

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y**  
**METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**



**TESIS**

**FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD Y  
RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS EN TALADROS DE  
PRODUCCION, CONTRATISTA SAN MARTIN, TAJO MINA 5 EN  
LA EMPRESA MINERA SHOUGANG S.A.A.**

**PRESENTADO POR:**

Br. NOREL RUBEN VASQUEZ ZAPATA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO DE MINAS**

**ASESOR:**

Mg. ODILON CONTRERAS ARANA

**CUSCO – PERÚ**

**2026**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ODILON CONTRERAS ARANA  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: FACTORES QUE AFECTAN LA  
DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS  
EN TALADROS DE PRODUCCIÓN, CONTRATISTA SAN MARTIN,  
TAJO MINA 5 EN LA EMPRESA MINERA SHOUQANG S.A.A.

Presentado por: NOREL RUBEN VASQUEZ ZAPATA DNI N° 70457364;  
presentado por: ..... DNI N°: .....  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el  
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**  
**Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje     | Evaluación y Acciones                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Marque con una (X)                  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Del 1 al 10%   | No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.                                                                                                                                                                                                                                                               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las subsanaciones.                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/>            |
| Mayor a 31%    | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/>            |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 19 de ENERO de 2026

Odilon Contreras Arana  
Firma

Post firma ODILON CONTRERAS ARANA

Nro. de DNI 23.82.33.56

ORCID del Asesor 0000-0002-9164-1705

#### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:547392266

# Norel Ruben Vasquez Zapata

## FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS EN TALADROS DE PRODUCCION, ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547392266

Fecha de entrega

19 ene 2026, 11:48 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 ene 2026, 12:09 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS EN TALAD....pdf

Tamaño del archivo

2.5 MB

100 páginas

20.414 palabras

114.021 caracteres

# 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)
- Trabajos entregados

## Exclusiones

- N.º de fuentes excluidas
- N.º de coincidencia excluida

## Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
31 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres: Roosbelt y Esther con todo el amor que siento hacia ellos, por ser los principales autores de mis sueños, por ser mi inspiración y motivo para lograr mis metas; y a la vida.*

*Norel V.*

## AGRADECIMIENTOS

*Ante todo, a dios por protegerme y acompañarme en todo momento, a mis Padres y Hermanas por el apoyo incondicional durante toda mi formación profesional.*

*A mi alma mater, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, del cual me siento orgulloso de ser egresado.*

*A mi Asesor por su colaboración y orientación durante el desarrollo de la tesis y a mis docentes de la escuela Profesional de Ingeniería de minas por todas las enseñadas y experiencias brindadas.*

*Un agradecimiento especial a la empresa San Martín Contratistas Generales por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.*

*Norel V.*

## **PRESENTACION**

Decano de la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia, señores docentes miembros del jurado de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

En cumplimiento de lo establecido por la Universidad San Antonio Abad del Cusco, para la obtención del título universitario, me es grato presentar el trabajo de investigación titulado: “FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS EN TALADROS DE PRODUCCION, CONTRATISTA SAN MARTIN, TAJO MINA 5 EN LA EMPRESA MINERA SHOUGANG S.A.A.”, con la finalidad de conocer la importancia de estos factores, así como el aporte que esto significa para la empresa minera.

Se espera que la investigación sea el principio para futuras investigaciones y se genere un aporte que contribuya al área de perforación en minas y a los estudiantes, se presenta la investigación que se pone a su disposición.

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis titulada “FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE LAS BARRAS Y BROCAS EN TALADROS DE PRODUCCION, CONTRATISTA SAN MARTIN, TAJO MINA 5 EN LA EMPRESA MINERA SHOUGANG S.A.A.” producto de llevar a cabo un proceso de investigación.

La investigación es resultado de un conjunto de acciones realizadas, sobre la base de una planificación previa, a fin de determinar el nivel de relación entre la Optimización de la vida útil de los aceros de perforación y la influencia en los costos de perforación en la unidad Minera Shougang Hierro Perú. Para ello se ha formulado como problema de investigación, la siguiente interrogante ¿Qué factores afectan la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas en taladros de producción, en el Contratista San Martín, Tajo Mina 5 en la empresa minera Shougang Hierro Perú S.A.A.?

El objetivo de la investigación fue: Identificar los factores que afectan la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas en taladros de producción en el contratista san Martín, Tajo mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.

La hipótesis planteada fue: Con la identificación de los factores que afectan la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas en taladros de producción del tajo mina 5, se podrá optimizar el consumo de aceros y sus costos que demanda en la operación de perforación. Se identifico los principales factores que influyen en el proceso de perforación, los cuales son Pulldown, RPM, Presión de aire, La velocidad de perforación. En cuanto al consumo de barras, la barra Neuman tuvo un mayor rendimiento alcanzando el promedio de 23,372.50 y la barra Mammoth tuvo un rendimiento promedio de 21,686.33

Capítulo I: Planteamiento del problema, objetivos, justificación e hipótesis.

Capítulo II: Marco teórico sobre perforación, rocas y factores de desgaste.

Capítulo III: Descripción general de la mina, ubicación, geología y geotecnia.

Capítulo IV: Análisis del rendimiento de brocas y barras según parámetros de perforación.

Capítulo V: Evaluación de la vida útil y del costo de perforación.

## RESUMEN

Shougang Hierro Perú S.A.A. es una empresa minera de capital chino-dedicada a la explotación, procesamiento y comercialización de mineral de hierro en el Perú, desarrollando sus operaciones en el yacimiento de Marcona, región Ica. Dentro del proceso productivo del hierro, la perforación constituye la primera operación unitaria y una de las más críticas, ya que permite la fragmentación inicial del macizo rocoso y condiciona la eficiencia de las operaciones posteriores. En esta etapa, las barras y brocas cumplen un rol fundamental al ser los elementos de contacto directo entre la roca y la máquina perforadora.

La presente tesis tiene como objetivo identificar los factores que influyen en la vida útil y el rendimiento de las barras y brocas utilizadas en taladros de producción, así como evaluar su impacto en los costos de perforación. El estudio se desarrolló en el tajo 5 de la empresa Shougang Hierro Perú, donde se evidenció un desgaste acelerado del acero de perforación, generando pérdidas económicas significativas y tiempos muertos durante las operaciones mineras.

Para afrontar esta problemática, se realizó un seguimiento del consumo de acero, registrando los metros perforados, y se analizaron las condiciones geomecánicas de la roca y los parámetros operativos del equipo de perforación que influyen directamente en la durabilidad y el rendimiento de las barras y brocas empleadas en producción.

Los resultados muestran mayor eficiencia en perforación, con altos rendimientos del acero Newman y brocas Coretech, reduciendo cambios, aumentando productividad y logrando un costo de perforación de 36,66 US\$/m final.

**PALABRAS CLAVE:** Geomecánica, Parámetros de perforación, Rendimientos de barra y broca, Costo total de perforación.

## **ABSTRACT**

Shougang Hierro Perú S.A.A. is a Chinese-capital mining company engaged in the exploitation, processing, and commercialization of iron ore in Peru, with operations located at the Marcona deposit, in the Ica region. Within the iron production process, drilling constitutes the first unit operation and one of the most critical stages, as it enables the initial fragmentation of the rock mass and directly influences the efficiency of subsequent operations. At this stage, drill rods and bits play a fundamental role, as they are the elements in direct contact between the rock and the drilling machine.

The objective of this thesis is to identify the factors that influence the service life and performance of drill rods and bits used in production drilling, as well as to evaluate their impact on drilling costs. The study was conducted in pit 5 of Shougang Hierro Perú S.A.A., where accelerated wear of drilling steel was observed, resulting in significant economic losses and operational downtime.

To address this issue, a monitoring program of drilling steel consumption was carried out by recording the drilled meters, and an analysis of the rock mass geomechanical conditions and drilling equipment operational parameters was performed, as these directly affect the durability and performance of the drill rods and bits used in production.

The results show improved drilling efficiency, with high performance achieved using Newman drill steel and Coretech drill bits, reducing steel replacement times, increasing productivity, and achieving a total drilling cost of 36.66 US\$/m.

