

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN MEDIANTE LA
CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA UNIFORMIZAR
LA FRAGMENTACIÓN EN LA EXPLOTACIÓN DE MINA
SUBTERRÁNEA”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

Bach. David René QUISPE PILCO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2019



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

**“DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN
DEL MACIZO ROCOSO PARA UNIFORMIZAR LA FRAGMENTACIÓN EN LA
EXPLOTACIÓN DE MINA SUBTERRÁNEA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PRESENTADO POR:**

Bach. David René QUISPE PILCO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS**

APROBADA POR:

PRESIDENTE

: 

DR. EUGENIO ALFREDO CAMAC TORRES

PRIMER MIEMBRO

: 

DR. FERNANDO BENIGNO SALAS URVIOLA

SEGUNDO MIEMBRO

: 

ING. AMILCAR GIOVANNY TERAN DIANDERAS

Área : Perforación y Voladura.

Tema : Diseño de Malla de Perforación.

Fecha de sustentación: 29/10/2019

DEDICATORIA

A mis padres, René y Faustina, quienes con sus esfuerzos y grandes consejos me encaminaron en mi desarrollo personal y profesional.

A mi hermano Ing. Abelardo, quien me acompaña en esta etapa tan importante de mi vida.

A la Srta. Lilia Estefani, por su apoyo incondicionalmente. A todos ellos les dedico este gran logro para compartirlo en nuestras vidas.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
ÍNDICE GENERAL.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	iv
Resumen.....	5
Abstract.....	5
Introducción.....	6
Antecedentes.....	7
Importancia de la investigación.....	9
Objetivo.....	9
Materiales y métodos.....	9
Ubicación.....	9
Geografía.....	9
Accesibilidad.....	9
Metodología del estudio.....	10
Diseño metodológico.....	10
Técnicas y procedimientos de recolección de datos.....	10
Materiales y equipos a utilizar.....	10
Descripción del sistema de minado aplicado al yacimiento.....	10
Caracterización del comportamiento de la masa.....	11
Perforación de taladros largos.....	13
Análisis de granulometría P80.....	14
Resultados y discusión.....	15
Propiedades de la roca intacta.....	15

Caracterización geomecánica del macizo rocoso	15
Aspectos de calidad de la masa rocosa	16
Cálculo de burden	16
Conclusiones.....	20
Agradecimientos.....	20
Bibliografía	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Malla de perforación.....	19
Figura 2: Resultados de P-80.....	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Propiedades físicas por litología	15
Tabla 4-2: Características geomecánicas por dominio estructural	15
Tabla 4-3: Tabla para el cálculo de burden y espaciamiento según Pearse	17

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CP	Caja piso
CT	Caja techo
ERQD	Índice de calidad de roca equivalente
GSI	Índice de resistencia geológica
JSF	Factor de corrección de la resistencia al contacto
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation)
VT	Veta

**DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN DEL
MACIZO ROCOSO PARA UNIFORMIZAR LA FRAGMENTACIÓN EN LA
EXPLOTACIÓN DE MINA SUBTERRÁNEA**

***PERFORATION MESH DESIGN BY CLASSIFICATION OF ROCKY MACE TO
UNIFORM FRAGMENTATION IN THE UNDERGROUND MINE EXPLOITATION***

Bach. David René QUISPE PILCO

Teléfono: 978825753

Correo: drqp_123@hotmail.com

Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano - Puno

Av. Sesquicentenario N°1051

Resumen

El presente trabajo de investigación se realizó el diseño de malla de perforación con datos obtenidos de la clasificación del macizo rocoso que nos permita uniformizar la fragmentación del material extraído. Para realizar la clasificación del macizo rocoso fue necesario conocer datos del mapeo geomecánico en mina y clasificar el macizo rocoso mediante el RMR de Bieniawski y Q de Barton poder determinar el Índice de calidad de roca RQD. Ya conociendo parámetros geomecánicos de la matriz de roca y del macizo rocoso se procedió a realizar los cálculos del burden mediante la teoría de Pearse que requiere de los siguientes parámetros: Diámetro del taladro, presión de detonación de la carga explosiva y la resistencia dinámica de la roca. Después de los cálculos realizados el burden resulta 1.002 metros y el espaciamiento 1.25 metros. Para finalizar se utiliza análisis granulométrico para pronosticar la fragmentación que resulta 5.06 pulgadas, con estos resultados nos permite evaluar constantemente el diseño de malla de perforación.

