

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y
METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA



**“DETERMINACION DE LA VELOCIDAD PICO PARTICULA
CRITICA (VPP_c) EN LAS ROCAS MEDIANTE
CARACTERIZACION GEOMECANICA Y REFRACCION SISMICA,
PARA EL DISEÑO DE VOLADURA DE LA MINA TOQUEPALA,
ILABAYA –TACNA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. LISBET HONORIA NINA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEOLOGO

PUNO – PERÚ
2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

TESIS

**‘DETERMINACION DE LA VELOCIDAD PICO PARTICULA CRITICA
(VPPc) EN LAS ROCAS MEDIANTE CARACTERIZACION GEOMECANICA
Y REFRACCION SISMICA, PARA EL DISEÑO DE VOLADURA DE LA MINA
TOQUEPALA, ILABAYA – TACNA’**

PRESENTADA POR:

Bach. LISBET HONORIA NINA MAMANI

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEOLOGO



APROBADA POR:

PRESIDENTE:

ING. GEORGES FLORENCIO LLERENA PEREDO

PRIMER MIEMBRO:

ING. MAURICIO PERALTA MOLINA

SEGUNDO MIEMBRO:

ING. LUIS ALBERTO MAYDANA VILCA

DIRECTOR / ASESOR:

M.Sc. LEONEL PALOMINO ASCENCIO

Área : GEOTECNIA

Tema : CARACTERIZACION GEOMECANICA Y REFRACCION SISMICA

Fecha de Sustentación : 03 de Julio de 2019

DEDICATORIA

A Dios, por haber iluminado y protegido siempre en mi camino. Por ayudarme en los momentos difíciles y poder lograr mis metas.

A mis Padres Mario Nina Laqui y Gloria Mamani Condori, por haber confiado siempre en mí, inculcaron en mis grandes valores, por haberme hecho una mejor persona, brindarme todo su apoyo, por darme la libertad de elegir mi camino, sé que no ha sido fácil pero siempre estuvieron ahí para mí cuando los necesite. No pude tener mejores padres que ustedes, Gracias.

A Rubén, el mejor hermano del mundo, que a pesar de la distancia siempre estuvo conmigo, me brindaste amor y buenos consejos, siempre me incentivaste a aprender más, depositaste toda tu confianza en mí.

A Raquel, su comprensión, amor, apoyo y sensibilidad, ya que más que hermanas somos amigas.

A ms Sobrinos, Zeus Antonio y Mavila, por alegrar mis días, cada día se vuelve una aventura, con ustedes entendí que nunca dejamos de ser niños solo que a veces lo olvidamos.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional del Altiplano, a la Profesional de Ingeniería Geológica, por haberme inculcado sus conocimientos y haberme acogido durante mis años de estudiante.

A mis docentes de la mi facultad, quienes con empeño día a día se esfuerzan por cultivar el conocimiento y amor a la Geología en cada uno de sus alumnos, tratando de hacer mejores profesional y personas.

A mi Asesor M.Sc. Leonel Palomino Ascencio, a los miembros de jurado de esta tesis Ing. Georges Florencio Llerena Peredo, Ing. Mauricio Peralta Molina, Ing. Luis Alberto Maydana Vilca, por su disposición, las observaciones, aportaciones, sugerencias que dieron como resultado esta tesis de investigación.

A la empresa Southern Perú, por haberme abierto las puertas y acogido en su gran familia, a los profesionales que ahí laboran, quienes me instruyeron sus conocimientos en Geología y Geotecnia: Ing. Enrique Sanca, Geólogo Senior Ing. Henry Revilla, Ing. Francisco Gonzales, mis compañeros en el campo: Adrian Arizapana, Ing. German Flores, Henry y Ricardo; por haberme hecho parte de su equipo y en ello brindarme sus buenos consejos.

A mis amigos de la Escuela Profesional de Geología en Puno, que siempre me acompañaron en esta aventura que es el Mundo de la Geología, con quienes compartí muchos momentos inolvidables.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	xiii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	Planteamiento del Problema	3
1.2	Formulación del problema	4
1.3	Antecedentes	4
1.4	Hipótesis	5
1.5	Objetivos de la investigación	6
1.5.1	Objetivo general	6
1.5.2	Objetivos específicos	6
1.6	Justificación	6

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	Geomorfología Regional.....	7
2.2	Geomorfología Regional.....	8
2.2.1	Llanura Costera.....	8
2.2.2	Flanco andino	8
2.2.3	Cadena de conos volcanicos	9
2.3	Geomorfologia Local	9
2.3.1	Faja Costera Local	9
2.3.2	Cordillera de la Costa	9
2.3.3	Pampas Costeras	10
2.3.4	Valles	10
2.3.5	Colinas	10
2.3.6	Quebradas	10
2.4	Geología.....	10
2.5	Estratigrafía.....	12

2.5.1	Secuencia Vulcano – Sedimentaria	12
2.5.2	Serie Alta	12
2.5.3	Serie Toquepala	12
2.6	Características del Depósito.....	16
A.	Litología.....	16
B.	Estructuras	16
C.	Alteración.....	16
D.	Mineralización	17
2.7	Geología Estructural	17
A.	Falla Incapuquio	17
B.	La falla Micalaco	18
2.8	Mapeo geológico – Geotécnico	18
2.9	Geomecánica de Rocas	19
2.10	Caracterización del Macizo Rocoso.....	19
2.11	Clasificación Geomecánica del Macizo Rocoso.....	20
2.11.1	RMR (Rock Mass Rating) – Bieniawski	21
2.11.2	Sistema de Clasificación de Q de Barton (1974).....	24
2.11.3	Clasificación Sistema GSI (Geological Strength Index)	26
2.12	Propiedades del Macizo Rocoso	27
2.12.1	Discontinuidades en Macizo Rocoso.....	27
2.12.2	Meteorización de las rocas	28
2.12.3	Resistencia de las rocas	28
2.12.4	Espaciamiento.....	29
2.12.5	Dimensiones (Persistencia).....	30
2.12.6	Rugosidad	31
2.12.7	Apertura.....	33
2.12.8	Relleno.....	33
2.12.9	Condición de Agua	34
2.13	Prospección Geofísica.....	34
2.13.1	Ondas Sísmicas.....	35

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Metodología de la Investigación.....	36
3.2	Trabajos de gabinete	36
3.2.1	Recopilación de Información.....	36

3.2.2	Trabajos Realizados en Perú.....	37
3.3	Trabajos de Campo	38
3.3.1	Topografía	38
3.4	Clasificación Geomecánica	40
3.5	Procedimiento de Mapeo Geotécnico	48
3.5.1	Clasificación de Bieniawski Sistema RMR.....	48
3.6	Prospección Geotécnica Laboratorio	54
3.6.1	Metodología.....	55
	Trabajo de Campo	55
	Laboratorio	55
	Fase I.....	55
	Fase II.....	55
3.6.2	Investigación Geotécnica.....	55
	❖ Mapeo Geotécnico - Estructural	55
	❖ Campaña de Muestreo	56
	Materiales	56
3.6.3	Ensayo Carga Puntual (PLT).....	57
	Procedimiento.....	57
3.7	Prospección Geofísica.....	62
3.7.1	Trabajo de Campo	62
3.8	Ubicación	65
3.9	Acceso.....	66
3.10	Clima.....	66

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Análisis e Interpretación de Prospección Geotécnica.....	68
4.1.1	Interpretación Geotécnica.....	68
4.1.2	Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski, 1989).....	68
4.1.3	Determinación de la Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca Intacta	71
4.1.4	Análisis e Interpretación de Prospección Geofísica	74
4.1.5	Caracterización Geotécnica de los Materiales.....	81
4.1.6	Parámetros de Resistencia de Roca Intacta	82
4.1.7	Parámetros de Resistencia del Macizo Rocoso	86
4.2	Calculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc).....	89
V.	CONCLUSIONES	96



VI. RECOMENDACIONES	97
VII. REFERENCIAS	98
BIBLIOGRAFIA	98
ANEXOS	100

INDICE DE FIGURAS

N°	DESCRIPCION	Pág.
Figura 1:	Geomorfología de campamento minero de Toquepala, en el fondo se observa la cadena de montañas por la que se encuentra rodeada.....	8
Figura 2.	Estratigrafía de la Mina Toquepala.....	15
Figura 3.	Perfil de un testigo de perforación, para el cálculo del RQD solo se deben tomar en cuenta los trozos que tengan una medida de 10 cm o superior y desestimar aquellos que y tengan una medida menor.....	22
Figura 4.	Clasificación Q.....	25
Figura 5.	Clasificación GSI.....	26
Figura 6.	Espaciamiento en el macizo rocoso.	29
Figura 7.	Medida del espaciado en las discontinuidades.....	30
Figura 8.	Tamaño relativo de las familias de discontinuidades.....	31
Figura 9.	Ondulación de una discontinuidad.....	31
Figura 10.	Tipos de Ondulación en Rocas.....	32
Figura 11.	Peine de Barton. Toma de datos en campo.	32
Figura 12.	Escala intermedia, para la observación de hasta un metro de longitud.....	32
Figura 13.	Apertura visible influida por efectos de la meteorización superficial	33
Figura 14.	Relleno de calcita dentro de las aberturas.....	34
Figura 15.	Levantamiento Topográfico.....	38
Figura 16.	Delimitación de las celdas para realizar el mapeo Geomecánico.	42
Figura 17.	Determinación de tipo de estructuras. Fallas o fracturas naturales. Mapeo de tipo estructural.	42
Figura 18.	El banco muestra estructuras de falla, poco desclasamiento y un pliegue...	43
Figura 19.	Perfil de banco luego de la voladura.....	43
Figura 20.	Mapeo en fondo de mina, en la fotografía se muestra dos bancos consecutivos.	44
Figura 21.	Muestreo en fondo de mina, monitoreo de proyecto de voladura.....	44
Figura 22.	Fracturamiento, monitoreo después de la voladura, se debe diferenciar las fracturas naturales de las artificiales.....	45
Figura 23.	Condiciones de agua en la zona noreste, en el fondo de mina.....	45
Figura 24.	Calculo de RMR, para el parámetro RQD.....	50

Figura 25. Muestras colocadas en orden, marcadas con el número de celda, sector, tipo de roca y orden numérico	58
Figura 26. Medir las muestras para anotar sus dimensiones reales antes del ensayo....	58
Figura 27. Tipos básicos de pruebas de carga puntual, diametral (a), axial (b), bloque prismático (c) o ensayo de forma irregular (d).	59
Figura 28. Ensayo de muestra para la determinación de Resistencia a la Compresión PLT	59
Figura 29. Medida de las muestras luego del ensayo.	60
Figura 30. Modos típicos de falla para determinar ensayos validos e inválidos (a) ensayos diametral valido, (b) ensayo axial valido, (c) ensayo bloque prismático valido, (d) ensayo de testigo invalido, (e) ensayo axial invalido.	60
Figura 31. campamento minero de Toquepala.	66
Figura 32. Perfil de Velocidad de Onda	75
Figura 33. Diagrama de referencia de Velocidades de onda P. Para distintos materiales.	76
Figura 34. Ejemplo de sismograma de Refracción Sísmica	78
Figura 35. Registro de Velocidades minima y maxima detectadas en los ensayos de Refraccion Sismica.	81

ÍNDICE DE TABLAS

N°	DESCRIPCION	Pág.
Tabla 1.	Calidad de la Roca-RQD, usado para mapeo en talud.	21
Tabla 2.	Clasificación Rock Mass Rating System, usado para el cálculo en testigo de perforación.....	22
Tabla 3.	Clasificación de parámetros RQD.	23
Tabla 4.	Guía de clasificación y discontinuidades.	24
Tabla 5.	Clasificación de parámetros individuales utilizados en el Índice de Calidad de Excavación de Túneles Q	25
Tabla 6.	Terminología de espaciados recomendada por la sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SRM),	29
Tabla 7.	Terminología de continuidad o persistencia recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIRM).....	30
Tabla 8.	Coordenadas de Mapeo Geotécnico-Estructural de celdas de 1 al 25 línea geofísica.....	39
Tabla 9.	Coordenadas de Mapeo Geotécnico-Estructural de celdas de 26 a 47 línea geofísica.....	40
Tabla 10.	Clasificación de dureza en terreno.....	41
Tabla 11.	Parámetro, cálculo del RQD.....	46
Tabla 12.	Parámetro, cálculo de la familia de diaclasas J_n	46
Tabla 13.	Parámetro de Rugosidad de las diaclasas J_r	47
Tabla 14.	Parámetro Agua en las diaclasas J_w	47
Tabla 15.	Clasificación de Barton de los macizos rocosos. Índice de Calidad Q.....	48
Tabla 16.	Parámetro clasificación por Resistencia de Rocas Sanas.	50
Tabla 17.	Espaciamiento de discontinuidades.	51
Tabla 18.	Clasificación según las aberturas de las discontinuidades.....	51
Tabla 19.	Clasificación según la continuidad de las discontinuidades.	51
Tabla 20.	Clasificación según la Rugosidad de las discontinuidades.....	51
Tabla 21.	Clasificación según el relleno de las discontinuidades	51
Tabla 22.	Clasificación según la meteorización de las discontinuidades.	52
Tabla 23.	Obtención de rango RMR, según parámetro de la presencia de agua.	52
Tabla 24.	Determinación de RMR usando la valoración de Bieniawski 1989.....	53
Tabla 25.	Valores de RMR, calculados las celdas en los perfiles de geofísica.	54

Tabla 26. Cantidad de muestras tomadas y muestras válidas para ensayar.....	61
Tabla 27. Códigos Asignados a los perfiles Geofísicos, desde la línea geofísica del 1 a 25	63
Tabla 28. Códigos Asignados a los perfiles Geofísicos, desde la línea geofísica del 26 a 47.....	64
Tabla 29. Coordenadas UTM y Geográficas	65
Tabla 30. Vías de accesos.....	66
Tabla 31. Cuadro Resumen Determinación de la calidad del Macizo Rocosó - RMR Bieniawski, 1989 & GSI. Información de la línea geofísica (1D a 9C).....	69
Tabla 32. Cuadro Resumen Determinación de la calidad del Macizo Rocosó - RMR Bieniawski, 1989 & GSI. Información de la línea geofísica (11A a 24C).....	70
Tabla 33. Parámetros de Resistencia de Roca Intacta. Desde el perfil (1D a 7F).	72
Tabla 34. Parámetros de Resistencia de Roca Intacta. Desde el perfil (9A a 24C).....	73
Tabla 35. Valores establecidos de Velocidad Sísmica de las Rocas	76
Tabla 36. Se muestran los valores obtenidos de la interpretación de las Secciones de Modelos de onda P, como se detallan a continuación. Del perfil 1D al 9C.	79
Tabla 37. Se muestran los valores obtenidos de la interpretación de las Secciones de Modelos de onda P, como se detallan a continuación. Del perfil 11A al 24C	80
Tabla 38. Materiales determinados mediante el Mapeo Geotécnico - Estructural	82
Tabla 39. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad de Roca Intacta de la línea 1 a 24	84
Tabla 40. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad de Roca Intacta de la línea 25 a 47	85
Tabla 41. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad del Macizo Rocosó En las líneas 1 a 22. (1D al 12E)	87
Tabla 42. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad del macizo rocosó. En las líneas 23 a 47.(5A al 20B)	88
Tabla 43. Cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc desde la línea geofísica del 1 a 24.	90
Tabla 44. Cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc) desde la línea geofísica de 25 a 47.	91
Tabla 45. Se muestran los valores de VPP50, obtenidos con el Estudio Geofísico de Refracción Sísmica.	92
Tabla 46. Calculo Final	94

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Aa	: Alta andesita
Agl-Volc	: Aglomerado Volcanico
Brecha Pipe	: Estructura mineralizada de forma circular.
Bx-G/A	: Brecha angular con yeso
Bx-Qs	: Brecha angular Cuarzo Sericita
Cu ₂ S	: Calcocita
Cu ₅ FeS ₄	: Bornita
CuFeS ₂	: Calcopirita
Cu-Mo:	Cobre – Molibdeno
Da	: Aglomerado de dacita
Di	: Diorita
Di-G/A	: Diorita con yeso
Di-Prop	: Diorita Propilitica
Di-Qs	: Diorita Cuarzo Sericita
Dp-G/A	: Dacita Porfirítica con yeso
Ei	: Modulo de deformación
Erm	: Modulo de Young
GSI	: Geological Strench Índice
Is(50)	: Índice de carga puntual
Ja	: Índice de rugosidad
Jn	: Índice de diaclazado
Jr	: Rugosidad de las superficies de las discontinuidades
Jw	: Coeficiente reductor

Lp	: Latita Porfirítica
mm/s	: milímetros por segundo
Mi	: Valor predeterminado por Rocscience 4.0
mi**	: Valor obtenido por ensayo triaxial
Mpa	: Mega pascales
MR***	: Valor predeterminado por software Rocscience
NE-SO	: Noreste – suroeste
NO-SE	: Noreste – sureste
Ondas P	: Ondas Longitudinales u ondas de compresión
PLT	: Point load test
Q	: Calidad de roca, criterio de Barton.
Qq	: Pórfido Cuarzífero Quellaveco
RMR	: Rock Massic Rating
RQD	: Rock Quality Designation
SPCC	: Southern Peru Copper Corporation
SRF	: Coeficiente estado tensional de macizo rocoso
Strike Slip Fault: Falla transcurrete	
Ta	: Andesita Toquepala
Td	: Dolerita Toquepala
Tq	: Pórfido Cuarzífero Toquepala
Tr	: Riolita Toquepala
UCS	: Compression uniaxial
USC (1)	: Resistencia a la compresión uniaxial (Hoek and Brown, 1980)
USC (2)	: Resistencia a la compresión uniaxial (Boch and Franklin, 1972)

UTM	: Sistema de coordenadas Universal
V_p	: Velocidad de propagación de la onda P
VPP	: Velocidad Pico Partícula
VPPc	: Velocidad Pico Partícula Critica
WGS	: Sistema de coordenadas geográficas
σ	: Resistencia a la tracción de la roca.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en la Unidad minera Toquepala ubicada en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna, tiene por finalidad la determinación de la velocidad pico partícula crítica en cada tipo de roca. El yacimiento Toquepala es de tipo pórfido Cobre-Molibdeno, que se explota a tajo abierto, mediante técnicas de voladura electrónica controlada, el minado es diario, pudiéndose desarrollar de dos a más proyectos de voladura en un día, afectando directamente a los bancos inferiores, superiores y al talud en general, por lo cual es importante tomar en consideración el principio físico de propagación de ondas que es ocasionado por la detonación de explosivos, la velocidad de propagación de las ondas de compresión en cada tipo de roca. Las vibraciones causadas por efecto de la voladura, son la causa de la realización del estudio de determinación de la velocidad pico partícula crítica, partiendo de la aplicación de geofísica usando el método de refracción sísmica que se aplica en 47 líneas repartidas en el tajo en la que se obtiene valores de la velocidad de las partículas, mediante la geomecánica de rocas se realiza mapeo de celdas de las cuales se obtuvo información de la roca sus condiciones físicas, geológicas para determinar la resistencia de la roca fresca en la pared de talud, también se realizó la recopilación de ocho a diez muestras por cada celda, y mediante ensayo indirecto carga puntual se determinan parámetros como cohesión, resistencia. Una vez obtenidos todos los datos estos pasan a ser analizados y calculados mediante fórmulas matemáticas. El pórfido Cuarzófero Quellaveco que registra la velocidad pico partícula sísmica más baja de 148 mm/s se encuentra en la zona de fondo de mina, los intrusivos sin yeso, pero con alteraciones (diorita propilítica, diorita cuarzo-serecita, aglomerado dacita) tienen los valores promedio en velocidad pico partícula 170 mm/s a 240 mm/s y los valores más altos son los intrusivos con yeso (Dacita Porfírica, brecha angular, diorita) oscilan entre 240 mm/s a 256 mm/s. Con estos resultados se ha podido hacer un mapa de zonificación de velocidad pico partícula.

Palabras clave: Geomecánica, refracción sísmica, velocidad pico partícula, voladura.

ABSTRACT

This research work was carried out in the Toquepala mining unit located in the Ilabaya district, Jorge Basadre province, department of Tacna, whose purpose is the determination of the critical particle peak velocity in each type of rock. The Toquepala deposit is copper-molybdenum porphyry type, which is exploited in open pit, using controlled electronic blasting techniques, mining is daily, being able to develop two or more blasting projects in one day, directly affecting the lower banks, higher and to the slope in general, so it is important to take into consideration the physical principle of wave propagation that is caused by the detonation of explosives, the speed of propagation of compression waves in each type of rock. The vibrations caused by the blasting effect, are the cause of the study of the determination of the critical particle peak velocity, starting from the application of geophysics using the seismic refraction method that is applied in 47 lines distributed in the pit in the pit that values of the velocity of the particles are obtained, by means of the rock geomechanics, mapping of cells is obtained from which information of the rock was obtained, its physical, geological conditions to determine the resistance of the fresh rock in the slope wall, also Eight to ten samples were collected for each cell, and parameters such as cohesion, resistance are determined by indirect spot loading. Once all the data has been obtained, they are analyzed and calculated using mathematical formulas. The Quellaveco Quartziform porphyry that records the lowest seismic particle peak velocity of 148 mm/s is found in the bottom of the mine, the gypsum-free intrusive, but with alterations (propylitic diorite, quartz-sericite diorite, dacum agglomerate) have Average values in peak particle velocity 170 mm/s to 240 mm/s and the highest values are the intrusive with plaster (Porphyry Dacite, angular gap, diorite) ranging from 240 mm / s to 256 mm/s. With these results it has been possible to make a zoning map of peak particle velocity.

Key Words: Geomechanics Peak particle velocity, blasting, seismic refraction.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En la mina Toquepala se realiza la explotación mediante el uso de explosivos y las variedades de rocas que componen el macizo rocoso en las diferentes zonas de la mina, pueden influenciar de manera directa el comportamiento y el nivel de daño que pueden sufrir cada banco, las principales variables analizar son los efectos de las ondas sísmicas que atraviesan las rocas cuando se produce la voladura, estas pueden ser manipulables o modificadas cuando se emplea un modelo.

Los parámetros geomecánicos y físicos de cada roca, como la resistencia, alteración, relleno de las fracturas, familias de diaclasas y fracturas en la pared del talud, estas condiciones tienen influencia directa en el mayor efecto de los daños, para la optimización de un modelo que tenga eficacia al momento de una buena distribución de la energía de los explosivos que se utilizan.

Y para reducir las probabilidades de incidentes es necesario hacer un monitoreo de vibraciones con ensayos de refracción sísmica aplicación de la geomecánica de rocas, luego aplicando fórmulas matemáticas y análisis de los datos tenemos como resultado la Velocidad Pico Partícula crítica, que nos servirá para poder elaborar un modelo o método para mejorar la distribución de las ondas sísmicas, optimizar el minado, las mallas de voladura, la carga de explosivo, la secuencia de disparo.

De lo anterior se desprenden las siguientes interrogantes

- a. ¿Es posible la determinación de la velocidad pico partícula crítica a partir de características geotécnicas y geofísicas?
- b. ¿Cómo influye la Velocidad Pico Partícula en los diferentes tipos de roca?
- c. ¿Qué tan importante es un estudio de determinación de velocidad pico partícula, para cada tipo de roca?

1.2 Formulación del problema

Debido a la necesidad de conocer la velocidad pico partícula para la optimización en la elaboración de proyectos de voladura, y poder predecir el impacto que tendrán las ondas vibracionales en el macizo rocoso al momento de realizarse una voladura; mediante modelos ajustados al yacimiento de Toquepala, modelos que puedan medir las consecuencias y los beneficios, por lo cual es necesario e imprescindible tener un valor para cada tipo de roca presente en los diferentes sectores del tajo.

Las diferentes características de la geomecánica de rocas, para la formulación de un proyecto de voladura es imprescindible, dado que la información que se recopila en un mapeo geomecánica, geomecánica-estructural y ensayos de laboratorio no pueden ser ajustados ya que debe al proyectarse un área se debe tener en cuenta cual es valor en mm/s, que no debe ser sobrepasado.

Al producirse la voladura, se generan diferentes tipos de ondas sísmicas las cuales atraviesan el macizo rocoso debido a distintos parámetros, tienen influencia de ocasionar mayor o menor daño, pudiendo disminuir la calidad del macizo rocoso, ocasionando movimientos de deslizamiento en distintas velocidades.

Para la determinación de la velocidad pico partícula se realiza mediante una campaña de ensayos de refracción sísmica, la cual inducirá ondas sísmicas a través de 47 líneas que serán colocadas dentro del tajo; una campaña de mapeo geomecánica de la cual se obtendrá la calidad de la roca en los diferentes sectores y tipos de roca; una campaña de muestreo de la cual se obtendrán valores reales sobre la resistencia y la compresión de las rocas.