**Keywords:** Geomechanics, drilling parameters, drill rod and bit performance, total drilling cost.

## INDICE DE CONTENIDO

|                                                     |      |
|-----------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA .....                                   | ii   |
| AGRADECIMIENTOS .....                               | iii  |
| PRESENTACION.....                                   | iv   |
| INTRODUCCIÓN .....                                  | v    |
| RESUMEN .....                                       | vi   |
| ABSTRACT.....                                       | vii  |
| INDICE DE CONTENIDO .....                           | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                             | xii  |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS.....                             | xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                               | xiv  |
| CAPITULO I.....                                     | 15   |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... | 15   |
| 1.1. Planteamiento del problema.....                | 15   |
| 1.2. Formulación del problema .....                 | 16   |
| 1.2.1. Problema general .....                       | 16   |
| 1.2.2. Problemas específicos .....                  | 16   |
| 1.3. Objetivos de la investigación .....            | 17   |
| 1.3.1. Objetivo general.....                        | 17   |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                  | 17   |
| 1.4. Justificación de la investigación .....        | 17   |
| 1.5. Hipótesis de la investigación.....             | 18   |
| 1.5.1. Hipótesis general.....                       | 18   |
| 1.5.2. Hipótesis específicas .....                  | 18   |
| 1.6. Delimitación de la investigación.....          | 19   |
| 1.6.1. Delimitación temporal .....                  | 19   |
| 1.6.2. Delimitación espacial.....                   | 19   |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.7. Variables e indicadores .....                                  | 19 |
| 1.7.1. Variable Dependiente.....                                    | 19 |
| 1.7.2. Variable independiente .....                                 | 19 |
| 1.7.3. Operacionalización de variables .....                        | 19 |
| CAPITULO II.....                                                    | 20 |
| II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....                            | 20 |
| 2.1. Diseño y enfoque de la investigación .....                     | 20 |
| 2.1.1. Nivel y tipo de investigación .....                          | 20 |
| 2.1.2. Población y muestra.....                                     | 20 |
| 2.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....          | 21 |
| 2.2.1. Técnicas de recolección de datos.....                        | 21 |
| 2.2.2. Procesamiento de datos.....                                  | 21 |
| CAPITULO III:.....                                                  | 22 |
| III. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACIÓN .....                        | 22 |
| 3.1. Antecedente de la investigación.....                           | 22 |
| 3.1.1. Antecedente internacional.....                               | 22 |
| 3.1.2. Antecedente nacional .....                                   | 22 |
| 3.2. Bases teóricas.....                                            | 23 |
| 3.2.1. Minería superficial .....                                    | 23 |
| 3.2.2. Geomecánica.....                                             | 25 |
| 3.2.3. Propiedades de las rocas relacionadas a la perforación ..... | 28 |
| 3.2.4. Fundamentos de la perforación.....                           | 31 |
| 3.2.5. Variables de la perforación .....                            | 32 |
| 3.2.6. Tipos de perforadoras utilizadas en tajo abierto .....       | 36 |
| 3.2.7. Componentes de las perforadoras .....                        | 38 |
| 3.2.8. Variables de perforacion .....                               | 44 |
| 3.2.9. Mantenimiento de las perforadoras.....                       | 48 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.10. Estructura del costo total de perforación.....                                                                 | 48 |
| CAPITULO IV .....                                                                                                      | 52 |
| IV. EVALUACION DE LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE BARRAS Y<br>BROCAS EN TALADROS DE PRODUCCION EN EL TAJO MINA 5 ..... | 52 |
| 4.1. Características técnicas del tajo mina 5 .....                                                                    | 52 |
| 4.1.1. Ubicación y accesibilidad .....                                                                                 | 52 |
| 4.1.2. Geología local .....                                                                                            | 53 |
| 4.1.3. Geología económica.....                                                                                         | 54 |
| 4.2. Características geomecánicas del yacimiento .....                                                                 | 57 |
| 4.3. Diseño del tajo .....                                                                                             | 57 |
| 4.3.1. Angulo de cara de banco.....                                                                                    | 58 |
| 4.3.2. Diseño de bancos .....                                                                                          | 59 |
| 4.4. Perforación.....                                                                                                  | 60 |
| 4.4.1. Diseño de malla de perforación .....                                                                            | 61 |
| 4.4.2. Maquina perforadora utilizada.....                                                                              | 62 |
| 4.5. Identificación de factores que afectan la durabilidad y el rendimiento de barras<br>y brocas .....                | 64 |
| 4.5.1. Características geomecánicas.....                                                                               | 64 |
| 4.5.2. Factores inherentes a la maquina perforadora.....                                                               | 65 |
| 4.6. Recepción de las barras y brocas utilizadas .....                                                                 | 68 |
| 4.6.1. Duración y rendimiento de barras.....                                                                           | 68 |
| 4.6.2. Duracion y rendimiento de brocas .....                                                                          | 72 |
| 4.6.3. Fallas frecuentes en la perforación.....                                                                        | 75 |
| 4.6.4. Costo de perforación .....                                                                                      | 78 |
| CAPITULO V:.....                                                                                                       | 81 |
| V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                                                                             | 81 |
| 5.1. Evaluación de los factores que afectan la durabilidad y rendimiento.....                                          | 81 |
| 5.1.1. Evaluación de factores en tipo de roca dura mineral .....                                                       | 81 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 5.2. Evaluación de los costos de perforación ..... | 84 |
| 5.3. Discusión de resultados.....                  | 86 |
| CONCLUSIONES .....                                 | 88 |
| RECOMENDACIONES .....                              | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                 | 90 |
| ANEXOS .....                                       | 91 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Perforadora DR412i, diámetro de 11", taladros de producción. .... | 37 |
| Figura 2: Perforadora DML, diámetro de 9" taladros buffer. ....             | 37 |
| Figura 3: Perforadora Rockdrill, diámetro de 5" taladros pre-corte .....    | 38 |
| Figura 4: Barras de perforación .....                                       | 39 |
| Figura 5: Adaptador de broca .....                                          | 40 |
| Figura 6: Adaptador inferior .....                                          | 41 |
| Figura 7: Partes de una broca tricónica.....                                | 43 |
| Figura 8: Broca triconica CoreTEch de 11".....                              | 43 |
| Figura 9: Ubicación y Accesos a Mina Shougang Hierro Perú .....             | 53 |
| Figura 10: Tajo de Mina 5 .....                                             | 58 |
| Figura 11: Taludes de Mina 5 .....                                          | 59 |
| Figura 12: Perforadoras de Mina 5 .....                                     | 60 |
| Figura 13: Malla triangular .....                                           | 62 |
| Figura 14: Proyecto de perforación.....                                     | 62 |
| Figura 15: Perforadora Sandvik .....                                        | 63 |
| Figura 16: Perforadora DR412i .....                                         | 76 |
| Figura 17: Mantenimiento a la perforadora .....                             | 76 |
| Figura 18: Broca desgastada insertos periféricos.....                       | 77 |
| Figura 19: Terreno mineral de densidad de 4.7gr/gg.....                     | 77 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Abaco de Miller 1965 .....                                                  | 27 |
| Gráfico 2: Resistencias a la compresión más frecuente de los diferentes tipos de rocas | 29 |
| Gráfico 3: Efecto de empuje sobre la velocidad de penetración.....                     | 44 |
| Gráfico 4: Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad de penetración .....  | 46 |
| Gráfico 5: Rendimiento de barras Mammoth .....                                         | 69 |
| Gráfico 6: Rendimiento de barras Newman .....                                          | 70 |
| Gráfico 7: Rendimiento promedio en función al costo.....                               | 71 |
| Gráfico 8 Rendimiento promedio en función al costo .....                               | 80 |
| Gráfico 9: Valores promedio .....                                                      | 82 |
| Gráfico 10: Influencia de los factores en la velocidad de perforación.....             | 83 |
| Gráfico 11: TDC vs velocidad de perforación .....                                      | 85 |
| Gráfico 12: Columna geológica de mina Shougang Hierro Perú. ....                       | 95 |
| Gráfico 13: FLOW SHEET .....                                                           | 99 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Operacionalización de variables .....                                  | 19 |
| Tabla 2: Clasificación de dureza de roca .....                                  | 28 |
| Tabla 3: Porcentaje de contenido de cuarzo en los diferentes tipos de roca..... | 30 |
| Tabla 4: Propiedades de textura de tipos de roca.....                           | 31 |
| Tabla 5: Fuerza de empuje pull down.....                                        | 34 |
| Tabla 6: Velocidades ascensionales .....                                        | 35 |
| Tabla 7: Valores límites de empuje según tricono .....                          | 45 |
| Tabla 8: RPM requeridos por tipo de roca.....                                   | 46 |
| Tabla 9: Estimado de Reservas Minables en Toneladas Metricas .....              | 56 |
| Tabla 10: Características de la Roca Mina 5 .....                               | 57 |
| Tabla 11: Parámetros de medición.....                                           | 61 |
| Tabla 12: Parámetros por proyecto de perforación.....                           | 61 |
| Tabla 13: Características de la perforadora DR412i.....                         | 63 |
| Tabla 14: Calidad de roca de Mina 5.....                                        | 65 |
| Tabla 15: Metros perforados por equipo.....                                     | 68 |
| Tabla 16: Rendimiento de barras Mammoth .....                                   | 68 |
| Tabla 17: Rendimiento de Barras newman.....                                     | 69 |
| Tabla 18: Comparación de barras .....                                           | 70 |
| Tabla 19: Consumo de brocas enero .....                                         | 72 |
| Tabla 20: Consumo de brocas febrero .....                                       | 73 |
| Tabla 21: Consumo de brocas marzo.....                                          | 73 |
| Tabla 22: Consumo de brocas abril .....                                         | 74 |
| Tabla 23: Consumo de brocas por mes.....                                        | 74 |
| Tabla 24: Factores en roca dura - mineral .....                                 | 75 |
| Tabla 25: TDC roca dura .....                                                   | 79 |
| Tabla 26: Valores recomendados .....                                            | 81 |

## **CAPITULO I**

### **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

En la industria minera global, especialmente en operaciones de tajo abierto, la perforación es una operación fundamental que afecta significativamente la eficiencia y los costos de extracción de minerales. El desgaste de los aceros de perforación es un desafío constante debido a la dureza y abrasividad de las rocas, lo que resulta en frecuentes reemplazos y altos costos operativos. Esta situación incrementa los costos directos en la compra de aceros y también impacta la productividad debido a los tiempos de inactividad asociados con los cambios de equipo.

La Compañía Minera Shougang Hierro Perú, a través de su contratista San Martin S.A.C., enfrenta dificultades particulares en su proceso de perforación debido a que la roca mineralizada es altamente competente y abrasiva. Este contexto ha llevado a un desgaste prematuro de las brocas y barras de perforación, incrementando el consumo de aceros y generando costos adicionales significativos. Estas dificultades no solo aumentan los costos de perforación, sino que también afectan la continuidad y eficiencia de las operaciones mineras.

Se están evaluando los factores de durabilidad y rendimiento en las barras y brocas de perforación (particularmente en los triconos, que son brocas de perforación), ya que estos sufren un desgaste prematuro respecto a lo planificado en mina. Este desgaste prematuro provoca un incremento en los costos operativos y una reducción en la eficiencia de la perforación.

Además, existen dificultades relacionadas con la verticalidad de la columna de perforación de las máquinas perforadoras, debido a desvíos en el taladro causados por el tamaño del mismo. Estos desvíos pueden ser atribuibles a problemas de mantenimiento, errores operativos o condiciones geológicas adversas, lo que afecta la precisión y eficiencia de la perforación.

Para abordar estos desafíos y mejorar los factores de durabilidad y rendimiento de los aceros de perforación, se desarrolla la presente investigación. Este estudio se enfoca en identificar y analizar los principales factores que afectan la durabilidad y el rendimiento de las barras y brocas en los taladros de producción, con el objetivo de optimizar el consumo de aceros y reducir los costos asociados a la operación de perforación en el Tajo Mina 5 de la empresa minera Shougang Hierro Perú S.A.A.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

PG: ¿Qué factores afectan la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas en taladros de producción, en el Contratista San Martín, Tajo Mina 5 en la empresa minera Shougang Hierro Perú S.A.A.?

### **1.2.2. Problemas específicos**

PE1: ¿Cómo influyen los factores que intervienen durante el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.?

PE2: ¿Cómo influye el rendimiento de las barras y brocas en el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.?

