 2.