1.3 Antecedentes

En Perú el principio de la Velocidad Pico Partícula, ya está siendo usado en las diferentes unidades mineras, Industrias que tienen que ver con perforaciones o voladuras, en la construcción e infraestructura de distintos proyectos, desde el 2005;

destacando su importancia para la optimización de proyectos con uso de explosivos y la seguridad en sus operaciones tanto para el personal que labora como para la misma infraestructura y equipos.

(**Tovar, 2015**). La empresa minera Consorcio Minero Horizonte, mina Lourdes se presente un macizo rocoso de mala calidad con un Rock Masic Rating de 20-40, los accidentes leves y las acidas de roca son muy frecuentes. Debido a la imperiosa necesidad de controlar y minimizar el daño al macizo rocoso en la etapa de perforación y voladura por lo que se aplicara el principio de Velocidad Pico Partícula en la operación unitaria de voladura, que es esencial realizarlos con una alta eficiencia, porque influye directamente en las operaciones posteriores y en el daño que pueden ocasionar al macizo rocoso.

(**Contreras, 2009**). El empleo adecuado del monitoreo de vibraciones producto de la voladura, es una técnica que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de la voladura. En efecto, la medición de los niveles de velocidad de partículas que provoca la detonación de cada carga explosiva, es un medio a través del cual es posible conocer su eficiencia relativa, su interacción con las cargas adyacentes y en definitiva el rendimiento general del diseño.

(**Pampacata, 2015**). Debido a la necesidad de obtener la materia prima “Puzolana”, insumo importante para la fabricación de cemento, ubicado en el distrito de María del Triunfo, Lima. Debido a la demanda de tiempo y demasiadas maquinas ara producir toneladas de materia prima, lo que no es factible económicamente. La forma de solución a este problema era realizar voladuras sin que afecte a las zonas aledañas, Es necesario crear un modelo matemático, que prediga las diferentes intensidades de vibración de acuerdo a la zona y distancia respecto a las casas cercanas, de esta manera ajustar las cargas explosivas y retardo de acuerdo a los diferentes modelos y cálculos matemáticos queden la seguridad de minimizar daños en las estructuras.

1.4 Hipótesis

Es posible el cálculo de la velocidad pico partícula en la mina, mediante ensayos geofísicos de refracción sísmica y análisis geomecánico (ensayos y mapeos) en las paredes de los taludes, tomando en cuenta las características de cada tipo de roca presente, monitoreando los proyectos de voladura.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

- Determinar la velocidad pico partícula crítica (VPPc), para la optimización del diseño de proyectos de voladura en la Mina Toquepala y monitoreo diario de vibraciones en el tajo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geomecánicamente del macizo rocoso en celdas de 15 x 15 m, con ensayos PLT para la determinación de la resistencia en cada tipo de roca.
- Determinar la Velocidad Pico Partícula (VPP) en la Mina Toquepala.

1.6 Justificación

La presente investigación se hace con la finalidad de determinar la velocidad pico partícula crítica, mejorando los modelos de predicción de daños causado por ondas sísmicas al momento del uso de explosivos. Trabajos similares aplicados en otras unidades mineras, dando buenos resultados mejorando los métodos o monitoreos de control de vibraciones, modelos de diseños para proyectos de voladura ya sea superficial o subterránea, también minimizaron daños de tipo estructural que debilita o daña al macizo rocoso disminuyendo el factor de seguridad

El mapeo geomecánico – estructural, son la base de la formulación de proyectos en minería, industria o proyectos viales, y que muchas veces es omitido, ya que se asume un valor general para todo, que en la mayoría de casos está equivocada pues la naturaleza de los materiales no es la misma por lo cual su comportamiento es distinto, debido a esto es necesario una análisis de vibraciones sísmicas inducidas para poder aplicar un método matemático y de tal forma hacer más eficiente un trabajo de voladura en distintos materiales, distintos sectores.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Geomorfología Regional

El área de estudio se emplaza sobre las colinas en alineamientos que se desprenden de la moderna cordillera volcánica (andes sudoccidentales). Estos alineamientos colinosos, están dispuestos de forma paralela, con una orientación norte-sur, se encuentran separados por estrechos valles secos que sirven de colectores de una densa red de cursos menores que disectan en las colinas. Este conjunto está inclinado hacia el sur, desplegándose entre los 2400 y los 3800 msnm, la relativa homogeneidad del basamento geológico y el clima árido imperante en toda el área han determinado que el relieve se bastante uniforme en cuanto a su fisonomía. Solo la depresión tectónica asociadas a la Falla Incapuquio lo que altera la uniformidad. (Flores, 2017)



Figura 1: Geomorfología de campamento minero de Toquepala, en el fondo se observa la cadena de montañas por la que se encuentra rodeada.

2.2 Geomorfología Regional

La zona de investigación se presentan estructuras mayores asociadas a la tectónica que dio origen a la formación de la cordillera de los andes, formándose grandes fallas profundas de origen tensional de rumbo predominante NO-SE. Locamente se tiene reconocida la falla Micalaco y el alineamiento Toquepala como estructuras mayores en el área de estudio, también se encuentran estructuras menores de rumbos NE-SO buzamiento predominante hacia el norte, producto de esfuerzos tensionales de cizallamiento regional se diferencian principalmente tres unidades geomorfológicas las llanura costera, el flanco andino, y las cadenas de los conos volcanicos. (Flores, 2017)

2.2.1 Llanura Costera

Se conforma por la formación Moquegua, la cual se encuentra en el sector SO que van de 1000 a 1800 msnm, se encuentra bastante erosionada presenta un paisaje típico de desierto con una pendiente suave, con relleno de pie de monte aluvial, el cual es transportado a las zonas bajas por la red de drenaje dendrítico. (Flores, 2017) (Ingemmet, 1989)

2.2.2 Flanco andino

Este se encuentra en la zona Este de la llanura costera, presenta un basamento de roca intrusiva y rocas volcánicas en la superficie, su topografía es bastante abrupta muestra quebradas, depresiones, una red de drenaje subparalelo. (Ingemmet, 1989)

2.2.3 Cadena de conos volcanicos

Se desarrolla una faja montañosa formada por una sucesion de conos volcanicos que presentan un ancho de 20 a 30 km con rumbo NO-SE.

En la zona volcanica ha sido afectada por la glaciacion cuaternaria con circos glaciares, con superficies estriadas y diques morreicos son comunes en los flancos de los volcanes.

La orientacion NO-SE que tiene la cadena volcanica se relaciona a que las zonas de erupcion volcanica se encuentra a lo largo de la falla o zona de debilidad en forma mas o menos paralelea ala litoral del Pacifico. Se tiene un drenaje dendritico a sub paralelo que converge hacia las quebradas principales, esta topografia es formada en las zonas de debilidad como son fallas y contactos litologicos ha sido erosionada por agua en las epocas de avenidas. (Ingemmet, 1989)

El clima es calido y desertico, sin precipitaciones salvo las pequeñás garuas con neblinas que en duante del invierno llegan hasta las pampas, descargando lluvia muy fina. El clima varia con la altitud de moderado a templado hasta el frio intenso; presencia de lluvias spordicas en los meses de diciembre a marzo, presencia de temperaturas bajas que llegan hasta los 5°C en los meses de mayo a agosto. (Ingemmet, 1989)

La flora es ilimitada por la baja precipitacion que tiene durante el año y esta constituida por cactus y algunos arbustos que se ubican en el fondo de quebradas, la fauna esta contituida por vizcachas, zorros, pequeños roedores y aves pequeñas. (Flores, 2017)

2.3 Geomorfologia Local

2.3.1 Faja Costera Local

Esta unidad que se encuentra entre 200 a 400 msnm, presenta en su mayoría planicies de tipo desértico, terrazas aluviales, sistemas dendríticos, abanicos fluviales.

2.3.2 Cordillera de la Costa

Ubicada entre los 800 a 1200 msnm con 60 km de ancho presenta una geoforma de plutones de oca ígnea, tonalitas, granodioritas, tiene dirección NO-SE originadas durante las fases tectónicas de la orogenia Hercinica y Andina.

2.3.3 Pampas Costeras

Entre 400 a 1200 msnm, De origen cuaternario con forma típica de desierto disectada por varios valles, muestra una topografía semi ondulada con pequeñas elevaciones, que no superan los 30 metros.

2.3.4 Valles

Se encuentran ubicados en las pampas costeras junto a ríos, estos se encuentran con cultivos de fruta y otros productos, estas zonas son relativamente planas con pendientes que no superan los 10°.

2.3.5 Colinas

Colina Baja

Están ubicadas a los lados del valle de Locumba entre los 1500 a 1700 msnm con una pendiente de 20 a 25°, con acumulación de detritos aluviales producto de la meteorización y arrastre.

Colina Media

Posee una pendiente superior a 35° muy pronunciada y abrupta, las formaciones rocosas que aquí se encuentran están bastante fracturadas y meteorizadas, algunas de estas muestran milites marcados de sal y/o yeso.

Colina Alta

Están entre los 2900 a 3300 msnm, elevaciones que se distinguen en el paisaje, ya que algunos forman parte de las quebradas profundas.

2.3.6 Quebradas

Son las depresiones bien marcadas en el paisaje, con una profundidad de 50 metros a más, las paredes que se encuentran en sus extremos son abruptas, formaciones naturales producto de la meteorización.

2.4 Geología

El depósito está situado en un terreno que fue sometido a intensa actividad ígnea, incluyendo una gran variedad de fenómenos eruptivos, lo que se registra hace 70 millones de años (cretáceo-terciario); esta actividad produjo enormes cantidades de material volcánico, el cual se acumuló en una serie de mantos de lava volcánica, hasta completar un espesor de 1500 m constituyendo el basamento regional, el mismo que está

compuesto por derrames alterados de riolitas, andesitas y aglomerados, inclinados ligeramente hacia el oeste y constituyen el llamado Grupo Toquepala. (Bellido, 1963)

Posteriormente, la actividad ignea fue principalmente intrusiva y produjo grandes masas de roca en fusión que intruyeron, rompieron y fundieron las lavas enfriadas del Grupo Toquepala. Estas rocas intrusivas constituyen apofisis del batolito andino que fueron emplazadas en diferentes etapas. Debido a que provinieron de un magma de composición química variable, resultando diferentes tipos de rocas por diferenciación (diorita, dacita porfídica, etc) (Bellido, 1963)

La actividad tectónica regional, esta relacionada con la formación de la Cordillera de los Andes, estructuralmente representada en el área de Toquepala por la falla Micalaco por el alineamiento Toquepala. La intersección de estas dos fallas está ubicada en el área de la mina. (Richard, 1958)

Posteriormente, soluciones hidrotermales de alta temperatura, resultado de un estado de diferenciación magmática, fluyeron a través de las rocas existentes, destruyendo y alterando su composición química, haciéndolas más permeables. Estas soluciones favorecidas por un intemperismo pre-existente produjeron la alteración y mineralización primaria. (Richard, 1958)

Los diferentes eventos intrusivos de dacita porfídica dieron origen al sistema de estructuras de brechas (brecha pipe mineralizada), y brechas de colapso, parcialmente mineralizada.

Un evento igneo tardío tuvo lugar inmediatamente al norte del yacimiento caracterizado por la actividad eruptiva explosiva e hidrotermal, constituido por una diatrema que fue rellenada por los fragmentos de rocas pre-existentes y un magma de composición dacítica, por lo que se denomina Porfido de Dacita Aglomerada. Cerrando el ciclo de actividad intrusiva ocurriendo diques de Latita Porfídica y de dacita que se reemplazaron a lo largo del Alineamiento Toquepala y atravesaron todas las rocas existentes. (Richard, 1958)

Esta actividad intrusiva-volcánica fue seguida por sucesivos estados de intensa erosión, asociados a variaciones de nivel de agua que contribuyeron en la lixiviación de la parte superior de la zona mineralizada (leach capping), dando como resultado una

concentración de cobre en profundidad (zona de enriquecimiento secundario), todos estos eventos son responsables de la superficie expuesta actual. (Richard, 1958)

La edad medida para el depósito de Toquepala está alrededor de los 58 a 52 m.a.

2.5 Estratigrafía

2.5.1 Secuencia Vulcano – Sedimentaria

Se tiene la presencia del Grupo Toquepala, las rocas volcánicas correspondientes a este miembro solo afloran en los alrededores, están formas por derrames de la serie Toquepala, donde se tiene las siguientes clases de rocas: Riolita, andesitas, pórfidos cuarcíferos y doleritas con un grosor promedio de 420 m. (Lacy, 1958)

2.5.2 Serie Alta

A. Alta Andesita (Aa)

Con afloramientos limitados de andesitas oscuras con presencias de magnetita en la matriz, con texturas afaníticas y con algunos fenocristales de plagioclasas. Esta roca se encuentra en discordancia deposicional sobre la serie Toquepala que corresponde a la Andesita Toquepala. (Lacy, 1958)

2.5.3 Serie Toquepala

B. Andesita Toquepala (Ta)

Roca volcánica que sobre yace al Pórfido Cuarcífero Toquepala, con matriz afanítica oscura, de fractura concoidea y muy fracturada, esta roca presenta como mineralización magnetita y pirita diagenética en la matriz. Esta roca presenta una potencia promedio de 50 m en los afloramientos completos donde se encuentra expuesta. (Lacy, 1958)

C. Pórfido Cuarcífero Toquepala (Tq)

Se sobrepone en discordancia erosional a la Dolerita Toquepala, roca volcánica de textura porfírica de composición ácida con presencia de abundante cuarzo en la matriz de color marrón claro, en la zona se tiene afloramientos restringidos en las partes altas, como mineralización se tiene la presencia de pirita y turmalina en relleno de fracturas. Esta roca presenta una potencia de 100 y 150 m aproximadamente. (Lacy, 1958)

D. Dolerita Toquepala (Td)

La dolerita Toquepala es una roca de grano fino de color gris oscuro a negro se presentan en bancos de 50 a 75 m de grosor y con buzamiento suave al SO, en algunas zonas se encuentran alterado por efecto hidrotermal a arcillas de color blanco amarillento con Serecita fina. Presenta un gran desarrollo de sus plagioclasas en algunos horizontes, presenta una fluidal y hacia los contactos una textura aglomeradica con clastos de las cajas correspondientes al techo y piso. Esta roca en algunos horizontes presenta magnetita y pirita rellenando las fracturas. Se encuentra sobre una roca denominada Qq (Pórfido Cuarzífero Quellaveco). (Richard, 1958)

E. Pórfido Cuarzífero Quellaveco (Qq)

Roca que aflora en la zona y es más extensa y de gran afloramiento y que se encuentra en contacto con la roca intrusiva (diorita), de composición acida con la presencia de fenocristales de cuarzo hialino en una matriz o pasta afanítica muy silicificada, con fractura concoidea y bordes muy fluidos. (Richard, 1958)

Edad

Regionalmente los volcánicos del Grupo Toquepala sobre yacen con discordancia angular al Grupo Yura del Jurásico Superior, Cretáceo Inferior e infra yace a la formación Moquegua considerada del Mi plioceno, en base a esta correlación el Grupo Toquepala estaría aproximadamente comprendida entre el Cretáceo Medio y el tope del Terciario Inferior. Las erupciones volcánicas tuvieron lugar en condiciones sub aéreas. Por las discordancias que existen entre las diversas unidades que integran el grupo, se infiere que el vulcanismo que origino tuvo lugar en varias fases separadas por periodos de inactividad o actividad muy disminuida durante los cuales predominan los procesos erosivos. (Richard, 1958)

F. Rocas Ígneas

Las rocas intrusivas afloran a lo largo del flanco andino con un desarrollo NO-SE, el tamaño de los intrusivos varía desde apófisis hacia stocks de considerables dimensiones, en el paisaje los cuerpos ms grandes destacan por su topografía prominente y en algunos casos por su coloración. En la zona de estudio se ha reconocido rocas intrusivas que varían gradacionalmente de diorita a granodiorita. Las rocas son holocristalinas, equigranular de grano grueso a medio. Estos cuerpos intrusivos atraviesan las diferentes unidades volcánicas del Grupo Toquepala en contacto es débil o nulo. La composición

de estas rocas está dada por plagioclasas en granos y cristales, ortosa en granos pequeños y gruesos, cuarzo que en el caso de dioritas en escaso, la horblenda y biotita que está siempre presente en la roca. Como minerales secundarios se tiene a la epidota y en ojos e hilos se tiene a la turmalina. (Dpto de Geología, 2011)

G. Diorita

Roca predominante en la zona con la presencia de cristales de plagioclasas en su mayor porcentaje coloración oscura en fractura fresca, muy poco o casi nada de cuarzo, textura equigranular de grano medio a fino, en superficie intemperizada muestra una coloración marrón rojiza producto de la alteración de las plagioclasas, feldespatos micas.

F. Granodioritas

Roca de textura inequigranular de color claro a rosado, con presencia de feldespato potásico y plagioclasas, en superficies intemperizada presenta una coloración rojiza y los bloques erosionados presentan un sub-redondeamiento por degradación de sus minerales accesorios de esta roca. Se desgrana fácilmente y forma unos suelos arcillosos los que van depositando en las partes bajas de las cuencas de esa zona, en algunas zonas se encuentra presencia de xenolitos de diorita flotando en la granodiorita; en superficie fresca forma bloques de gran tamaño. (Ingemmet, 1989)

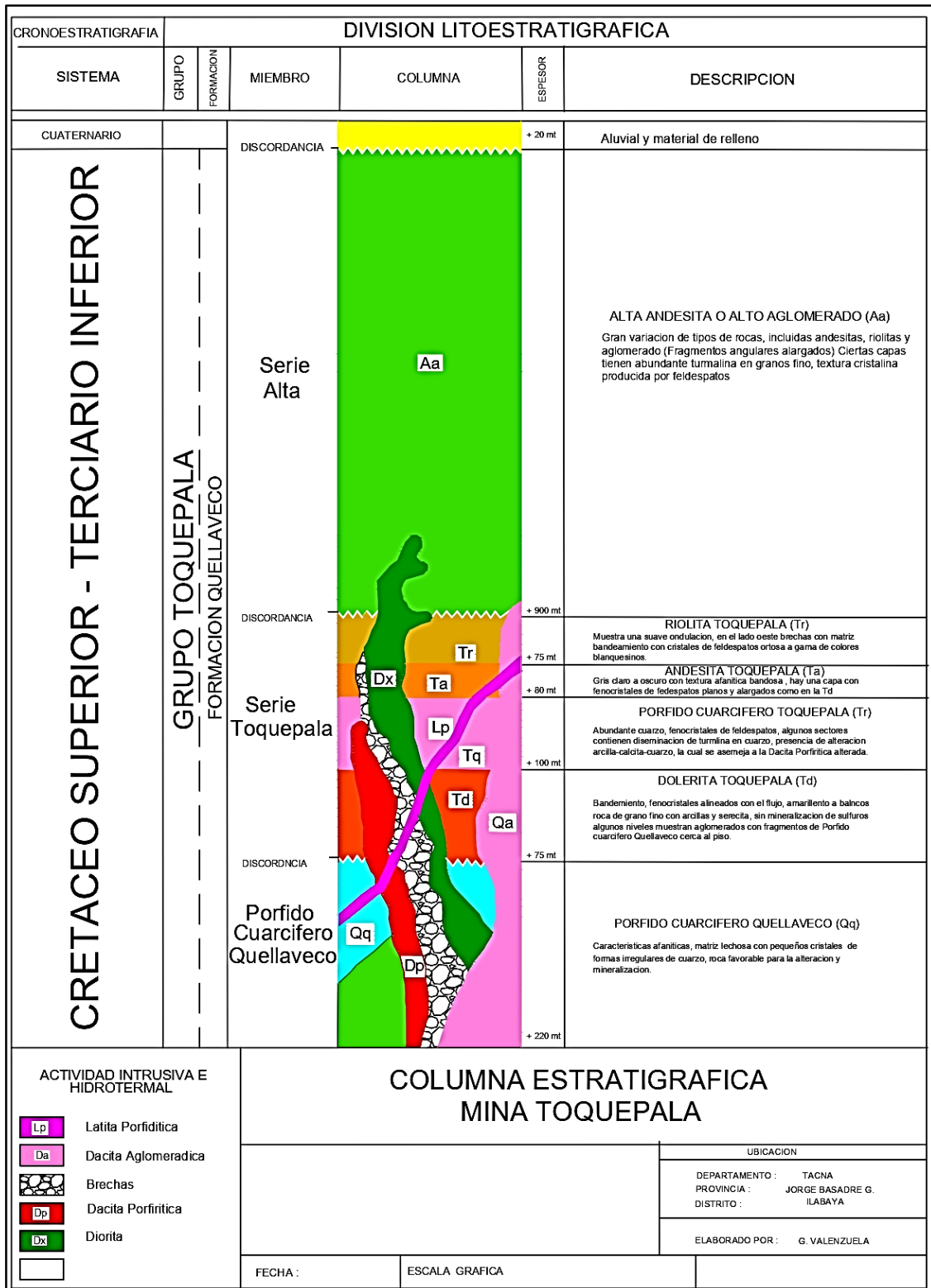


Figura 2. Estratigrafía de la Mina Toquepala
Fuente: Tomado de (Flores, 2017)

2.6 Características del Depósito

Localizado sobre el flanco Occidental de la Cordillera sur-este de los andes. Cuerpo mineral de gran tamaño (más de 1 km de diámetro), y más de 700 m de profundidad, de forma cónica con paredes bastantes empinadas.

Sufrió procesos de erosión, oxidación y enriquecimiento secundario, el desbroce antes de empezado el trabajo en el depósito, fue estimado más de 150 millones de toneladas. (Bellido, 1963)

A. Litología

Relacionado a una intensa actividad ígnea desde el Cretáceo Superior ala Terciario Inferior. El basamento consiste de flujos alternados de riolitas y andesitas de posición sub-horizontal, con una potencia acumulada de más de 1500 m, los cuales constituyen el Grupo Toquepala.

Intrusiones atravesaron el basamento, con apófisis y cuerpos de granodiorita y diorita perteneciente al batolito de la Costa. Intrusión de Dacita Porfirítica asociada a la mineralización. (Dpto de Geología, 2011)

B. Estructuras

Regionalmente se enmarca dentro del alineamiento tectónico NO-SE, formado durante el Cretaceo superior y terciario inferior, con una orientación paralela al rumbo de la cordillera andina (Falla Micalaco y Toquepala).

Relacionadas a la formación de brechas y también al fracturamiento tipo “Stock Work” desarrollado en amplias áreas de debilidad, conformando una “Brecha Pipe”. (Dpto de Geología, 2011)

C. Alteración

Muestra las tres alteraciones más comunes:

- Alteración Propilitica (epidota, calcita, piritita, clorita).
- Alteración Argilica (cuarzo-arcillas).
- Alteración Filica (cuarzo-serecita y piritita)
- Alteración Filica-Potásica (cuarzo-serecita, biotita, feldespato alcalino)

La zona de alteración abarca un área más grande que el cuerpo mineralizado. Todo el basamento y las rocas intrusivas han sido alterado, excepto los diques de última generación. Un evento tardío de yeso, es emplazado en las brechas y rocas intrusivas. (Dpto de Geología, 2011)

D. Mineralización

Posee una mineralización simple y una distribución uniforme, consistentes lateralmente como una profundidad.

Minerales económicos son encontrados como sulfuros, disgregados por toda la roca en forma de relleno de venillas o como pequeños granos diseminados. Presenta una mineralogía compuesta por calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y Calcocita (Cu_2S) como minerales económicos de Cobre; Molibdenita (MoS_2) como mineral económico de Molibdeno y Pirita (Dpto de Geología, 2011)

2.7 Geología Estructural

En la zona de los cuadrángulos de Moquegua, Palca y Pachia, esta orientación o alineamiento tectónico se encuentra definido por grandes fallas siendo la principal de estas el denominado Sistema de Fallas de Incapuquio (J. Wilson y W. García).

A. Falla Incapuquio

La falla Incapuquio principalmente a los volcánicos Toquepala y solo en un pequeño sector del extremo, suroriental disloca a la Formación Ataspaca, poniéndola en contacto con la Formación Toquepala. En la apacheta de Mogotito el tufo Huaylillas se halla cubriendo la taza de la falla sin ser afectada.

Las características más importantes de esta falla son: su alineamiento casi recto que sugiere un plano de fracturamiento de alto ángulo; y zonas de intensa alteración que existen en ciertos tramos de su traza donde las rocas se presentan fuertemente fracturadas.