PE3: ¿Cómo influye la evaluación técnico-económico en el consumo de las barras y brocas en el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general**

OG: Identificar los factores que afectan la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas en taladros de producción en el contratista san Martín, Tajo mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

OE1: Determinar los factores que influyen durante el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.

OE2: Determinar el rendimiento de las barras y brocas en el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.

OE3: Determinar la evaluación técnico-económico en el consumo de las barras y brocas en el proceso de perforación en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5 en la empresa minera Shougang S.A.A.

### **1.4. Justificación de la investigación**

La presente investigación es crucial para optimizar los procesos de perforación en la industria minera global, especialmente en tajos abiertos, donde el desgaste prematuro de aceros de perforación incrementa significativamente los costos operativos y reduce la eficiencia. En la Compañía Minera Shougang Hierro Perú, la roca altamente competente y abrasiva de la Unidad Minera Mina 5 acelera el desgaste de las brocas y barras de perforación, aumentando los costos y afectando la continuidad y eficiencia de las operaciones. Además, problemas de desalineación en las máquinas perforadoras debido a desviaciones en la verticalidad de los taladros comprometen la precisión y seguridad del proceso. Evaluar y mejorar los factores que afectan la durabilidad y rendimiento de los aceros de perforación permitirá a la empresa disminuir los costos operativos y mejorar su competitividad. Esta investigación no solo beneficiará a la Unidad Minera Mina 5, sino que también proporcionará un modelo de mejores prácticas aplicable a otras operaciones

mineras similares, contribuyendo así a la optimización de procesos de perforación en la industria minera global.

Durante la etapa de explotación de una operación minera, el inicio de todo este proceso es la perforación, que se manifiestan a través de equipos de perforación cuyo principal mecanismo es triturar y cortar las formaciones del subsuelo son los aceros de perforación, principalmente la broca.

El avance tecnológico en estas últimas décadas ha sido crucial para un buen proceso de minado, por lo que el objeto de estudio es el consumo de aceros de perforación ya que representa un gasto significativo en toda operación minera. El consumo de aceros de perforación y en especial de brocas tricónicas, significa un elevado costo de operación por lo tanto es necesario realizar estudios de rendimientos que contribuyan a la mejora de toma de decisiones. La duración de los aceros de perforación desde el punto de vista práctico no solo se ve reflejada por el tipo de terreno a perforar, sino que también por la maniobrabilidad que tenga el operador y la capacidad de reacción frente a los problemas que se presentan durante el proceso de perforación. Por tal motivo se realizará un estudio sobre la durabilidad y rendimientos de los aceros barra y broca, en un periodo de 4 meses (enero, febrero, marzo y abril).

Se trabajara con la marca Coretech y Newman para saber si son eficientes en el tipo de roca dura que se tiene en el Tajo 5, respetando la ficha técnica de las marcas.

## **1.5. Hipótesis de la investigación**

### **1.5.1. Hipótesis general**

HG: Con la identificación de los factores condiciones geomecánicas de la roca y los parámetros operativos del taladro influyen significativamente en la durabilidad y rendimiento de las barras y brocas utilizadas en taladros de producción del tajo mina 5, se optimiza el consumo de aceros y sus costos que demanda en la operación de perforación.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

HE1: Mediante el análisis de la identificación de los factores que intervienen en el procedimiento de perforación, podremos valorar el rendimiento de los aceros.

HE2: La investigación de los rendimientos de barras y brocas según las marcas nos permitirá reducir las deficiencias y mejorar en la toma de decisiones.

HE3: Al realizar un análisis de la evaluación técnico-económica del consumo de brocas, será posible examinar cómo estos aspectos se reflejan en los costos asociados a la perforación.

## 1.6. Delimitación de la investigación

### 1.6.1. Delimitación temporal

En un periodo de 4 meses (enero, febrero, marzo y abril del 2023)

### 1.6.2. Delimitación espacial

Se realiza en Mina Tajo 5, en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

## 1.7. Variables e indicadores

### 1.7.1. Variable Dependiente

- Vida útil y rendimientos de barras y brocas.

### 1.7.2. Variable independiente

- Factores

### 1.7.3. Operacionalización de variables

*Tabla 1: Operacionalización de variables*

| Variables                                                              | Dimensiones                                                                                                                                                     | Indicadores                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Independiente:</b><br><br>Factores                                  | <b>-Parámetros Geomecánicas</b><br>(tipo de roca)<br><br><b>-Parámetros Operativos de Perforación:</b><br><br>Pulldown<br><br>RPM<br><br>Evacuación de detritus | Roca de dureza dura a muy dura (MPa)<br><br>Fuerza descendente aplicada a la broca (Lb)<br><br>Revolución por minuto broca<br><br>Eficiencia de remoción de detritos (m <sup>3</sup> /min) |
| <b>Dependiente:</b><br><br>Vida útil y rendimiento de barras y brocas. | Ficha técnica de los aceros                                                                                                                                     | Metros Perforados m/perf.                                                                                                                                                                  |

Fuente: Propio

## **CAPITULO II**

### **II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1. Diseño y enfoque de la investigación**

La investigación es de tipo explicativo y cuantitativo ya que explica las causas que originan el desgaste prematuro de las brocas de perforación y se recopila los datos de campo. (Hernandez, 2016).

##### **2.1.1. Nivel y tipo de investigación**

El nivel de la presente investigación es la del análisis del tipo descriptivo - evaluativo, ya que se describirán y explicarán las características y propiedades de los conceptos de las variables. (Hernandez, 2016).

##### **2.1.2. Población y muestra**

###### **2.1.2.1. Población**

Está conformado por las 11 perforadoras de la contratista San Martin S.A.C. en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, Mina 5.

### **2.1.2.2. Muestra**

Está conformado por las barras y brocas de 2 perforadoras marca Sandvik modelo DR412i

#### **2.1.2.2.1. Tipo de muestra**

La muestra que se utiliza es no probabilística, porque los datos obtenidos para la investigación se han generado a criterio del investigador, según la recopilación de los datos e instrumentos utilizados.

### **2.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La recolección de datos se realiza en campo en la misma malla de perforación mediante la técnica de observación, recolección y procesamiento de datos.

La recolección de datos se realiza en hoja de cálculo predeterminada para su respectivo almacenamiento, procesamiento y análisis.

#### **2.2.1. Técnicas de recolección de datos**

Para la recolección de datos se usará

Los reportes de perforación de cada perforadora, planos, cámaras fotográficas, softwares y herramientas de gestión de Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mina 5.

#### **2.2.2. Procesamiento de datos**

Para el procesamiento de datos se usará hojas de cálculo de Excel, mediante tablas dinámicas y filtros y gráficos se procesó los datos para el desarrollo y análisis de datos.

## **CAPITULO III:**

### **III. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Antecedente de la investigación**

##### **3.1.1. Antecedente internacional**

**Mayoral Fernandez Ruben (2012)** “*Optimización técnico – económica de perforación de barrenos en terrenos homogéneos. Búsqueda de leyes de desgaste para bocas de perforación.*” Obteniendo como conclusión. De entre los diferentes elementos que conforman la tecnología de perforación, queda probado que la boca de perforación es, de entre aquellas variables sobre las que se puede influir durante la operación (y que pueden ser investigadas desde un punto de vista técnico), la que mayor influencia tiene sobre la reducción de coste y el aumento del rendimiento operativo, que se traduce en un aumento de velocidad de penetración durante la perforación. La elección de los diseños de boca de perforación adecuados para el macizo objeto del trabajo minero, pasa por el estudio del desgaste de la misma. Por ello se deduce que es también necesario investigar el desgaste en perforación

##### **3.1.2. Antecedente nacional**

**Wilson Umasi, Carlos** (Universidad Nacional San Agustín de Arequipa) (2013) en su investigación “*Estudio de comparación entre rendimientos en brocas de 12 ¼” en*

*yacimientos skarn a tajo abierto para selección óptima*". El rendimiento de brocas de marca Sandvick tuvo una mayor duración respecto a las demás brocas como son Atlas copco y Varel. También se observó que las marcas de brocas Sandvik y Atlas Copco, en cuanto a costos totales de perforación resultan económicamente óptimas US\$ 5,9 y 5,8 respectivamente

**Aparco Huillcas, Adrián** (Universidad Nacional de Huancavelica) (2019) en su investigación "*Optimización de la vida útil de los aceros de perforación para la reducción de costos en Mina san Vicente – Cia. San Ignacio de Morococha S.A.A. año 2018*". Llegando a la conclusión. Con el cuidado, uso adecuado y afilado de brocas oportunamente se optimizo la vida útil de las brocas de perforación de 45 mm obteniendo una mejora 35% de su vida útil respecto al hallado, logrando un incremento de 1124.15 pies perforados/broca. Se logró determinar el que una mala evaluación del macizo rocoso influye en un deficiente rendimiento en la perforación y con ello el desgaste prematuro de los aceros de perforación.

**Chirinos Andía, Alexis Martín** (Universidad Nacional San Agustín de Arequipa) (2015) "*Control de aceros de perforación, factores que influyen la vida útil, su relación con el paralelismo y profundidad en el proyecto de expansión k-115 JCC contratistas generales s.a. Sociedad Minera Cerro Verde*". La relación entre el paralelismo y la desviación de los taladros influyen directamente sobre el resultado de una voladura, sobre todo cuando la profundidad es mayor para cumplir con las metas programadas sin que el área de perforación se vea perjudicada por tiempos improductivos ocasionados por equipos con baja disponibilidad operativa. Es muy complicado llevar un control preciso cuando se trata de aceros de perforación. Hay muchas variables que no se pueden controlar, pero que sí se pueden identificar para tener las herramientas de solución a la mano y así la producción no pare, sobre todo cuando por proceso constructivo el trabajo es concatenado.

### **3.2. Bases teóricas**

#### **3.2.1. Minería superficial**

Según Herrera Herbert. Juan (2018). La minería a cielo abierto o tajo abierto es toda excavación que se realiza sobre la superficie, se caracteriza por el movimiento de grandes volúmenes de material, durante la etapa de desbroce y explotación.

### ***3.2.1.1. Diseño de tajo***

Según Camus (2002). El diseño de una mina a tajo abierto, es una de las actividades más importantes en el estudio técnico económico de un proyecto minero, pues no solo nos proporcionará las reservas económicas a explotar, sino la forma de la mina al final de su vida en cada banco de explotación, la pendiente de los taludes en diferentes niveles, el tonelaje de material estéril a extraer, la ubicación del tonelaje y ley que suministrará la mayor rentabilidad.

