

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA EL DISEÑO DE
SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADA POR:

CARLOS ANDRÉS MAMANI SUCASAIRE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO -PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

**CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA EL DISEÑO DE
SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PRESENTADO POR:

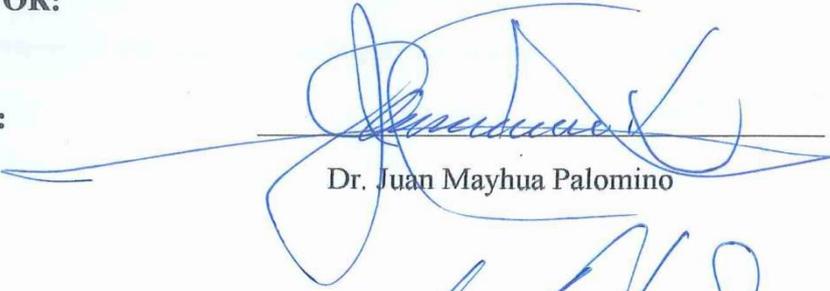
CARLOS ANDRÉS MAMANI SUCASAIRE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

APROBADO POR:

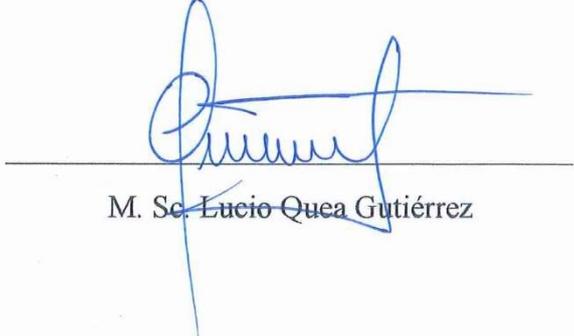
PRESIDENTE:


Dr. Juan Mayhua Palomino

PRIMER MIEMBRO:


Ing. David Velásquez Medina

SEGUNDO MIEMBRO:


M. Sc. Lucio Quea Gutiérrez

TEMA: Sostenimiento minero.

ÁREA: Ingeniería de Minas.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 07 de noviembre del 2019.

DEDICATORIA

A mis padres Andrés Mamani Vargas y

Virginia Sucasaire Mamani

A mi esposa, hermana, a mis sobrinos y a mi familia más cercana.

A todos Ustedes es una satisfacción y un privilegio dedicarles, con alegría y entusiasmo personal, profesional y también intelectual, los cientos de horas invertidas en este trabajo de investigación, que no es más que la evidencia de la muestra de mi amor y cariño hacia ustedes.

AGRADECIMIENTO

A mi facultad de Ingeniería de Minas por brindarme la oportunidad de conformar su familia académica.

A todos los docentes de la Facultad de Minas, por transmitirme sus sabias enseñanzas durante el transcurso de mi formación en aulas universitarias.

Mi agradecimiento a mis compañeros de estudio, con los cuales forme una gran amistad, gracias por ser tan buenos amigos.

A la Universidad Nacional del Altiplano Puno, mi Alma Mater que me entre sus aulas durante los años de mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
1. TÍTULO	10
2. AUTORES, AFILIACIÓN Y DIRECCIÓN INSTITUCIONAL	10
3. RESUMEN.....	10
4. PALABRAS CLAVES:	10
5. INTRODUCCIÓN	11
6. MATERIALES Y MÉTODOS	12
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
8. CONCLUSIÓN	22
9. REFERENCIAS	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva de deformación para roca pizarra y cuarcita tipo “C”	15
Figura 2: Curva de deformación para roca pizarra en software Rocdata.....	16
Figura 3: Curva de deformación para roca cuarcita en software Rocdata	16
Figura 4: Mapeo geomecánico estación N° 1	17
Figura 5: Mapeo geomecánico estación N° 2	17
Figura 6: Mapeo geomecánico estación N° 3	17
Figura 7: Aberturas máximas vs tiempo de auto-soporte	19
Figura 8: Gradación de los agregados recomendadas según EFNARC.....	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sistemas principales de estructuras	14
Tabla 2: Relación de densidad y porosidad	14
Tabla 3: Contenido de agua roca pizarra	15
Tabla 4: Contenido de agua roca cuarcita.....	15
Tabla 5: Densidad de la roca pizarra	15
Tabla 6: Densidad de la roca cuarcita.....	15
Tabla 7: Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca pizarra	16
Tabla 8: Cálculo del RMR.....	18
Tabla 9: Clase de macizo rocoso según RMR	18
Tabla 10: Característica de la excavación túnel de conducción AI	18
Tabla 11: Sostenimiento según tipo de roca	19
Tabla 12: Aberturas máximas vs tiempo de auto-soporte.....	19
Tabla 13: Adiciones cementicias aceptadas según EFNARC	19
Tabla 14: Tipos de shotcrete.....	20
Tabla 15: Sostenimiento en túnel de conducción AI	21

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CyM	Constructores y Mineros
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Índice de calidad de roca
Q	Sistema Q de Barton
AI	Ángel I
IGME	Instituto geológico y minero de España
g	Gramos
cm	Centímetro
cm ²	Centímetros cuadrados
cm ³	Centímetros cúbicos
%	Porcentaje
Kg	Kilogramos
L	Longitud
D	Diámetro
Mpa	Megapascal
Ø	Diámetro
e	Espaciado
m	Metro
mm	Milímetro
KN	Kilonewtons
ESSC	European Statistical System Committee
EFNARC	Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable
P	Capacidad de apoyo del shotcrete

T	Peso del block muerto
FS	Factor de seguridad
P	Capacidad de apoyo del shotcrete
Ac	Área de corte
P	Capacidad de apoyo del perno (Kg)
Rc	Resistencia a la tracción mínima del perno = 6320 Kg/cm ²
S	Área del perno
d	Diámetro del perno (cm)
τ	Adherencia entre el perno y el cemento (Kg/cm ²)
U	Circunferencia del perno (cm)
L	Longitud del perno (cm)
y	Peso unitario de la roca (2.7 Tn/m ³)
h	Potencia de la zona inestable (1.5 m)
S	Espaciamiento entre pernos de dirección longitudinal y transversal



Caracterización del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas

Characterization of the rock mass for the design of support in underground excavations

Carlos Andrés Mamani Sucasaire

ORCID: 0000-0001-8839-2077, adrickcarlos@gmail.com , 987001991

Facultad Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano, Av. Floral 1153, Ciudad Universitaria, Puno, Perú.