Es difícil establecer el movimiento de la falla Incapuquio (J. Wilson), sugiere que esta falla es del tipo transcurrente (strike slip fault) y considera que su movimiento principal fue en sentido horizontal, debido al cual habrían producido pequeños pliegues de arrastre que existen en ambos lados de la falla con ejes dispuestos a menos de 45° con respecto al plano de fracturamiento. (Dpto de Geología, 2011)

En el caso de la falla Incapuquio según Wilson, el primer y principal movimiento tuvo lugar en una etapa comprendida entre el post-Toquepala y pre-Moquegua. Los movimientos posteriores, según el mismo autor, habrían sido de tipo normal en un poco posterior a la deposición de la Formación Moquegua a la cual afecta débilmente (Richard, 1958)

B. La falla Micalaco

Esta estructura a 6 o 7 km al norte de la falla Incapuquio, es más o menos paralela esta y puede pertenecer al mismo sistema.

La falla en mención se reconoce desde el paraje de Micalaco, hasta el borde sur del tajo abierto de la Mina Toquepala y probablemente continua formando el contacto el intrusivo diorítico del cerro Sargento con los volcánicos de la serie Toquepala. La falla en el trayecto reconocido tiene traza recta y en algunos sitios se ha constatado pequeñas vetas de óxido de fierro. (Ingemmet, 1989)

El tajo abierto de la Mina Toquepala, en cuya porción central se encuentra la chimenea de brecha que controla a la mineralización, el stock de pórfido dacítico, con el cual se supone relacionada genéticamente dicha mineralización, así como el cuello de aglomerado dacítico y otras filoneas, se hallan prácticamente sobre esta falla y concentrados en un área relativamente pequeña. Todo parece indicar que esta parte de la falla se produjo, por causas aún no bien conocidas, una zona de debilidad que permitió el emplazamiento de stock dacítico, la formación de la chimenea de brecha y su posterior mineralización. (Ingemmet, 1989)

2.8 Mapeo geológico – Geotécnico

El acopio de la información geomecánica se debe llevar a cabo mediante diferentes tipos de mapeo geotécnicos. Los métodos de mapeo geotécnico más confiables son los que se realizan directamente sobre afloramiento de masas rocosas, estos métodos son los convencionales y comprenden el “método de celdas en detalle”, el mapeo se realiza sobre un área de afloramiento rocoso de extensión variable, sea en superficie o en subterráneo, los lugares del mapeo denominados, también estaciones de medición, deberán ser colocados en los planos geológicos-geotécnicos. (Monge, 2004)

El mapeo geomecánico, es la representación gráfica del tipo de soporte a colocar en base a la condición geomecánica, según la clasificación G.S.I, RMR, de una labor excavada y los factores influyentes que actúan sobre ella, tales como, el ancho de la

abertura, labores cercanas, presencia de agua, influencia de esfuerzos, orientación de fracturas y la voladura. (Monge, 2004)

Por otro lado, cuando no se dispone de afloramientos rocosos, se pueden aprovechar los testigos de las perforaciones de diamantinas para realizar sobre ellos el mapeo geotécnico de la masa rocosa en donde se ubican estas perforaciones. (Monge, 2004)

Los parámetros de observación y medición deben ser obtenidos en formatos de registros señalados para cada evaluación, adecuándolos a las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM-International Society for Rock Mechanics).

2.9 Geomecánica de Rocas

La mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y el comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y su respuesta ante la acción de la fuerza aplicada en el entorno físico. El desarrollo de la mecánica de rocas se inicia como consecuencia de la utilización del medio geológico para obras de ingeniería superficiales, obras subterráneas, minería y otros; durante las fases de perforación diamantina para determinar el valor económico; para el diseño de medidas de sostenimiento en excavaciones subterráneas; entre otros en el diseño de grandes metros, centrales hidroeléctricas, presas y otros trabajos de ingeniería. (Vallejo, 2002)

2.10 Caracterización del Macizo Rcoso

Mapear geomecánicamente el macizo rocoso es recopilar la información necesaria relativa a las propiedades y características de los materiales rocosos, que precisan ser cuantificados para su aplicación. La recolección de los datos debe definir e identificar todos los rasgos estructurales que controlan la estabilidad. El orden de la información dependerá de la capacidad de acceso a los afloramientos y las zonas específicas por describirse. El nivel de detalle requerido depende de la importancia del proyecto. (Vallejo, 2002)

La caracterización geológica-geotécnica consiste en cartografiar lugares con propiedades físico mecánicas diferentes a diferentes escalas, aquí las discontinuidades tienen primordial preponderancia de él se obtienen su respectiva calidad de roca intacta, con ensayos “in situ” toma de muestras representativas para ensayos de laboratorios en mecánica de rocas, y para poder adquirir las propiedades físicas y mecánicas de la roca. (Vallejo, 2002)

El objetivo de la caracterización geomecánica es cuantificar los parámetros geotécnicos que gobiernan el comportamiento del macizo rocoso en una excavación. Para la evaluación de resultados, los datos de campo pueden ser analizados e interpretados. (Vallejo, 2002)

Es importante tener definida la litología o tipos de rocas presentes en el yacimiento. Se deben trazar en forma clara los contornos de la mineralización y los contactos de los diferentes tipos de rocas en las cajas. Esta información se debe tener disponible. (Vallejo, 2002)

El análisis de la distribución de las discontinuidades es otro aspecto importante para definir el arreglo estructural de la masa rocosa. Mediante la utilización de técnicas de proyección estereográficas, podemos determinar el número de sistemas o familias de discontinuidades presentes en el lugar de evaluación. Las características estructurales de las discontinuidades, pueden ser determinadas, mediante tratamiento estadístico de la información posteriormente controlado por el arreglo estructural de la masa rocosa. (Vallejo, 2002)

Las características estructurales de las discontinuidades, pueden ser determinadas mediante tratamientos estadísticos de la información de los mapeos geotécnicos.

2.11 Clasificación Geomecánica del Macizo Rcoso

Es importante entender que el uso esquema de clasificación de la masa rocosa no puede reemplazar a los procedimientos más elaborados de diseño. El uso de los procedimientos requiere de información relativamente detallada sobre los esfuerzos in situ las propiedades de la masa rocosa y la secuencia de excavación planeada. (Vallejo, 2002)

Los objetivos de la clasificación geomecánica son:

- Identificar los parámetros más significativos que influyen en el comportamiento, es decir, clases de masas rocosas de diferentes calidades.
- Dividir una formación rocosa en grupos de similar comportamiento, diferentes tipos de calidades en el macizo rocoso.
- Obtener datos cuantitativos y guías para el diseño de ingeniería.

2.11.1 RMR (Rock Mass Rating) – Bieniawski

Fue desarrollada en 1973, actualizada en 1979 y 1989, el sistema consiste de una metodología de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo rocoso, criterios de excavación y sostenimiento. Esta metodología es una de las más usadas.

Tiene como objetivo definir la calidad de los macizos rocosos en función al índice RMR, este índice se calcula teniendo en cuenta la resistencia de la matriz rocosa, el índice RQD, condición de las discontinuidades y parámetros hidrogeológicos. (Brown, 1981)

La clasificación RMR tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- La resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- El grado de fracturación en parámetros del RQD
- El espaciado de las discontinuidades.
- Parámetros o condiciones hidrogeológicas.
- La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de excavación.

Tabla 1. *Calidad de la Roca-RQD, usado para mapeo en talud.*

Índice de Calidad RQD (%)	Calidad
0-25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Excelente

Tabla 2. Clasificación Rock Mass Rating System, usado para el cálculo en testigo de perforación

Descripción de la Calidad del Macizo Rocoso	R.Q.D %	Observaciones
Muy mala	0-25	Para RQD < 10 se puede tomar RQD = 10 en la ecuación de Q.
Mala	25-50	
Mediana	50-75	
Buena	75-90	
Excelente	90-100	

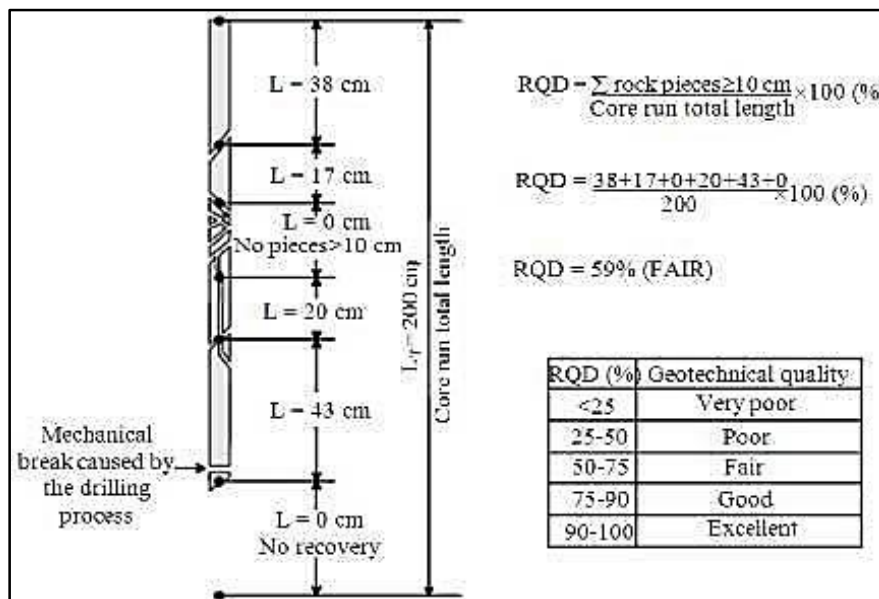


Figura 3. Perfil de un testigo de perforación, para el cálculo del RQD solo se deben tomar en cuenta los trozos que tengan una medida de 10 cm o superior y desestimar aquellos que y tengan una medida menor

Fuente: Tomado de (Gonzalez de Vallejo, 2002)

Tabla 3. Clasificación de parámetros RQD.

CLASIFICACION GEOMECANICA RMR (BIENIAWSKI, 1989)									
1	RESISTENCIA A LA MATRIZ ROCOSA (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	COMPRESION SIMPLE (MPa)		
		COMPRESION SIMPLE	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 -	<1
	PUNTUACION		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25 %		
	PUNTUACION		20	17	13	6	3		
3	SEPARACION DE DIACLASA		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	PUNTUACION		20	15	10	8	5		
4	ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	LONG DE LA DISCONTINUIDAD	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		PUNTUACION	6	4	2	1	0		
		ABERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		PUNTUACION	6	5	3	1	0		
		RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		PUNTUACION	6	5	3	1	0		
		RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		PUNTUACION	6	4	2	2	0		
		ALTERACION	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
PUNTUACION	6	5	3	1	0				
5	AGUA FREATICA	CAUDAL POR 10m DE TUNEL	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min		
		RELACION: PRESION DE AGUA/TENSION PRINCIPAL MAYOR	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	PUNTUACION		15	10	7	4	0		
CLASIFICACION	CLASE		I	II	III	IV	V		
	CALIDAD		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala		
	PUNTUACION		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		

Tabla 4. Guía de clasificación y discontinuidades.

Parámetros	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	valoración
Longitud de discontinuidad(m)	>20	>20	>20	0
Apertura (mm)	<1	1-2	<2	06
Rugosidad	Ligeramente	suave	suave	05
Relleno	Blando	blando	blando	
Meteorización	Ligera	ligera	ligera	5
Total				12

2.11.2 Sistema de Clasificación de Q de Barton (1974)

Desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir del estudio de un gran número de túneles, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas. El Índice Q, está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la expresión: (Barton, Clasificación de Q de Barton, 1974)

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

Dónde:

J_n = Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

J_a = Índice de rugosidad de las discontinuidades.

J_w = Coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF (Stress reduction factor) = Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Tabla 5. Clasificación de parámetros individuales utilizados en el Índice de Calidad de Excavación de Túneles Q

DESCRIPCION	VALOR	NOTAS
1. INDICE DE CALIDAD DE ROCA		
	RQD (%)	
A. Muy mala	0-25	1. Cuando se obtienen valores de RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el Índice Q. 2. Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.
B. Mala	25-50	
C. Regular	50-75	
D. Buena	75-90	
E. Excelente	90-100	
2. NUMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS		
	Jn	
A. Masivo o con pocas juntas.	0.5-1.0	1. En intersecciones de túneles se utiliza la expresión (3.0 x Jn) 2. En las bocaminas de los túneles se utiliza la expresión (2.0 x Jn)
B. Una familia de juntas	2	
C. Una familia de juntas + una aislada.	3	
D. Dos familias de juntas	4	
E. Dos familias de juntas + una aislada	6	
F. Tres familias de juntas.	9	
G. Tres familias y algunas juntas aleatorias.	12	
H. Cuatro familias, juntas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15	
I. Roca triturada, terrosa.	20	

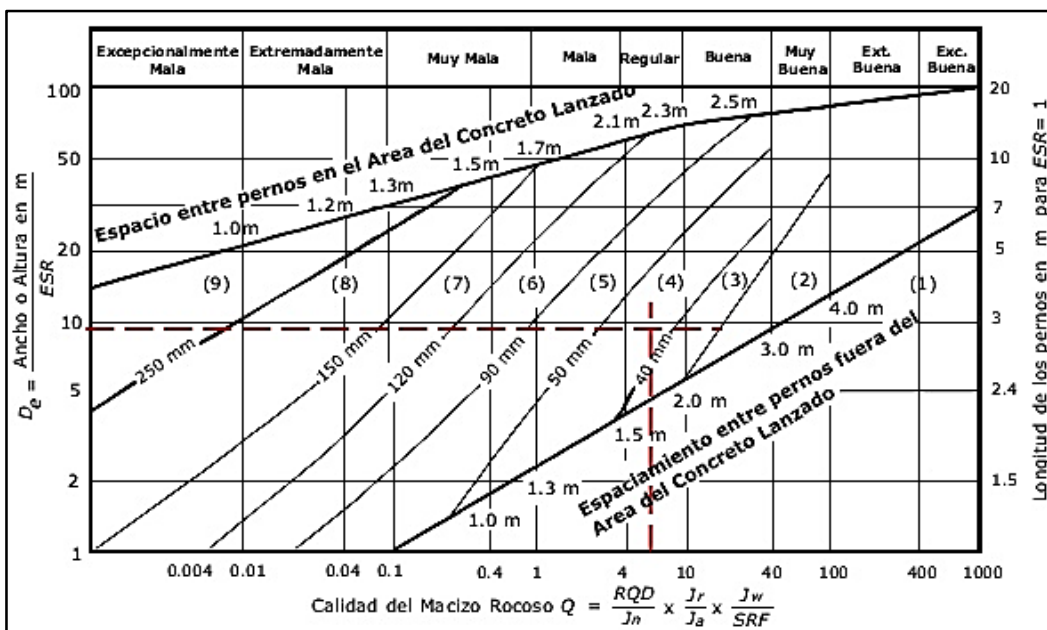


Figura 4. Clasificación Q

Fuente: Tomado de (Monge, 2004)

2.11.3 Clasificación Sistema GSI (Geological Strength Index)

La caracterización del macizo rocoso es simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en término de bloque y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas. La combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas. (Gonzalez de Vallejo, 2002)

INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE				
		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
<p>Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.</p>		<p>DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →</p>				
<p>ESTRUCTURA</p>		<p>DECRECE EL ENCLAVAMIENTO DE LOS BLOQUES ↓</p>				
<p>INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas</p>	90	80	70	N/A	N/A	
<p>FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de dicontinuidades</p>	80	70	60	50	40	
<p>MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrelabados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas</p>	70	60	50	40	30	
<p>FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la Interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion</p>	60	50	40	30	20	
<p>DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados</p>	50	40	30	20	10	
<p>LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla</p>	N/A	N/A				

Figura 5. Clasificación GSI

Fuente: Tomado de (U. Nacional de Colombia , 2015)

2.12 Propiedades del Macizo Rocosos

Es importante definir las propiedades físico-mecánicas de la masa rocosa y de sus elementos constituyentes, es decir de la roca intacta y de las discontinuidades estructurales. En el caso de la roca intacta, la propiedad más relevante es la resistencia compresiva no confinada o denominada también resistencia compresiva simple o uniaxial. Este parámetro de resistencia puede ser determinado mediante ensayos de golpes con el martillo de geólogo, o mediante ensayos de impacto con el martillo de Schmidt, o mediante ensayos de carga puntual, o mediante ensayos de compresión simple en laboratorio de mecánica de rocas, todos ellos de acuerdo a las normas sugeridas por la ISRM (Brown, 1981).

En el caso de discontinuidades es necesario definir los parámetros de resistencia al corte de Mohr Coulomb (cohesión y ángulo de fricción), mediante ensayos de corte directo sobre superficies de discontinuidad en laboratorio de mecánica de rocas. Los ensayos del tablero inclinable (“tilt test”) realizados sobre testigos de perforaciones de diamantinas pueden ser valiosos para estimar el ángulo de fricción básico. Otro parámetro de las discontinuidades es la resistencia compresiva no confinada y el coeficiente de rugosidad de las juntas, ambos del criterio de la falla de Barton-Bandis (1990), los cuales pueden determinarse siguiendo las recomendaciones en este criterio. (Brown, 1981)

Finalmente podría ser necesario definir las propiedades de rigidez de las discontinuidades (rigidez normal y rigidez de corte), los cuales pueden ser estimadas utilizando ya sea el método basado en las propiedades de los materiales de relleno de las discontinuidades o en el método basado en las propiedades de deformaciones de la masa rocosa y la roca intacta (Barton 1972).

2.12.1 Discontinuidades en Macizo Rocosos

Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y la durabilidad de la masa. Es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la fábrica estructural. (Monge, 2004)

Los tipos de discontinuidades son:

- **Planos de Estratificación;** Dividen en capas o estratos de las rocas sedimentarias.

- **Fallas;** Son fracturas que han tenido desplazamiento. Estas son estructuras menores que se presentan en áreas locales de la mina o estructuras muy importantes que pueden atravesar toda la labor.
- **Zonas de Corte;** Son bandas de material que pueden ser varios metros de espesor, donde ha ocurrido el fallamiento del cuerpo rocoso.
- **Diaclasa;** Son fracturas o fisuras en la masa rocosa, que interceptan superficies primarias y estratificación, exfoliación, esquistosidad; esta no va acompañada de deslizamiento de bloque.
- **Planos de Foliación o Esquistosidad;** Son estructuras de espaciamiento pequeño comparado al volumen de roca, de origen penetrativo con una dimensión de un metro.
- **Contactos Litológicos;** Es la superficie que separa los cuerpos de rocas de diferentes litologías o tipos de rocas, este puede ser concordante o discordante, según el tipo de roca, según sus edades y sus disposiciones, una falla también puede actuar como contacto litológico. (Monge, 2004)

2.12.2 Meteorización de las rocas

Se denomina a las modificaciones experimentales en su composición o estructura por la acción de los agentes atmosféricos. La importancia que tiene la meteorización desde el punto de vista de la mecánica de los materiales rocosos. (Monge, 2004)

La meteorización física incluye las siguientes acciones:

- Arranque directo de las partículas
- Acción destructora debida a la congelación del agua en grietas y fisuras.
- Modificaciones producidas por los cambios de volumen de la roca debidos a variaciones de temperatura.
- Acción de las plantas, especialmente de las raíces de los árboles.

2.12.3 Resistencia de las rocas

La resistencia a compresión de las rocas se puede estimar a partir de la dureza superficial de las mismas, la cual se puede obtener mediante el martillo de Schmidt. Un dispositivo que registra con el rebote los valores de resistencia a compresión simple de

la roca comprendidos entre 20 MPa y 300MPa, Barton y choubey (1977) proponen la siguiente fórmula para calcular la resistencia. Ver tabla 06. (Monge, 2004)

$$\text{Log} (\sigma_c) = 0.00088 \gamma R + 1.01$$

2.12.4 Espaciamiento

El espaciado de las discontinuidades es el factor más influyente en el tamaño de los bloques que componen el macizo rocoso. Este aspecto cobra la máxima importancia cuando otros factores que contribuyen a aumentar la Deformabilidad del macizo rocoso. (Monge, 2004)

Tabla 6. Terminología de espaciados recomendada por la sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SRM),

<i>Descripción</i>	<i>Espaciado en mm</i>
Extremadamente cerrado	< 20
Muy cerrado	20 – 60
Cerrado	60 – 200
Moderado	200 – 600
Abierto	600 – 2000
Muy abierto	2000 – 6000
Extremadamente abierto	> 6000

Fuente: Tomado de (Brown, 1981)



Figura 6. Espaciamiento en el macizo rocoso.

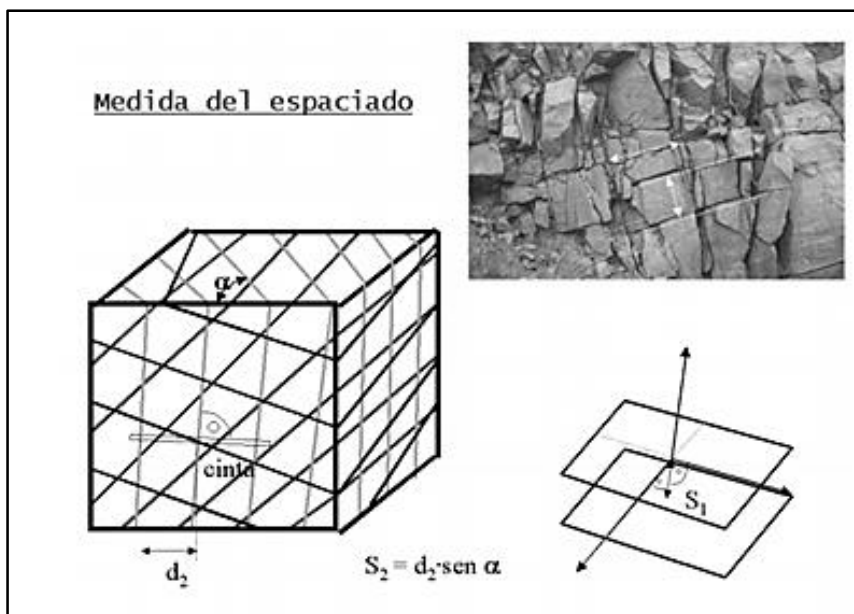


Figura 7. Medida del espaciado en las discontinuidades.

Fuente: Fotografía tomada de (Monge, 2004).

2.12.5 Dimensiones (Persistencia)

Este concepto hace referencia a la extensión o tamaño de las discontinuidades. Las dimensiones de la discontinuidad se pueden cuantificar observando su longitud en los afloramientos en la dirección del rumbo y en la del buzamiento. (Monge, 2004)

Las discontinuidades se pueden clasificar por el tamaño mediante la terminología de la siguiente tabla recomendada por la SIMR (Brown, 1981).

Tabla 7. Terminología de continuidad o persistencia recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIRM)

Termino	Continuidad en m
Muy pequeña	< 1
Pequeña	1 -3
Media	3 – 10
Grande	10 – 20
Muy grande	> 20

Fuente: (Brown, 1981)

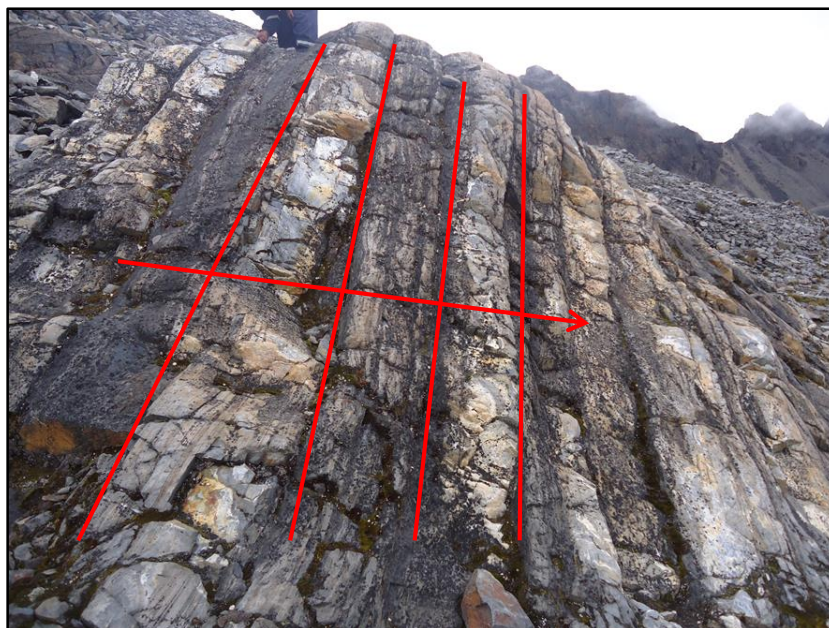
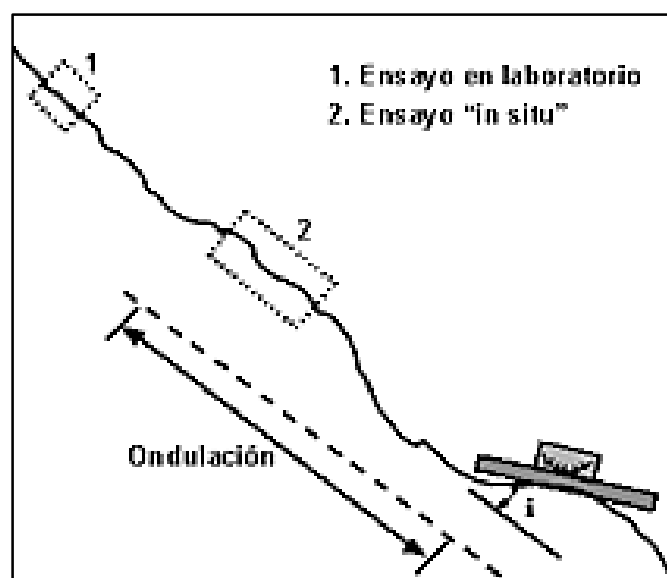


Figura 8. Tamaño relativo de las familias de discontinuidades.