Palabras clave: Clasificación Geomecánico, parámetros de perforación, parámetros de explosivos, fragmentación.

Abstract

The present research work was the design of drilling mesh with data obtained from the classification of the rock massif that allows us to standardize the fragmentation of the extracted material. In order to classify the rock massif it was necessary to know data of the geomechanical mapping in Mina and classify the rock massif by means of the RMR of Bieniawski and Q of Barton to determine the Rock Quality Index RQD. Already knowing the geomechanical parameters of the rock matrix and the rock

massif, the load calculations were carried out using the Pearse theory that requires the following parameters: Bore diameter, detonation pressure of the explosive charge and the dynamic resistance of the rock. After the calculations made, the load is 1,002 meters and the spacing is 1,25 meters. Finally, granulometric analysis is used to predict the fragmentation that is 5.06 inches, with these results it allows us to constantly evaluate the design of drilling mesh

Keywords: *Geomechanical classification, drilling parameters, explosive parameters, fragmentation.*

Introducción

En la minería subterránea es muy importante el estudio geomecánico antes de hacer el diseño de malla de perforación y voladura de rocas, ya que la actividad minera es extraer minerales del subsuelo y para acceder a los yacimientos se tendrá que atravesar estructuras y macizos rocosos mediante cortadas, galerías, rampas, etc. Para lo cual en la mayoría de los casos es necesario tener conocimientos sobre diseño de malla de perforación y carguío adecuado de explosivos para tener una voladura eficiente y uniformizar la fragmentación.

Entre los principales inconvenientes detectados en las operaciones unitarias de perforación y voladura se destacan: Mal diseño de la malla de perforación y voladura, incumplimiento del diseño de malla de perforación, deficiencias de perforación,

deficiencias en la secuencia de los tiempos de retardo en la voladura, etc.

Y cuando se observa que la granulometría del material extraído en mina es muy gruesa es consecuencia de una mala voladura. El tonelaje de material producto del disparo es inferior a lo esperado. Los metros de avance por disparo son inferiores a lo esperado, y trae como consecuencia que el rendimiento de los equipos de acarreo y transporte disminuye, y se afecta a la programación de trabajo de los equipos.

Por lo cual el objetivo para realizar el diseño de malla de perforación conociendo la clasificación del macizo rocoso, con datos obtenidos en pruebas de campo que nos permita diseñar la malla de perforación y así poder uniformizar la fragmentación del material extraído

Antecedentes

Respecto a estudios realizados referidos al diseño de malla de perforación y voladura, se presenta los siguientes:

- a.* Según la tesis de Valenzuela, H. (2017) “Mejoramiento de las técnicas operativas en perforación y voladuras para reducir la dilución en vetas angostas; caso Tajo Mariano, Unidad Minera San Rafael – Minsur” Concluye que: “implementar la técnica de perforación tipo Casing, la cual permitió reducir el grado de desviación de los taladros, lo cual tiene por consecuencia dilución operativa en los paneles a minar.”
- b.* Según la tesis de Villanueva, J. (2018). “Evaluación de parámetros de diseño de perforación y voladura en taladros largos aplicado en vetas angostas para determinar su productividad en la U.M. San Rafael, Minsur S.A.” Concluye que: El análisis de control de voladura para mostrar los resultados en la granulometría,
- c.* Según la tesis de Calderon, M. (2015), “Optimización de las prácticas de perforación y voladura en el avance y producción de la

minería de mediana escala (Unidad Minera Macdesa)”. Concluye que: El diseño y marcado de malla de perforación, así como el uso de guidores en las diferentes labores son el punto de inicio de una buena voladura y por consecuencia tener un material cuya granulometría es la óptima.

- d.* Según la tesis de Lara, O (2013). “Diseño de malla de perforación para optimizar la voladura en la Unidad Carahuacra de la Compañía Minera Volcan S.A.A”. Concluye que: Al aplicar el arranque hexagonal especialmente en terrenos con un $RMR > 41$, facilita proveer caras libres adicionales a los demás cuadrantes. Además la ventaja de este tipo de arranque es que el rendimiento de avance por disparo es eficiente.
- e.* Según la tesis de Yance E. (2013). “Estudio geomecánico en el diseño de malla de perforación del crucero 300, nivel 16 en la Compañía Minera Casapalca S.A.”. Concluye que: No se debe hacer el diseño de malla de perforación sin antes haber efectuado el estudio geomecánico del matriz roca y del macizo rocoso, adicionalmente a

esto se debe conocer las especificaciones técnicas del explosivo proporcionado por los fabricantes.