Resumen

La empresa Constructores y Mineros, se enfoca en la construcción e instalación de central hidroeléctrica Ángel I, II y III, el proyecto está ubicado en Ollachea, Carabaya, Puno, Perú. El problema surge de tantos accidentes mortales e incidentes que ocurre en excavaciones subterránea por desprendimiento y caída de rocas, sin duda es una actividad de más alto riesgo que el hombre realiza. Y dado que una obra como este túnel hidráulico requiere una vida útil de por lo menos 70 años, la investigación se realizó en el año 2017 ; basado en los objetivos de caracterizar el macizo rocoso y el diseño de sostenimiento en roca emplazados a lo largo del túnel, siguiendo un diseño metodológico del tipo descriptivo tomando como marco poblacional 03 estaciones geomecánicas en túnel de conducción Ángel I, usando instrumentos de campo como son esclerómetros, brújula, distancio metro, flecsometro, picca y equipos de utilería para el registro de los datos tomados en campo, planos topográficos, ábacos y tablas. Las características geomecánicas del macizo rocoso presentes en el túnel están controladas por las características estructurales, geométricas y de las discontinuidades, dentro de estas últimas las condicionantes fueron: el espaciamiento, la persistencia o continuidad, la rugosidad de las juntas, la apertura, el relleno, la meteorización, alteración y presencia de agua, las cuales determinaron 7 tipos de roca I, IIA, IIB, IIIA, IIIB, IVA Y IVB que nos permitió un diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas.

Palabras claves: RMR, tipo de roca, sostenimiento, túnel, geomecánica.

Abstract

The company Constructores y Mineros, focuses on the construction and installation of Angel I, II and III hydroelectric power plant, the project is located in Ollachea, Carabaya, Puno, Peru. The problem arises from so many fatal accidents and incidents that occur in underground excavations due to rockfall and fall, it is undoubtedly an activity of higher risk that man performs. And since a work such as this road tunnel requires a useful life of at least 70 years, the research was carried out in 2017; based on the objectives of characterizing the rock massif and the design of rock support located along the tunnel, following a methodological design of the descriptive type taking as a population framework 03 geo-mechanical stations in Angel I conduction tunnel, using field instruments such as They are sclerometers, compass, distance meter, phrometer, picca and props for the registration of data taken in the field, topographic plans, abacuses and tables. The geo-mechanical characteristics of the rock massif present in the tunnel are controlled by the structural, geometric and discontinuity characteristics, within the latter the conditions were: spacing, persistence or continuity, the roughness of the joints, the opening, the landfill, weathering, alteration and presence of water, which determined 7 types of rock I, IIA, IIB, IIIA, IIIB, VAT and IVB that will allow us to design a support in underground excavations allowing.

Keywords: RMR, rock type, support, tunnel, geo mechanics.

1. Introducción

El presente trabajo de investigación titulado “Caracterización del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas”, se inicia a través de los análisis de los altos índices de accidentabilidad que conlleva a la gerencia de línea con su personal garantizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas a controlar a través del sostenimiento.

La caracterización física y mecánica del macizo rocoso es de gran importancia debido a la gran cantidad de excavaciones realizadas, por tal motivo es necesario realizar una serie de estudios utilizando métodos directos e indirectos con el fin de conocer las características de la masa rocosa sobre el cual opera la empresa Constructores y Mineros. Tales estudios se complementan con estudios geológicos locales, regionales en donde se considera sumamente importante los estudios a detalle de la caracterización geo mecánica en aspectos del tipo estructural como fallas, pliegues, alteraciones, fracturas. Considerando los esfuerzos generados alrededor de las excavaciones subterráneas, es difícil la medición de la intensidad de los mismos, sin embargo, es muy importante determinar esos valores para dimensionar adecuadamente la sección del túnel y diseñar los elementos de sostenimiento adecuado a la capacidad de presión de la roca.

Con el fin de brindar una operación segura y de calidad la caracterización geomecánica permite evitar y/o disminuir los incidentes/accidentes por caída de rocas, utilizando las herramientas, a fin de controlar la estabilidad de rocas, estableciendo tipos de sostenimiento en las diferentes excavaciones subterráneas y garantizando la estabilidad de la masa rocosa. En labores subterráneas se presentan agrietamientos de los macizos rocosos, lo se manifiesta la pérdida de su estabilidad y el mecanismo de actuación de la presión, esto se determina mediante la geomecánica.(Cueva-Romero & Arana-Cabrera, 2014)

(Saavedra-Godoy, 2007) Menciona que “*para un mejor análisis en labores subterráneas se recomienda realizar mapeos geotécnicos; caracterización, clasificación geomecánica y zonificación geomecánica del macizo rocoso; y, evaluar de las condiciones de presencia del agua y de los esfuerzos in-situ.*”

Estimar el comportamiento mecánico del macizo rocoso puede ser una herramienta útil para administrar el riesgo durante el proceso de

excavación de obras subterráneas. ¿Esto debido a que previene al constructor de ciertas amenazas de inestabilidad; Ayuda a redefinir las fases de excavación en ciertos sectores; y a definir el tipo, cantidad y oportuna instalación del soporte. Todos estos procesos a largo plazo se traducen también en una optimización de la construcción global de este tipo de obras. (Suarez-Burgoa, Valencia-Gonzalez, Ordoñez-Carmona, Navarro-Montoya, & Hidalgo-Gomez, 2009)

Con la aplicación de las clasificaciones geomecánicas, basadas en el RQD, el RMR y la Q, y según la norma de la Sociedad Internacional de la Mecánica de Roca (ISRM 1982), se obtiene que existen tres zonas de rocas de calidad mala, regular y buena. De estas se deriva que en la zona de rocas de buena calidad se laboreen las excavaciones con avance completo, de longitud libre 1-1,5 m; empleando en la corona el soporte de anclas cementado de diámetro 20 mm, longitud 3 m y espaciado 2,5 m y se aplica hormigón lanzado de grosor 50 mm. Para la zona de calidad mala y regular que se laboreen las excavaciones en avance escalonada de longitud libre de 1-3 m y después de cada voladura instalar en la corona anclas cementado de diámetro 20 mm, longitud 4-5 m y espaciado 1-2 m y en los lados malla metálica, con hormigón lanzado del grosor 50-150 mm. En este estudio se observa que la dirección de las discontinuidades es generalmente de norte a sur, por lo que hay que prever la dirección de laboreo de las excavaciones. (Adeoluwa-Olajesu, Noa-Monjes, & Quevedo-Sotolongo, 2017)

(Soto-Vilca, 2016) menciona que “*la determinación de las características geomecánicas del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento de las cuñas subterráneas de roca del túnel Wayrasencca, permitirá reconocer y plantear las posibles medidas de corrección, remediación y mitigación de los problemas de inestabilidad del túnel Wayrasencca. Evitando los incidentes, accidentes a los trabajadores, además los problemas de inestabilidad que pudieran existir en un futuro.*”

Mejorado en el Departamento de Geomecánica debe realizarse la cuantificación de los parámetros para determinar la calidad del macizo rocoso mediante la clasificación geo mecánica de Bieniawski RMR y Barton Q, siendo necesaria la aplicación del sistema de información geomecánica, estandarizado por el ISRM (Society International For Mechanic’s), cuyo procedimiento es de caracterizar el macizo rocoso, mediante el

levantamiento litológico-estructural, la caracterización de los componentes mecánicos de la masa rocosa, mediante los ensayos de laboratorio, que nos determinan las propiedades físico-mecánicas de las rocas y el mineral, los ensayos in-situ, como es el caso de la utilización del martillo Schmidt para estimar la resistencia compresiva de la roca y mineral, y mediante las clasificaciones geomecánicas determinar los dominios estructurales. (Marquez-Olivera, 2019)