#### ***3.2.1.1.1. Diseño de banco***

Según Camus (2002). La función principal de los bancos es proporcionar un entorno seguro para el personal y el equipo que debe trabajar cerca a la cara del talud. En consecuencia, deben satisfacer las necesidades de:

- Confiabilidad; porque se requiere que las caras del banco y crestas de sean estables. Las variables primarias que controlan la estabilidad de las caras y crestas del banco son la geometría de las juntas y la resistencia al corte de las mismas.
- La seguridad; porque se requiere anchos de banco suficientes para detener y mitigar el peligro de las rocas y contener cualquier derrame de los bancos anteriores.
- Acceso a lo largo de los bancos para los operadores implicados en actividades tales como el monitoreo de talud y la limpieza de la roca y el vertido.

#### ***3.2.1.1.2. Partes de un banco***

Según Camus (2002). Las partes de un banco en minería son las siguientes:

- La altura del banco, que es la altura vertical entre los bancos de enganche. Cuando los bancos se apilan esto será un múltiplo de la altura del banco de trabajo.
- El ancho del banco
- El ángulo de la cara del banco

#### ***3.2.1.1.3. Malla de perforación***

Según Camus (2002). También denominados parámetros para la voladura, son datos empleados en el cálculo y diseño de taladros en función al burden y el espaciamiento, como los correspondientes a las características físicas de la roca: densidad, dureza, grado de fisuramiento, coeficientes de resistencia a deformación y rotura, etc.; y otros son

variables, es decir que podemos modificarlos a voluntad, de acuerdo a las necesidades reales del trabajo y condiciones del terreno.

#### **A.) Burden**

También denominada piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura. Se considera el parámetro más determinante de la voladura. Depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere conseguir. Si el burden es excesivo, la explosión del taladro encontrará mucha resistencia para romper adecuadamente al cuerpo de la roca, los gases generados tenderán a soplarse y a craterizar la boca del taladro. Por el contrario, si es reducido, habrá exceso de energía, la misma que se traducirá en fuerte proyección de fragmentos de roca y vibraciones.

#### **B.) Espaciamiento**

Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se calcula en relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros. Al igual que con el burden, espaciamientos muy pequeños producen exceso de trituración y caracterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. Por otro lado, espaciamientos excesivos producen fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular.

#### **3.2.2. Geomecánica**

Según Ramírez Oyanguren (2004). Numerosos sistemas de clasificación de macizos rocosos existen hoy en día; sin embargo, seis de ellos deben ser mencionados, ya que son contribuciones importantes en el tema, siendo estos los propuestos por Terzaghi (1946), Lauffer (1988), Deere (1988), Wickham et al. (1972), Bieniawski (1979) y Barton, Lien y Lunde (1974). Actualmente, el sistema RMR y el sistema Q 14 son las dos clasificaciones de masas rocosas más utilizadas en la ingeniería de rocas en todo el mundo

(Bieniawski, 1993), siendo estos dos sistemas la base para el desarrollo de la presente investigación.

### **3.2.2.1. Clasificación geomecánica de rocas**

#### **3.2.2.1.1. Rock mass rating (RMR)**

Este sistema fue presentado por el profesor Bieniawski en 1973, y actualizado en 1989. Este sistema clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, valorando seis parámetros, a saber: i) la resistencia a la compresión uniaxial; ii) RQD; iii) espaciamiento de las discontinuidades; iv) condición de las discontinuidades (apertura, relleno, meteorización, persistencia y rugosidad); v) orientación de las discontinuidades, y vi) presencia de agua (Celada, Tardáguila, Rodríguez, Varona y Bieniawski, 2014).

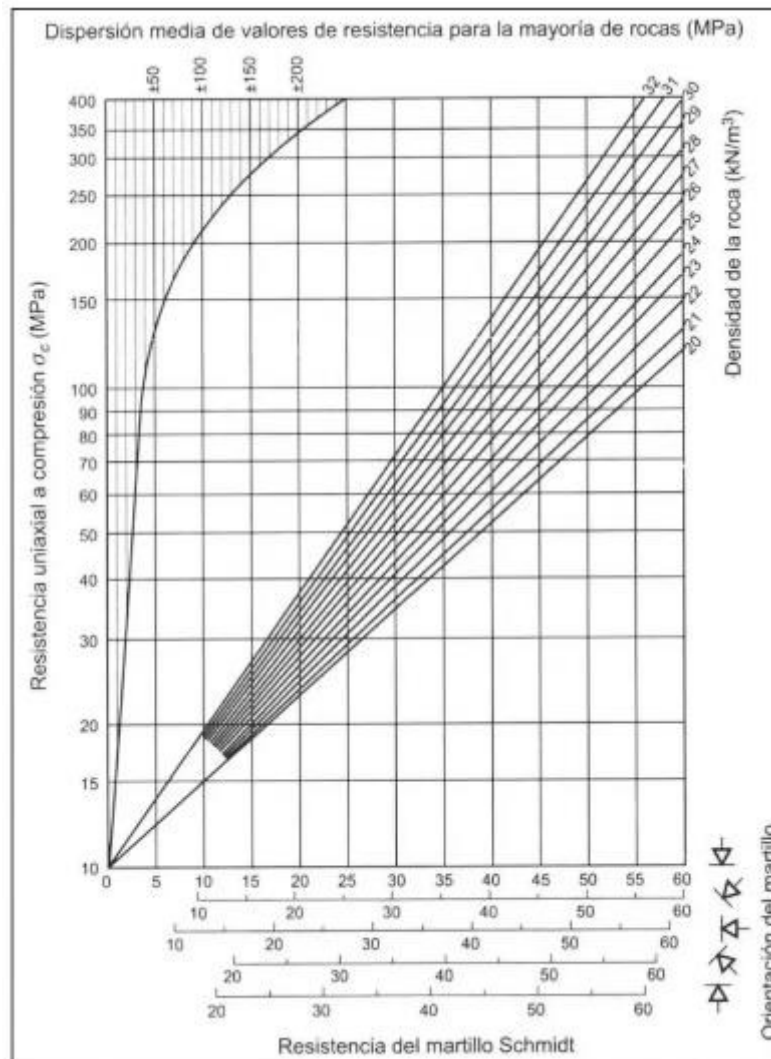
#### **3.2.2.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)**

Parámetro que permite caracterizar y clasificar la matriz rocosa. La resistencia determina la competencia de la roca para mantener unido todos sus componentes y depende principalmente de la composición mineralógica de la roca y grado de alteración (Rodríguez, 2007). Esta se puede obtener por criterios de campo (ISRM, 1978), por ensayos de resistencia en laboratorio, o por correlaciones con el Martillo Schmidt. Para este trabajo se usaron la primera y la última, debido a que no se contó con presupuesto para los ensayos de laboratorio.

#### **3.2.2.1.3. Martillo de schmidt Esclerómetro**

Según Lozano (2019). El Martillo de Schmidt o esclerómetro es un instrumento diseñado para realizar ensayos de dureza, siendo éste un método no destructivo [...] Aunque en un principio se creó para 1 Todas las traducciones de las citas de los textos en inglés son de nuestra autoría. 15 estimar la resistencia a la compresión simple del concreto, el martillo se ha modificado convenientemente para dar lugar a nuevos modelos, algunos de los cuales resultan apropiados para estimar la compresión simple en roca, ya que por su tamaño y la manejabilidad del aparato puede aplicarse sobre la matriz de la roca y sobre las caras de las discontinuidades. Por medio de éste, se mide la resistencia al rebote de la superficie de la roca, dato utilizado para hallar la resistencia a la compresión uniaxial, correlacionándolo mediante el gráfico de Miller (1965) que contempla la densidad de la muestra y la orientación del martillo respecto al plano ensayado.

Gráfico 1: Abaco de Miller 1965



Fuente: Miller 1965

#### 3.2.2.1.4. *RQD (Índice de designación de calidad de la roca)*

Este método fue desarrollado por Deere entre 1963 y 1967 para cuantificar la calidad del macizo rocoso con respecto a núcleos de perforación. En dichos núcleos debe tomarse una sección de 100 cm donde se medirá el porcentaje de piezas núcleo intacto mayores a 10 cm de longitud, que se suman y se dividen por la longitud total del núcleo. En adición, se debe tener en cuenta que las piezas de núcleo que no estén de forma sólida o tengan longitudes menores a 10 cm no deben contarse; por otro lado, el diámetro del núcleo debe ser preferiblemente de 54,7 mm. Este método puede ser utilizado siempre y cuando la perforación sea lo suficientemente cuidadosa para que no cause fracturas en el núcleo por sí sola (Bieniawski, 1989).

### 3.2.3. Propiedades de las rocas relacionadas a la perforación

#### 3.2.3.1. Dureza

Según López Jimeno (2019). Se entiende por dureza a la resistencia de una capa superficial a la penetración en ella de otro cuerpo más duro.

La dureza de las rocas es el principal tipo de resistencia a superar durante la perforación, pues cuando se logra la penetración del útil el resto de las acciones se desarrollan más fácilmente.