- f. Según la tesis de Sánchez Y. (2012) Pág. N° 02, "Optimización en los Procesos de Perforación y Voladura en el Avance de Rampa en la Mina Bethzabeth – Ecuador". Menciona que: A partir de un modelo matemático, se obtendrá una malla de perforación técnica, ajustada a las características físico – mecánicas del macizo rocoso, consiguiendo óptimos tiempos de perforación, número adecuado de barrenos y cantidad exacta de sustancia explosiva, para tener un avance en el tiempo programado; con esto se minimizarán costos de operación y el tiempo de avance de la rampa.
- g. Según la tesis de Ledezma, F. (2009) Pág. N° 44, Concluye que: Es de suma importancia llevar el control de la sección, para evitar el movimiento innecesario de material no programado; lo cual nos daría un ahorro significativo. Si no se utiliza el control de voladura a los costos generados por la sobre rotura, hay que sumar los problemas de dilución, que es una

pérdida significativa del valor del mineral.

- h. Según la tesis de Garrido, A. (2005), "Diagnóstico y Optimización de Disparos en Desarrollo horizontal Mina el Teniente". Menciona que: Como instrumento de investigación se utilizó las fotografías de los disparos antes y después de cada tronadura y el monitoreo de las vibraciones producto de la tronadura. Sus conclusiones fueron los siguientes. Reducción del número de perforación por disparo un 10%, reducción de la sobre excavación de un 24% a un 6%, menor exposición al riesgo por desprendimientos y caídas de rocas, disminución de los tiempos de trabajo y disminución de los costos directos de perforación y voladura“.

Importancia de la investigación

La importancia radica en mejorar la granulometría de cada uno de los disparos realizados en mina y así optimizar todos los procesos productivos en Operaciones Mina.

Objetivo

Diseñar malla de perforación mediante la clasificación del macizo rocoso que nos permita uniformizar la fragmentación.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se realizó en Minsur – Unidad Minera San Rafael.

La Unidad Minera San Rafael se encuentra localizada en el departamento de Puno, a una altitud que varía entre los 4,500 y 5,200 m.s.n.m. en la cordillera oriental de los andes del Perú. Es el primer productor de estaño en América y tercer productor mundial de estaño, después de China e Indonesia. El principal mineral de explotación es la casiterita (SnO_2 , óxido de estaño) y se extrae con el método de Sublevel Stopping.

Geografía

La Unidad Minera San Rafael, desde el punto de vista regional, se ubica en las estribaciones occidentales de la cordillera oriental de los andes del Perú y desde el punto de vista local se encuentra ubicado al suroeste del nevado de Quenamari a 5,299 m.s.n.m. Políticamente está ubicada en el distrito de Antauta, provincia de Melgar del departamento de Puno.

Las coordenadas geográficas: longitud oeste $70^\circ 19'$ y latitud sur $14^\circ 14'$. Las coordenadas UTM: Este 357 730 y Norte 8' 426 570

Accesibilidad

A la Unidad Minera se llega desde Lima por vía aérea al aeropuerto de la ciudad de Juliaca, de esta ciudad se sigue por vía terrestre a través de la carretera asfaltada Juliaca – Cusco, hasta la localidad Calapuja, luego por la carretera asfaltada hasta el desvío Antauta, pasando por los pueblos de Azángaro, Progreso y San Antón, y posteriormente se llega al pueblo de Antauta y prosiguiendo aprox.10 min hasta llegar al control de garita en Cumani.

Metodología del estudio

La presente investigación es del tipo aplicativo.

La investigación será de tipo aplicativo, de causa y efecto, donde la causa es el diseño de la malla de perforación y el cálculo del tipo de carga explosiva para la voladura; y su efecto serán los resultados que se tienen después de la voladura observando la granulometría de la fragmentación.

Diseño metodológico

Población y Muestra Población: Unidad Minera San Rafael - Minsur

Muestra: Tajo de producción - Carmen.