A partir del análisis de las propiedades ingeniero geológicas y de las características mecánico – estructurales del macizo; teniendo en cuenta las características e intensidad de agrietamiento, el grado de bloquesidad del macizo, las formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan y el mecanismo con que se producen; el comportamiento, estado actual y grado de deterioro del macizo o sectores de él, se puede estimar cuales son los modelos geo mecánicos más representativos en los macizos rocosos estudiados. (Pire-Cartaya, 2006)

La elección del tipo de sostenimiento está en función al tipo de roca, mediante un mapeo estructural y geomecánico, donde se determina el tipo de roca que mediante la cartilla geo mecánica se aplica el elemento a sostener. De ello el tipo de sostenimiento a aplicarse, son varios debido a que el diseño minero involucra distintos dominios geo mecánicos. Otro aspecto relevante para la determinación del sostenimiento es el carácter “temporal y/o permanente” de las labores mineras (vida útil de la labor). (Lazaro-Maguiña, 2018)

(Ceras-Cuadros, 2015) concluyó que *“La determinación del tipo de sostenimiento para minimizar el estrés de roca influye positivamente en la estabilidad del macizo rocoso, debido a que minimiza el nivel de estrés de roca.”*

(Calderón-Quirós, 2013) hace referencia que *“en la mayoría de túneles construidos por el ICE, la estabilidad ha sido controlada por una particular combinación de refuerzo para el sostenimiento temporal, la cual consiste en una sección de viga tipo W (típicamente secciones W6x20 hasta W8x31), que son colocados en conjunto con malla electro soldada y concreto proyectado de espesor*

2. Materiales y métodos

El presente proyecto de investigación identificado como caracterización del macizo rocoso y diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas se lleva a cabo en la central

variable. Este tipo de sostenimiento implica un alto costo de fabricación, debido al precio del acero en la actualidad. Aun cuando el comportamiento del sostenimiento colocado típicamente en los túneles del ICE es satisfactorio, en muchos casos podría ser remplazado por un sistema de sostenimiento diferente, que de la misma forma involucra la combinación de acero y concreto, pero en este caso se utilizaría un arco más ligero, el cual estaría constituido por una cercha de acero o vigas de celosías embebidas en concreto lanzado.”

La clasificación geomecánica de rocas en minería subterráneas, garantiza la instalación adecuada de las fortificaciones de las labores. Por ello, la geomecánica juega un papel muy fundamental en la minera, específicamente en la estabilidad de la masa rocosa, esto por las fracturas en la roca que existen como consecuencia de las operaciones mineras. La geomecánica permite establecer dimensiones adecuadas de las labores mineras, establecer la dirección general de avance del minado a través del cuerpo mineralizado, especificar el sostenimiento adecuado, asegurar el rendimiento adecuado de la masa rocosa involucrada con las operaciones, etc. (Lazaro, 2018)

La investigación comprende básicamente la caracterización del macizo rocoso será determinante para identificar el tipo de roca que nos permitirá un diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas, en el presente estudio se centra en analizar la caracterización del macizo rocoso para la aplicación del diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas en la central hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI.

Los parámetros a considerar serán las características estructurales, geométricas y de las discontinuidades, dentro de estas últimas las condicionantes fueron: el espaciamiento, la persistencia o continuidad, la rugosidad de las juntas, la apertura, el relleno, la meteorización, alteración y presencia de agua.

La presente investigación tiene como objetivo analizar la caracterización del macizo rocoso para la aplicación del diseño de sostenimiento.

hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI con secciones de 3.50 x 3.50 m que está ubicado en Ollachea, Carabaya Puno, será siendo aplicada a una investigación del tipo descriptivo, que se caracteriza por describir las características a tomar en cuenta en su aplicación.

La población de estudio se consideró el proyecto de la central hidroeléctrica Ángel I, II y III y la muestra se tomó 03 estaciones del túnel de conducción AI que tiene una longitud de 1013.08 m.

Para el presente trabajo de investigación se trabajó recorriendo el lugar de trabajo y realizando descripción cualitativa y cuantitativa usando plantillas para recolección de datos para la caracterización geo mecánica; además se utilizó guías para la valoración de los parámetros respecto a las discontinuidades.

En la Figura 4, 5 y 6 se visualizan la cartilla geomecánica usada para toma de datos que incluye los rangos para la clasificación RMR. La operación de variables independientes es la caracterización del macizo rocoso indicando la calidad del macizo rocoso, categorizando de acuerdo a zonas y dominios geotectónicos teniendo en cuenta los índices RQD y RMR usando instrumentos de campo como son: esclerómetro, brújula, distanciómetro, picca.

La operación de variables dependientes es el sostenimiento de acuerdo al tipo de roca se diseña el sostenimiento como refuerzo o soporte, el índice es su factor de seguridad usando tablas y abanicos.

Los instrumentos para la recolección de datos, que se realizó en la caracterización geo mecánica del macizo rocoso y correlación, son los siguientes: 01 Brújula marca Brunton, 01 Distancio metro marca Leika, 01 Esclerómetro marca Proeti, 01 Flexómetro milimétrico marca Tools, 01 Picca, 01 Wincha de 50 m.

Los equipos de utilería para el registro de los datos tomados en campo son: tablero acrílico A4, formatos de registro, planos topográficos, ábacos y tablas, libretas de campo.

En cuanto a la preparación de muestras para ensayos y equipos de ensayo de rocas se utilizó: sonda saca testigos, cortadora de disco diamantino, balanza electrónica con precisión a 0.01 g, equipo de compresión uniaxial.

3. Resultados y discusión

Análisis de resultados

Distribución de Discontinuidades

Para establecer las características de la distribución de discontinuidades tanto mayores como menores, el procesamiento de los datos orientaciones se realizó mediante técnicas de proyección estereográfica equiarial, utilizando la versión avanzada del programa de computo DIPS

versión en túnel de conducción AI SW, se tienen claramente definidos tres sistemas estructurales principales y uno secundario que afectan a la zona, la Primera con orientación NE - SW teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP dirección) de 81/316. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NW – SE con DIP/DIP dirección de 77/218. Sistema principal, la tercera con orientación NE.

SW con DIP/DIP dirección de 54/109. Sistema principal, la cuarta con orientación NW-SE con DIP/DIP dirección de 75/81. Sistema secundario.

La distribución de las discontinuidades revela que en toda la zona de evaluación se presenta tres arreglos estructurales principales y uno secundario, donde se dan cuatro sistemas típicos de discontinuidad: 6.0 (2012), Rocscience.

Tabla 1: Sistemas principales de estructuras

Set	DIP	DIP DIR
S1	81	316
S2	77	218
S3	54	109
S4	75	81

Fuente: Elaboración propia.