*Tabla 2: Clasificación de dureza de roca*

| CLASIFICACION | DUREZA MOHS | RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa) |
|---------------|-------------|-----------------------------------|
| Muy dura      | +7          | +200                              |
| Dura          | 6-7         | 120-200                           |
| Medio dura    | 4.5-6       | 60-120                            |
| Medio blanda  | 3-4.5       | 30-60                             |
| Blanda        | 2-3         | 10-30                             |
| Muy blanda    | 1-2         | -10                               |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

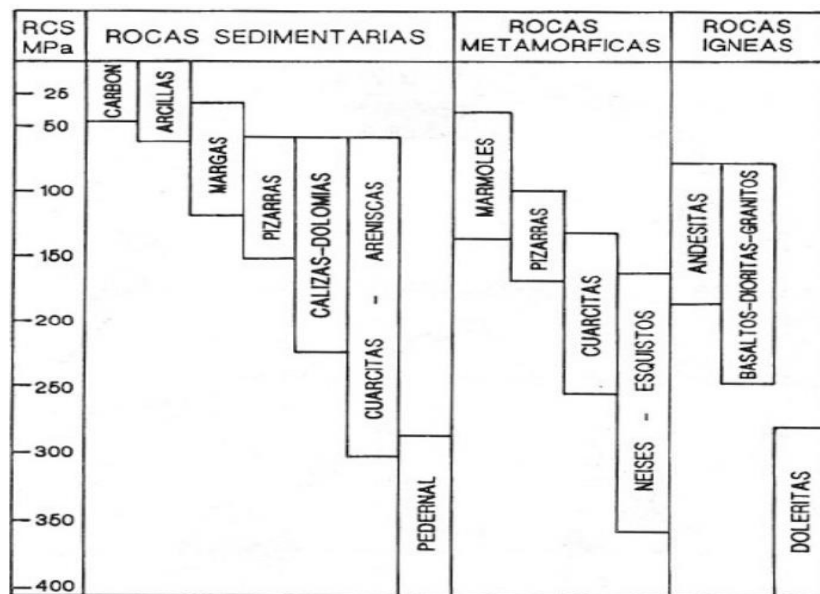
#### 3.2.3.2. Resistencia

Según López Jimeno (2019). Se llama resistencia mecánica de una roca a la propiedad de oponerse a su destrucción bajo una carga exterior, estática o dinámica.

Las rocas oponen una resistencia máxima a la compresión: comúnmente, la resistencia a la tracción no pasa de un 10 a un 15 % de la resistencia a la compresión, eso se debe a la fragilidad de las rocas, a la gran cantidad de defectos locales e irregularidades que presentan y a la pequeña cohesión entre las partículas constituyentes.

La resistencia de las rocas depende fundamentalmente de su composición mineralógica. Entre los minerales integrantes de las rocas el cuarzo es el más sólido, su resistencia supera los 500 MPa, mientras que las de silicatos ferromagnésicos y los aluminosilicatos varían de 200 500 MPa, y de la calcita de 10 a 20 MPa. Por eso, conforme es mayor el contenido de cuarzo, por lo general la resistencia aumenta.

Gráfico 2: Resistencias a la compresión más frecuente de los diferentes tipos de rocas



Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

### 3.2.3.3. Elasticidad

Según López Jimeno (2019). La mayoría de los minerales constituyentes de las rocas tienen un comportamiento elástico – frágil, que obedece a la Ley de Hooke, y se destruyen cuando las tensiones superan el límite de elasticidad.

Según el carácter de deformación, en función de las tensiones provocadas para cargas estáticas, se consideran tres grupos de rocas:

- Las elasto-frágiles o que obedecen a la ley de Hooke
- Las plástico-frágiles, a cuya destrucción precede la deformación plástica
- Las altamente plásticas o muy porosas, cuya deformación elástica es insignificante.

### 3.2.3.4. Plasticidad

Según López Jimeno (2019). En algunas rocas, a la destrucción le precede la deformación plástica. Esta comienza en cuanto las tensiones de la roca superan el límite de elasticidad. En el caso de un cuerpo idealmente plástico tal deformación se desarrollará con una tensión invariable. Las rocas reales se deforman consolidándose al mismo tiempo: para el aumento de la deformación plástica es necesario incrementar el esfuerzo.

### 3.2.3.5. Abrasividad

Según López Jimeno (2019). La abrasividad es la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro, en el proceso de rozamiento durante el movimiento.

Los factores que elevan la capacidad abrasiva de las rocas son las siguientes:

- La dureza de los granos constituyentes de la roca.
- La forma de los granos. Los más angulosos son más abrasivos que los redondeados.
- El tamaño de los granos
- La porosidad de la roca
- La heterogeneidad

*Tabla 3: Porcentaje de contenido de cuarzo en los diferentes tipos de roca*

| TIPO DE ROCA | CONTENIDO<br>EN CUARZO<br>(%) | TIPO DE ROCA       | CONTENIDO<br>EN CUARZO<br>(%) |
|--------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Anfibolita   | 0 - 5                         | Mica neis          | 0 - 30                        |
| Anortosita   | 0                             | Mica esquisto      | 15 - 35                       |
| Diabasa      | 0 - 5                         | Norita             | 0                             |
| Diorita      | 10 - 20                       | Pegmatita          | 15 - 30                       |
| Gabro        | 0                             | Filita             | 10 - 25                       |
| Neis         | 15 - 50                       | Cuarcita           | 60 - 100                      |
| Granito      | 20 - 35                       | Arenisca           | 25 - 90                       |
| Grauvaca     | 10 - 25                       | Pizarra            | 10 - 35                       |
| Caliza       | 0 - 5                         | Pizarra grano fino | 0 - 20                        |
| Mármol       | 0                             | Taconita           | 0 - 10                        |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

### 3.2.3.6. Textura

Según López Jimeno (2019). La textura de una roca se refiere a la estructura de los granos de minerales constituyentes de esta. Se manifiesta a través del tamaño de los granos, la forma, la porosidad, etc. Todos estos aspectos tienen una influencia significativa en el rendimiento de la perforación.

Como los granos tienen forma lenticular, como en un esquisto, la perforación es más difícil que cuando son redondos, como en una arenisca.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de los diferentes tipos de roca.

Tabla 4: Propiedades de textura de tipos de roca

| TIPO DE ROCA        |                    | PESO ESPECÍFICO (t/m <sup>3</sup> ) | TAMAÑO DE GRANO (mm) | FACTOR DE ESPONJAMIENTO | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa) |
|---------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ígneas</b>       | Intrusiva          | Diorita                             | 2,55-2,85            | 1,5                     | 170-300                           |
|                     |                    | Gabro                               | 2,85-3,2             | 1,6                     | 260-350                           |
|                     |                    | Granito                             | 2,7                  | 1,6                     | 200-350                           |
|                     | Extrusiva          | Andesita                            | 2,7                  | 1,6                     | 300-400                           |
|                     |                    | Basalto                             | 2,8                  | 1,5                     | 250-400                           |
|                     |                    | Riolita                             | 2,7                  | 1,5                     | 120                               |
|                     |                    | Traquita                            | 2,7                  | 1,5                     | 330                               |
| <b>Sedimentaria</b> | Conglomerado       | Arenisca                            | 2,6                  | 1,5                     | 140                               |
|                     |                    | Pizarra de grano fino               | 2,5                  | 1,5                     | 160-255                           |
|                     |                    | Caliza                              | 2,7                  | 1,35                    | 70                                |
|                     |                    | Dolomita                            | 2,6                  | 1,55                    | 120                               |
|                     |                    |                                     | 2,7                  | 1,6                     | 150                               |
|                     | <b>Metamórfica</b> | Neis                                | 2                    | 1,5                     | 140-300                           |
|                     |                    | Mármol                              | 0,1-2                | 1,6                     | 100-200                           |
|                     |                    | Cuarcita                            | 0,1-2                | 1,55                    | 160-220                           |
|                     |                    | Esquisto                            | 0,1-1                | 1,6                     | 60-400                            |
|                     |                    | Serpentina                          | —                    | 1,4                     | 30-150                            |
|                     |                    | Pizarra                             | 0,1                  | 1,5                     | 150                               |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

### 3.2.3.7. Estructura

Según López Jimeno (2019). Las propiedades estructurales de los macizos rocosos, tales como esquistosidad, planos de estratificación, juntas, diaclasas y fallas, así como el rumbo y el buzamiento de estas afectan a la linealidad de los barrenos, a los rendimientos de perforación y a la estabilidad de las paredes de los taladros.

### 3.2.4. Fundamentos de la perforación

Según López Jimeno (2019). La perforación de rocas dentro del campo de la minería, es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir agujeros con la distribución y geometría adecuada dentro del macizo rocoso mediante maquina perforadora asignada para este fin; donde posteriormente se cargara de explosivos y accesorios detonadores.

#### 3.2.4.1. Perforación roto percutiva

Según López Jimeno (2019). Son los más utilizados en casi todos los tipos de rocas, tanto si el martillo se sitúa en la cabeza o en el fondo del barreno. La principal característica de este tipo de perforadoras es que a medida que da cierto giro, también va acompañado de una energía de impacto o percusión.

#### **3.2.4.2. Perforación rotativa**

Según López Jimeno (2019). El principio utilizado por las perforadoras rotativas consiste en aplicar energía a la roca haciendo rotar una broca que destroza conjuntamente con la acción de una gran fuerza de empuje. Los diámetros habituales de barreno conseguidos con este tipo de perforadoras oscilan entre 50 y 311 mm, estando los mayores diámetros especialmente indicados para los grandes volúmenes de excavación.

Este sistema consta de una fuente de energía, una columna de barras o tubos individuales o conectados en serie, que transmiten el peso, la rotación y el aire de barrido a una boca con dientes de acero o de insertos de carburo de tungsteno que deben fragmentar la roca. Este tipo de perforación se usa principalmente para taladros de producción.

#### **3.2.4.3. Columna de perforación**

Según López Jimeno (2019). La columna de perforación conecta los componentes de superficie del equipo de perforación con el arreglo de fondo de pozo y el barreno, tanto para bombear el fluido de la perforación al barreno como para poder subir, bajar y hacer rotar el arreglo de fondo de pozo y al barreno.

La columna de perforación está conformada por el amortiguador (shock absorber), el adaptador superior (top sub), barra de perforación (drill pipe), adaptador inferior (bit sub), tricono.

### **3.2.5. Variables de la perforación**

#### **3.2.5.1. Velocidad de perforación**

Según López Jimeno (2019). La velocidad de perforación depende de muchos factores externos: características geológicas, propiedades físicas de las rocas, distribución de tensiones y estructura interna. Esto hace que la determinación de velocidad de perforación durante el desarrollo de un proyecto sea una tarea difícil para el ingeniero proyectista, pero necesaria ya que la decisión que se tome va a incidir decisivamente en el resto de las operaciones.