Técnicas y procedimientos de recolección de datos

Se tiene los catálogos de fabricantes de explosivos nacionales y extranjeros para la determinación de las principales propiedades de los explosivos.

La empresa dispone de los datos técnicos sobre las operaciones de perforación y voladura.

Materiales y equipos a utilizar

Computadoras con Microsoft Excel para realizar cálculos y software Wipfrag para conocer la granulometría

del material extraído, cámaras fotográficas, y otros

Descripción del sistema de minado aplicado al yacimiento

En la Unidad Minera San Rafael se viene aplicando el método de Sublevel Stopping con sus diferentes variantes. Este método consiste en extraer el mineral a partir de subniveles de explotación mediante disparos efectuados en planos verticales, con taladros negativos y positivos tanto paralelos como en abanico. Para lo cual, se debe tener en cuenta, dentro de un punto de vista geomecánico, que tanto las cajas como el cuerpo mineralizado han de ser competentes y de alto buzamiento para darle "caída" al mineral que va a ser extraído por medio de este método.

El mineral disparado cae a un nivel base de extracción el cual cuenta con ventanas de extracción (*draw points*) por los cuales se extrae el material hacia un *ore pass* central para finalmente ser evacuado por los volquetes a través de tolvas electro hidráulicas ubicadas estratégicamente en cámaras de carguío de la rampa principal. Es así que Minsur S.A mediante el desarrollo tecnológico que ha venido siguiendo estos últimos

años, hace que este método de minado sea cada vez más eficiente, versátil y seguro.

Minado por subniveles

Denominado también Sublevel Stopping, es una aplicación de los principios de la voladura de banco a cielo abierto a las explotaciones subterráneas. La explotación se realiza a través de los subniveles a intervalos en forma descendente.

Existen dos variaciones en este método:

Método taladros paralelo (LBH)

Es una variante del método, que consiste en abrir cámaras de perforación, cuyos extremos son los contactos del cuerpo o veta en cada sub-nivel de perforación. Luego todos los taladros de producción son perforados en forma paralela.

Método taladros en abanico

Se realiza desde las galerías de preparación o de los subniveles con taladros radiales, entre 0 y 360 grados, cuyas longitudes se adaptan al contorno de la mineralización.

Este método es de bajo costo, y su secuencia es la misma que el método LBH Criterios para su aplicación:

- Potencia de vetas mayores a 3 metros.
- Buzamiento mayor a 50 grados.
- Las rocas encajonantes deben ser competentes y resistentes.
- El mineral debe ser competente y con buena estabilidad.

Caracterización del macizo rocoso

Para caracterizar el macizo rocoso se tiene que conocer los parámetros geomecánicos que son; la resistencia del macizo rocoso, la resistencia a la tracción del macizo rocoso, la cohesión de la roca intacta, el ángulo de fricción además de la clasificación de la roca ya pueda ser según la tabla GSI, RQD el RMR u otros.

Caracterización del comportamiento de la masa rocosa

La cuantificación de las características estructurales y geomecánicas de las rocas circundantes a las estructuras mineralizadas tiene justificación técnica y económica para una explotación racional, segura y rentable. Su utilización está orientada para el planeamiento y diseño, selección de equipos, diseño de la perforación, voladura y sostenimiento de labores mineras superficiales y subterráneas.

- Caracterización del macizo rocoso, a través de levantamiento litológico – estructural.
- Caracterización del comportamiento mecánico de la masa rocosa y sus componentes, a través de ensayos de laboratorio (determinación de propiedades físicas y propiedades mecánicas de la roca y mineral) y ensayos in-situ (Índice de la calidad de la roca, RQD)

Ensayos de laboratorio

Comprenderá determinar las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes materiales rocosos, entre roca y mineral a partir de un muestreo selectivo y representativo en sectores característicos de la operación minera.

Las muestras deben ser sometidas a los siguientes ensayos:

Propiedades físicas: Densidad, porosidad aparente, peso específico aparente, absorción en peso.

Propiedades mecánicas: Ensayo de compresión uniaxial, ensayo de carga puntual, ensayo de corte directo, ensayo para la determinación de constantes elásticas, ensayo de

compresión triaxial, ensayo de tracción indirecta–brasileño.