2.12.6 Rugosidad

La rugosidad de los labios de una discontinuidad tiene una gran influencia sobre su resistencia al corte. Esta influencia es tanto menor cuanto mayor sea su apertura y el espesor de relleno. La rugosidad de una discontinuidad se puede caracterizar mediante los factores: ondulación y aspereza. Las ondulaciones son rugosidades a gran escala que provocan una fuerte expansión o dilatación de la discontinuidad. (Monge, 2004)



*Figura 9. Ondulación de una discontinuidad
Fuente: Tomada de (Monge, 2004)*

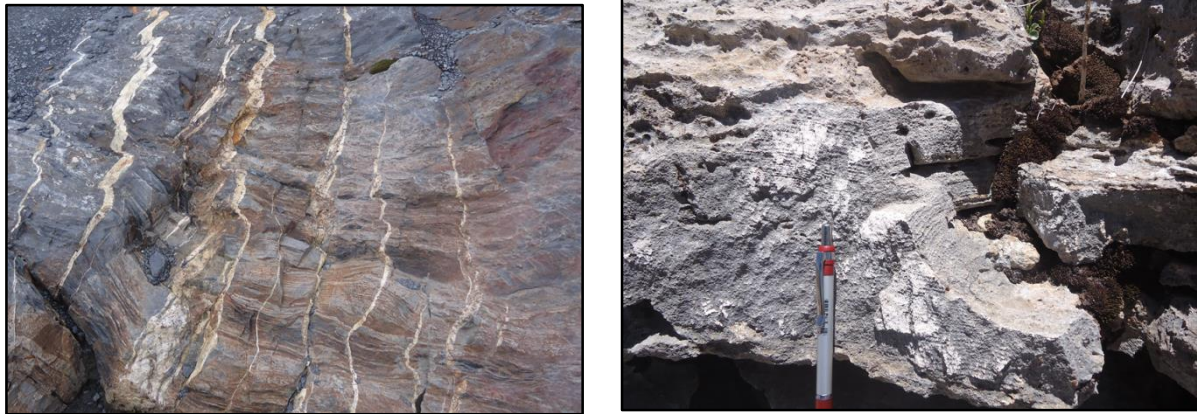


Figura 10. Tipos de Ondulación en Rocas



Figura 11. Peine de Barton. Toma de datos en campo.

Fuente: Tomada de (Oyanguren, Irizar, Lain, & Obeso)

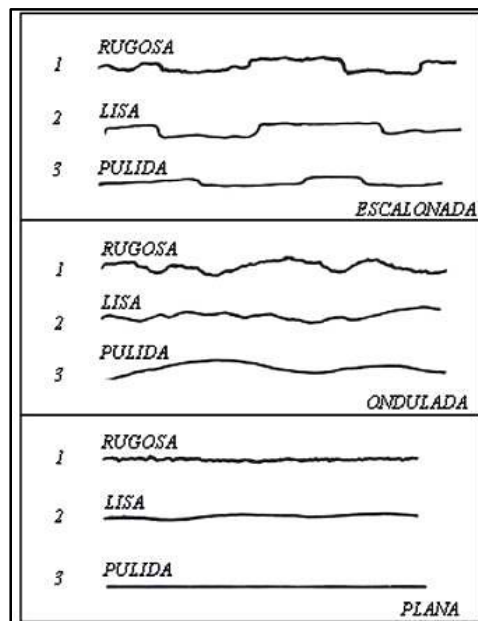


Figura 12. Escala intermedia, para la observación de hasta un metro de longitud.

Fuente: (Barton & N. and Bakhtar, Description and modelling of rock joints for the hydro-thermal-mechanical design of nuclear waste vaults AECL, 1987).

2.12.7 Apertura

En la mayoría de macizos rocosos existen aperturas de distintos tamaños en diferentes profundidades con diferentes tipos de rellenos, las aperturas son los resultados de desplazamiento cortantes que ha sufrido una estructura a lo largo del tiempo.



Figura 13. Apertura visible influida por efectos de la meteorización superficial

2.12.8 Relleno

Es el material meteorizado y mineralizado, que está dentro de las facturas del macizo rocoso. Su composición es variada desde minerales disgregados como talco, yeso, calcita o arcilla y fluidos mineralizantes como sílice. Estas están en forma perpendicular a las paredes de la abertura,

En cuanto al relleno en las fracturas, se debe tener en cuenta, la mineralogía del material, el tamaño de partículas y su granulometría, la consolidación que tiene, rugosidad de las paredes, espesor, desplazamientos cortantes, condición de agua. (Monge, 2004)

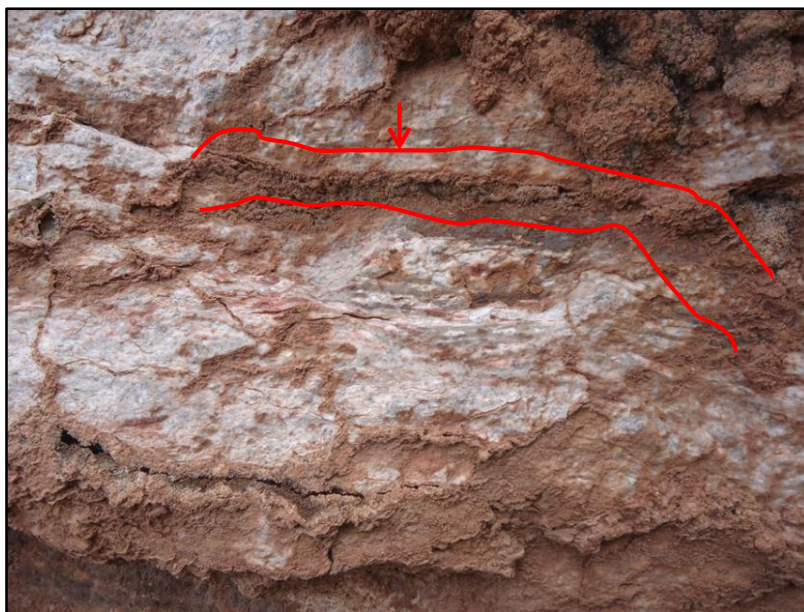


Figura 14. Relleno de calcita dentro de las aberturas.

2.12.9 Condición de Agua

La circulación de agua a través de los macizos rocosos resulta principalmente del flujo de agua a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria). En caso de ciertas rocas secundarias, sin embargo la permeabilidad primaria puede ser de importancia tal que la circulación de agua se produzca principalmente por los poros en las rocas. (Oyanguren, Irizar, Lain, & Obeso)

A este aspecto se deben hacer observaciones adicionales.

Los planos de estratificación y los estratos de rocas sedimentarias ya que tienen una permeabilidad primaria, elevada y posibilitan la conexión hidráulica de grandes zonas en los macizos rocosos sedimentarios. Estas condiciones hidráulicas tan eficientes tienen, no obstante una poca importancia en macizos rocosos ígneos o metamórficos, con ausencia de juntas o fallas de escala regional. (Oyanguren, Irizar, Lain, & Obeso)

Las fallas a veces, contienen brechas altamente permeables adyacentes a zonas arcillosas muy impermeables. Por lo tanto, la conductividad hidráulica puede ser muy anisótropa e incluso el flujo de agua puede quedar confinado en un plano paralelo al de la falla. (Oyanguren, Irizar, Lain, & Obeso)

2.13 Prospección Geofísica

Los métodos sísmicos de prospección requieren la introducción en la tierra de una energía que generalmente se genera mediante explosiones, y aunque en otros casos por

medios mecánicos, golpeando el suelo con un peso o generando una determinada señal mediante vibrador (sistemas de Weight Dropping y Vibroseis). Por estos medios producimos ondas sísmicas en la tierra semejantes a las ondas sonoras y que más propiamente designamos como ondas elásticas de estos materiales. (Cantos, 1973).

Los métodos geofísicos basan su aplicación en un fuerte contraste de las propiedades físicas de los materiales geológicos, entre las que se encuentren densidad, potenciales naturales, permeabilidad magnética, potenciales REDOX, conductividad térmica, etc., y dependiendo de las condiciones físicas y morfológicas del sitio de estudio, se podrán aplicar diversas técnicas geofísicas para resolver un problema. (Manilla Aceves, 2003)

2.13.1 Ondas Sísmicas

El impulso generado por la explosión puede considerarse como un tren de ondas amortiguándose con el tiempo. Como incluye un espectro amplio de frecuencias, sería la suma de todas, cada una de ellas amortiguándose con el tiempo. (J. Rios)

La carga explosiva se sitúa en el fondo de un sondeo perforado a poca profundidad por medio de una sonda portátil que forma parte del equipo de campo. El objeto se sondeo es situar la carga por debajo del estrato de alteración superficial o estrato de baja velocidad weathering (Cantos, 1973)

El método de Refracción Sísmica permite determinar la secuencia vertical de variaciones en impedancia acústica de una columna litológica afectada por ondas originadas en un punto de impacto. (Cantos, 1973)

Las condiciones elásticas de los materiales del subsuelo están definidas por el grado de cohesión de las partículas y por la densidad; las velocidades de onda están, por tanto en relación directa con la capacidad y con el peso, por lo que se deduce que los sedimentos no consolidados y livianos son más lentos que las rocas duras y densas. (Cantos, 1973)

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Metodología de la Investigación

El presente estudio de investigación, desarrollara una metodología analítica, descriptiva basada en estudios de comparación y análisis de la recopilación de datos en campo, los cuales serán tomados del campo en la caracterización del macizo rocoso a nivel geomecánico, geotécnico-estructural y los datos tomados en el estudio de refracción sísmica.

El presente trabajo de investigación, desarrolla una metodología científica con la observación del problema

3.2 Trabajos de gabinete

3.2.1 Recopilación de Información

Esta es la fase inicial, donde se reunirá toda la información necesaria para el desarrollo iniciando con la recopilación, revisión y selección de trabajos realizados en el área de Geotecnia, como formatos anteriores, mapeos anteriores, registro de tipos de rocas, mapa geológico, mapas estructurales.

Dentro de la recopilación de información se buscará trabajos realizados en otras empresas, en las que se haya hecho la aplicación de análisis de las ondas sísmicas, tanto para labores superficiales y subterráneas.

También se buscará información sobre trabajos de refracción sísmica, aplicación y análisis de datos proporcionados en esta prueba, para la obtención de velocidades en distintos tipos de material.

3.2.2 Trabajos Realizados en Perú

Con el tiempo, la voladura se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas en la industria de la construcción civil, extracción de materiales (tanto en canteras como en minería) y demoliciones. Al mismo tiempo, las voladuras son la forma más común de la generación de vibraciones y son estas las causantes de varios problemas ambientales y sociales, profundizándose de esta manera las contradicciones en relación sociedad-naturaleza. (Orihuela, 2009)

Lo que se busca principalmente es hallar un modelo mediante ensayos reales (disparo de cargas y medición de vibraciones) que pueda ayudarnos a obtener la ley de la transmisividad de un terreno específico, que viene a ser nivel de vibración recibida en un punto y expresado como valor de velocidad de vibración, para así poder predecir los niveles de vibraciones con el objetivo de poder delimitarlas y garantizar que no se alcanzara en ningún caso, los límites permisibles establecidos por la legislación que se rija en el momento (Orihuela, 2009)

Estudio de investigación denominado “Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladura en el Bypass 179 Compañía Minera Kolpa S.A.”, el cual se realizó para reducir la sobre rotura que se genera en 0.25 m alrededor del perímetro de diseño de la labor y controlar el daño de creación de nuevas fracturas al cual es sometido el macizo rocoso por la voladura de roca, generando labores inestables para el trabajo diario, mayores costos de sostenimiento, acarreo y transporte. (Tovar, 2015)

Empleo adecuado del Monitoreo de Vibraciones producto de voladuras, es una técnica que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de voladura. En efecto, la medición de los niveles de velocidad de partículas que provoca la detonación cada carga explosiva, es un medio a través del cual es posible conocer su eficiencia relativa, su interacción con las cargas adyacentes y en definitiva el rendimiento general del diseño. Así, el monitoreo de las vibraciones en la roca causadas por una voladura, ha sido utilizado como una herramienta de diagnóstico de esta, que la adecuada interpretación del registro de vibraciones permite determinar el grado de

interacción entre las variables de una variable de una voladura, pudiéndose evaluar por ejemplo; cargas detonando en una secuencia de encendido incorrecta; dispersión en los tiempos de encendido de los retardos. Efecto sumatorio de la velocidad de partícula y el daño que esta genera al macizo rocoso. (Contreras, 2009)

3.3 Trabajos de Campo

Para los trabajos de campo se contarán con la recopilación de datos tomados en los mapeos a realizarse y registros, tomados en los ensayos de refracción sísmica en zonas estratégicas del tajo minero.

Por lo cual cada proceso desarrollara distintos procedimientos en cada etapa, de los datos obtenidos en campo serán analizados.

3.3.1 Topografía

Se hará un trabajo preliminar de levantamiento topográfico para la determinación de las zonas más adecuadas y beneficiosas para el extendido de las líneas geofísicas. Ver tablas 8 y 9.

Esta base topográfica deberá levantarse en las coordenadas locales que se han dispuesto para la mina. para de tal forma determinar las zonas estratégicas en las que se realizaran los estudios e inducción de sismicidad.



*Figura 15. Levantamiento Topográfico
Fuente: JCS, Servicios Generales*

Tabla 8. *Coordenadas de Mapeo Geotécnico-Estructural de celdas de 1 a 25 línea geofísica.*

Perfiles Geofísicos						
	Perfiles Geofísicos	Tipo Roca	Desde		Hasta	
			Este	Norte	Este	Norte
1	1D	Agl-Volc	551417	62492	551413	62610
2	1E	Tr	551225	64376	551255	64337
3	1F	Aa	551415	62684	551433	62796
4	1G	Aa	551693	63837	551723	63721
5	2A	Agl-Volc	551452	64492	551535	64415
6	2B	Aa	551702	63086	551640	63039
7	2C	Agl-Volc	551657	64095	551674	63077
8	2D	Aa	551612	62933	551572	62816
9	2E	Aa	551413	62610	551415	62684
10	3A	Tr	551433	62796	551465	62884
11	3B	Aa	551569	63159	551534	63036
12	3C	Tr	548888	63929	548998	63974
13	3D	Ta	549584	64504	549687	64564
14	4A	Ta	549333	64187	549395	64234
15	5A	Tq	548938	63714	549016	63805
16	5B	Tq	549763	64489	549861	64557
17	5C	Td	549555	64141	549648	64211
18	6A	Td	549279	63897	549323	63951
19	6B	Td	549919	64402	550025	64456
20	7A	Qq	551019	63045	550995	63001
21	7B	Qq	550914	62818	550897	62760
22	7F	Qq	551206	63323	551205	63199
23	9A	Da/Ta/Lp	550839	64358	550884	64330
24	9C	Da	550362	64071	550439	64023
25	11A	Di-Prop	551085	63678	551097	63560

Tabla 9. *Coordenadas de Mapeo Geotécnico-Estructural de celdas de 26 a 47 línea geofísica.*

	Perfiles Geofísicos	Tipo Roca	Desde		Hasta	
			Este	Norte	Este	Norte
26	11B	Qq	551198	63124	551142	63022
27	11C	Di	549762	62497	549669	62572
28	11D	Di	548956	63420	548950	63338
29	11E	Di-Prop	549103	63926	549166	64029
30	11F	Di-Prop	551092	63558	551076	63488
31	12A	Di-Qs	550125	62756	550217	62747
32	12B	Di-Qs	549550	63250	549599	63169
33	12C	Di-Qs	549477	63471	549491	63354
34	12D	Di-Qs	549761	63037	549816	63037
35	12E	Di-Qs	549473	63582	549477	63471
36	14A	Qq	550160	64105	550209	64118
37	14B	Qq	549980	64044	550078	64112
38	18A-24B	Dp-G/A	550016	63637	550064	63666
39	20A	Di-G/A	550420	63220	550471	63327
40	20B	Di -G/A	550379	63118	550420	63220
41	21A	Bx-G/A	550514	63447	550514	63351
42	21C	Bx-Qs	550525	63561	550514	63447
43	24A-24C	Dp-G/A	550117	63697	550167	63723
44	7C*	Qq	-	-	-	-
45	4B*	Tr	-	-	-	-

3.4 Clasificación Geomecánica

Se realizarán mapeos geomecánicos en celdas de 15 m x 15 m, estos estarán distribuidos para cada línea de geofísica que será extendida a lo largo del tajo, para la caracterización también se hará el recolecto de muestras para los ensayos PLT para la determinación de la resistencia de la pared de talud. (Ver Anexos)

La caracterización geomecánica del macizo rocoso encada celda seguirá el siguiente orden:

- Identificación de los todos los tipos litológicos en la mina, su resistencia in situ

- Mapeo de las principales estructuras, sistemas de juntas, familias de diaclasas, evaluación de la continuidad de estas.
- Condiciones hidrogeológicas

3.4.1 Clasificación de dureza del terreno

Para clasificar la dureza de la roca en terreno, escoger un testigo de tamaño de la mano al golpearlo y rasgarlo según la clasificación de la tabla mostrada abajo, poner la dureza corresponde a los códigos alfanuméricos cercanos a 0.5 (p.e. R1.5, R2, R2.5, etc.). Tener la precaución con las muestras que no sean frescas porque se pueden secar y endurecer.

Tabla 10. Clasificación de dureza en terreno.

Grado	Descripción	Aprox. Esfuerzo	Identificación en Terreno
R0	Roca extremadamente débil	0.25 - 1.0 Mpa. 70 - 145 p.s.i.	Se indenta con la uña.
R1	Roca muy débil	1.0 - 5.0 Mpa. 145 - 725 p.s.i.	Se desmorona con un simple golpe de la punta de al martillo puede rasgarse con una navaja.
R2	Roca débil	5.0 - 25 Mpa	Puede rasgarse con dificultad con una navaja, se indenta superficialmente con la punta del martillo.
R2.5		725 - 3600 p.s.i.	Puede rasgarse con dificultad con una navaja, o el espécimen se puede fracturar en muchos pedazos con un simple golpe de martillo.
R3	Roca medianamente fuerte	25 - 50 Mpa. 3600 - 7250 p.s.i.	No puede ser rasgado o pelado con una navaja, el espécimen puede fracturar con un simple golpe de martillo.
R4	Roca fuerte	50 - 100 Mpa. 7250 - 14500 p.s.i.	El espécimen requiere más de un golpe de martillo para ser fracturado
R5	Roca muy fuerte	100 - 125 Mpa. 14500 - 36000 p.s.i.	El espécimen requiere de muchos golpes de martillo para ser fracturado.
R6	Roca extremadamente fuerte	> 250 Mpa. > 36000 p.s.i.	El espécimen solo es rasgado por el martillo.

3.4.2 Estimación de RQD

El RQD o Rock Quality Designation, es un parámetro definido por Deere (1963) que es la suma de todos los testigos perforados en la roca intacta tiene más de 10cm de longitud. RQD es un parámetro importante porque es usado por los sistemas de caracterización de la matriz de roca más importante, como los sistemas de RMR y de Q.

El mapeo de bancos, hay tres maneras para medir RQD, e método de Scanline, método de Jv y una combinación de los dos métodos de Scanline, tiene que imaginar un pozo de 1m de longitud de roca, y visualizar cuantos pedazos de roca ente fracturas naturales, tiene más de 10 cm de longitud, tal como dice la definición de RQD.



Figura 16. Delimitación de las celdas para realizar el mapeo Geomecánico.



Figura 17. Determinación de tipo de estructuras. Fallas o fracturas naturales. Mapeo de tipo estructural.

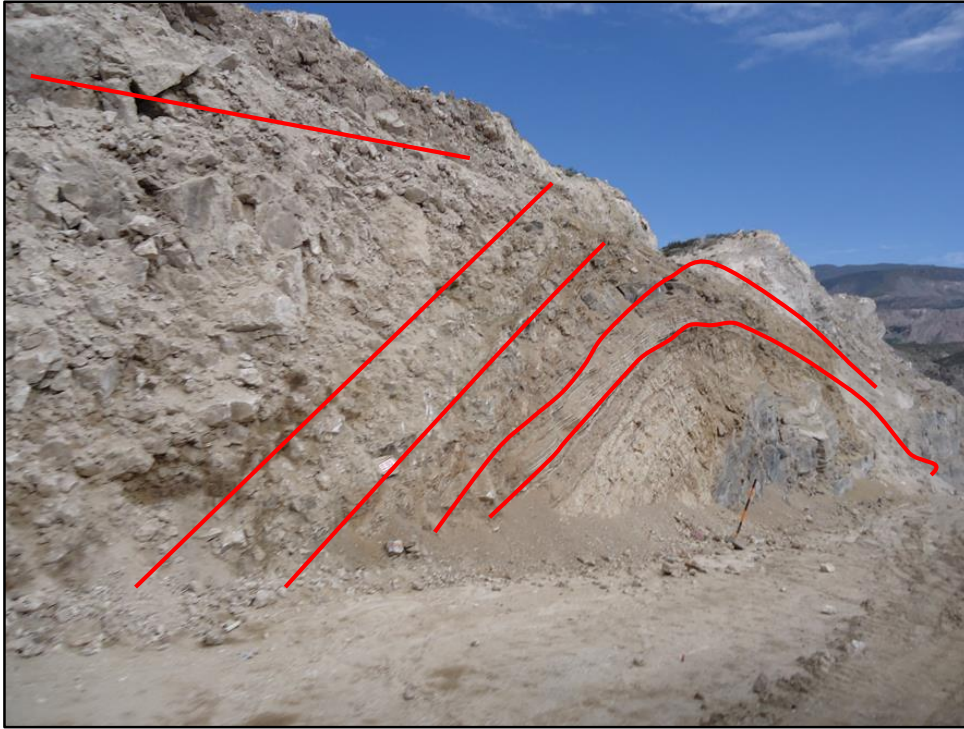


Figura 18. El banco muestra estructuras de falla, poco desclasamiento y un pliegue.



Figura 19. Perfil de banco luego de la voladura



Figura 20. Mapeo en fondo de mina, en la fotografía se muestra dos bancos consecutivos.



Figura 21. Muestreo en fondo de mina, monitoreo de proyecto de voladura.



Figura 22. Fracturamiento, monitoreo después de la voladura, se debe diferenciar las fracturas naturales de las artificiales.



Figura 23. Condiciones de agua en la zona noreste, en el fondo de mina.

3.4.3 Clasificación de Barton, Lén y Lunde (INDICE Q)

Estos autores consideran esta clasificación tomando en cuenta el RQD relacionándola con diversos parámetros, que serán considerados a continuación están relacionados con la siguiente formula.

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

Como se analiza, la clasificación de Barton, se basa 6 parámetros:

RQD : Índice de calidad de la roca

Jn : Número de familias de diaclasas.

Jr : Rugosidad de las superficies de las discontinuidades.

Ja : Alteración de las diaclasas.

Jw : Coeficiente reductor. Presencia del agua.

SRF : Factor reductor del esfuerzo.

- El primer coeficiente RQD/Jn representa en la formula el tamaño de los bloques.
- El segundo coeficiente Jr/Ja representa en la formula la resistencia al corte de los bloques.
- El tercer y último coeficiente Jw/SRF representa en la formula el estado tensional del macizo rocoso.

Tabla 11. Parámetro, cálculo del RQD.