Propiedades físico – mecánico del macizo rocoso, en la propiedad se consideró la pizarra y la cuarcita:

La pizarra es una roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas, La pizarra es una roca densa, de grano fino, formada a partir de rocas sedimentarias arcillosas y, en algunas ocasiones, de rocas ígneas. La principal característica de la pizarra es su división en finas láminas o capas (pizarrosidad). Los minerales que la forman son principalmente cuarzo y moscovita, suele ser de color negro azulado o negro grisáceo, pero existen variedades y otros tonos. Es altamente impermeable, ver Tabla 2.

Tabla 2: Relación de densidad y porosidad

Tipo de roca	Densidad (kg/m ³)	Porosidad (%)
Pizarra	2600 - 2700	0.1-0.5
Cuarcita	2650 - 2750	0.1-0.5

Fuente: Ferrer, M. y González Vallejo, L, Eds. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

La cuarcita es una roca metamórfica dura con alto contenido de cuarzo. En composición la mayoría de las cuarcitas llegan a ser más de 90 % de cuarzo y algunas incluso 99 %, la cuarcita se forma por re cristalización a altas temperaturas y

presión, carece de foliación y tiene una meteorización lenta.

Pizarra y cuarcita, el contenido de agua que presentan las rocas en mención está muy ligado a la porosidad que presentan, como se observa en los Cuadros 03 y 04.

Tabla 3: Contenido de agua roca pizarra

	Muestra 001	Muestra 002	Muestra 003
Peso tara (g)	47.60	48.60	47.00
Peso muestra húmeda + tara (g)	131.20	115.00	124.30
Peso muestra seca + tara (g)	131.17	114.94	124.18
Peso agua (g)	0.03	0.06	0.12
Peso muestra húmeda (g)	83.60	66.40	77.30
Peso muestra seca (g)	83.57	66.34	77.18
W (%)	0.04	0.09	0.16
Promedio		0.09	

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

Tabla 4: Contenido de agua roca cuarcita

	Muestra 001	Muestra 002	Muestra 003
Peso tara (g)	45.00	47.10	47.50
Peso muestra húmeda + tara (g)	73.00	84.16	110.80
Peso muestra seca + tara (g)	72.96	84.13	110.79
Peso agua (g)	0.04	0.03	0.01
Peso muestra húmeda (g)	28.00	37.06	63.30
Peso muestra seca (g)	27.96	37.03	63.29
W (%)	0.14	0.08	0.02
Promedio		0.08	

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

La roca pizarra y cuarcita presenta una densidad promedio, como se muestra en el Cuadro 05, pruebas realizadas en laboratorio en gamma natural y asumiendo el contenido de agua en campo (in situ) de los núcleos.

Tabla 5: Densidad de la roca pizarra

	Peso (g)	Volumen (cm ³)	In situ w (%)	Densidad
Muestra 001	442.37	139.64	0.20	2.64
Muestra 002	438.91	138.55	0.20	2.64
Muestra 003	438.40	138.39	0.20	2.64

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

Tabla 6: Densidad de la roca cuarcita

	Peso (g)	Volumen (cm ³)	In situ w (%)	Densidad
Muestra 001	442.87	139.80	0.15	2.75
Muestra 002	439.90	138.86	0.15	2.75
Muestra 003	443.13	139.88	0.15	2.75

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

La deformación de la roca pizarra y cuarcita, cuando se somete los núcleos de roca a una carga en ambos casos estas tienden a una ruptura, por lo que al estudiar su deformación mediante gráficas conocidas como Esfuerzo-Deformación, da del tipo "C" tal como se muestra en las Figuras 1, 2 y 3.

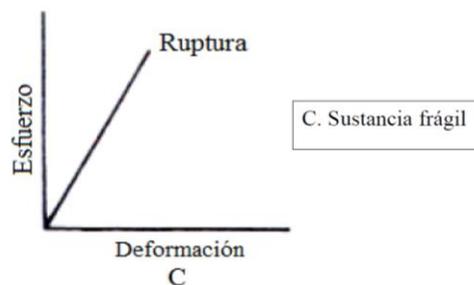


Figura 1: Curva de deformación para roca pizarra y cuarcita tipo "C"

Fuente: Hoek, E. y Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca, México, McGraw-Hill.

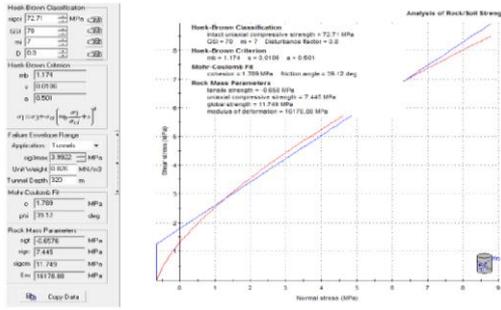


Figura 2: Curva de deformación para roca pizarra en software Rocdata

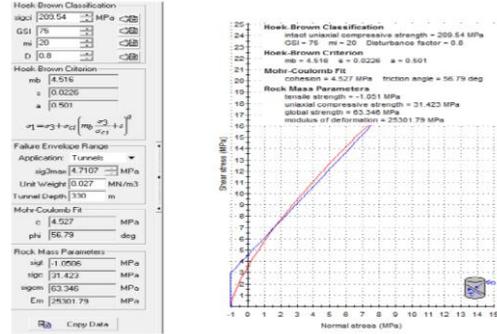


Figura 3: Curva de deformación para roca cuarcita en software Rocdata

Es el esfuerzo máximo que puede soportar una roca sin romperse, esta propiedad mecánica de la roca se puede determinar tanto en laboratorio y en el sitio mismo del proyecto.

Tabla 7: Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca pizarra

ID	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Relación L/D	Carga (kg-f)	UCS (MPa)	Tipo rotura
SF 1-1	4.46	8.94	15.62	2.0	7800	48.96	Fractura
SF 1-2	4.45	8.91	15.55	2.0	14770	93.13	Matriz
SF 1-3	4.45	8.90	15.55	2.0	12060	76.04	Matriz

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

La valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating), introducido por Bieniawski (1989), es posiblemente la clasificación geo mecánica más usada, inicialmente pensado para valorar la estabilidad y los soportes requeridos en túneles.

El RMR es una clasificación geo mecánica, en la que se tienen en cuenta los siguientes parámetros del macizo rocoso.

- (1) Resistencia del material intacto que se obtiene mediante ensayo de carga puntual o compresión simple
- (2) RQD
- (3) Espaciado de las discontinuidades, hace referencia a la longitud entre discontinuidades dentro de la zona a estudio.

(4) Condición de las discontinuidades, que incluye:

- Longitud de la discontinuidad
- Abertura
- Rugosidad
- Relleno
- Alteración

(5) Presencia de agua subterránea

A cada uno de los parámetros anteriores se le asigna un valor, el RMR se obtiene como la suma de todos ellos.