Ensayos in-situ

En la operación minera se debe implementar un sistema de control instrumental para garantizar la estabilidad de las labores mineras subterráneas y superficiales, a través de: extensómetros de varillas, cinta, inclinómetros y estación total (teodolito y distanciómetro electrónico), martillo Schmidt de dureza y por último el nivel y/o caudal del agua mediante piezómetros.

Índice de calidad de la roca

La calidad de la roca se determina mediante el RQD (Rock Quality Designation). Se basa en la recuperación en porcentaje de piezas enteras mayores a 100 mm con relación a longitud total de una perforación diamantina.

El valor RQD es representativo para cada tramo, representa además un valor numérico de la calidad de la roca; en este sentido, es necesario utilizar toda la información de las perforaciones diamantinas y los datos de campo referidos al número de discontinuidades.

Perforación de taladros largos

La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios.

Se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpe y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la broca y hasta una profundidad dada por la longitud del barrenado utilizado. La eficiencia en perforación consiste en lograr la máxima penetración al menor costo.

Condiciones de perforación

Normalmente la calidad de los taladros a ser perforados está determinada por cuatro condiciones: diámetro, longitud, rectitud y estabilidad.

a. Diámetro: Depende del tipo de aplicación en que el taladro será utilizado. Como regla general, el de “menor diámetro factible” será el más adecuado y económico de realizar.

b. Longitud: Influye mucho en la elección de la capacidad del equipo perforador y naturalmente en el avance del disparo (profundidad del taladro).

c. Rectitud: Varía con el tipo de roca, método de perforación y características del equipo perforador. Deben tener la mayor rectitud y alineamiento para que el explosivo sea apropiadamente distribuido.

En la mayoría de trazos de perforación el paralelismo entre taladros es de vital importancia para la interacción de las cargas explosivas en toda la voladura.

d. Estabilidad: Los taladros deben mantenerse abiertos hasta el momento de su empleo. En terrenos sueltos tienden a desmoronarse por lo que puede ser necesario revestirlos interiormente con tubos especiales para poderlos cargar (casing) o hacer otro taladro adyacente al obturado.

Diseño de malla de perforación

Para hacer el diseño de malla se toman una serie de factores geológicos como geomecánicos, Por lo tanto una malla de perforación es variable en cada una de ellas. Las variables que se toman en consideración son las siguientes:

Variables no controlables.

Estas variables se caracterizan por su gran aleatoriedad y entre ellas se tiene: propiedades físicas de las rocas, propiedades elásticas o de resistencia

dinámica de las rocas y las condiciones geológicas.

Variables controlables.

Geométricas: Burden (B), diámetro de taladro, espaciamiento, longitud de cargas, taco, profundidad del taladro, etc.

Físico-químicas: Tipo de mezcla explosiva comercial, densidad de la mezcla explosiva, parámetros de detonación.

De tiempo: Tipo y tiempos de retardos, tipos y secuencias de salida, etc.

Variable de mayor importancia en el diseño

Las condiciones particulares de cada macizo rocoso determinarán los detalles del diseño de voladura. Las dimensiones principales son el burden y el espaciamiento.

El burden: se considera como el adecuado a aquel con el que se ha logrado en la producción continua los requerimientos siguientes: Un grado uniforme de fragmentación y una rotura completa sin dañar los contornos del macizo rocoso.

Espaciamiento: Distancia entre taladros y cargas en una fila, medida perpendicularmente hacia el burden y paralelo a la cara libre del movimiento esperado de la roca.

Análisis de granulometría P80

Wipfrag es un software empleado, en este caso, en la medición de fragmentación de la voladura. Lo que se hace es emplear un objeto colocado sobre el mineral fragmentado que servirá de patrón del cual se conoce su mediada real, dicha medida es dato de ingreso (input) en el software. Wipfrag comienza con la figura de la distribución del mineral explotado y del objeto patrón, lo convierte en una "red" de fragmentos, luego mide la red que se acomoda manualmente y muestra y delineada una selección de estadísticas de fragmentación y gráficos para la obtención del P80.

El P80 es la dimensión de malla a la que aproximadamente el 80% acumulado de las partículas analizadas pasarían sin ningún problema.

Resultados y discusión

Valoración del macizo rocoso – Unidad Minera San Rafael

Propiedades de la roca intacta

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio y ensayos de campo mostraron las siguientes propiedades para cada tipo litológico.