<i>Descripción de la Calidad del Macizo Rcoso</i>	<i>R.Q.D %</i>	<i>Observaciones</i>
Muy mala	0-25	Para RQD < 10 se puede tomar RQD = 10 en la ecuación de Q.
Mala	25-50	
Mediana	50-75	
Buena	75-90	
Excelente	90-100	

Tabla 12. Parámetro, cálculo de la familia de diaclasas Jn

<i>Descripción</i>	<i>Jn</i>
Roca masiva	0.5 -1
Una familia de diaclasas.	2
Una familia de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	3
Dos familias de diaclasas.	4
Dos familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	6
Tres familias	9
Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales.	12
Cuatro a más familias de diaclasas, roca muy fracturada.	15
Roca triturada terrosa.	20
En boquillas, se utiliza 2 jun y en túneles 3 jun	

Tabla 13. Parámetro de Rugosidad de las diaclasas J_r

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

Nota : Si el espaciado de la diaclasas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_n en una unidad.
 Para diaclasas con espejos de falla provisto de lineaciones, si están orientados favorablemente, se puede usar $J_r = 0.5$

Tabla 14. Parámetro Agua en las diaclasas J_w

	J_w	Presión del agua kg/cm^2
- Excavaciones secas o de influencia poco importante	1	< 1
- Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de diaclasas.	0.66	1 - 2.5
- Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de rellenos de las diaclasas.	0.33*	2.5 - 10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo.	0.1-0.2*	> 10
- Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0.05-0.01*	> 10

Los valores presentados con el signo * son solo valores estimados, Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w

Tabla 15. Clasificación de Barton de los macizos rocosos. Índice de Calidad Q

Tipo de Roca	Valor de Q
Excepcionalmente Mala	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente Mala.	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy mala.	$10^{-1} - 1$
Mala	1 - 4
Media	4 - 10
Buena	10 - 40
Muy Buena	40 - 100
Extremadamente Buena	100 - 400
Excepcionalmente Buena	400 - 1000

3.5 Procedimiento de Mapeo Geotécnico

Cuando no se disponen de sondeos, el RQD se estima a partir de afloramientos, mediante el índice volumétrico de juntas J_v .

En el parámetro J_n , puede estar afectado por la foliación, esquistosidad, y laminaciones. Si las diaclasas paralelas están suficientemente desarrolladas, se contabilizan como una familia, si no se contabilizan como diaclasas ocasionales.

Se tomarán los valores de los parámetros J_r y J_a de la familia de diaclasas o discontinuidades rellenas de arcillas más débil de la zona, pero hay que elegir en primer lugar las diaclasas de orientación desfavorable, aunque no den el valor mínimo del cociente J_r/J_a .

El valor del SRF se obtendrá en la tabla de clasificación de este parámetro, si el macizo rocoso tiene arcilla en las diaclasas.

En las rocas anisótropas, la resistencia a la compresión simple de la roca, y la resistencia a la tracción, σ_c y σ_t respectivamente se evalúan en la zona más desfavorable para la estabilidad de la estructura subterránea.

3.5.1 Clasificación de Bieniawski Sistema RMR

Este sistema de clasificación se ha desarrollado en base a otras clasificaciones existentes, la mayor limitación de esta clasificación está en su aplicación en rocas expansivas y fluientes.

El parámetro que define la clasificación es el denominado índice RMR (Rock Mass Rating), que indica la cantidad del macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de los siguientes parámetros.

1. Resistencia, la compresión simple de la roca, es decir de la parte de la roca no presenta discontinuidades estructurales.
2. R.Q.D. este parámetro se considera de gran interés, para seleccionar el revestimiento de los túneles.
3. Espaciado de las diaclasas o discontinuidades, que es la distancia medida entre los planos de discontinuidad de cada familia.
4. Naturaleza de las diaclasas del cual consiste en considerar los siguientes parámetros.
 - Apertura de las caras de la discontinuidad
 - Continuidad de las diaclasas o discontinuidad según se rumbo y buzamiento.
 - Rugosidad.
 - Dureza de las caras de discontinuidad.
 - Relleno de las juntas.
5. Presencia del agua, en un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene gran influencia sobre el comportamiento, las descripciones utilizadas para este criterio son: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.
6. Orientación de las discontinuidades.

Para obtener el Índice RMR de Bieniawski se realiza lo siguiente:

1. Se suma los 5 variables o parámetros calculados, eso dé como resultado un valor índice.
2. El parámetro 6 que se refiere a la orientación de las discontinuidades, esta clasificación considera que este parámetro es desfavorable, por lo tanto, cuando se obtiene este valor índice de la orientación de las discontinuidades, este se le

sustraer al valor índice obtenido cuando la suma los 5 primeros parámetros, al realizar dicha operación se obtiene el INDICE RMR y se busca ese valor en la siguiente tabla 16.

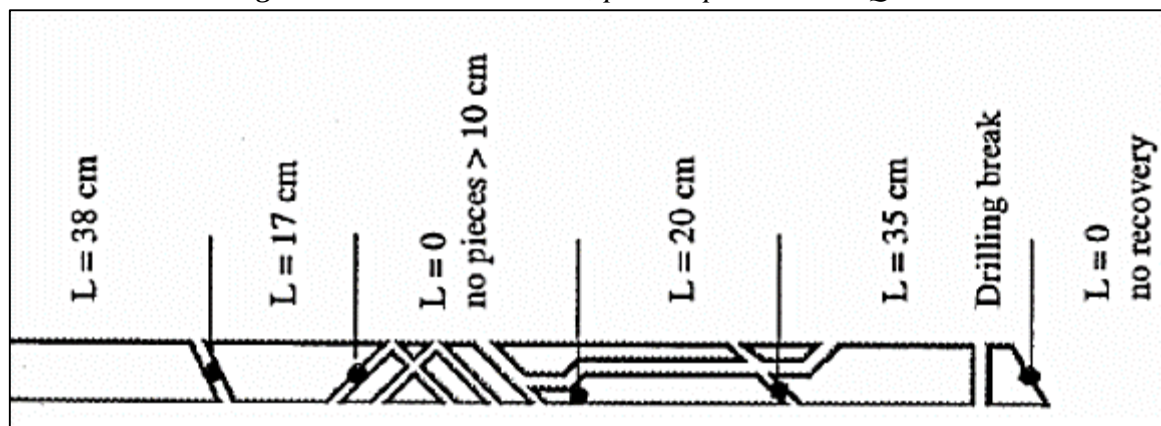
Tabla 16. Parámetro clasificación por Resistencia de Rocas Sanas.

Descripción	Resistencia a Compresión Simple (Mpa)	Índice de Resistencia de Carga Puntual (Mpa)
Muy Alta	> 200	> 8
Alta	100 – 200	4 - 8
Media	50 – 100	2 - 4
Baja	25 – 50	1 - 2
Muy Baja	10 – 25 3 – 10 1 – 3	< 1

❖ **Parámetro para calcular el RMR, Calculo de R.Q.D.**

El RQD, se calcula como se indica al inicio de esta guía, cuando se tiene el valor, se debe buscar el índice para el cálculo de RMR, y para ello se utiliza el siguiente.

Figura 24. Calculo de RMR, para el parámetro RQD.



Fuente: mecrocks.files

❖ **Parámetro para calcular el RMR, espaciamento de las discontinuidades.**

El espaciamento de las discontinuidades está clasificado según la tabla que a continuación expresa:

Tabla 17. Espaciamiento de discontinuidades.

Descripción	Espaciado de las Juntas	Tipo de Macizo Rocoso
Muy ancho	> 3 mts.	Solido
Ancho	1 -3 mts.	Masivo
Moderadamente cerrado	0.3 - 1 mts.	En bloques
Cerrado	50 - 300 mm.	Fracturado
Muy cerrado	< 50 mm	Machacado

❖ **Parámetro para calcular el RMR, naturaleza de las Juntas.**

Tabla 18. Clasificación según las aberturas de las discontinuidades

Grado	Descripción	Separación de las caras	Rango RMR
1	Abierta	> 5 mm.	0
2	Moderadamente abierta	1 - 5 mm.	1
3	Cerrada	0.1 - 1 mm.	4
4	Muy cerrada	< 0.1 mm.	5
5	No tiene	0	6

Tabla 19. Clasificación según la continuidad de las discontinuidades.

Grado	Descripción	Continuidad	Rango RMR
1	Muy pequeña	< 1 mts.	6
2	Pequeña	1 - 3 mts.	4
3	Media	3 - 10 mts.	2
4	Alta	10 - 20 mts.	1
5	Muy alta	> 20 mts.	0

Tabla 20. Clasificación según la Rugosidad de las discontinuidades

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	2
4	Suave	1
5	Espejo de falla	0

Tabla 21. Clasificación según el relleno de las discontinuidades

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Relleno blando > 5 mm.	0
2	Relleno blando < 5 mm.	2
3	Relleno duro > 5 mm.	2
4	Relleno duro < 5 mm.	4
5	Ninguno	6

Tabla 22. Clasificación según la meteorización de las discontinuidades.

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Descompuesta	0
2	Muy meteorizada	1
3	Moderadamente meteorizada	3
4	Ligeramente meteorizada	5
5	No meteorizada	6

Para calcular el RMR, según la naturaleza de las discontinuidades se toma el promedio de la suma de los RMR obtenidos en las tablas descritas anteriormente.

❖ **Parámetro para calcular el RMR, según la presencia de agua.**

Tabla 23. Obtención de rango RMR, según parámetro de la presencia de agua.

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Completamente seco	15
2	Semi Húmedo	10
3	Húmedo	7
4	Mojado	4
5	Flujo de agua	0

❖ **Parámetro para calcular el RMR, según la orientación de las discontinuidades (Rumbo y Buzamiento)**

Para calcular este rango RMR, se debe clasificar la roca de acuerdo al rumbo y buzamiento. *Ver Anexos. Mapeo de Celdas Geomecánicas*

Tabla 24. Determinación de RMR usando la valoración de Bieniawski 1989.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.) / CLASIFICACION BIENIAWSKI (1989)											
PARAMETRO	RANGO DE VALORES - VALOR ESTIMADO					VALORACION					
	>250	100-250	50-100	25-50	<25(2) <5(1) <1(0)	(4)	(8)	(1)	(5)	(0)	
RESISTENCIA (MPa)	(15)	(12)	(7)	(7)	(4)	(4)	(8)	2	(3)	1	7
RQD %	(20)	(17)	(13)	(13)	(8)	(8)	(8)	2	(5)	2	2
ESPACIAMIENTO (m)	(20)	(15)	(10)	(10)	(8)	(8)	(8)	8	(0)	3	8
Persistencia	(6)	(4)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	2	(0)	4A	2
Apertura	(6)	(5)	(4)	(4)	(1)	(1)	(1)	4	(0)	4B	4
Rugosidad	(6)	(5)	(3)	(3)	(1)	(1)	(1)	3	(0)	4C	3
Relleno	(6)	(4)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	1	(0)	4D	1
Alteración	(6)	(5)	(3)	(3)	(2)	(2)	(2)	3	(0)	4E	3
AGUA SUBTERRANEA	(15)	(10)	(7)	(7)	(4)	(4)	(4)	15	(0)	5	15
ROCK MASS RATING '89											
45											
CALIDAD DE MACIZO ROCOSO											
REGULAR											
RMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100						
IDENTIFICACION EN EL PLANO											
CALIDAD GEOTECNICA	MUY MALA	MALA	REGULAR	BUENA	MUY BUENA						

* # de Discontinuidades:.....en.....m * Número de Discontinuidades / m3:

28 --% RQD=----- 23%

* Tamaño de Bloques: ----- m3

Tabla 25. Valores de RMR, calculados las celdas en los perfiles de geofísica.

Perfil Geofísico	Tipo Roca	RMR		GSI
		Biewniaski(89)		
		Valor	Calidad	
			Macizo Rocoso	
1D	Agl-Volc	45	REGULAR	40
1E	Tr	49	REGULAR	44
1F	Aa	47	REGULAR	42
1G	Aa	56	REGULAR	51
2A	Agl-Volc	59	REGULAR	54
2B	Aa	49	REGULAR	44
2C	Agl-Volc	56	REGULAR	51
2D	Aa	57	REGULAR	52
2E	Aa	53	REGULAR	48
3A	Tr	51	REGULAR	46
3B	Aa	47	REGULAR	42
3C	Tr	51	REGULAR	46
3D	Ta	65	BUENO	60
4A	Ta	67	BUENO	62
5A	Tq	58	REGULAR	53
5B	Tq	60	REGULAR	55
5C	Td	57	REGULAR	52
6A	Td	64	BUENO	59
6B	Td	57	REGULAR	52
7A	Qq	59	REGULAR	54
7B	Qq	57	REGULAR	52
7F	Qq	53	REGULAR	48
9A	Da/Ta/Lp	55	REGULAR	50
9C	Da	64	BUENO	59

3.6 Prospección Geotécnica Laboratorio

La prospección Geotécnica tiene por objetivo obtener descripciones geomecánicas y estructurales de la zona de estudio, principalmente determinar las características y propiedades geotécnicas del macizo rocoso que incluye las estructuras principales; para lo cual se desarrolló una campaña geotécnica considerando mapeos de celdas para la clasificación geomecánica (RMR 89), muestreo y ensayo para determinar el Índice de Carga Puntual (PLT), forma indirecta para obtener la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS).

3.6.1 Metodología

La metodología para llevar a cabo el presente estudio ha comprendido en las siguientes fases:

Trabajo de Campo

Los trabajos de campo desarrollados fueron el mapeo geotécnico por las celdas y muestreo para los ensayos de Carga Puntual (PLT).

Laboratorio

Las muestras de rocas tomadas en campo, han sido ensayadas mediante Carga Puntual en el laboratorio de Geotecnia Mina Toquepala SPCC.

Fase I

Donde se ha revisado informes relacionados con estudios similares y de la zona de trabajo. Preparación de la información topografía, contacto, litológico, con apoyo de Software como AutoCAD y MineSight.

Fase II

En esta fase se interpreta e integra la información recopilada en las fases anteriores, permitiendo definir el modelo geotécnico y geológico, información que será utilizada para el cálculo de VPPc.

Con los 47 perfiles geofísicos resultado del Método de Refracción Sísmica, se interpretará los valores máximos y mínimos de la Velocidad de Propagación en la Onda P. Se ha utilizado el software RocData 4.0 de Rocsciense, para la determinación de los parámetros de Resistencia del macizo rocoso.

3.6.2 Investigación Geotécnica

Para la determinación las propiedades mecánicas más representativas de la diversidad litológica del Tajo Toquepala, se ha empleado métodos de investigación de campo, uno de los métodos más utilizados se basa en un buen mapeo de celda y muestreo para realizar ensayos de PLT.

❖ Mapeo Geotécnico - Estructural

Metodología empleada para identificar parámetros geo mecánicos y estructurales del macizo expuesto en los taludes por tramos denominados celdas, en el área de cobertura

de los perfiles geofísicos, obteniendo la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR 89) y GSI.

❖ **Campaña de Muestreo**

Metodología empleada para extraer muestras representativas donde se realizó el Mapeo Geotécnico – Estructural. Es importante contar con los implementos de seguridad como guantes, lentes, casco, etc. Estas muestras deben ser de tamaño uniforme para que se puedan tratar en el ensayo de Carga Puntual (PLT), este tipo de ensayo nos ayuda hacer las correcciones en cuanto a la determinación de la compresión uniaxial (UCS) de la roca mapea en cada celda.

Materiales

- Martillo de geólogo
- Bolsas de muestreo
- Etiquetas
- Plumones
- Pinturas
- Libreta de notas, formatos de mapeos
- Lápiz
- Bolsas
- Tablero

Equipos

- Equipo de carga puntual, Matest A125
- Escalímetro digital

Consideraciones para realizar en muestreo de campo

- Cada muestra que se tome en campo debe cumplir con algunas especificaciones tales como; no tener ningún tipo de alteraciones y discontinuidades, fracturas naturales o provocadas.
- Tener tamaño mediano con medidas promedio de 15 * 10 *2.5 centímetros.

- Colocar cada lote de muestra colocándolas en un determinado orden para luego ser ensayadas.
- Trabajar cada muestra dándole una forma de un paralelepípedo.
- De cada celda se deben tomar 8 a 12 muestras por celda mapeada, esto por cambio de características de las rocas, cambio de litología.
- El total de muestras que se tomaron de 312 muestras en toda la campaña de mapeo y de muestreo.

3.6.3 Ensayo Carga Puntual (PLT)

El ensayo de PLT (Piont load test), es el complemento de mapeo para la determinación de la resistencia a la Compresión Uniaxial “UCS”, Este se utiliza para la determinar la Resistencia a la Compresión uniaxial de los fragmentos irregulares de roca o testigos, a partir del índice de carga puntual I_s , una vez obtenido el ensayo. *Ver Anexos.*

Resultados de Ensayos PLT

Procedimiento

El ensayo de Carga Puntual trata de romper un bloque de forma irregular, entre dos puntas cónicas metálicas accionado por una prensa metálica portátil. A partir de esta rotura se obtiene I_s , la cual calculándose en formatos preparados de Excel el cálculo de la Resistencia a Compresión Uniaxial del material ensayado.

- Determinar la naturaleza litológica y estructural de la muestra.



Figura 25. Muestras colocadas en orden, marcadas con el número de celda, sector, tipo de roca y orden numérico

- Medir las dimensiones que deben de ser aproximadas.
- Colocar la muestra en medio de las placas

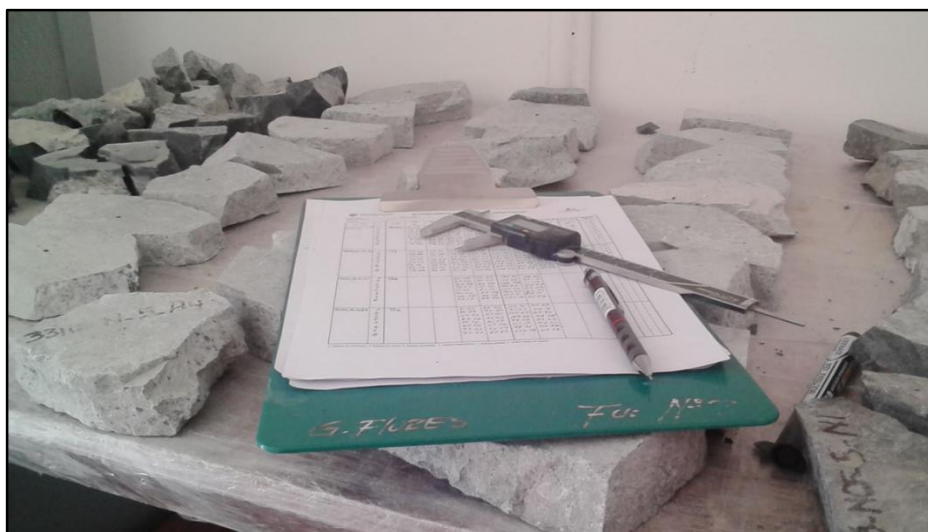


Figura 26. Medir las muestras para anotar sus dimensiones reales antes del ensayo.

- Colocar y ajustar la muestra entre las dos puntas cónicas, se debe ajustar el quipo antes de cada ensayo.

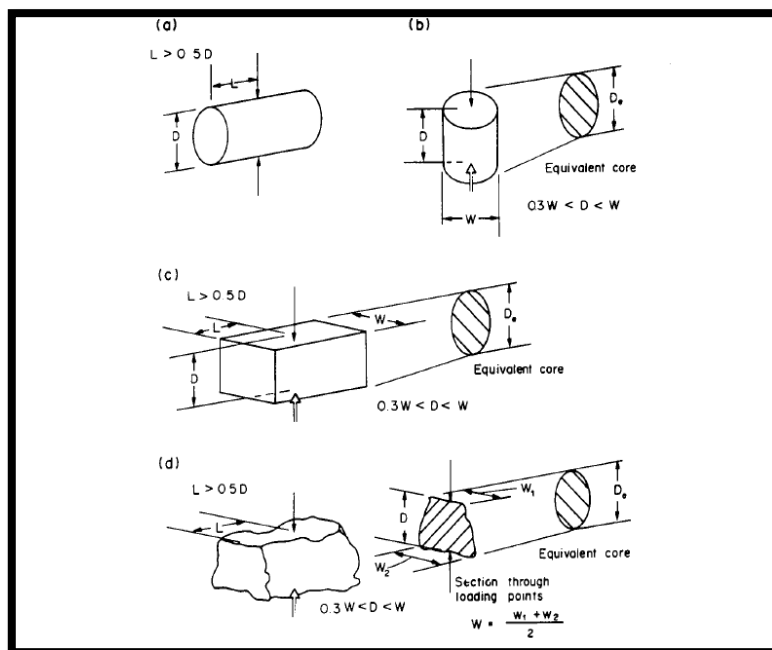


Figura 27. Tipos básicos de pruebas de carga puntual, diametral (a), axial (b), bloque prismático (c) o ensayo de forma irregular (d).



. Figura 28. Ensayo de muestra para la determinación de Resistencia a la Compresión PLT

La muestra deberá ser nuevamente medida de la muestra (dimensiones), anotar los datos del equipo, anotar tipo de fractura por la que se produjo la ruptura.



. *Figura 29. Medida de las muestras luego del ensayo.*

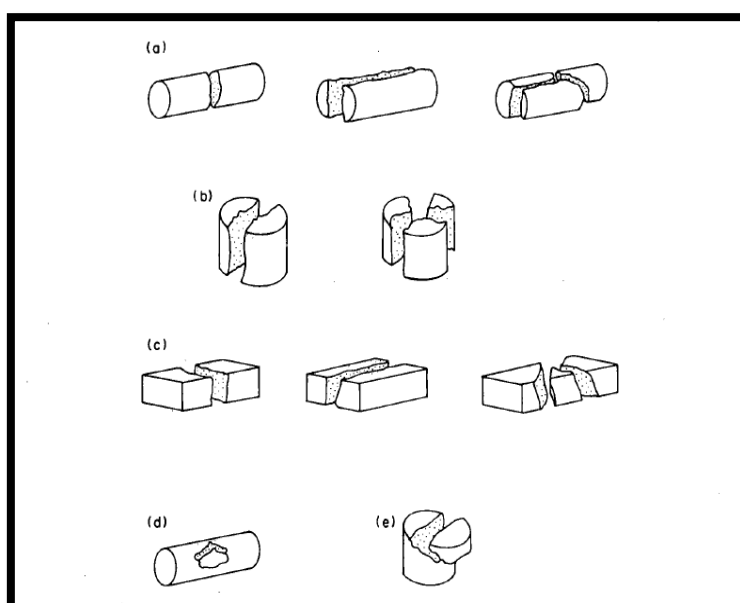


Figura 30. Modos típicos de falla para determinar ensayos validos e inválidos (a) ensayos diametral valido, (b) ensayo axial valido, (c) ensayo bloque prismático valido, (d) ensayo de testigo invalido, (e) ensayo axial invalido.

Todos los datos obtenidos aquí deberán ser pasados a una base de datos para determinación de la Resistencia a la Compresión, para hacer la corrección de los datos obtenidos en campo. Y la determinación del Índice I_s , permite hacer evaluaciones con las muestras tomadas en campo y se consideraron para el resultado en la tabla 28.

Tabla 26. Cantidad de muestras tomadas y muestras válidas para ensayar.

	Perfil Geofísico	# Muestras extraídas del talud	# Muestras consideradas resultado PLT
1	1D	8	7
2	1E	10	7
3	1F	8	5
4	1G	10	7
5	2A	4	4
6	2B	9	7
7	2C	8	8
8	2D	4	4
9	2E	4	4
10	3A	12	8
11	3B	8	6
12	3C	4	4
13	3D	6	4
14	4A	8	6
15	4B	0	0
16	5A	11	8
17	5B	8	6
18	5C	8	5
19	6A	4	4
20	6B	12	8
21	7A	8	5
22	7B	10	6
23	7C	0	0
24	7F	8	8
25	9A	8	6
26	9C	8	3
27	11A	8	5
28	11B	8	5
29	11C	4	4
30	11D	4	4
31	11E	4	4
32	11F	10	7
33	12A	8	6
34	12B	4	4
35	12C	4	4
36	12D	8	6
37	12E	6	6
38	14A	11	8
39	14B	8	5
40	18A-24B	4	4
41	20A-20B	10	7
42	21A	8	5
43	21C	5	2
44	24C-24A	10	8
	TOTAL	312	234

3.7 Prospección Geofísica

El estudio geofísico es realizado por una Consultora encargada, donde se realizaron 47 perfiles geofísicos, cada uno con 120 metros de longitud, usando el método de la refracción sísmica con Tomografía Iónica de trayectorias de onda. Comprende los resultados de las mediciones e interpretaciones de Refracción Sísmica efectuada a lo largo de 5640 metros en el tajo de la mina Toquepala.

El método de Refracción sísmica permite determinar la secuencia vertical de variaciones en impedancia acústica de una columna litológica afectada por ondas originadas en un punto de impacto.