Una forma instantánea de hallar la velocidad de penetración es en base a la fórmula del movimiento en un espacio o distancia ejercido en un tiempo dado que es la siguiente expresión:

$$V_P = \frac{R_T}{H_E}$$

Donde:

Vp: Velocidad de penetración (metros/hora)

Rt: Recorrido del tricono (metros)

He: Horas efectivas perforadas

Según López Jimeno (2019). Sostiene que una vez determinada la velocidad de penetración, es preciso estimar cual será la velocidad media resultante al incluir los tiempos muertos como izaje y descenso de la columna rotativa, levantamiento y nivelación del equipo con las gatas hidráulicas, desempate y empalme de barras o el traslado de punto a punto del equipo de perforación. Además, esta velocidad media está presente en el cálculo del coste de perforación por metro perforado o TDC (Total Drilling Cost).

$$VM = 2 * VP^{0.65}$$

Donde:

VM: Velocidad media de perforación m/h

VP: Velocidad de penetración m/h

### **3.2.5.2. Pull down**

Según López Jimeno (2019). Para obtener una buena velocidad de penetración en la roca, es preciso un determinado empuje que depende tanto de la resistencia de la roca como el diámetro del barreno que se pretende perforar. Como el peso de las barras no es suficiente para obtener la carga precisa, se hace necesario aplicar fuerzas adicionales que suelen transmitirse casi exclusivamente a través de energía hidráulica.

Existen básicamente cuatro sistemas: cremallera y piñón directo, cadena directa, cremallera y piñón con cadena, sistema de empuje por cilindro hidráulico.

Estos mecanismos de empuje permiten, además de suministrar un esfuerzo de empuje perfectamente controlado, izar las barras que constituyen la sarta de perforación.

El peso de todo el conjunto de la maquina actúa como reacción contra el empuje aplicado a la boca, de donde se deduce que el peso de la perforadora debe ser superior y normalmente el doble de la carga máxima que se pretende conseguir.

Tabla 5: Fuerza de empuje (pull down)

| Empuje Insuficiente                                                   | Empuje Excesivo                                     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Reduce velocidad de penetración                                       | Disminuye la velocidad de perforación               |
| Mayor desgaste de varillas y manguitos                                | Dificulta desenroscado del varillaje                |
| Aumento la pérdida de apriete del varillaje y calentamiento del mismo | Aumenta desgaste de bocas y desviación de los pozos |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

### 3.2.5.3. Sistema de evacuación de detritos

Según López Jimeno (2019). El aire comprimido cumple las siguientes funciones:

- Enfriar y lubricar los cojinetes del tricono
- Limpiar el fondo del barreno
- Elevar el detrito con una velocidad ascensional adecuada

Según López Jimeno (2019). El aire circula por un tubo desde el compresor al mástil y desde este, por manguera flexible protegida, a la cabeza de rotación, de donde pasa al interior de la barra de perforación que lo conduce hasta la boca, saliendo entre los conos para producir la remoción del detritus elevándolo hasta la superficie. Es necesario evacuar bien el detritus ya que una mala evacuación produciría remolienda, la falta de aire produce un desgaste de energía innecesario, una menor velocidad de penetración y un mayor desgaste de la broca. Por el contrario, si la velocidad de evacuación es mayor produce un mayor desgaste en el centralizador y en las barras de perforación.

$$Va = 9.55 * \frac{\partial_r}{\partial_r + 1} * dp^{0.6}$$

Donde:

Va: Velocidad ascensional (m/s)

$\partial_r$ : Densidad de la Roca (g/cm<sup>3</sup>)

dp: Diámetro de las partículas (mm)

#### 3.2.5.4. Caudal de aire

Según López Jimeno (2019). Este término se utiliza para referirse a la velocidad con la que el material perforado (detritus) es evacuado del pozo mediante el aire inyectado, al incrementar la velocidad hace que el detritus desgaste prematuramente los aceros de perforación y el usar una velocidad menor provoca remolienda en el tricono por que el aire no es capaz de evacuar el 100% del detritus, quedando partículas remanentes y produciendo desgaste y en algunos casos atrapamiento de las barras. Los dos factores que influyen directamente en la velocidad de barrido es la capacidad del compresor y del espacio anular.

Capacidad del compresor, Recordemos que se debe utilizar el valor real, descontando del valor nominal del compresor todos los factores que influyen en el rendimiento del compresor.

El espacio anular, es la diferencia de espacio entre la pared del pozo y la barra, es decir la diferencia entre el tricono y las barras. El caudal de aire necesario se calcula mediante la expresión:

$$Qa = Ab * Va = \frac{D^2 - d^2}{1.27}$$

Donde:

Ab: Área de la corona circular entre la pared del barreno m<sup>2</sup>

Qa: Caudal de aire necesario m<sup>3</sup>/min

Va: Velocidad ascensional m/min

D: Diámetro del barreno m

d: Diámetro de la barra m

Las velocidades ascensionales recomendadas, en función del tipo de roca, son las siguientes:

Tabla 6: Velocidades ascensionales

| TIPO DE ROCA | VELOCIDAD MINIMA |            | VELOCIDAD MAXIMA |            |
|--------------|------------------|------------|------------------|------------|
|              | (m/min)          | (pies/min) | (m/min)          | (pies/min) |
| Blanda       | 1.200            | 4.000      | 1.800            | 6.000      |
| Media        | 1.500            | 5.000      | 2.100            | 7.000      |
| Dura         | 1.800            | 6.000      | 2.400            | 8.000      |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

Consideraciones a tener en cuenta en la velocidad de barrido:

- La Velocidad de Barrido deberá ser de 5000 - 7000 ft/min para material seco y ligero.
- La Velocidad de Barrido deberá ser de 7000 - 9000 ft/min para material húmedo y pesado. El agua hace que las partículas se junten, haciéndose más grandes y pesadas al momento de ser barridas.

### **3.2.6. Tipos de perforadoras utilizadas en tajo abierto**

Según López Jimeno (2019). En un entorno en el que la tendencia hacia la perforación inteligente sigue ganando terreno, el equipo de perforación rotativa Sandvik DR412i, equipado con la arquitectura de automatización de perforación de superficie escalable, introduce nuevos niveles de precisión, productividad, eficiencia y seguridad en las operaciones mineras a cielo abierto.

El DR412i, que forma parte de la gama Sandvik i-Series de equipos de perforación de superficie, se diseñó en respuesta a la tendencia de la industria minera hacia la perforación inteligente. Incorpora la arquitectura de automatización de perforación de superficie escalable de Sandvik, que permite una ruta personalizada hacia el nivel de automatización que cada cliente necesita, cuando lo necesita.

*Figura 1: Perforadora DR412i, diámetro de 11", taladros de producción.*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 2: Perforadora DML, diametro de 9" taladros buffer.*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 3: Perforadora Rockdrill, diametro de 5" taladros pre-corte*



Fuente: Elaboración propia

### **3.2.7. Componentes de las perforadoras**

#### **3.2.7.1. Barras**

(Atlas Copco, 2017) Inmediatamente debajo de los adaptadores superiores se ubican las barras de perforación, se pueden definir como elementos de extensión y de unión que transfieren la energía de rotación y empuje desde el cabezal de rotación a la herramienta de corte o tricono de perforación conduciendo internamente el aire necesario para generar la evacuación del material cortado desde el fondo de la perforación a la superficie.

Las longitudes, los diámetros, los hilos y sus diseños obedecen exclusivamente al tipo de maquina en que serán usadas. A excepción de algún accesorio especial, no hay otro elemento en la columna de perforación que esté sometido a condiciones de trabajo tan extremas y severas como las barras de perforación. Por tales motivos para la confección de esta vital herramienta de perforación se deben combinar la experiencia de los ingenieros de diseño con la total cooperación de los usuarios en terreno para conseguir el máximo de rendimiento de estos elementos beneficiándose al extender su vida útil. Cada barra de perforación tiene una identificación única e irrepetible para hacer un seguimiento

durante el periodo que dure su vida útil, utilizando esta información el fabricante puede realizar mejoras a su diseño y adaptarlo a las condiciones de terreno.

Las barras de perforación no obedecen a un estándar de fabricación, este depende como se ha señalado principalmente del terreno donde se usarán, básicamente su diseño consiste en un tubo de unión entre un terminal con rosca macho y un terminal con rosca hembra, razón por la cual la vida útil de las barras se mide por el desgaste que gradualmente va sufriendo la pared de dicho tubo.

Independiente de lo anterior, las barras se pueden especificar por el espesor de pared del tubo señalado, cuando las condiciones de dureza de roca exigen una mayor energía de empuje se necesita que las barras puedan tener una mayor resistencia a las cargas de compresión, por tal razón su espesor de pared debe ser necesariamente mayor.

*Figura 4: Barras de perforación*



Fuente: Atlas Copco 2017

### **3.2.7.2. Estabilizador**

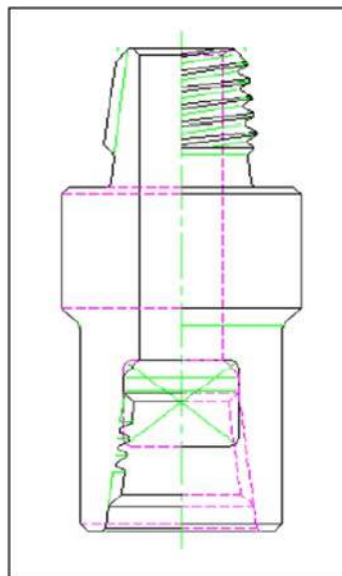
#### **3.2.7.2.1. Adaptador superior (Top Sub).**

(Atlas Copco, 2017). La columna o tren de barras continúa con los adaptadores superiores que como primera función permiten acoplar elementos con diferentes uniones roscadas, como su nombre lo indica adaptan diferentes tipos de roscas o pueden adaptar elementos de diferentes diámetros, adicionalmente estos adaptadores cumplen una segunda función como elementos de desgaste, impidiendo daños en los hilos de los spindler de los cabezales de rotación y en los hilos de los amortiguadores.

La lubricación en los hilos de unión hacia las barras es fundamental para prolongar su vida útil, solamente los hilos machos de los adaptadores se deben engrasar, los hilos hembras no se engrasan porque el flujo de aire los impulsa al fondo de la columna y pueden obstruir las toberas de refrigeración y lubricación de los triconos.

Los adaptadores, así como los otros componentes de la columna son fabricados en aceros de alta resistencia, razón por la cual se debe evitar al máximo aplicar soldaduras para fijarlos a los amortiguadores, un calentamiento excesivo en las zonas de unión con el amortiguador provoca revenidos en el acero alterando su estructura metalografía y alterando su resistencia mecánica.