Tabla 0-1: Propiedades físicas por litología

LITOLOGÍA	UBICACIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPA)	MI	DENSIDAD SECA (KN/M3)	POROSIDAD (%)	MÓDULO DE YOUNG (GPA)	RELACIÓN DE POISSON
Brecha mineralizada	Veta	80 -135 (90)	16.1	27.7	1.62	87	0.31
Monzogranítica	Caja piso y techo	80-135 (110)	14.2	26.4	1.53	98	0.23
Pizarra	Caja techo	40-130 (85)	9.4	27.6	1.85	83	0.35

Fuente: Estudio Geomecánico para Reservas – Dpto. Geomecánica MINSUR

Caracterización geomecánica del macizo rocoso

La veta fue dividida en tres dominios estructurales principales tales como: caja piso (CP), caja techo (CT), caja intermedia (CI) y veta (VT).

Tabla 0-2: Características geomecánicas por dominio Estructural

DOMINIO ESTRUCTURAL	RMR 76				
	Mínimo	Promedio	Máximo	Q'	N° DATOS
CARMEN	25	67	79	12.2	211
CI	47	65	79	10.1	26
CP	43	70	79	17.4	86
CT	25	65	79	10.3	89
VT	33	57	66	4.3	10

Fuente: Estudio Geomecánico para Reservas – Dpto. Geomecánica MINSUR

Aspectos de calidad de la masa rocosa

Según los análisis efectuados se obtuvieron las siguientes características de calidad de la masa rocosa: La resistencia compresiva de la roca intacta varía en el rango de 100 a 250 MPa, el RQD oscila en el rango de 70 % a 80%, el espaciamiento de las discontinuidades en el rango de 0.20m a 0.6m, la persistencia en el rango de 3 a 10m, y ocasionalmente de 0.06 a 0.20m.

La apertura es menor de 0.1 mm y ocasionalmente entre 1.0 mm y 5.0 mm. Las paredes de las discontinuidades presentan ligera rugosidad a lisa. El relleno está constituido mayormente por material duro (sílice) de espesor variable, con un promedio de 5.0mm. La intemperización; es sana a ligeramente intemperizada, generalmente consistente en una coloración de óxidos. Las condiciones de agua subterránea son generalmente secas, eventualmente se observa humedad cuando hay filtraciones localizadas. Con estas características, el RMR puede variar.

Cálculo de burden

Teoría de Pearse.

Fórmula modificada de Pearse.

$$B = (K \cdot D / 1000) \cdot \sqrt{P / \text{Std}}$$

Donde:

B = Burden (m)

K = Constante que depende de la carga explosiva y de la roca. Varía entre (0.7 – 1.0).

D = Diámetro de taladro (mm)

P = Presión de detonación de la carga explosiva (kg/cm²).

Std= Resistencia dinámica de la roca (kg/cm).

a) Determinación de la constante "k" en función de la calidad de la roca.

Según la relación: $K = 1.96 - 0.27 \ln(\text{RQD})$

El RQD del mineral en la Mina San Rafael varía de 70 a 80.

$$ERQD = RQD \times JSF$$

$$ERQD = 75 \times 0.9$$

$$ERQD = 67.5$$

Donde:

ERQD: Índice de calidad de roca equivalente

JSF: Factor de corrección de la resistencia al contacto

Tabla 0-3: Tabla para el cálculo de burden y espaciamento según Pearse

Calidad de roca	Factor de corrección - JSF
Fuerte	1
Medio	0.9
Debil	0.8
Muy debil	0.7

Fuente: Dpto. Perforación y Voladura MINSUR

Reemplazando en la fórmula:

$$K = 1.96 - 0.27 \ln (ERQD)$$

$$K = 1.96 - 0.27 \ln (67.5)$$

$$K = 0.847 \text{ (adimensional)...}$$

b) Determinación del esfuerzo tensivo dinámico del mineral

$$Std = 8\% \times Sc$$

Sc: Resistencia compresiva uniaxial del mineral (casiterita) = 986.92 kg/cm^2

$$Std = 8\% \times 986.92 = 78.95 \text{ kg/cm}^2 \dots$$

c) Presión de detonación del explosivo.