Las condiciones elásticas de los materiales del subsuelo están definidas por el grado de cohesión de las partículas y por la densidad; las velocidades de ondas están, por tanto, en relación directa con la compacidad y con el peso, por lo que se deduce que los sedimentos no consolidados y livianos son más lentos que las rocas duras y densas.

El levantamiento topografía de las líneas de refracción sísmica fue realizado por consultoras encargadas, para determinar la posición exacta de las estaciones donde se instaló los puntos de los geófonos y puntos de tiro de los perfiles de refracción sísmica. Además, proveyó el apoyo a la Consultora encargada en el tendido de las líneas geofísicas e instalación de geófonos.

El levantamiento se realizó en el sistema de coordenadas locales, a lo largo de 47 perfiles, cada línea con una longitud de 120 metros y estacado cada 5 metros.

3.7.1 Trabajo de Campo

El procedimiento consistió en identificar las llegadas de onda (en sismogramas) a cada uno de los geófonos o detectores colocados a distancias conocidas del punto de impacto. La operación de campo sísmica permite llegar a los cálculos de profundidad bajo cada geófono, con lo que la resolución horizontal viene a ser, por lo tanto, de 5 a 20 metros, distancias usuales para estudios geotécnicos.

Los procedimientos modernos de cálculo de refracción permiten construir secciones bidimensionales en las que interceptan las estructuras, no solamente con los planos de contacto sino también con cambios litológicos gradacionales.

Al principio de los trabajos antes mencionados. Se designó nombres a cada uno de los 47 perfiles geofísicos distribuidos en gran parte del tajo Toquepala (códigos iniciales),

conforme se realizaban los trabajos, los códigos de algunos perfiles tuvieron cambios involuntarios. En las tablas 27 y 28 se muestran los códigos de los perfiles geofísicos utilizados y los códigos finales considerados por el Mapeo Geotécnico - Estructural.

Tabla 27. Códigos Asignados a los perfiles Geofísicos, desde la línea geofísica del 1 a 25

	Código Inicial	Código asignado	Código asignado	Código Final
1	1D	1D	1D	1D
2	1E	1B	1E ^(*)	1E
3	1F	1F	1F	1F
4	1G	1G	1G	1G
5	2A	2A	2A	2A
6	2B	2B	2B	2B
7	2C	2C	2C	2C
8	2D	2D	2D	2D
9	2E	2E	2E	2E
10	3A	3A	3A	3A
11	3B	3B	3B	3B
12	3C	3C	3C	3C
13	3D	3D	3D	3D
14	4A	4A	4A	4A
15	4B	4B	4B	4B
16	5A	5A	5A	5A
17	5B	5B	5B	5B
18	5C	5C	5C	5C
19	6A	6A	6A	6A
20	6B	6B	6B	6B
21	7A	7A	7A	7A
22	7B	7B	7B	7B
23	7C	7C	7C	7C

Tabla 28. Códigos Asignados a los perfiles Geofísicos, desde la línea geofísica del 26 a 47.

	Código Inicial	Código asignado	Código asignado	Código Final
24	7F	7F	7F	7F
25	9A	9A	9A	9A
26	9C	9C	9C	9C
27	11A	11A	11A	11A
28	11B	11B	11D	11B
29	11C	11C	11C	11C
30	11D	11B	11B	11D
31	11E	11E	11E	11E
32	11F	11F	11F	11F
33	12A	12A	12A	12A
34	12B	12B	12B	12B
35	12C	12C	12C	12C
36	12D	12D	12D	12D
37	12E	12E	12E	12E
38	14A	14A	14A	14A
39	14B	14B	14B	14B
40	18A	18A	18A	18A
41	20A	20A	20A	20A
42	20B	20B	20B	20B
43	21A	21A	21A	21A
44	21C	21C	21C	21C
45	24A	24A	24A	24A
46	24B	24B	24B	24B
47	24C	24C	24C	24C

3.8 Ubicación

El asentamiento minero de Toquepala se encuentra en el sur del Perú en la Región de Tacna, Provincia de Jorge Basadre Grohmann en el distrito de Ilabaya. Se encuentra entre los 2770 y 3595 msnm de altitud, está situada en una zona montañosa y semidesértica con un clima húmedo en meses de diciembre a marzo y frío a seco en mayo a setiembre. La topografía es variada y accidentada con elevaciones que alcanzan los 5500 msnm y quebradas profundas.

Toquepala es un yacimiento de tipo pórfido de cobre y molibdeno diseminado, donde la mineralización subordinada en una chimenea de brecha y a un intrusivo de dacita ambos genéticamente relacionados a la actividad intrusiva hidrotermal calco-alcalina datada a fines del Cretáceo superior-Terciario inferior.

Tabla 29. Coordenadas UTM y Geográficas

Coordenadas Geográficas	
17° 13' Latitud sur	
70° 36' Longitud Oeste	

Coordenadas UTM WGS 84	
Zona	19 S
Este	326 600
Norte	8 092 500

Fuente: Geotecnia Mina Toquepala.



Figura 31. campamento minero de Toquepala.

3.9 Acceso

Los accesos al campamento minero de Toquepala se hace por vía terrestre por la panamericana, hasta llegar a Camiara punto en el que se toma una vía directa para Toquepala y vía férrea que es propia de la empresa minera de SPPC, donde se trasladan de Cuajone, Toquepala e Ilo.

Tabla 30. Vías de accesos

Tramo		Tiempo	Carretera	Tipo de Vía
Arequipa	Camiara	5 horas	Panamericana Sur	Asfaltado
Tacna	Camiara	1 y 30 minutos	Panamericana Sur	Asfaltado
Cuajone	Toquepala	30 minutos	Panamericana Interna	Trocha carrozable

3.10 Clima

Toquepala está situada geográficamente en una zona montañosa y semi desértica, por lo que la variación de temperaturas durante los meses de mayo y setiembre baja de forma considerablemente hasta llega a 4° y 10.3°, se tiene precipitaciones durante los meses de diciembre y marzo un promedio anual de 53mm, las que pueden variar por tormentas anómalas durante el año.

La mayor parte del año el clima es semi templado en área de campamento, en tanto en la parte baja donde se encuentra Quebrada Honda, el clima es bastante seco durante la mayor parte del día.

La vegetación de Toquepala es restringida debido al clima, la mayoría de sus plantas son gramíneas, arbustos medios y leñosos, cactáceas en varias formas, la mayor parte flora se ve en las quebradas en los tiempos de verano invierno

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis e Interpretación de Prospección Geotécnica

4.1.1 Interpretación Geotécnica

La interpretación geotécnica se basa en la caracterización geológica, clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989) representativa de las observaciones de campo y determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca en función del ensayo d carga puntual.

4.1.2 Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)

Aplicado a las celdas de mapeo – estructural, para cada uno de los perfiles geofísicos. Los resultados de la clasificación de la calidad del macizo rocoso RMR 89, en la tabla para cada perfil geofísico, adicionalmente se ha añadido el valor de GSI, siempre y cuando el valor del RMR 89, sea mayor a 25 (Ver en las Tablas 31 y 32).

$$\text{GSI} = \text{RMR } 89 - 5$$

Tabla 31. Cuadro Resumen Determinación de la calidad del Macizo Rocoso - RMR Bieniawski, 1989 & GSI. Información de la línea geofísica (1D a 9C).

Perfil Geofísico	Tipo Roca	RMR Bieniawski(89)		GSI
		Valor	Calidad Macizo Rocoso	
1D	Agl-Volc	45	REGULAR	40
1E	Tr	49	REGULAR	44
1F	Aa	47	REGULAR	42
1G	Aa	56	REGULAR	51
2A	Agl-Volc	59	REGULAR	54
2B	Aa	49	REGULAR	44
2C	Agl-Volc	56	REGULAR	51
2D	Aa	57	REGULAR	52
2E	Aa	53	REGULAR	48
3A	Tr	51	REGULAR	46
3B	Aa	47	REGULAR	42
3C	Tr	51	REGULAR	46
3D	Ta	65	BUENO	60
4A	Ta	67	BUENO	62
5A	Tq	58	REGULAR	53
5B	Tq	60	REGULAR	55
5C	Td	57	REGULAR	52
6A	Td	64	BUENO	59
6B	Td	57	REGULAR	52
7A	Qq	59	REGULAR	54
7B	Qq	57	REGULAR	52
7F	Qq	53	REGULAR	48
9A	Da/Ta/Lp	55	REGULAR	50
9C	Da	64	BUENO	59

Tabla 32. Cuadro Resumen Determinación de la calidad del Macizo Rocoso - RMR Bieniawski, 1989 & GSI. Información de la línea geofísica (11A a 24C).

Perfil Geofísico	Tipo Roca	RMR Bieniawski(89)		GSI
		Valor	Calidad Macizo Rocoso	
11A	Di	61	BUENO	56
11B	Qq	67	BUENO	62
11C	Di-Prop	57	REGULAR	52
11D	Di-Prop	60	REGULAR	55
11E	Di-Prop	66	BUENO	61
11F	Di	57	REGULAR	52
12A	Di-Qs	52	REGULAR	47
12B	Di-Qs	53	REGULAR	48
12C	Di-Qs	59	REGULAR	54
12D	Di-Qs	52	REGULAR	47
12E	Di-Qs	54	REGULAR	49
14A	Qq	56	REGULAR	51
14B	Qq	53	REGULAR	48
18A-24B	Dp-G/A	64	BUENO	59
20A	Di-G/A	62	BUENO	57
20B	Di-G/A	63	BUENO	58
21A	Bx-G/A	70	BUENO	65
21C	Bx-Qs	39	MALO	34
24A-24C	Dp-G/A	64	BUENO	59
7C*	Qq	-	-	-
4B*	Tr	-	-	-

*Valores obtenidos en los mapeos geomecánicos.

La calidad del macizo rocoso generalmente regular, en menor proporción Bueno y solo una línea que es Malo.

4.1.3 Determinación de la Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca

Intacta

La resistencia a la compresión uniaxial – UCS, se puede determinar en forma indirecta mediante el ensayo de carga puntual – PLT. En la siguiente tabla 28 se muestra de forma resumida los resultados de la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Resistencia a la tracción (Hoek and Brown y Boch and Franklin) de todas las celdas de Mapeo Geotécnico – Estructural y estadística, obtenidos por medio del ensayo de Carga Puntual (PLT); parámetros de resistencia de roca intacta para cada perfil geofísico. Los resultados del ensayo de Carga Puntual (PLT) para cada uno de los perfiles geofísicos estudiados, con mayor detalle se muestran. Las fórmulas Utilizadas para el cálculo de los siguientes parámetros en la tabla 33 y 34

$$I_{S(s)} = \left(\frac{p}{D_e^2} \right) * 1000$$

$$I_{S(50)} = F * I_{S_s}$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45}$$

$$UCS(1) = [14 + (0.175 * D_e)] * [I_{S(50)}] \quad \text{Hoek y Brown (1980)}$$

$$UCS(2) = 24 * I_{S(50)} \quad \text{Boch y Franklin (1972)}$$

Tabla 33. Parámetros de Resistencia de Roca Intacta. Desde el perfil (1D a 7F).

Perfiles Geofísicos	Tipo Roca	$I_{S(50)}$		UCS ⁽¹⁾ (MPa)		UCS ⁽²⁾ (MPa)		σ_t (MPa)	
		Promedio	Desv.Stand.	Promedio	Desv.Stand.	Promedio	Desv.Stand.	Promedio	Desv.Stand.
1D	Agl-Volc	4.90	1.34	129.64	27.02	117.59	32.21	6.12	1.68
1E	Tr	7.34	1.28	198.35	28.79	176.06	30.71	9.17	1.60
1F	Aa	5.94	1.39	152.15	27.44	142.59	33.36	7.43	1.74
1G	Aa	6.23	1.18	161.44	23.40	149.46	28.27	7.78	1.47
2A	Agl-Volc	9.85	1.47	248.31	34.71	236.51	35.35	12.32	1.84
2B	Aa	6.74	1.81	177.71	41.67	161.86	43.48	8.43	2.26
2C	Agl-Volc	9.81	2.38	262.93	59.49	235.54	57.20	12.27	2.98
2D	Aa	7.87	0.84	213.49	13.93	188.87	20.22	9.84	1.05
2E	Aa	4.59	0.29	129.27	12.44	110.21	6.86	5.74	0.36
3A	Tr	7.10	2.31	200.17	62.52	170.49	55.39	8.88	2.88
3B	Aa	6.57	1.41	180.67	40.30	157.59	33.75	8.21	1.76
3C	Tr	9.15	1.62	242.74	32.75	219.61	38.92	11.44	2.03
3D	Ta	8.88	0.98	225.89	17.32	213.08	23.44	11.10	1.22
4A	Ta	8.64	2.71	223.04	60.64	207.45	64.93	10.80	3.38
5A	Tq	8.54	2.17	227.24	48.10	204.84	52.15	10.67	2.72
5B	Tq	4.09	1.67	110.90	47.29	98.24	40.07	5.12	2.09
5C	Td	5.01	0.74	136.54	19.59	120.17	17.66	6.26	0.92
6A	Td	7.38	0.51	194.82	7.47	177.13	12.21	9.23	0.64
6B	Td	6.99	0.94	184.04	21.14	167.82	22.61	8.74	1.18
7A	Qq	7.20	1.18	192.88	21.55	172.78	28.40	9.00	1.48
7B	Qq	7.69	2.19	208.92	63.27	184.48	52.59	9.61	2.74
7F	Qq	9.33	1.85	249.76	43.04	223.85	44.30	11.66	2.31

Tabla 34. Parámetros de Resistencia de Roca Intacta. Desde el perfil (9A a 24C).

Perfiles Geofísicos	Tipo Roca	I _{S(50)}		UCS ⁽¹⁾ (MPa)		UCS ⁽²⁾ (MPa)		σ _t (MPa)	
		Promedio	Desv. Standard.	Promedio	Desv. Standard.	Promedio	Desv. Standard.	Promedio	Desv. Standard.
9A	Da/Ta/Lp	5.85	1.37	159.55	29.26	140.45	32.86	7.32	1.71
9C	Da	4.23	0.54	118.86	7.75	101.56	12.89	5.29	0.67
11A	Di	5.87	2.29	155.37	54.08	140.92	54.87	7.34	2.86
11B	Qq	11.16	1.31	289.59	31.84	267.95	31.42	13.96	1.64
11C	Di-Prop	5.71	1.06	155.20	23.11	137.01	25.45	7.14	1.33
11D	Di-Prop	5.37	0.84	138.26	16.65	128.84	20.23	6.71	1.05
11E	Di-Prop	6.54	0.70	180.20	19.02	156.95	16.82	8.17	0.88
11F	Di	11.96	2.54	301.85	55.19	287.11	60.88	14.95	3.17
12A	Di-Qs	6.06	1.15	158.43	28.19	145.51	27.49	7.58	1.43
12B	Di-Qs	2.17	0.29	58.35	12.01	52.03	7.05	2.71	0.37
12C	Di-Qs	4.80	1.24	133.87	29.60	115.11	29.87	6.00	1.56
12D	Di-Qs	6.23	1.79	160.19	45.03	149.59	42.87	7.79	2.23
12E	Di-Qs	8.76	2.75	223.06	58.33	210.17	65.95	10.95	3.43
14A	Qq	6.02	0.95	157.69	23.70	144.37	22.81	7.52	1.19
14B	Qq	4.20	1.63	112.90	39.86	100.81	39.04	5.25	2.03
18A-24B	Dp-G/A	6.48	1.77	169.34	55.62	155.63	42.57	8.11	2.22
20A	Di-G/A	8.41	0.98	227.17	29.36	201.75	23.48	10.51	1.22
20B	Di-G/A	8.41	0.98	227.17	29.36	201.75	23.48	10.51	1.22
21A	Bx-G/A	4.20	1.00	110.03	25.26	100.81	24.02	5.25	1.25
21C	Bx-Qs	0.40	0.27	10.07	6.30	9.51	6.53	0.50	0.34
24A-24C	Dp-G/A	4.87	1.47	125.67	30.66	117.00	35.27	6.09	1.84
7C*	Qq	-	-	-	-	-	-	-	-
4B*	Tr	-	-	-	-	-	-	-	-

**Perfiles Geofísicos no analizados, litologías asumidas del Plano Geológico de la mina Toquepala.*

Nota:

Is (50) : Índice de Carga Puntual corregido

UCS (1) : Resistencia a la Compresión Uniaxial (Hoek and Brown, 1980)

UCS (2) : Resistencia a la Compresión Uniaxial (Boch and Franklin, 1972)

σ_t : Resistencia a la Tracción de Roca Intacta.

Los valores de Resistencia a la Compresión Uniaxial según Hoek y Brown, 1980 son los que van hacer utilizados para los cálculos que se requieran realizar.

4.1.4 Análisis e Interpretación de Prospección Geofísica

Para proceder a interpretar los perfiles geofísicos debemos tener en cuenta que las secciones están representadas de forma geofísica, como reconstrucción de Tomografía Iónica de Trayectorias de Onda. Las secciones sísmicas no son necesariamente secciones litológicas, sino más bien representaciones en tablas de variaciones elásticas.

Los modelos elásticos son resultantes de la interpretación de los levantamientos de Refracción Sísmica. Las velocidades se dan en metro por segundo. Las escalas son de 1:1000, horizontales y verticales. La sección esta presentada de manera geofísica estrictica, como la reconstrucción de Tomografía Iónica de Trayectoria de Onda con utilización de Volúmenes Fresnel (Haz de Rayos Fresnel). El procedimiento tomográfico automáticamente ha delimitado la profundidad de interpretación una vez que se alcanzó la velocidad alta, porque no es posible refracción debajo de tal horizonte. Los cambios rápidos de color significan cambios radicales de la litología, mientras que los cambios graduales representan variaciones progresivas. Las secciones sísmicas no son propiamente secciones litológicas. Por la necesidad de que los horizontes elásticos sean siempre más veloces (compactos) a profundidad, condición indispensable para que ocurra la refracción de las ondas, toda "capa" de baja velocidad que pudiera existir bajo una alta velocidad impedirá la refracción a superficie e introducirá un error de interpretación insalvable en operaciones primarias como la de este estudio. Sin embargo, la tomografía iónica de trayectorias permite "manejar" ciertas inversiones de velocidad cuando se trata de volúmenes discretos incluidos en las secciones, como puede ocurrir en caso de bloque dentro de aluviones o de cavernas y fracturas dentro del basamento.

Han sido diferenciados los siguientes tipos elásticos:

- **Sobrecarga:** La cubierta exterior, constituida por roca muy fracturada con velocidades de 500 a 1200 m/s. De color azul/celeste.
- **Horizonte:** Intermedio: Bajo la sobrecarga han sido encontrados n materiales con velocidades entre 1200 a 1600 m/s. Se trata de roca muy fracturada. Coloreado de verde
- **Basamento:** En las secciones topográfico aparece un horizonte elástico d alta velocidad relativa con 1600 m/s a 2200 m/s (color amarillo) que puede ser considerado como roca fracturada, roca algo fracturada con 2200 m/s a 2600 m/s (rojo) hasta roca poco fracturada con más de 2600 m/s (rosado). Existe basamento con más de 2600 m/s y hasta 5000 m/s, revelando roca cada vez más compacta. Ver figura 36 y 37.

La máxima penetración alcanzada fue de unos 70 metros en los sectores donde hay buen acoplamiento elástico se pudo alcanzar unos 20 metros, como mínimo.

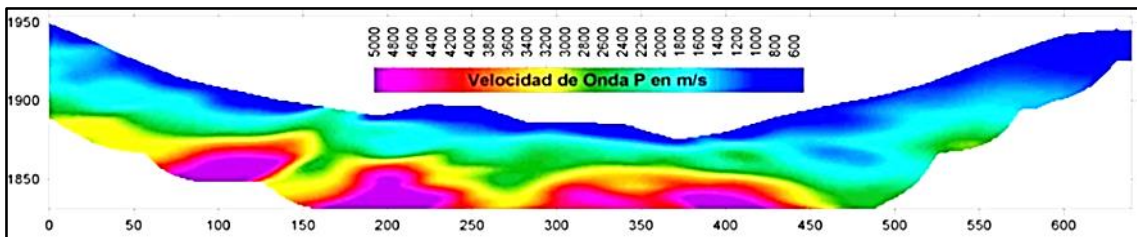


Figura 32. Perfil de Velocidad de Onda
Fuente: Imagen referencial

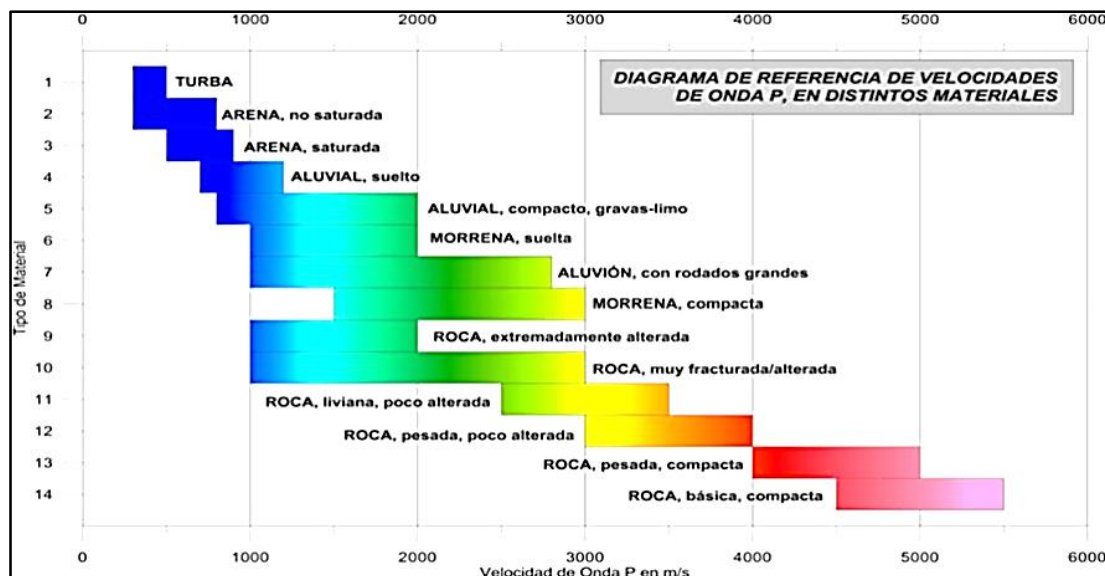


Figura 33. Diagrama de referencia de Velocidades de onda P. Para distintos materiales.
Fuente: Imagen referencial

Tabla 35. Valores establecidos de Velocidad Sísmica de las Rocas

Velocidades de Ondas P en diferentes materiales		
Material	Vp (m/s)	
Arena	Mínimo	Máximo
Arena (seca)	200	1500
Arena (Saturada de agua)	1500	2000
Arcilla	1000	2500
Tillita Glacial (saturada de agua)	1500	2500
Permafrosts	3500	4000
Capa Meteorizadas	300	900
Aluviones Modernos	350	1500
Rocas Sedimentarias		
Areniscas	2000	6000
Areniscas Terciarias	2000	2500
Areniscas Pennant (Carbonifero)	4000	4500
Cuarcita Cambrica	5500	6000
Arcillas	1000	2000
Margas	1800	3200
Conglomerados	2500	5000
Calizas		
Pedernal Cretacico	2000	2500
Calizas bioclasicas y oolíticas jurasicas	3000	4000
Caliza Carbonifera	5000	5500
Dolomitas		
Sal	4500	5000
Anhidrita	4500	6500
Yeso	2000	3500
Rocas Igneas y Metamorficas		
Granito	5500	6000
Diabasas	5800	7100
Gneis	3100	5400
Gabro	6500	7000
Rocas Ultramaficas	7500	8500
Serpentinita	5500	6500

Fuente: (Udias, 1999)

Los registros sísmicos fueron analizados para fijar las primeras llegadas de onda P, en milisegundos, a cada uno de los geófonos. El proceso fue relativamente sencillo para las distancias cortas a partir de los puntos de impacto. El proceso fue relativamente sencillo para las distancias cortas a partir de los puntos de impacto pero se hizo progresivamente más difícil en los tramos alejados, debido a la atenuación de altas frecuencias y a la ocurrencia predominante de largas longitudes de ondas. Este problema es normal y ocurre siempre, salvo los casos especiales de buena transmisión de frecuencias altas, sobre todo relacionada con terrenos húmedos. La refracción sísmica tiene como condición, *sine qua nom*, que las velocidades de onda sean siempre mayores a la profundidad. Esto ocurre en la mayor parte de los estudios geotécnicos, cuando la columna litológica consiste en una sobrecarga de baja velocidad, arriba y materiales gradualmente más compactos hacia abajo, usualmente alcanzando roca de alta velocidad. Las zonas fracturadas o falladas, que ocurren como sectores de velocidad baja en el basamento sin mostrar potencia suficiente de relleno, son señaladas como zonas de debilidad o, simplemente, como de baja velocidad. Es materia de la interpretación del geólogo en relacionar tales estructuras, con la geología regional y local para decidir cuándo se trata de fallas, cuando de zonas de cizallamiento, cuando de alteración hidrotermal o cuando de variación litológica singenética. Un perfil sísmico permite disponer del primer cuadro del subsuelo obtenido con mediciones indirectas mediante la acción de un campo de energía de intensidad y ubicación controladas. La energía de un impacto en la superficie del terreno se desplaza en todas las direcciones, lateral y verticalmente. Como consecuencia de ello, las interpretaciones sísmicas tienen carácter definitivamente volumétrico (o sea, en tres dimensiones), a diferencia de la información de los medios geognósticos (taladros o túneles) que es esencialmente lineal. Por lo tanto, se debe tener cuidado al comparar geofísica con los taladros, a menos que haya varias perforaciones correlacionales y que se acepte el efecto de “*suavización*” de los planos de contacto elástico construido por la interpretación sísmica. En la interpretación tomografía iónica de Trayectoria se utiliza el concepto de “*Haz de Rayos Fresnel*” (Fresnel volúmenes), en lugar en los tradicionales “rayos lineares”, permitiendo, así como corregir las deformaciones topográficas y la definición de las propiedades elásticas que varían progresivamente (contactos gradacionales) en lugar de los planos teóricos convencionales. Por otra parte, el procedimiento de la tomografía iónica considera ciertas condiciones de inversión de velocidades que eran inaceptables en las técnicas de rayos individuales. Ver figura 34

Las aspas rojas marcan las primeras llegadas seleccionadas, mientras que las azules son los resultados del modelo.