*Figura 5: Adaptador de broca*



Fuente: Atlas Copco 2017

#### 3.2.7.2.2. Adaptador inferior (Bit sub)

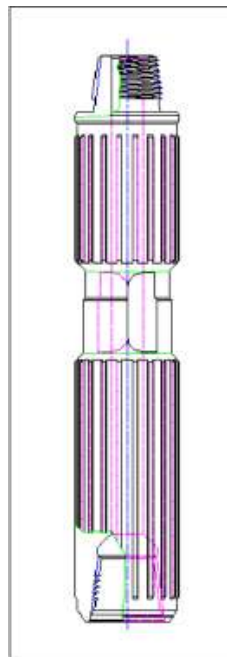
(Atlas Copco, 2017). En la parte inferior de la columna de perforación se ubican los adaptadores de tricono a barras que unen las barras de perforación con los triconos de perforación, su función es similar a los adaptadores superiores, en algunos casos deben unir elementos con roscas diferentes, pero nunca unir elementos con diferentes diámetros. Es el elemento de una columna que está expuesto a las más severas condiciones de desgastes por abrasión las que se originan en el fondo de la perforación.

Históricamente los adaptadores de triconos cumplían funciones de estabilizadores de la columna de perforación, para lo cual se confeccionaban con rodillos giratorios o aletas de aceros antiabrasivos dispuestas en sentido longitudinal o helicoidal. El rápido desarrollo

de la ingeniería en la construcción de nuevos triconos de perforación trajo como consecuencia un aumento en la velocidad de la perforación, llámese aumento de r.p.m. Y carga sobre el tricono mismo, razón por la cual la cantidad de material removido debía ser extraída desde el fondo del pozo en el menor tiempo posible con el propósito de mantener limpio el frente de corte.

Al evacuar el material removido también se disminuye la gran turbulencia que va gastando los faldones del tricono, el cuerpo del adaptador y de manera ascendente el resto de los componentes de la columna, el desgaste de los faldones del tricono y el cuerpo del adaptador es ocasionado por la mencionada turbulencia y remolienda del tricono al repasar las partículas más pesadas que no alcanzan a ser levantadas por el aire de barrido. El flujo de material turbulento que se ubica en el fondo de la perforación es causado por el aire a alta presión que sale desde las toberas del tricono, las tres toberas de barrido más la rotación necesaria para la ruptura y remoción del material a cortar son los que generan la turbulencia.

*Figura 6: Adaptador inferior*



Fuente: Atlas Copco 2017

### **3.2.7.3. Brocas**

Según López Jimeno (2019). Aunque la aparición de los triconos como herramienta de perforación se remonta al año 1910, puede decirse que hasta el desarrollo de los equipos

rotativos en la década de los 60 no se logró un perfeccionamiento en el diseño y fabricación de este tipo de brocas que hiciera su utilización masiva en minería.

En un principio, sólo eran aplicables en formaciones rocosas blandas o de poca resistencia, pero, en la actualidad, estos útiles han permitido a la perforación rotativa competir con otros métodos empleados en rocas duras.

Su característica principal es la presencia de conos que giran alrededor de sus ejes a medida que la broca lo hace sobre el fondo. La acción de perforación de este tipo de brocas depende básicamente de la descentralización de los conos. Esto hace que el cono se detenga periódicamente cuando gira la broca y raspe el fondo del hoyo, tal como lo hacen las brocas de arrastre, lo cual tiende a aumentar la velocidad de perforación en la mayoría de los tipos de formación. En ángulo de descentralización del cono varía desde alrededor de cuatro grados para formaciones blandas, a cero grados para formaciones extremadamente duras.

Una broca tricónica se caracteriza por tener los siguientes elementos:

- Cortadores
- Cojinetes
- Cuerpo

El trabajo de un tricono se basa en la combinación de dos acciones:

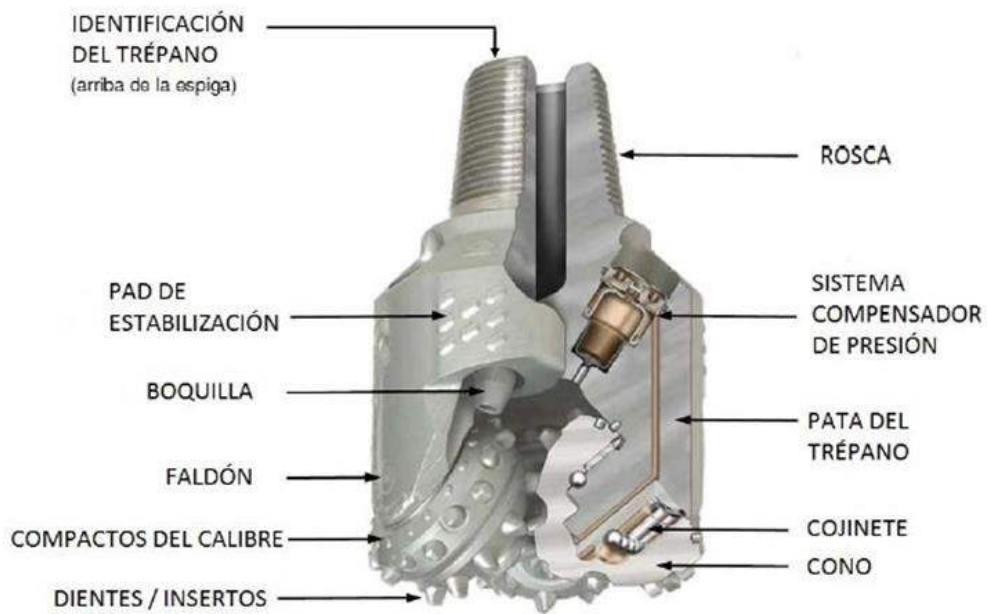
- Indentación:

Los dientes o insertos del tricono penetran en la roca debido al empuje sobre la broca. Este mecanismo equivale a la trituración de la roca.

- Corte:

Según López Jimeno (2019). Los fragmentos de roca se forman debido al movimiento lateral de desgarre de los conos al girar sobre el fondo del barreno. La acción de corte sólo se produce, como tal, en rocas blandas, ya que en realidad es una compleja combinación de trituración y cizalladura debido al movimiento del tricono.

*Figura 7: Partes de una broca tricónica*



Fuente: Aceros AGECOMET

*Figura 8: Broca triconica CoreTEch de 11"*



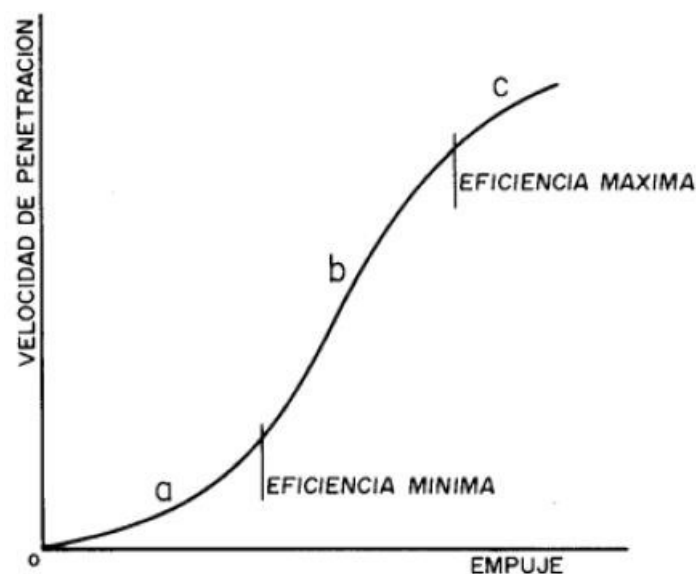
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.8. Variables de perforacion

#### 3.2.8.1. Fuerza de empuje (PULL DOWN)

Según López Jimeno (2019). La fuerza de empuje que es necesario aplicar aumenta directamente con la dureza de la roca, y debe alcanzar una magnitud suficiente para sobrepasar su resistencia a la compresión. Por otra parte, esta fuerza no puede exceder un determinado valor límite, para evitar daños prematuros en la cabeza de perforación. En formaciones rocosas duras o muy duras, una fuerza excesiva conduce a la incrustación de la cabeza y consecuente destrucción, lo que significa el término de la vida útil de la broca tónica. A su vez, a mayor diámetro de perforación, mayor la superficie a perforar por lo que ofrecerá mayor resistencia. En suma, la fuerza de empuje es función de dos variables: la dureza de la roca y el diámetro de perforación.

*Gráfico 3: Efecto de empuje sobre la velocidad de penetración*



Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

Según López Jimeno (2019). El empuje mínimo, por debajo del cual una roca no es perforada, puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$E_m = 28.5 * RC * D$$

Donde:

Em: Empuje mínimo (libras).

RC: Resistencia a la compresión de la roca (MPa).

D: Diámetro del tricono (pulg).

El Empuje máximo, por encima del que se produce el enterramiento del tricono, se considera que vale el doble del valor anterior.

$$E_M = 2 * E_m$$

El empuje límite, que soporta un tricono en función del tamaño de sus cojinetes, que, a su vez, depende del diámetro del tricono:

$$E_L = 810 * D^2$$

Dónde:

EL: Empuje límite del tricono (libras).

D: Diámetro (pulg.).

A continuación, se muestra una tabla con los valores máximos de pullwdon según el diámetro de tricono:

*Tabla 7: Valores límites de empuje según tricono*

| <b>Diámetro del tricono<br/>(pulg.)</b> | <b>Empuje limite<br/>(libras)</b> |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| 5 1/8                                   | 21,000                            |
| 6 1/4                                   | 31,000                            |
| 6 3/4                                   | 37,000                            |
| 7 7/8                                   | 50,000                            |
| 9                                       | 65,000                            |
| 9 7/8                                   | 79,000                            |
| 12 1/4                                  | 121,000                           |

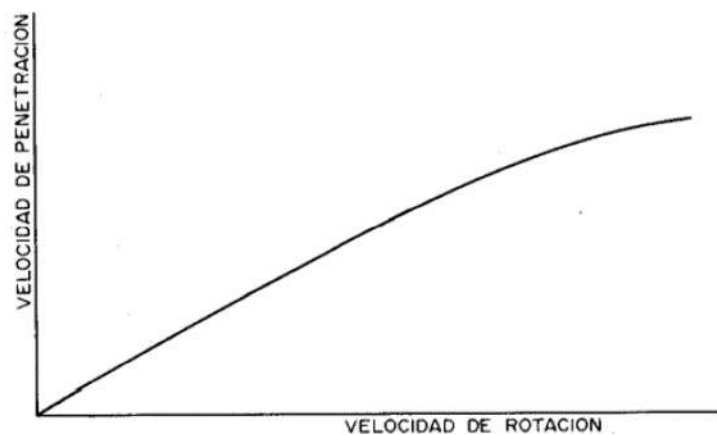
Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

### 3.2.8.2. Velocidad de rotacion

Según López Jimeno (2019). En principio, conceptualmente la velocidad de rotación es inversamente proporcional a la resistencia a compresión de la roca. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la velocidad de rotación también varía en función de la marcha en la que se esté trabajando.