Explosivo utilizado Examon - P

Mediante la formula

$$PD = \frac{pe * VOD^2 * 10^{-5}}{4}$$

Dónde:

PD: Presión de detonación KBar

pe: Densidad del explosivo g/cm³

VOD: Velocidad de detonación m/s

Datos:

Densidad de explosivo = 0.84

Vel. Detonación = 2800 – 4400 m/s

Energía = 1003 KCal/kg

Reemplazando en la formula

$$PD = \frac{0.84 * 3600^2 * 10^{-5}}{4} = 27.22 \text{ KBar} = 26772.15 \text{ kg/cm}^2\dots$$

d) Burden

$$B = \frac{K * D \sqrt{P} \div Std}{1000} = \frac{0.85 * 64 * \sqrt{26772.15} \div 78.95}{1000}$$

$$B = 1.002 \text{ m} \dots$$

Para el cálculo del espaciamiento E=1.25 B

$$E = 1.25 * 1.002$$

$$E = 1.25 \text{ m} \dots$$

Con estos datos obtenidos se grafica la malla de perforación:

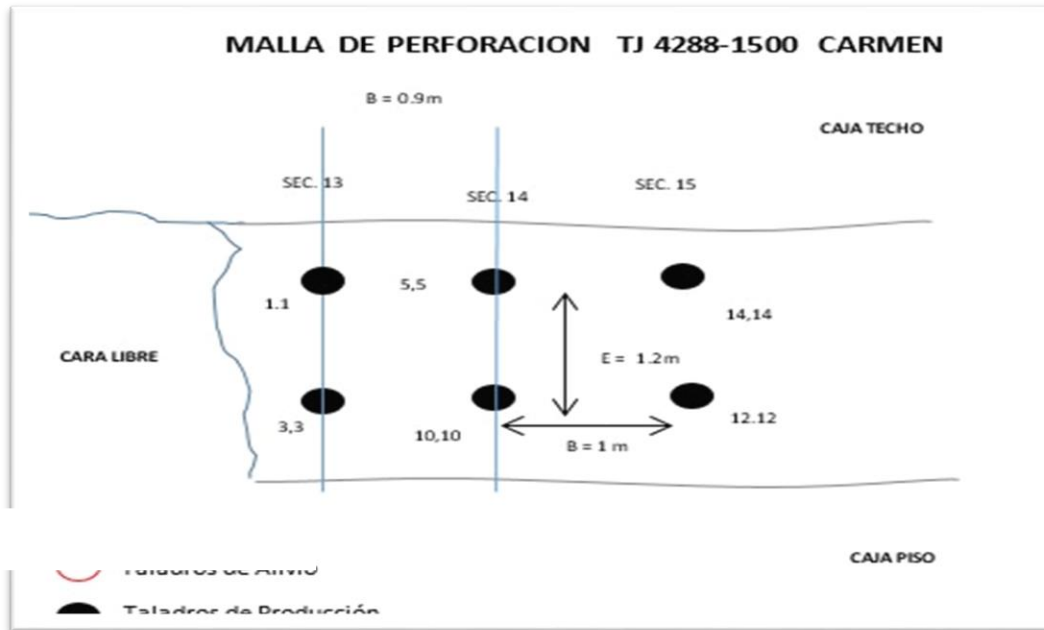


Figura 1: Malla de perforación
 Fuente: Dpto. Perforación y Voladura MINSUR

Análisis granulométrico

En el análisis granulométrico de la malla de perforación se obtuvo el valor de 5.06 pulgadas.