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)											
PARAMETROS	RANGO DE VALORES										VALORACION
	VALOR ESTIMADO										
R. COMPRESION UNIAxIAL (Mpa)	>250 (15)	100 - 250 (12)	X	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	X	<25 (2), <5 (1), <1 (0)	1	12		
RQD (%)	90 - 100 (20)	75 - 90 (17)		50 - 75 (13)	25 - 50 (8)		<25 (3)	X	2	3	
ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0,6 - 2,0 (15)	X	0,2 - 0,6 (10)	0,06 - 0,2 (8)		<0,06 (5)		3	20	
CONDICION DELAS JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	X	1-3 m Long. (4)	3-10m. (2)	X	10-20 m (1)		>20 m (0)	4A	6
	ABERTURA	Cerrada (6)		<0.1mm apert (5)	0.1-1.0mm. (4)		1-5 mm (1)	X	>5 mm (0)	4B	1
	RUGOSIDAD	Muy Rugosa (6)	X	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	X	Lisa (1)		Espejo de falla (0)	4C	6
	RELLENO	Limpia (6)	X	Duro <5mm (4)	Duro >5mm (2)	X	Suave <5mm (1)		Suave >5mm (0)	4D	6
	METEORIZACION	Sana (6)	X	Lig. Meteor. (5)	Mod. Meteor. (3)	X	Muy Meteor. (1)		Descompuesta (0)	4E	6
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	X	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	X	Flujo (0)		5	15	
AJUSTE POR ORIENTACION	Muy Favorab (0)	X	Favorable (-2)	Media (-5)	Desfavorable (-10)	X	Muy Desfavorab (-12)		6	0	
VALOR TOTAL RMR (Ajustado a excavaciones subterráneas)										(Suma de valoración 1 a 5) =	75
II-A											
CLASE DE MACIZO ROCOSO (Según RMR Básico)											
RMR	100 - 81	80 - 66	65 - 56	55 - 46	45 - 31	30 - 21	20 - 0				
DESCRIP	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B	TIPO III-A	TIPO III-B	TIPO IV-A	TIPO IV-B				

Figura 4: Mapeo geomecánico estación N° 1

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)											
PARAMETROS	RANGO DE VALORES										VALORACION
	VALOR ESTIMADO										
R. COMPRESION UNIAxIAL (Mpa)	>250 (15)	100 - 250 (12)		50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	X	<25 (2), <5 (1), <1 (0)	1	4		
RQD (%)	90 - 100 (20)	75 - 90 (17)		50 - 75 (13)	25 - 50 (8)		<25 (3)	X	2	3	
ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0,6 - 2,0 (15)	X	0,2 - 0,6 (10)	0,06 - 0,2 (8)		<0,06 (5)		3	15	
CONDICION DELAS JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)		1-3 m Long. (4)	3-10m. (2)	X	10-20 m (1)		>20 m (0)	4A	2
	ABERTURA	Cerrada (6)		<0.1mm apert (5)	0.1-1.0mm. (4)		1-5 mm (1)	X	>5 mm (0)	4B	1
	RUGOSIDAD	Muy Rugosa (6)		Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	X	Lisa (1)		Espejo de falla (0)	4C	3
	RELLENO	Limpia (6)		Duro <5mm (4)	Duro >5mm (2)	X	Suave <5mm (1)		Suave >5mm (0)	4D	2
	METEORIZACION	Sana (6)		Lig. Meteor. (5)	Mod. Meteor. (3)	X	Muy Meteor. (1)		Descompuesta (0)	4E	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)		Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	X	Flujo (0)		5	4	
AJUSTE POR ORIENTACION	Muy Favorab (0)		Favorable (-2)	Media (-5)	X	Desfavorable (-10)		Muy Desfavorab (-12)	6	-5	
VALOR TOTAL RMR (Ajustado a excavaciones subterráneas)										(Suma de valoración 1 a 5) =	32
III-B											
CLASE DE MACIZO ROCOSO (Según RMR Básico)											
RMR	100 - 81	80 - 66	65 - 56	55 - 46	45 - 31	30 - 21	20 - 0				
DESCRIP	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B	TIPO III-A	TIPO III-B	TIPO IV-A	TIPO IV-B				

Figura 5: Mapeo geomecánico estación N° 2

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)											
PARAMETROS	RANGO DE VALORES										VALORACION
	VALOR ESTIMADO										
R. COMPRESION UNIAxIAL (Mpa)	>250 (15)	100 - 250 (12)		50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	X	<25 (2), <5 (1), <1 (0)	1	4		
RQD (%)	90 - 100 (20)	75 - 90 (17)		50 - 75 (13)	25 - 50 (8)		<25 (3)	X	2	3	
ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0,6 - 2,0 (15)		0,2 - 0,6 (10)	0,06 - 0,2 (8)	X	<0,06 (5)		3	8	
CONDICION DELAS JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)		1-3 m Long. (4)	3-10m. (2)	X	10-20 m (1)		>20 m (0)	4A	1
	ABERTURA	Cerrada (6)		<0.1mm apert (5)	0.1-1.0mm. (4)		1-5 mm (1)	X	>5 mm (0)	4B	1
	RUGOSIDAD	Muy Rugosa (6)		Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	X	Lisa (1)		Espejo de falla (0)	4C	1
	RELLENO	Limpia (6)		Duro <5mm (4)	Duro >5mm (2)	X	Suave <5mm (1)		Suave >5mm (0)	4D	1
	METEORIZACION	Sana (6)		Lig. Meteor. (5)	Mod. Meteor. (3)	X	Muy Meteor. (1)		Descompuesta (0)	4E	1
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)		Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	X	Flujo (0)		5	4	
AJUSTE POR ORIENTACION	Muy Favorab (0)		Favorable (-2)	Media (-5)	X	Desfavorable (-10)		Muy Desfavorab (-12)	6	-5	
VALOR TOTAL RMR (Ajustado a excavaciones subterráneas)										(Suma de valoración 1 a 5) =	19
IV-B											
CLASE DE MACIZO ROCOSO (Según RMR Básico)											
RMR	100 - 81	80 - 66	65 - 56	55 - 46	45 - 31	30 - 21	20 - 0				
DESCRIP	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B	TIPO III-A	TIPO III-B	TIPO IV-A	TIPO IV-B				

Figura 6: Mapeo geomecánico estación N° 3

Para la determinación de la calidad del macizo rocoso se realizó el mapeo geomecánico, en función a los parámetros anteriormente descritos.

Tabla 8: Cálculo del RMR

Estación	RMR
01	75
02	32
03	19

Fuente: Elaboración propia.

Para elección del sostenimiento de la Central Hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI está en función del RMR₈₉ y el tipo de roca.

Tabla 10: Característica de la excavación túnel de conducción AI

	I	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB
Tipo de excavación, a=sección completa	A	A	A	A	A	A	A
Área de excavación (m ²)	10.94	10.94	11.38	11.62	11.62	12.08	12.32
Ancho (m)	3.50	3.50	3.60	3.65	3.65	3.75	3.80
Altura (m)	3.50	3.50	3.55	3.57	3.57	3.63	3.65
Longitud de voladura (m)	-	-	Máx. 3.50	Máx. 3.50	Máx. 2.50	Máx. 2.50	Máx. 1.00

Fuente: Área de geología CyM

La longitud de voladura máxima esta función a la calidad de roca para evitar la sobre excavación.