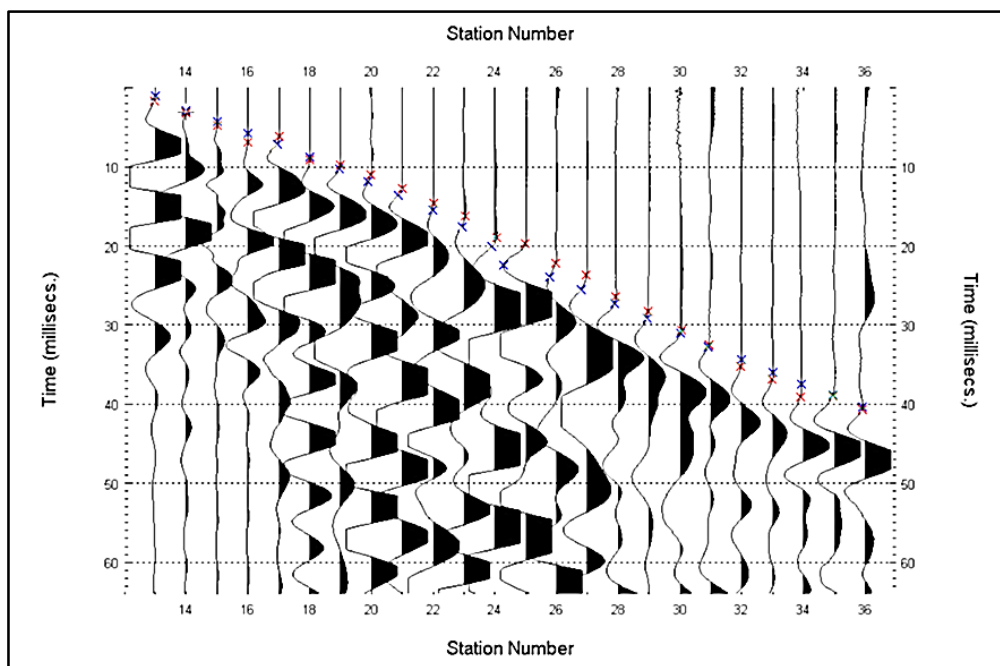


Figura 34. Ejemplo de sismograma de Refracción Sísmica
Fuente: Imagen Referencial

La interpretación sísmica de este estudio ha sido realizada con un programa iterativo de inversiones. El primer paso fue el de la selección de llegadas de onda P en los sismogramas de campo. Con tales tiempos de llegada se estimaron las velocidades iniciales de material de sobrecarga con el método de “*frente de ondas*” para luego calcular modelos completos de velocidad con el método de Delta t-v, y con la definición el tamaño apropiado de celdas que serían luego utilizadas para la tomografía iónica. Se consiguió así la “imagen” del subsuelo representada por los cambios elásticos radicales y gradacionales corregidos para la deformación topográfica.

Del análisis e interpretación de las Secciones de Modelos de onda P, presentadas por las consultoras, se ha obtenido valores mínimos y máximos de la velocidad de propagación de la Onda P (V_p), ver tabla 36 y 37, para una profundidad promedio de 15 metros para caracterizar a un banco, con respecto a la cota de cada uno de los perfiles geofísico.

Tabla 36. Se muestran los valores obtenidos de la interpretación de las Secciones de Modelos de onda P, como se detallan a continuación. Del perfil 1D al 9C.

Valores de la Velocidad de Propagación de la Onda P (Vp)

	Perfil Geofísico	Tipo Roca	Vp (m/s) Mínimo	Vp (m/s) Máximo
1	1D	Agl-Volc	2000	2400
2	1E	Tr	2000	2400
3	1F	Aa	1400	1900
4	1G	Aa	1400	2400
5	2A	Agl-Volc	2000	4000
6	2B	Aa	1600	2200
7	2C	Agl-Volc	2000	4200
8	2D	Aa	1200	1400
9	2E	Aa	1500	1900
10	3A	Tr	1400	2200
11	3B	Aa	1500	1800
12	3C	Tr	1400	1900
13	3D	Ta	1400	2200
14	4A	Ta	1600	2400
15	5A	Tq	1800	2600
16	5B	Tq	1600	3000
17	5C	Td	2600	3600
18	6A	Td	2000	3000
19	6B	Td	2000	2800
20	7A	Qq	1400	1800
21	7B	Qq	1400	1800
22	7F	Qq	1500	1700
23	9A	Da,Ta,Lp	2000	3000
24	9C	Da	1800	4400

Tabla 37. Se muestran los valores obtenidos de la interpretación de las Secciones de Modelos de onda P, como se detallan a continuación. Del perfil 11A al 24C

	Perfil Geofísico	Tipo Roca	Vp (m/s)	Vp (m/s)
			Mínimo	Máximo
25	11A	Di	2000	3400
26	11B	Qq	1200	1600
27	11C	Di-Prop	1400	1800
28	11D	Di-Prop	1400	1800
29	11E	Di-Prop	1800	2400
30	11F	Di	2000	2400
31	12A	Di-Qs	1400	2000
32	12B	Di-Qs	1600	2000
33	12C	Di-Qs	1800	2000
34	12D	Di-Qs	1200	1800
35	12E	Di-Qs	1200	1800
36	14A	Qq	1500	1900
37	14B	Qq	1300	2000
38	18A	Dp-G/A	2200	4200
39	20A	Di-G/A	3600	5200
40	20B	Di-G/A	3200	4600
41	21A	Bx-G/A	3600	5200
42	21C	Bx-Qs	1200	2200
43	24A	Dp-G/A	2800	5000
44	24B	Dp-G/A	3000	4200
45	24C	Dp-G/A	3800	5000
46	4B*	Tr	1800	2600
47	7C*	Qq	1600	2400

Los valores más altos de Vp, se presentan en las rocas con yeso, mientras que los valores más bajos se encuentran principalmente en el Pórfido Cuarzífero Quellaveco (Qq) se ubica en el sector Sureste – Este de la mina.

En la figura 35, se muestra los índices de velocidad registrados en el tajo, algunas de las rocas analizadas poseen una velocidad menor a los al estándar, debido a las condiciones estructurales al momento del ensayo.

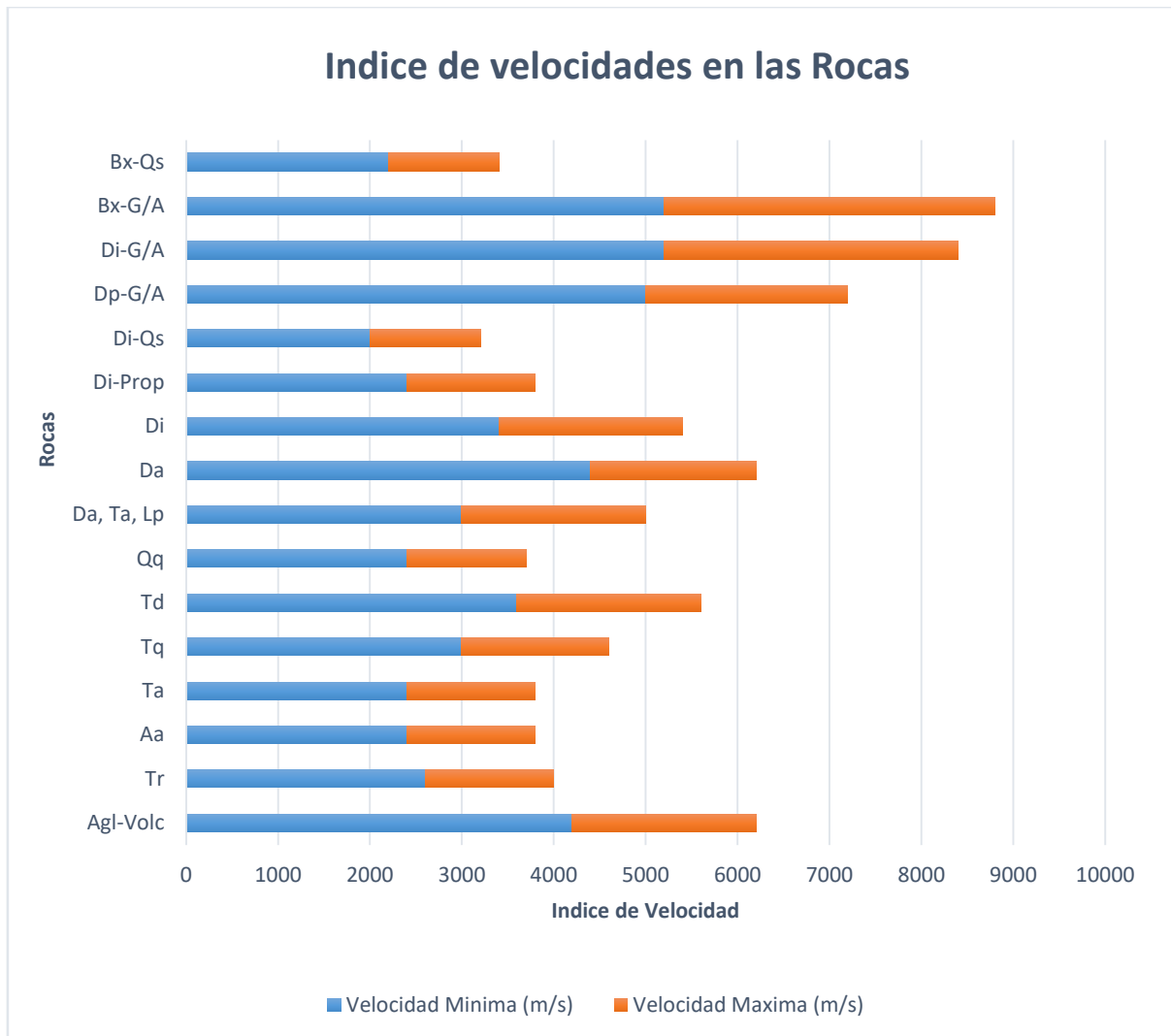


Figura 35. Registro de Velocidades minima y maxima detectadas en los ensayos de Refraccion Sismica.

4.1.5 Caracterización Geotécnica de los Materiales.

De la interpretación geotécnica, se concluye que existen una variedad litológica determinada dentro del área donde se llevaron a cabo los perfiles geofísicos comprendido en el tajo Mina Toquepala, ver tabla 38, a partir de la reconocida en el Mapeo Geotécnico – Estructural, se obtendrá los parámetros de roca intacta posteriormente los parámetros del macizo rocoso. Datos necesarios para el cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc), junto con la información restante de la interpretación geofísica.

Tabla 38. Materiales determinados mediante el Mapeo Geotécnico - Estructural

Material	Simbología	Perfiles Geofísicos
Alta Andesita	Aa	1F, 1G, 2B, 2D, 2E, 3B
Riolita Toquepala	Tr	1E, 3A, 3C, 4B*
Andesita Toquepala	Ta	3D, 4A, 9A
Pórfido Cuarzífero Toquepala	Tq	5A, 5B
Dolerita Toquepala	Td	5C, 6A, 6B
Pórfido Cuarzífero Quellaveco	Qq	7A, 7B, 7C*, 7F, 11B, 14A, 14B
Latita Porfírica	Lp	9A
Aglomerado de Dacita	Da	9A, 9C
Dacita Porfírica con yeso	Dp-G/A	18A, 24A, 24B, 24C
Diorita	Di	11A, 11F
Diorita con yeso	Di-G/A	20A, 20B
Diorita Cuarzo Sericita	Di-Qs	12A, 12B, 12C, 12D, 12E
Diorita Propílica	Di-Prop	11C, 11D, 11E
Brecha Angular Cuarzo Sericita.	Bx-Qs	21C
Brecha angular con yeso	Bx-G/A	21A
<i>Aglomerado Volcánico</i>	<i>Agl-Volc</i>	<i>1D, 2A, 2C</i>

*Litologías asumidas del Plano geológico de Geología Mina Toquepala. Ver anexo Geología Mina Toquepala.

4.1.6 Parámetros de Resistencia de Roca Intacta

Los parámetros de resistencia tienen que representar adecuadamente a los materiales encontrados en la interpretación de la prospección geotécnica. Los parámetros de resistencia, tienen que caracterizar a la roca intacta, muestras *in-situ* obtenidas analizadas en la campaña de muestreo, después de realizado el Mapeo Geotécnico – Estructural, por lo cual los parámetros mostrados a continuación se presentan considerando el criterio generalizado de Hoek and Brown (2002).

Para proceder con este punto se utilizara los valores obtenidos en las tablas 33 y 34 (Resistencia a la Compresión Uniaxial – UCS, mediante ensayo PLT. Por otro lado se ha asumido los valores de **mi**, D considerando un macizo no disturbado (0), Modulo de Deformación (Ei) de Roca Intacta en función de MR, según los valores predeterminados

por el Software RocData 4.0, teniendo en cuenta la litología identificada en campo se le asigna valores por defecto, también se ha considerado valores determinados en los estudios realizados por las consultoras Golder Associates, Itasca y Piteau. Se ha calculado para cada perfil geofísico, en la tabla 39 y 40, se muestran los parámetros de resistencia de la roca intacta de las paredes de estudio utilizando el criterio generalizado de Hoek y Brown (2002).

Tabla 39. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad de Roca Intacta de la línea 1 a 24

PERFILES GEOFÍSICOS				INPUT CRITERIO HOEK & BROWN					
	Perfil	Tipo Roca	RMR	UCS ⁽¹⁾ MPa	GSI	mi	D	MR	E _i MPa
1	ID	Agl-Volc	45	129.64	40	19	0	700	90748.00
2	2A	Agl-Volc	59	248.31	54	19	0	500***	124155.00
3	2C	Agl-Volc	56	262.93	51	19	0	575	151185.00
4	1F	Aa	47	152.15	42	25	0	500	76075.00
5	1G	Aa	56	161.44	51	25	0	400***	64576.00
6	2B	Aa	49	177.71	44	25	0	500	88855.00
7	2D	Aa	57	213.49	52	25	0	200	42698.00
8	2E	Aa	53	129.27	48	25	0	350	45244.50
9	3B	Aa	47	180.67	42	25	0	500	90335.00
10	1E	Tr	49	198.35	44	25	0	425	84298.80
11	3A	Tr	51	200.17	46	25	0	475	95080.80
12	3C	Tr	51	242.74	46	25	0	400***	97096.00
13	11A	Di	61	155.37	56	30**	0	350	54379.50
14	11F	Di	57	301.85	52	30**	0	350	105648.00
15	11D	Di-Prop	60	138.26	55	25	0	325***	44934.50
16	11E	Di-Prop	66	180.20	61	25	0	325***	58565.00
17	11C	Di-Prop	57	155.20	52	25	0	325***	50440.00
18	12A	Di-Qs	52	158.43	47	25	0	450	71293.50
19	12B	Di-Qs	53	58.35	48	25	0	475	27716.30
20	12C	Di-Qs	59	133.87	54	25	0	325***	43507.80
21	12D	Di-Qs	52	160.19	47	25	0	475	76090.30
22	12E	Di-Qs	54	223.06	49	25	0	475	105954.00
23	5A	Tq	58	227.24	53	25	0	400***	90896.00
24	5B	Tq	60	110.90	55	25	0	400***	44360.00

Tabla 40. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad de Roca Intacta de la línea 25 a 47

PERFILES GEOFÍSICOS				INPUT CRITERIO HOEK & BROWN					
	Perfil	Tipo Roca	RMR	UCS ⁽¹⁾ MPa	GSI	mi	D	MR	E _i MPa
25	7A	Qq	59	192.88	54	25	0	400***	77152.00
26	7B	Qq	57	208.92	52	25	0	400***	83568.00
27	7F	Qq	53	249.76	48	25	0	400***	99904.00
28	11B	Qq	67	289.59	62	25	0	275	79637.30
29	14A	Qq	56	157.69	51	25	0	350	55191.50
30	14B	Qq	53	112.90	48	25	0	400***	45160.00
31	5C	Td	57	136.54	52	25	0	500	68270.00
32	6A	Td	64	194.82	59	25	0	300	58446.00
33	6B	Td	57	184.04	52	25	0	400***	73616.00
34	9A	Da,Ta,Lp	55	159.55	50	25	0	400	63820.00
35	3D	Ta	65	225.89	60	25	0	250	56472.50
36	4A	Ta	67	223.04	62	25	0	250	55760.00
37	9C	Da	64	118.86	59	25	0	400***	47544.00
38	18A	Dp-G/A	64	169.34	59	25	0	400***	67736.00
39	24A	Dp-G/A	64	125.67	59	25	0	500	62835.00
40	24B	Dp-G/A	64	169.34	59	25	0	400***	67736.00
41	24C	Dp-G/A	64	125.67	59	25	0	500	62835.00
42	21A	Bx-G/A	70	110.03	65	16.3**	0	375	41261.30
43	21C	Bx-Qs	39	10.07	34	19**	0	1400	3021.00
44	20A	Di-G/A	62	227.17	57	30**	0	500	113585.00
45	20B	Di-G/A	63	227.17	58	30**	0	475	107906.00
46	4B*	Tr	-	-	-	-	-	-	-
47	7C*	Qq	-	-	-	-	-	-	-

*Perfiles geofísicos no analizados

mi: Valor predeterminado por tipo de roca según software RocData 4.0 (Asumido por Hoek)

*mi*** : Obtenido por ensayo triaxial Golder Associates/Itasca Consulting/Piteau Associates Group, 2000

*MR**** : Valor predeterminado por tipo de roca según software RocData 4.0 (Asumido por Hoek)

MR : Valor asumido por interpretación de las condiciones de roca intacta, macizo rocoso y velocidad de propagación de onda P.

4.1.7 Parámetros de Resistencia del Macizo Rocosos

Siguiendo con los análisis, para el caso de los parámetros que deben caracterizar al macizo rocoso adecuadamente según los materiales encontrados en la interpretación de la prospección geotécnica, los parámetros mostrados a continuación se presentan tomando en cuenta el criterio de Hoek y Brown y el criterio de Morh Coulomb. Se ha calculado para cada perfil geofísico, por lo cual en las siguientes tablas 41 y 42. Se adjunta los parámetros de resistencia del macizo rocoso de los sectores de estudio.

Tabla 41. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad del Macizo Rocoso En las líneas 1 a 22. (1D al 12E)

PERFILES GEOFÍSICOS				CRITERIO HOEK & BROWN			PARÁMETROS MOHR COULOMB		PARÁMETROS MACIZO ROCOSO			
	Perfil	Tipo Roca	RMR	mb	s	a	c MPa	Φ	σ_{tm} MPa	σ_c Mpa	σ_{cm} MPa	E_{rm} MPa
1	1D	Agl-Volc	45	2.22906	0.00127	0.51137	6.8	33.0	-0.07401	4.28722	24.95840	14488.10
2	2A	Agl-Volc	59	3.67511	0.00603	0.50434	15.9	37.3	-0.40738	18.85790	64.06230	48038.00
3	2C	Agl-Volc	56	3.30170	0.00432	0.50535	16.1	36.4	-0.34404	16.78590	63.76420	49308.90
4	1F	Aa	47	3.15014	0.00159	0.50992	8.9	36.0	-0.07676	5.68992	35.09340	13918.70
5	1G	Aa	56	4.34435	0.00432	0.50535	10.7	38.7	-0.16054	10.30660	44.77860	21061.40
6	2B	Aa	49	3.38338	0.00198	0.50866	10.7	36.6	-0.10425	7.50201	42.73400	18597.60
7	2D	Aa	57	4.50231	0.00483	0.50499	14.4	39.1	-0.22893	14.44430	60.42310	14764.70
8	2E	Aa	53	3.90295	0.00310	0.50658	8.3	37.8	-0.10253	6.92396	33.74210	12281.50
9	3B	Aa	47	3.15014	0.00159	0.50992	10.6	36.0	-0.09115	6.75648	41.67150	16527.70
10	1E	Tr	49	4.04486	0.00346	0.50614	12.8	38.1	-0.16964	11.26710	52.83500	24357.40
11	3A	Tr	51	3.63389	0.00248	0.50755	12.4	37.2	-0.13654	9.52446	50.15910	22704.40
12	3C	Tr	51	3.63389	0.00248	0.50755	15.1	37.2	-0.16558	11.55000	60.82640	23185.60
13	11A	Di	61	6.23245	0.00753	0.50377	11.6	41.8	-0.18771	13.23570	52.08300	23387.50
14	11F	Di	57	5.40277	0.00483	0.50499	21.5	40.6	-0.26974	20.42260	93.43610	36532.20
15	11D	Di-Prop	60	5.01149	0.00674	0.50405	9.7	40.0	-0.18589	11.12170	41.57300	18345.90
16	11E	Di-Prop	66	6.20912	0.01312	0.50264	13.7	41.7	-0.38088	20.40840	61.22460	31783.90
17	11C	Di-Prop	57	4.50231	0.00483	0.50499	10.5	39.1	-0.16643	10.50050	43.92550	17441.80
18	12A	Di-Qs	52	4.50231	0.00483	0.50499	10.7	39.1	-0.16989	10.71910	44.83970	24652.80
19	12B	Di-Qs	53	3.90295	0.00310	0.50658	3.7	37.8	-0.04628	3.12534	15.23050	7523.50
20	12C	Di-Qs	59	4.83567	0.00603	0.50434	9.3	39.7	-0.16692	10.16670	39.44850	16834.00
21	12D	Di-Qs	52	3.76602	0.00277	0.50705	10.1	37.5	-0.11783	8.08815	40.96990	19382.10
22	12E	Di-Qs	54	4.04486	0.00346	0.50614	14.4	38.1	-0.19077	12.67070	59.41710	30614.40

Tabla 42. Parámetros de Resistencia y Deformabilidad del macizo rocoso. En las líneas 23 a 47.(5A al 20B)

PERFILES GEOFÍSICOS				CRITERIO HOEK & BROWN			PARÁMETROS MOHR COULOMB		PARÁMETROS MACIZO ROCOSO			
	Perfil	Tipo Roca	RMR	mb	s	a	c MPa	Φ	σ_{tm} MPa	σ_c MPa	σ_{cm} MPa	E_{rm} MPa
23	5A	Tq	58	4.66601	0.00540	0.50466	15.5	39.4	-0.26276	16.29050	65.62520	33274.20
24	5B	Tq	60	5.01149	0.00674	0.50405	7.8	40.0	-0.14911	8.92082	33.34620	18111.30
25	7A	Qq	59	4.83567	0.00603	0.50434	13.4	39.7	-0.24049	14.64830	56.83750	29851.60
26	7B	Qq	57	4.50231	0.00483	0.50499	14.1	39.1	-0.22403	14.13510	59.12960	28897.30
27	7F	Qq	53	3.90295	0.00310	0.50658	16.0	37.8	-0.19810	13.37760	65.19240	27118.70
28	11B	Qq	67	6.43488	0.01467	0.50246	22.3	42.0	-0.66002	34.70800	100.44500	45021.30
29	14A	Qq	56	4.34435	0.00432	0.50535	10.5	38.7	-0.15682	10.06720	43.73850	18000.70
30	14B	Qq	53	3.90295	0.00310	0.50658	7.2	37.8	-0.08955	6.04715	29.46920	12258.60
31	5C	Td	57	4.50231	0.00483	0.50499	9.2	39.1	-0.14642	9.23804	38.64430	23607.30
32	6A	Td	64	5.78108	0.01051	0.50305	14.4	41.1	-0.35414	19.69570	63.53230	29064.50
33	6B	Td	57	4.50231	0.00483	0.50499	12.4	39.1	-0.19735	12.45180	52.08800	25455.90
34	9A	Da,Ta,Lp	55	4.19193	0.00387	0.50573	10.5	38.4	-0.14714	9.60925	43.36900	19604.60
35	3D	Ta	65	5.99128	0.01174	0.50284	17.0	41.4	-0.44277	24.17220	75.18700	29365.70
36	4A	Ta	67	6.43488	0.01467	0.50246	17.2	42.0	-0.50834	26.73180	77.36190	31522.80
37	9C	Da	64	5.78108	0.01051	0.50305	8.8	41.1	-0.21606	12.0164	38.7612	23643.10
38	18A	Dp-G/A	64	5.78108	0.01051	0.50305	12.5	41.1	-0.30782	17.11970	55.22310	33684.30
39	24A	Dp-G/A	64	5.78108	0.01051	0.50305	9.3	41.1	-0.22844	12.70480	40.98200	31247.10
40	24B	Dp-G/A	64	5.78108	0.01051	0.50305	12.5	41.1	-0.30782	17.11970	55.22310	33684.30
41	24C	Dp-G/A	64	5.78108	0.01051	0.50305	9.3	41.1	-0.22844	12.70480	40.98200	31247.10
42	21A	Bx-G/A	70	4.67003	0.02047	0.50198	7.9	39.2	-0.48225	15.62120	33.45450	26065.50
43	21C	Bx-Qs	39	2.15086	0.00114	0.51217	0.5	32.7	-0.00533	0.31293	1.89685	1495.00
44	20A	Di-G/A	62	6.45906	0.00841	0.50352	17.2	42.1	-0.29595	20.49150	77.68670	51367.40
45	20B	Di-G/A	63	6.45906	0.00841	0.50352	17.2	42.1	-0.29595	20.49150	77.68670	48799.00
46	4B*	Tr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	7C*	Qq	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Perfiles Geofísicos no analizados

4.2 Cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc)

En el cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica – VPPc, para las diferentes rocas analizadas en función a los perfiles geofísicos por ubicación y/o sectores litológicos, este parámetro es la velocidad que soporta la roca hasta antes de fallar por tensión y se calcula conociendo la resistencia a la tracción, el módulo de Young o deformación y la velocidad de propagación de la onda P, (V_p), según la siguiente fórmula:

$$VPPc = \frac{(\sigma t * v_p)}{Erm}$$

Donde

VPPc : Velocidad pico partícula crítica (mm/s)

σt : Resistencia a la tracción (MPa)

Vp : Velocidad de propagación de onda P (m/s)

Erm : Modulo de Young (GPa)

Los valores de la resistencia a la tracción (σt) de roca intacta se han calculado a partir de la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) que se obtuvo mediante ensayos de Carga Puntual (PLT), a través de la campaña de muestreo conforme se realizaban los Mapeos Geotécnico – Estructural de cada perfil geofísico. Así mismo se ha considerado los valores predeterminados por el Software RocData 4.0 de Rocsciense que le asigna a cada tipo de roca la variable MR (*Module Ratio*), la cual a la vez está en función de la interpretación que se asumirá para cada perfil.