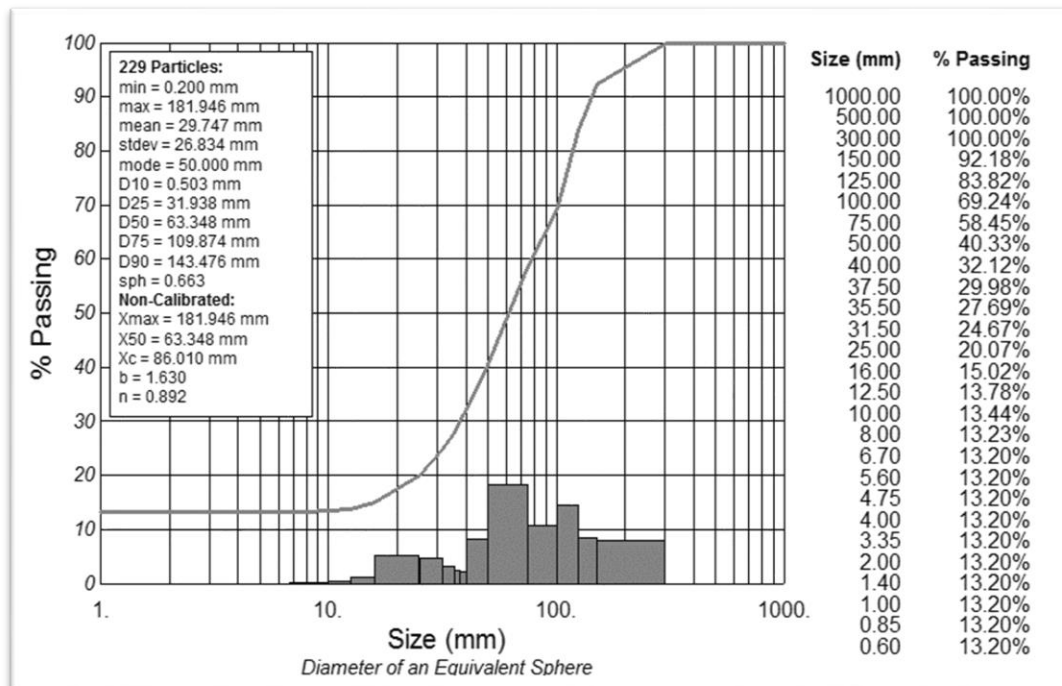


Figura 2: Análisis granulométrico mediante WIPFRAG.
 Fuente: Dpto. Perforación y Voladura MINSUR

Conclusiones

1. Mediante la teoría de Pearse se obtiene un burden de 1.002 m.
2. Con la aplicación del software Wipfrag se muestra como resultado la fragmentación 5.06 pulgadas.
3. La clasificación del macizo rocoso nos permite conocer el RMR, RQD que son necesarios para modificar malla de perforación.
4. La reducción y/o aumento del burden y espaciamiento se realiza constantemente, debido a los cambios en el macizo rocoso, presencia de fallas, geodas, etc.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiar mis pasos diariamente, permitiéndome aprender de mis errores con entereza y aplomo; a mis padres René y Faustina que con su amor, perseverancia y comprensión apoyaron a que sea consecuente con mis ideales y firme con mis decisiones

Quiero agradecer a mi hermano Ing. Abelardo Quispe Pilco, por sus sabios consejos y facilitar recursos para poder llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, a toda la plana docente todos de un gran nivel, por su constante apoyo académico y humano, ellos, han permitido que culmine esta etapa de mi vida profesional con éxito.

También deseo expresar mi más sentido agradecimiento a todas aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado y contribuido con su apoyo, comentarios, sugerencia y ayuda en el desarrollo de esta tesis.

Bibliografía

1. Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock Engineering Proceedings, Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg.
2. Calderon, M. (2015), "Optimización de las prácticas de perforación y voladura en el avance y producción de la minería de mediana escala (Unidad Minera Macdesa)".
3. Garrido, A. (2005), "Diagnóstico y Optimización de Disparos en Desarrollo horizontal Mina el Teniente".

4. Lara, O (2013). "Diseño de malla de perforación para optimizar la voladura en la Unidad Carahuacra de la Compañía Minera Volcan S.A.A".
5. López J, C. 1997. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. ETSIM. Madrid, España. 1102 pp.
6. Quispe P, A. (2019) "Caracterización geológica para seleccionar el método de explotación de la veta Esperanza en la mina Aguada – Carabaylo Lima", Universidad Nacional del Altiplano, Puno Perú.
7. Sánchez Y. (2012) Pág. N° 02, "Optimización en los Procesos de Perforación y Voladura en el Avance de Rampa en la Mina Bethzabeth – Ecuador".
8. Valenzuela, H. (2017) "Mejoramiento de las técnicas operativas en perforación y voladuras para reducir la dilución en vetas angostas; caso Tajo Mariano, Unidad Minera San Rafael – Minsur"
9. Villanueva, J. (2018). "Evaluación de parámetros de diseño de perforación y voladura en taladros largos aplicado en vetas angostas para determinar su productividad en la U.M. San Rafael, MINSUR S.A."
10. Yance E. (2013). "Estudio geomecánico en el diseño de malla de perforación del cruceo 300, nivel 16 en la Compañía Minera Casapalca S.A."