SOSTENIMIENTO	I	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB
Sellado con shotcrete con fibra de acero (espesor, cm)	-	Indicado por la supervisión					
Longitud de pernos (m)	-	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Distribución de pernos radial/longitudinal (m)	-	Según requerimiento	4x3@1.75 /1.75	4x3@1.50 /1.50	5x4@1.50 /1.50	5x5@1.5 0/1.50	-
Diámetro de pernos (ø mm)	-	22	22	22	22	22	-
Min. Carga de rotura de pernos (kn)	-	190	190	190	190	190	-
Shotcrete con fibra de acero (espesor, mm)	-	50	50 bóveda	75 bóveda	75	50	50
Shotcrete sin fibra de acero (espesor, mm)	-	-	-	-	-	75	100
Malla electro soldada	-	-	Indicado por la supervisión				
			4mmx100 mm				
Cercha Metálica (Distribución Longitudinal)	-	-	-	-	-	-	HEA 100 1.0m

Tabla 9: Clase de macizo rocoso según RMR

RMR	Descripción	Calidad
>80	I	Muy buena
66-80	IIA	Buena
56-65	IIB	Buena
46-55	IIIA	Regular
31-45	IIIB	Regular
21-30	IVA	Mala
<=20	IVB	Muy Mala

Fuente: Área de geología CyM

Para la determinación de la calidad del macizo rocoso se realizó el mapeo geomecánico, en función a los parámetros anteriormente descritos.

Tabla 11: Sostenimiento según tipo de roca

Fuente: Área geología CyM

Tabla 12: Aberturas máximas vs tiempo de auto-soporte

RMR	Descripción	Calidad	Abierto máximo sin sostenimiento	Tiempo de auto soporte (días)
>80	I	Muy buena	15.0	333
66-80	IIA	Buena	8.0	104
56-65	IIB	Buena	4.0	42
46-55	IIIA	Regular	2.4	8
31-45	IIIB	Regular	1.8	Inmediato
21-30	IVA	Mala	0.7	Inmediato
<=20	IVB	Muy Mala	0.4	Inmediato

Fuente: Área de geología CyM

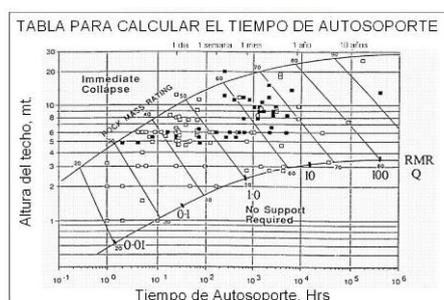


Figura 7: Aberturas máximas vs tiempo de auto-soporte

Los tiempos de auto-soporte y aberturas máximas establecidas en esta cartilla serán válidas sola y exclusivamente en labores donde se implemente practicas correctas de voladura.

Diseño de sostenimiento

Shotcrete (Concreto Lanzado)

La "especificación europea para concreto proyectado" (en lo sucesivo denominado "ESSC") deberá ser cumplida. La publicación fue emitida en 1996 por EFNARC En el caso de entrada de agua se aplicará una capa inicial de la pasta de cemento pulverizado acelerado (por ejemplo, con SikaShot o similar). Si es aprobado por el representante del propietario, se permiten las adiciones cementicias según se describe en el ESSC 5.3, Adiciones.

Tabla 13: Adiciones cementicias aceptadas según EFNARC

Cementitious material	Maximun addition
Silica Fume	15 % of Portland cement
Fly Ash	30% of Portland cement 15% of Portland/Fly Ash cement 20% of Portland blastfurnace slag cement
GGBS	30% of Portland cement

Fuente: EFNARC

En general, el concreto proyectado se debe aplicar mediante el proceso húmedo (cf. ESSC 3, sobre definiciones).

Una cantidad adecuada de microsíllice (tamaño medio de partícula inferior a 5 micras) será necesaria en la mezcla de concreto proyectado.

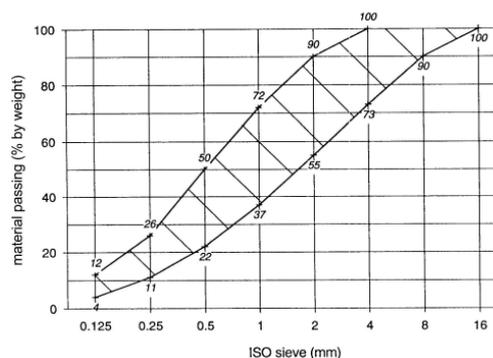


Figura 8: Gradación de los agregados recomendadas según EFNARC

Los aditivos deberán cumplir con ESSC 5.5, aditivos, y ESSC Apéndice 1, mezclas de concreto proyectado, definiciones, especificaciones, requisitos, las mezclas de referencia concretos y métodos de prueba.

Fibras de acero

Las fibras de acero deberán tener un promedio de longitud / diámetro de 60 a 80

(Por ejemplo, Dramix 30/0, 5 o igual), a menos que se haya aprobado de otro modo. En este contexto, el diámetro es o bien la de una sección circular o la de un círculo con un área igual al área en sección transversal de la fibra.

El contenido de fibras de acero se basa en el tipo de fibras utilizadas y normalmente será de 40 kg/m³, o como haya sido aprobado.

Tipos de shotcrete

El tipo de concreto proyectado se designa como Cbb/cc:XEi, donde Cbb/cc indica la clase de resistencia a la compresión de concreto proyectado (cf. ESSC 9.1, resistencia a la compresión, y la tabla 9.1.1: clases de resistencia a la compresión de

concreto proyectado) y la clase de exposición XEi (cf. EN 206-1:2000, 4.1 tipos de exposiciones relacionadas con acciones medioambientales, Cuadro 1 - Clases de exposición).

Tabla 14: Tipos de shotcrete

Tipo	Min. Resistencia a la compresión	Resistencia mínima a la compresión in situ	Resistencia mínima a la flexión	Dureza (absorción de energía)
C24/30:XC2	24 MPa	30 MPa	20.5 MPa	Clase b
C32/40:XF3	32 MPa	40 MPa	27.0 MPa	Clase b

Fuente: EFNARC

C24/30: XC2: clase de resistencia a la compresión de concreto proyectado C24/30, diseñado para superficies sujetas al contacto con agua a largo plazo. Este tipo de concreto proyectado será aplicado en obras subterráneas.

Los métodos de prueba se hicieron de conformidad con el ESSC 10, Métodos de ensayo.

La resistencia a la compresión in-situ debe ser $\geq 20,5$ MPa para C24/30: XC2, y $\geq 27,0$ MPa para C32/40: XF3, según se detalla en ESSC 9.1, resistencia a la compresión. La resistencia mínima a la flexión como se especifica en ESSC 9.2, Resistencia a la flexión, será de 3,4 MPa para C24/30: XC2 y 4,0 MPa para C32/40: XF3. Estos valores medios son válidos para 28 días. El Representante del propietario puede especificar los valores apropiados para concreto proyectado más reciente (por ejemplo, de 24 horas, días 3 y 7 d).