En las siguientes tablas 43 y 44, se muestra adicionalmente a lo obtenido anteriormente, los resultados determinados para cada perfil geofísico, VP, VPPc, se ha tenido en cuenta dicho nivel ($0.25 * VPPc$), como un límite conservador y a partir del cual se debe controlar los diseños de voladura para que las vibraciones no ocasionan daño al macizo rocoso. Los valores de VPP50 (mm/s), están relacionados al campo cercano.

Tabla 43. Cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc desde la línea geofísica del 1 a 24.

PERFILES GEOFÍSICOS					MACIZO ROCOSO	ROCA INTACTA	CÁLCULO VELOCIDAD PICO PARTÍCULA CRÍTICO					
Perfil	Tipo Roca	RMR	Sector	E _m GPa	σ _t Mpa	Vp m/s	Vp m/s	VPPc mm/s	VPPc mm/s	VPP ₅₀ 0.25*VPPc mm/s	VPP ₅₀ 0.25*VPPc mm/s	
						Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1	1D	Agl-Volc	45	SurEste	14.49	6.12	2000	2400	845.48	1014.58	211.37	253.65
2	2A	Agl-Volc	59	NorEste	48.04	12.32	2000	4000	512.85	1025.70	128.21	256.43
3	2C	Agl-Volc	56	Este-NorEste	49.31	12.27	2000	4200	497.58	1044.92	124.39	261.23
4	1F	Aa	47	SurEste-Este	13.92	7.43	1400	1900	747.01	1013.80	186.75	253.45
5	1G	Aa	56	Este-NorEste	21.06	7.78	1400	2400	517.46	887.08	129.37	221.77
6	2B	Aa	49	SurEste-Este	18.60	8.43	1600	2200	725.27	997.25	181.32	249.31
7	2D	Aa	57	SurEste-Este	14.76	9.84	1200	1400	799.48	932.73	199.87	233.18
8	2E	Aa	53	SurEste-Este	12.28	5.74	1500	1900	701.06	888.01	175.27	222.00
9	3B	Aa	47	SurEste-Este	16.53	8.21	1500	1800	744.89	893.87	186.22	223.47
10	1E	Tr	49	NorEste	24.36	9.17	2000	2400	752.93	903.51	188.23	225.88
11	3A	Tr	51	SurEste	22.70	8.88	1400	2200	547.53	860.40	136.88	215.10
12	3C	Tr	51	NorOeste	23.19	11.44	1400	1900	690.64	937.30	172.66	234.32
13	11A	Di	61	Este	23.39	7.34	2000	3400	627.64	1066.99	156.91	266.75
14	11F	Di	57	Este	36.53	14.95	2000	2400	818.64	982.37	204.66	245.59
15	11D	Di-Prop	60	Oeste	18.35	6.71	1400	1800	512.08	658.39	128.02	164.60
16	11E	Di-Prop	66	NorOeste	31.78	8.17	1800	2400	462.94	617.25	115.73	154.31
17	11C	Di-Prop	57	SurOeste	17.44	7.14	1400	1800	572.80	736.46	143.20	184.11
18	12A	Di-Qs	52	SurOeste	24.65	7.58	1400	2000	430.37	614.81	107.59	153.70
19	12B	Di-Qs	53	SurOeste	7.52	2.71	1600	2000	576.29	720.36	144.07	180.09
20	12C	Di-Qs	59	Oeste	16.83	6.00	1800	2000	641.06	712.29	160.27	178.07
21	12D	Di-Qs	52	SurOeste	19.38	7.79	1200	1800	482.38	723.56	120.59	180.89
22	12E	Di-Qs	54	Oeste	30.61	10.95	1200	1800	429.08	643.61	107.27	160.90
23	5A	Tq	58	NorOeste	33.27	10.67	1800	2600	577.14	833.65	144.29	208.41
24	5B	Tq	60	NorOeste-Norte	18.11	5.12	1600	3000	452.00	847.50	113.00	211.87

Tabla 44. Cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPc) desde la línea

PERFILES GEOFÍSICOS					MACIZO ROCOSO	ROCA INTACTA	CÁLCULO VELOCIDAD PICO PARTÍCULA CRÍTICO					
	Perfil	Tipo Roca	RMR	Sector	E _m GPa	σ _t Mpa	Vp m/s	Vp m/s	VPPc mm/s	VPPc mm/s	VPP ₅₀ 0.25*VPPc	VPP ₅₀ 0.25*VPPc
							Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	mm/s Mínimo	mm/s Máximo
25	7A	Qq	59	SurEste	29.85	9.00	1400	1800	422.04	542.62	105.51	135.66
26	7B	Qq	57	SurEste	28.90	9.61	1400	1800	465.50	598.50	116.38	149.63
27	7F	Qq	53	Este	27.12	11.66	1500	1700	644.88	730.87	161.22	182.72
28	11B	Qq	67	SurEste	45.02	13.96	1200	1600	371.98	495.97	92.99	123.99
29	14 ^a	Qq	56	NorOeste-Norte	18.00	7.52	1500	1900	626.59	793.68	156.65	198.42
30	14B	Qq	53	NorOeste-Norte	12.26	5.25	1300	2000	556.78	856.59	139.20	214.15
31	5C	Td	57	NorOeste	23.61	6.26	2600	3600	689.31	954.43	172.33	238.61
32	6A	Td	64	NorOeste-Norte	29.06	9.23	2000	3000	634.84	952.26	158.71	238.07
33	6B	Td	57	NorOeste-Norte	25.46	8.74	2000	2800	686.71	961.39	171.68	240.35
34	9 ^a	Da,Ta,Lp	55	NorEste	19.60	7.32	2000	3000	746.28	1119.43	186.57	279.86
35	3D	Ta	65	NorOeste	29.37	11.10	1400	2200	529.08	831.41	132.27	207.85
36	4A	Ta	67	NorOeste	31.52	10.80	1600	2400	548.41	822.62	137.10	205.65
37	9C	Da	64	Norte	23.64	5.29	1800	4400	402.74	984.47	100.68	246.12
38	18A	Dp-G/A	64	NorOeste-Norte	33.68	8.11	2200	4200	529.40	1010.67	132.35	252.67
39	24A	Dp-G/A	64	NorOeste-Norte	31.25	6.09	2800	5000	546.04	975.07	136.51	243.77
40	24B	Dp-G/A	64	NorOeste-Norte	33.68	8.11	3000	4200	721.91	1010.67	180.48	252.67
41	24C	Dp-G/A	64	NorOeste-Norte	31.25	6.09	3800	5000	741.06	975.07	185.26	243.77
42	21A	Bx-G/A	70	Este	26.07	5.25	3600	5200	725.19	1047.50	181.30	261.87
43	21C	Bx-Qs	39	Este	1.50	0.50	1200	2200	401.3	735.79	100.33	183.95
44	20A	Di-G/A	62	SurEste-Este	51.37	10.51	3600	5200	736.4	1063.7	184.11	265.93
45	20B	Di-G/A	63	SurEste-Este	48.80	10.51	3200	4600	689.0	990.52	172.26	247.63
46	4B*	Tr	-	NorOeste	-	-	1800	2600	-	-	-	-
47	7C*	Qq	-	Sur	-	-	1600	2400	-	-	-	-

geofísica de 25 a 47.

*Perfiles Geofísicos no analizados.

Nota:

Erm : Modulo de Deformación del Macizo Rocoso.

σ_t : Resistencia a la Tracción de Roca Intacta.

Vp : Velocidad de propagación de onda P

VPPc : Velocidad pico partícula crítica.

VPP50 :0.25*VPPc

Luego de haber calculado los valores del VPPc, en base a toda la información geotécnica determinada, se debe de tener en cuenta que estos valores son independientes para cada perfil geofísico analizado. En el desarrollo de los cálculos, por ejemplo, la velocidad de propagación de la onda P, experimenta un comportamiento individual a pesar de ser la misma litología y luego al ser agrupadas por sectores, tomado en cuenta además de las propiedades de las rocas, así como también las características geomecánica y/o ubicación de los perfiles en condiciones geomecánica iniciales de acuerdo a los trabajos desarrollados en los niveles respectivos donde se efectuaron las labores de Topografía y Refracción Sísmica. Con el desarrollo de este informe se ha podido calcular la VPPc, en la tabla 46, de las rocas comprendidas dentro de la Serie Alta, Serie Toquepala, Pórfido Cuarzífero de Quellaveco, Intrusivos sin yeso e Intrusivo en zona de Yeso.

Tabla 45. Se muestran los valores de VPP50, obtenidos con el Estudio Geofísico de Refracción Sísmica.

Tipo Roca	σ_t (Mpa)	ϵ (GPa)	Vp (m/s)	VPPc (mm/s)	VPP50 (mm/s)	Observaciones
Aglomerado de Dacita	5.9	18.32	2985.00	961.33	240.33	Datos de Velocidad de Onda Vp reales .
Diorita Propílica	4.4	13.83	2134.00	678.93	169.73	
Yeso / Anhidrita	4.9	23.10	4851.00	1029.00	257.25	
Brecha de Turmalina / Diorita	4.9	16.63	2704.00	796.73	199.18	
Brecha sin Yeso	4.7	13.76	2207.00	753.84	188.46	
Alta Andesita	6.1	12.60	1737.00	840.93	210.23	

Como se observa en la tabla, estos valores representan litologías específicas, los alcances del nuevo estudio de la VPPc, permite disponer de información actualizada y más específica del tajo Toquepala.

En la siguiente tabla 46, se muestra el cálculo final de la Velocidad Pico Partícula Crítica distribuido según la secuencia litológica del yacimiento Toquepala, en función de los resultados obtenidos por la prospección geotécnica y geofísica, considerando además para algunas rocas los cálculos determinados.

Calculo Final Velocidad Pico Partícula Crítica Mina Toquepala

Tabla 46. Calculo Final

Litología Mina Toquepala	Tipo Roca	Perfil	Sector	VPPc Max	X VPPc máx	VPP50máx mm/s	VPPc mm/s
				mm/s			
Serie Alta	Aglomerado Volcánico Agl-Volc.	1D	SurEste	1014.58	1028.40	253.65	257.10
		2A	NorEste	1025.70		256.43	
		2C	Este-NorEste	1044.92		261.23	
	Alta Andesita Aa	1F	SurEste-Este	1013.80	935.45	253.45	233.86
		1G	Este-NorEste	887.08		221.77	
		2B	SurEste-Este	997.25		249.31	
		2D	SurEste-Este	932.73		233.18	
		2E	SurEste-Este	888.01	222.00		
		3B	SurEste-Este	893.87	223.47		
Serie Toquepala	Riolita Toquepala Tr	1E	NorEste	903.51	903.51	225.88	225.88
		3A	SurEste	860.40	860.40	215.10	215.10
		3C	NorOeste	937.30	937.30	234.32	234.32
	Andesita Toquepala Ta	3D	NorOeste	831.41	827.02	207.85	206.75
		4A	NorOeste	822.62		205.65	
	Pórfido Cuarzífero Toquepala Tq	5A	NorOeste	833.65	840.58	208.41	210.14
		5B	NorOeste-Norte	847.50		211.87	
	Dolerita Toquepala Td	5C	NorOeste	954.43	956.03	238.61	239.01
6A		NorOeste-Norte	952.26	238.07			
6B		NorOeste-Norte	961.39	240.35			
Pórfido Cuarzífero Quellaveco	Pórfido Cuarzífero Quellaveco Qq	7A	SurEste	542.62	591.99	135.66	148.00
		7B	SurEste	598.50		149.63	
		7F	Este	730.87		182.72	
		11B	SurEste	495.97		123.99	
		14A	NorOeste-Norte	793.68		825.14	
14B	NorOeste-Norte	856.59	856.59	214.15			
Intrusivos Yeso sin	Diorita(Di)	11A	Este	1066.99	1024.68	266.75	256.17
		11F	Este	982.37		245.59	
	Diorita Propílica Di-Prop	11D	Oeste	658.39	670.70	164.60	167.67
		11E	NorOeste	617.25		154.31	
		11C	SurOeste	736.46		184.11	
	Diorita Cuarzo Sericita Di-Qs	12A	SurOeste	614.81	682.93	153.70	170.73
		12B	SurOeste	720.36		180.09	
		12C	Oeste	712.29		178.07	
		12D	SurOeste	723.56		180.89	
		12E	Oeste	643.61		160.90	
Brecha Angular (Bx-Qs)	21C	Este	735.79	735.79	183.95	183.95	
Aglomerado de Dacita (Da)*	-	-	-	961.33	-	240.33	
Diorita Propílica (Di-prop)*	-	-	-	678.93	-	169.73	
Brecha de Turmalina/Diorita*	-	-	-	796.73	-	199.18	
Intrusivos Yeso con	Dacita Porfirítica Dp-G/A	18A	NorOeste-Norte	1010.67	992.87	252.67	248.22
		24A	NorOeste-Norte	975.07		243.77	
		24B	NorOeste-Norte	1010.67		252.67	
		24C	NorOeste-Norte	975.07		243.77	
	Brecha Angular (Bx-G/A)	21A	Este	1047.50	1047.50	261.87	261.87
	Diorita(Di-G/A)	20A	SurEste-Este	1063.736	1027.13	265.93	256.78

*Valor que prevalece del estudio de Refracción Sísmica.

Nota: VPP (Promedio de VPP50max)

En la tabla 36, los perfiles geofísicos están agrupados por tipo de roca, los cuales se dispondrán según la columna estratigráfica de Toquepala.

Primeramente, el Pórfido Cuarzífero Quellaveco (Qq) obteniendo dos valores de VPP50; Sector Sureste - Este y Noreste – Norte diferenciándose por la velocidad de propagación de la onda V_p , así como el comportamiento geomecánica – estructural diferente de ambas zonas.

Seguidamente la Serie Toquepala compuesta por: Dolerita Toquepala (Td), Pórfido Cuarzífero Toquepala (Tq). Andesita Toquepala (Ta) y Riolita Toquepala (Tr), en su mayoría poseen un macizo de calidad geotécnica regular, determinando la VPPc para cada uno de ellos; en el caso de la Tr, en función a la ubicación de los perfiles geofísicos (Noreste, Sureste y Noroeste), se consideró por separado ya que tienen comportamientos diferentes relacionados a las distintas condiciones del lugar en que se formaron.

En la serie Alta tenemos: Alta Andesita (Aa) y Aglomerado Volcánico (Agl-Vol), ubicados principalmente en el sector Este del tajo, en general el macizo rocoso es de calidad geotécnica regular, el comportamiento geológico (secuencia de facies volcánicas), geomecánica y estructural en este sector de la mina se tuvo en cuenta para el cálculo de la VPPc.

Los resultados obtenidos están en función de las propiedades físico-mecánicas, condiciones geomecánica y estructurales del macizo rocoso; obtenidas del mapeo, muestreo y ensayos respectivos a los que fueron sometidos las muestras analizadas para caracterizar a los sectores litológicos en el cálculo de VPPc, en función a los perfiles geofísicos de Refracción Sísmica planteados en el Tajo Toquepala.

V. CONCLUSIONES

La refracción sísmica ha determinado los valores de velocidad y con el ello el valor de VPPc, según la columna estratigráfica de la Mina Toquepala. Estos valores abarcan la diversidad litológica presente en las zonas de estudio como: Serie Alta Toquepala, Serie Toquepala, Pórfido Cuarcífero Quellaveco, Intrusivos sin yeso, para los intrusivos se han diversificado los valores en función a los grados de alteración que presentan, tienen valores entre 167.67mm/s y 256.17mm/s. Para el caso del aglomerado de Dacita con un valor de 240.33 mm/s, de esta última se tomó un solo perfil ya que la zona en las que se tiene otros afloramientos son inaccesibles. En el caso de los intrusivos que tienen presencia de yeso y están comprendidos dentro de la zona Yeso/Anhidrita como: Dacita Porfirítica, Brecha Angular y Diorita según el mapeo geotécnico estas zonas muestran un macizo de buena calidad, muestran valores altos de V_p hasta de 5200 m/s, y en cálculos finales sus valores son 248.22 mm/s y 261.87 mm/s.

Para el caso de la VPPc del aglomerado de Dacita, perfil 9C interpretando los valores de velocidad de onda poco representativos para este material y considerando que solamente se realizó un perfil geofísico en esta litología, se concluyó mantener el valor obtenido en el estudio de Refracción Sísmica (240.33 mm/s); junto a la Diorita Propilitica y la brecha Turmalina/Diorita del lado Este, ubicadas en sectores inaccesibles a la fecha en que se realiza el estudio.

Para el caso de las rocas con yeso se ha determinado valores altos de VPPc, donde encontramos Dp-G/A, Di-G/A, el macizo rocoso es de buena calidad. Los valores de la V_p llegan hasta 5200 m/s.

VI. RECOMENDACIONES

Se deben realizar las actualizaciones de la VPP50, considerando de que acuerdo al avance de minado, se va ir encontrando condiciones diferentes en el macizo rocoso relacionadas a las propiedades geomecánica del macizo, controles estructurales, grado de alteración, contactos litológicos; y utilizar la información geofísica no considerada en el presente estudio.

Cada tres meses se debe realizar la actualización del Plano de Sectorización de Velocidad Pico Partícula (VPPc), de acuerdo al avance de minado que se tenga en diferentes fases.

VII. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

- Barton. (1974). *Clasificacion de Q de Barton*.
- Barton, & N. and Bakhtar, K. (1987). *Description and mmodelling of rock joints for the hidro-thermal-mechanical design of nuclar waste vaults AECL*. Canada.
- Barton, N., & Lien, R. L. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics.
- Bellido, G. y. (1963). *Geologia de Cuadrangulo de Moquegua*. Lima.
- Brown, E. (1981). *ISRM Rock Caracterizacion Testing and Monitoring*. Pergamon Press.
- C. Lopez Jimeno, E. L. (2003). *Manual de Perforacion y Voladure*. Madrid-España: E.T.S.I. de Minas - Universidad Politecnica de Madrid.
- Cantos, J. (1973). *Tratado de Geofisica Aplicada*. Madrid, España.
- Contreras, W. J. (2009). *Seleccion del explosivo adecuado y carga maxima por retardo usando el Monitoreo y Analisis de Vibraciones - Aplicacion Mina Ares*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Dpto de Geologia, M. T. (2011). *Geologia de la Mina Toquepala*. Toquepala, Peru: Southern Peru.
- Dueñas Gutierrez, J. W. (2018). *"Reduccion del daño inducido al Macizo Rocoso mediante monitoreo, modelamiento y anallisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179, Compañia Minera Kolpa S.A."*. Puno-Peru: Repositorio Univrsidad Nacional del Altiplano.
- EXSA. (2005). *Mnual Practico de Voladura* . Lima-Peru: 4ta. Edicion 144.
- Flores, C. M. (2017). *Comportamiento Litologico Respecto a la Alteracion Yeso-Anhidrita en la Mina Toquepala*. Arequipa, Lima : Universidad Nacional San Agustin .
- Gonzalez de Vallejo, L. I. (2002). *Ingenieria Geologica* . Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Ingemmet. (1989). *Geologia del Cuadrangulo de Moquegua*. Lima.
- J. Rios, C. R. (s.f.). *Aplicacion del Modelamiento de Vibraciones en Campo Lejano orientado a la Proteccion de Intlaciones*. Lima-Peru: Orica Mining Services.
- Lacy. (1958). *Mina Toquepala*. Lima.
- Manilla Aceves, A. A. (2003). *Geofisica Aplicada en los Proyectos Basicos de Ingenieria Civil*. Sanfandila, Qro.: Publicacion Tecnica No. 229.

- Monge, P. R. (2004). *Mecanica de Rocas " Fundamentos de la Ingenieria de Taludes"*.
- Orihuela, S. M. (2009). *"Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en la Mina Modelo"*. Lima, Peru: Repositorio Pontificia Universidad Catolica del Peru.
- Oyanguren, P., Irizar, L. d., Lain, R., & Obeso, E. G. (s.f.). *Mecanica de Rocas aplicada a la Minería Metalica Subterranea* . Madrid, España: Instiruro Geologico y Minero de España.
- Pampacata, L. R. (2015). *Analisis de Vibraciones inducidos por la Voladura de rocas n Cantera Atocongo en zonas ceercanas a Poblaciones*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Quiroz-Cotrina, C. (2014). *Monitoreo de vibraciones causadas por voladuras en Taludes*. Peru: Universidad Privada del Norte.
- Richard, C. (1958). *Geologia Mina Toquepala*. Lima .
- Tovar, F. A. (2015). *"Aplicacion del Principio de la Velocidad Pico Particula (VPP), para minimizar el daño al macizo rocoso-utilizando retardos- veta lourdes Consorcio Minero Horizonte-L Libertad"*. Huancayo-Peru: Universidad Nacional del Centro del Peru.
- U. Nacional de Colombia . (2015). *Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina "La Maruja", Colombia*. Medellin-Colombia : Universidad Nacional de Colombia .
- Udias, A. (1999). *Principles of Seismology*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Vallejo, L. I. (2002). *Ingenieria Geologica*. España, Madrid: ORIMU.

ANEXOS