La resistencia del concreto proyectado corresponde con la energía de absorción de la Clase b, según se especifica en ESSC 9.3, Dureza, tabla 9.3.2, los requisitos de absorción de energía.

La resistencia al congelamiento de C32/40: XF3 se efectuará según la norma ASTM C 666, procedimiento A. El factor de durabilidad debe ser > 80 .

Cálculo de capacidad de soporte del shotcrete

Para determinar la capacidad de soporte del shotcrete cuando este es aplicado a sección completa y distribución uniforme; se aplica la siguiente fórmula:

$$P = (A_c) (f_c) (0.2)$$

P = Capacidad de apoyo del shotcrete

A_c = Área de corte

f_c = Capacidad de carga del shotcrete 10.04 Kg/cm² a 02 horas de lanzado (ensayos de laboratorio).

Cálculo de soporte del shotcrete de 2" de espesor

$$A_c = 4 \times 100\text{cm} \times 5.1\text{cm} = 2040 \text{ cm}^2$$

$$P = 2040 \text{ cm}^2 \times 10.04 \text{ Kg/cm}^2 \times 0.2 = 4096.32$$

$$\text{Kgr} = 4.1 \text{ ton}$$

Capacidad de apoyo del shotcrete de 2" de espesor

$$P = 4.1 \text{ Ton}$$

El factor de seguridad se obtiene:

$$FS = P / T$$

Donde:

P = Capacidad de apoyo del shotcrete

T = Peso del block muerto

FS = Factor de seguridad

Entonces, tenemos para:

Shotcrete de 2 pulg de espesor

$$T = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 2.7 = 2.7 \text{ ton}$$

Peso del block muerto, T = 2.7 ton

$$FS = 4.1 \text{ ton} / 2.7 \text{ ton} = 2.70$$

FS = 1.52 F_c = 10.04 kg/cm² 02.00 hrs de lanzado Shotcrete.

FS = 4.05 F_c = 26.81 Kg/cm² 18.75 hrs de lanzado Shotcrete

Pernos de anclaje

Capacidad de resistencia de los pernos helicoidales

$$P = R_c \times S = \tau \times U \times L$$

$$S = \pi \times d^2 / 4$$

$$U = \pi \times d$$

$$T = 0.25 \times R_c \times d / L$$

Donde:

P = Capacidad de apoyo del perno (Kg)

R_c = Resistencia a la tracción mínima del perno = 6320 Kg/cm²

S = Área del perno

d = Diámetro del perno (cm)

τ = Adherencia entre el perno y el cemento (Kg/cm²)

U = Circunferencia del perno (cm)

L = Longitud del perno (cm)

Cálculo de soporte con perno helicoidal cementado y/o resina cuyo φ = 3/4" (d = 2.2 cm, r = 0.95 cm,

L = 210 cm)

$$\tau = 0.25 \times R_c \times d/L = 0.25 (6330 \text{ Kg/cm}^2)(2.2\text{cm})/(210\text{cm})$$

$$\tau = 16.57 \text{ Kg/cm}^2 = 1.65 \text{ MPa}$$

$$S = \pi \times r^2 = 3.1415(1.1 \text{ cm})^2 = 3.835 \text{ cm}^2$$

$$U = \pi \times d = 3.1415(2.2 \text{ cm}) = 6.97 \text{ cm}$$

$$P = \tau \times U \times L = (16.56 \text{ Kg/cm}^2)(5.97 \text{ cm})(210 \text{ cm}) = 20,761 \text{ Kg}$$

$$P = 20.76 \text{ TN (207.6 KN)}$$

Capacidad de los pernos = 20 TN (207 KN)

Condición estructural de la roca

Las cuñas o bloques son formados por la intersección de planos estructurales, así como: Planos de estratificación y por sistemas de discontinuidades, los cuales separan a la masa rocosa en piezas. Para calcular los parámetros geométricos de un bloque suspendido, se efectúa por:

Método de suspensión de estratos: Para el soporte de una zona potencialmente inestable en terreno estratificado laminar, el anclaje deberá colocarse por encima de la zona inestable. Si se asume que el peso de la roca de la zona inestable (estrato suspendido) es soportado completamente por la fuerza desarrollada por los pernos, entonces:

$$T = y \times h \times S$$

Donde, T = Peso del bloque muerto
y = Peso unitario de la roca (2.7 Tn/m³)
h = Potencia de la zona inestable (1.5 m)
S = Espaciamiento entre pernos de dirección longitudinal y transversal (1.5 m x 1.5 m).

Entonces, tenemos:
 $T = 2.7 \text{ Tn/m}^3 \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} = 9.11 \text{ TN}$
= Peso de un bloque suspendido
El factor de seguridad "FS", se calcula de la siguiente manera:

$$FS = P/T$$

Donde, P = Capacidad de apoyo del perno
T = Peso del bloque muerto
FS = factor de seguridad
Entonces, tenemos:
Perno de L = 2.10 m, $\phi = 22\text{mm}$ con capacidad de apoyo 20.76 TN.
 $FS = 20.76 \text{ TN} / 9.11 \text{ TN} = 2.27$

Las placas de soporte deberán ser placas de acero planas o cóncavas de dimensiones mínimas de 150 x 150 x 10 mm, o como se recomienda por el fabricante. Las arandelas biseladas o hemisféricas se utilizarán y las tuercas serán del tipo hexagonal pesado. Los componentes arriba mencionados deberán ser galvanizados en caliente, con una masa de recubrimiento no inferior a 0,6 kg/m². Cuando los pernos de anclaje se utilizan en conjunción con la malla de alambre, la malla será firmemente conectada a los pernos por medio de una placa de acero y tuercas. Cuando se aplica una capa inicial de concreto proyectado, una segunda placa de acero puede ser necesario para asegurar la malla antes de la aplicación de concreto.

El sondaje para un perno de roca deberá limpiarse a fondo con un chorro de aire / agua antes de su introducir la pasta, desde el fondo hacia afuera, en ese agujero.

La barra de acero corrugado, de NS 3576-3 tipo de calidad K500c con una resistencia característica de rendimiento $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$, deben tener un diámetro mínimo de 22 mm.

Cerchas metálicas

Las cerchas de acero deberán ser vigas I de ala ancha (WF).

La relación entre los momentos de inercia de los dos ejes principales de las vigas de ala ancha, no podrá ser inferior a $I_y = 3.49 \times 10^6 \text{ mm}^4$ y $I_z = 1.34 \times 10^6$ para túnel de conducción

El espacio entre la superficie de la roca y el refuerzo se rellenará con una mezcla de cemento y agregado fino, con una proporción de cemento / agregado = 1/10 (en peso con la superficie total en seco) o se utilizará concreto proyectado para rellenar el espacio entre la superficie de la roca y el refuerzo.

El soporte de roca se instala en la medida sea necesario para satisfacer las condiciones encontradas de la roca.

Todas las medidas del sostenimiento instalado deben ser ejecutado como permanente.

Tabla 15: Sostenimiento en túnel de conducción AI

Estación	RMR	Calidad	Sostenimiento
01	75	IIA	Pernos helicoidales según requerimientos in situ $\phi=22\text{mm}$ L=2.1m. Shotcrete completo en bóveda e=75mm con fibra de acero, pernos helicoidales de anclaje sistemáticos $\phi=22\text{mm}$ L=2.1m distribución 5x4@1.50x1.50m.
02	32	IIIB	Shotcrete primera capa e=50mm con fibra de acero, cercha metálica con plancha acanalada cada 1.0 m o malla electro soldada $\phi =4\text{mm}@100\text{mm}$ y segunda capa shotcrete e=100mm sin fibra de acero.
03	19	IVB	

Fuente: Elaboración propia.

Se realizará el sostenimiento indicado según la tabla 20 a cada estación.

Discusión de resultados

Las características geo mecánicas del macizo rocoso presentes en el túnel, sí están controladas por las características estructurales, geométricas y de las discontinuidades, dentro de estas últimas las condicionantes fueron: el espaciamiento, la persistencia o continuidad, la rugosidad de las juntas, la apertura, el relleno, la meteorización, alteración y presencia de agua.

La importancia de la interacción en el diseño de sostenimiento dependerá de los parámetros geomecánicas y operativos, siendo el pilar clave para una adecuada recomendación de sostenimiento. Esto con el objetivo de brindar un adecuado control de inestabilidad, la iteración conjunta, también es vital para seleccionar en forma óptima la alternativa de sostenimiento, salvaguardando los intereses de seguridad, productividad y de costos en el proyecto subterráneo.

(Soto-Vilca, 2016) Menciona que “*las características estructurales y geológicas de la zona de estudio, determinaron las clasificaciones de Roca RMR y Q, además determinaron la clasificación de los suelos (material fluvio glaciar) presentes en el portal de entrada y de salida del túnel. Dichas clasificaciones determinaron el tipo de sostenimiento a utilizar en los tramos de Roca según las recomendaciones de Bieniawski y Barton.*”

4. Conclusiones

Las características geo mecánicas del macizo rocoso presentes en el túnel están controladas por las características estructurales, geométricas y de las discontinuidades, dentro de estas últimas las condicionantes fueron: el espaciamiento, la persistencia o continuidad, la rugosidad de las juntas, la apertura, el relleno, la meteorización, alteración y presencia de agua.

La clasificación geo mecánica obtenido en la ejecución del presente proyecto nos da a conocer que, según el RMR89 de Bieniawski, da como resultado una calidad de tipo I, IIA, IIB, IIIA, IIIB, IVA Y IVB, el dominio estructural de la caracterización geo mecánica.

En lo referente al sostenimiento de acuerdo a los valores determinados por Bieniawski (RMR):

Para la estación N° 1 de Central Hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI con secciones de 3.50 x 3.50 m con RMR 75 tipo de roca IIA le corresponde un sostenimiento pernos helicoidales según requerimientos in situ $\phi=22\text{mm}$ $L=2.1\text{m}$.

Para la estación N° 2 de Central Hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI con secciones de 3.50 x 3.50 m con RMR 75 tipo de roca IIIB le corresponde un sostenimiento Shotcrete completo en bóveda $e=75\text{mm}$ con fibra de acero, una mayor distribución de pernos helicoidales de anclaje sistemáticos $\phi=22\text{mm}$ $L=2.1\text{m}$ distribución $5 \times 4 @ 1.50 \times 1.50\text{m}$.

Para la estación N° 3 de Central Hidroeléctrica Ángel I, II y III túnel de conducción AI con secciones de 3.50 x 3.50 m con RMR 75 tipo de roca IVB le corresponde un sostenimiento shotcrete primera capa $e=50\text{mm}$ con fibra de acero, cercha metálica con plancha acanalada cada 1.0 m o malla electro soldada $\phi=4\text{mm}@100\text{mm}$, segunda capa shotcrete $e=100\text{mm}$ sin fibra de acero.

En zonas de filtración es importante realizar agujeros de drenaje $\phi=50\text{ mm}$ 10 cm dentro de la roca alterna 2 y 1.

5. Referencias

- Adeoluwa-Olajesu, O., Noa-Monjes, R., & Quevedo-Sotolongo, G. (2017). Caracterización estructural del macizo rocoso de la mina subterránea Oro Descanso. *Minería y Geología*, 33(Octubre), 456–467. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223553249007>
- Calderón-Quirós, C. D. (2013). *Análisis, diseño y control geotécnico de la excavación del túnel y pozo vertical de la descarga de fondo del proyecto Hidroeléctrico Reventazón* (Escuela Tecnológico de Costa Rica). Retrieved from https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6187/Análisis_Diseño_Control_Geotécnico_Excavación_Túnel_Pozo_Vertical_Descarga_Fondo_Proyecto_Hidroeléctrico_Reventazón.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ceras-Cuadros, F. A. (2015). *Influenia del sostenimiento en el estrés de roca en el túnel DR 09 en la empresa de generación eléctrica cheves S.A.* (Universidad

- Nacional del Centro del Perú Escuela de Posgrado). Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2154/CerasCuadros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cueva-Romero, J. G., & Arana-Cabrera, J. A. (2014). Caracterización geomecánica en minería subterránea: una revisión de la literatura científica. *Universidad Privada Del Norte, 1*(Enero), 1–23. Retrieved from [http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/15035/Cueva Romero Jimmy Gerardo - Arana Cabrera Jhonny Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/15035/Cueva%20Romero%20Jimmy%20Gerardo%20-%20Arana%20Cabrera%20Jhonny%20Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Lazaro-Maguiña, J. E. (2018). *Geomecánica aplicada al diseño del sostenimiento para mejorar la estabilidad de las labores mineras en la mina Caridad de la compañía minera Lincuna S.A. - 2017* (Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo). Retrieved from <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2439>
- Lázaro, J. (2018). *Geomecánica aplicada al diseño del sostenimiento para mejorar la estabilidad de las labores mineras en la mina caridad de la compañía minera Lincuna SA – 2017*, (Universidad Nacional Santiago Antúne de Mayolo). Retrieved from <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2439>
- Marquez-Olivera, G. C. (2019). *Geomecánica aplicada al diseño del sostenimiento para mejorar la estabilidad del nivel 730 - unidad minera San Cristóbal - Volcan 2016* (Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo). Retrieved from <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2745>
- Pire-Cartaya, M. (2006). Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país. *Minería y Geología, 22*(Julio), 19. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223517652004.pdf>
- Saavedra-Godoy, L. A. (2007). *Diseño óptimo de experimentos para estimar el campo de esfuerzos en el macizo rocoso en torno al frente de avance en una cavidad minera* (Universidad de Chile). Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104578/saavedra_lg.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Soto-Vilca, A. C. (2016). *Diseño de sostenimiento en el túnel Wayrasencca - Ollachea* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2996>
- Suarez-Burgoa, L., Valencia-Gonzalez, Y., Ordoñez-Carmona, O., Navarro-Montoya, A., & Hidalgo-Gomez, B. (2009). Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del proyecto hidroeléctrico Porce III, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra, 26*(Julio), 69–86. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302009000200008&lang=es