La velocidad de rotación es requerida para mover el inserto de corte a la siguiente posición de rotura del inserto, mientras este cambio de posición sea más rápido la velocidad de penetración será mayor.

*Gráfico 4: Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad de penetración*



Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

A continuación, se muestra una tabla donde se especifica los RPM requeridos según el tipo de roca:

*Tabla 8: RPM requeridos por tipo de roca*

| <b>Tipo de roca</b> | <b>Velocidad de rotación<br/>(r.p.m.)</b> |
|---------------------|-------------------------------------------|
| Blanda              | 75 - 160                                  |
| Media               | 60 - 80                                   |
| Dura                | 35 - 70                                   |

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno

La velocidad de rotación es inversamente proporcional al tipo de roca, mientras mayor sea la dureza de la roca, menor será la velocidad de rotación, si la dureza de roca es suave mayor será la velocidad de rotación.

Criterios a tomar en cuenta durante la aplicación del RPM

- Alto RPM, puede resultar en un incremento de velocidad de penetración
- Alto RPM puede resultar en una disminución de la vida del cojinete
- Alto RPM puede resultar en una disminución de la vida del cojinete

### 3.2.8.3. Caudal de aire

Según López Jimeno (2019). Este término se utiliza para referirse a la velocidad con la que el material perforado (detritus) es evacuado del pozo mediante el aire inyectado, al incrementar la velocidad hace que el detritus desgaste prematuramente los aceros de perforación y el usar una velocidad menor provoca remolienda en el tricono por que el aire no es capaz de evacuar el 100% del detritus, quedando partículas remanentes y produciendo desgaste y en algunos casos atrapamiento de las barras. Los dos factores que influyen directamente en la velocidad de barrido es la capacidad del compresor y del espacio anular.

Capacidad del compresor, Recordemos que se debe utilizar el valor real, descontando del valor nominal del compresor todos los factores que influyen en el rendimiento del compresor.

El espacio anular, es la diferencia de espacio entre la pared del pozo y la barra, es decir la diferencia entre el tricono y las barras. El caudal de aire necesario se calcula mediante la expresión:

$$Qa = Ab * Va = \frac{D^2 - d^2}{1.27}$$

Donde:

Ab: Área de la corona circular entre la pared del barreno m<sup>2</sup>

Qa: Caudal de aire necesario m<sup>3</sup>/min

Va: Velocidad ascensional m/min

D: Diámetro del barreno m

d: Diámetro de la barra m

### 3.2.9. Mantenimiento de las perforadoras

Según López Jimeno (2019). Simplemente no hay mejor manera de controlar los costos, reducir el riesgo y mantener la productividad y el cumplimiento en un sitio de trabajo que a través de tales programas. Especialmente para los equipos de perforación terrestre, es crucial monitorear los sistemas y componentes interconectados -mecánicos o de otro tipo- de acuerdo con su mantenimiento y reparaciones preprogramadas, de manera que se reduzcan los tiempos muertos y se mitigue la probabilidad de que la máquina sea revisada.

### 3.2.10. Estructura del costo total de perforación

PDC (Parcial Drilling Cost = costo parcial de perforación) y TDC (Total Drilling Cost= costo total de perforación). El costo parcial de perforación es el precio al que se adquirió la broca dividido por la distancia que perfora. El PDC puede expresarse por la fórmula: (Llaique Nuñoncca & Sánchez Guevara, 2015)

$$PDC = \frac{\text{precio de compra de la broca}}{\text{metros perforados (metros)}}$$

El TDC es el PDC incluyendo la productividad en la ecuación. El TDC incluye el costo de la broca, el rendimiento por hora del equipo de perforación, pies o metros por hora y distancia perforada. La fórmula TDC se expresa normalmente por una de las dos ecuaciones siguientes: (Llaique Nuñoncca & Sánchez Guevara, 2015)

$$TDC = \frac{\text{costo de broca de perforación}}{\text{metros perforados}} + \frac{\text{costo horario de equipo de perforación}}{\text{metros perforados por hora}}$$

(PDC) es probablemente la mejor forma de evaluar. Sin embargo, si se cuenta con poco tiempo para la perforación y necesitamos evaluar a la flota en razón de la productividad, el costo total de perforación (TDC) es un buen criterio. (Llaique Nuñoncca & Sánchez Guevara, 2015)

Hablar de la evaluación de los costos de perforación, es referirse a la velocidad de penetración y a los metros perforados por cada broca tricónica, ya que estos dos factores inciden fundamentalmente en la perforación. Debido a que existe una relación inversamente proporcional entre ambos, es imposible mejorar el rendimiento de uno sin afectar el otro. Para elegir una adecuada combinación de estos factores, se requiere un patrón de medida en el cual, estén considerados todas las condiciones particulares de la operación, por lo que el mejor parámetro de evaluación está en función del costo métrico. (Llaque Nuñoncca & Sánchez Guevara, 2015)

$$TDC = \frac{B}{M} + \frac{D}{ROD}$$

Donde:

TDC: costo total de perforación (US\$/m)  
 B: precio de la broca (US\$)  
 M: rendimiento o metros perforados (m)  
 D: costo horario del equipo de perforación (US\$/h)  
 ROD: velocidad de penetración (m/h)

Evaluando cada parte del TDC

$$C_1 = \frac{B}{M}$$

Donde:

C1: costo del elemento de corte  
 B: costo de la broca tricónica puesta en el terreno (US\$)  
 M: total metros perforados por la broca (m)

$$C_2 = \frac{D * T}{M}$$

Donde:

C2: costo de la operación minera.  
 D: costo horario del equipo de perforación (US\$/h)  
 T: tiempo operación del tricono (h)  
 M: metros perforados por el tricono (m)

El costo horario del equipo de perforación está dado por:

**a. Costos directos:**

$$C_d = \frac{\sum d_i}{\sum H_i}$$

Donde:

Di: costos directos (US\$)

- Costo mano de obra
- Costo de energía

Determinado por: (el tiempo puede ser variado: semana, mes, año, etc.)

- Mano de obra
- Columna de perforación
- Costos mantenimiento y reparación

Hi: horas de trabajo (h)

**b. Costos indirectos:**

Estos costos se refieren a los que no están relacionados directamente con el proceso de perforación.

- Depreciación del equipo
- Seguros e impuestos
- Costo de supervisión
- Costos de bodegas e inventarios

Importancia de la velocidad de penetración en la obtención del costo mínimo:

De la ecuación general el ROD es igual a m/h, por lo tanto:

El costo es una función de los metros perforados y de la velocidad de penetración obtenida en la perforación. Esto quiere decir que, a mayor velocidad de penetración, el costo total de perforación se reduce. Los factores que están relacionados directa e indirectamente con la velocidad de penetración y los demás factores de la fórmula son:

- Propiedades del Macizo rocoso

- Broca tricónica adecuada para el terreno a perforar
- Velocidad de Barrido
- Velocidad de Salida del detrito
- Peso aplicado sobre la broca tricónica (Pulldown)
- Revoluciones por minuto de las brocas tricónicas (RPM)
- Análisis de desgaste de las brocas tricónicas

**CAPITULO IV:**

**IV. EVALUACION DE LA DURABILIDAD Y RENDIMIENTO DE  
BARRAS Y BROCAS EN TALADROS DE PRODUCCION EN EL  
TAJO MINA 5**

**4.1. Características técnicas del tajo mina 5**

**4.1.1. Ubicación y accesibilidad**

La mina Shougang Hierro Perú está ubicada a 530 km al sur de la ciudad de Lima, además esta limita hacia el norte con la provincia de Nazca y hacia el sur con provincia de Caraveli.

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| Localidad:    | Shougang Hierro Perú |
| Distrito:     | Marcona              |
| Provincia:    | Nazca                |
| Departamento: | Ica                  |
| Región:       | Ica                  |
| Altitud:      | 800 m.s.n.m          |

*Figura 9: Ubicación y Accesos a Mina Shougang Hierro Perú*



Fuente: Shougang Hierro Perú

#### **4.1.2. Geología local**

Marcona posee una elevación de 800 msnm, siendo caracterizada por una amplia meseta esculpida, la cual está conformada por un armazón de erosión marina. Por otro lado, se encuentra ubicada hacia el lado Oeste a través de 27 Terrazas litorales, las cuales se desarrollan a través de corrientes costeros en el tercio superior y durante el Cuaternario de solewantamientos interrumpidos del continente y debido a los fallamientos que restringen la zona hacia el lado del mar. Por otro lado, debido a sus irregularidades topográficas esta presenta una penullanuras de característica ondulada que forman colinas bajas y cubiertas por una acumulación aluvial compuesto por rodados, grava, arena, restos fósiles, fragmentos pulidos de minerales de fierro debido a los desbordamientos marinos y por los levantamientos interrumpidos y además por la operación eólica, lo que establece la dificultad de todo elemento geológico para su posterior análisis dentro de la región.

##### **4.1.2.1. Formación y tipo de yacimiento**

Existen alrededor de 117 cuerpos identificados como depósitos alrededor de un área de 150 km<sup>2</sup>, presentados en diversas dimensiones de hasta 2700m de longitud entre otros más pequeños y de diferente forma tabular.

El origen de estos cuerpos es de característica meta somático, desarrollado a través de soluciones residuales como resultados del magma intrusivo las cuales atraviesan las fisuras, debido a las variaciones que sufren las vetas de Marcona y Cerritos se produce una sustitución meta somática que da origen a la creación de nuevos minerales y al desplazamiento de la magnetita.

La representación del batolito de San Nicolas inició diferentes diques dando origen a que estos contribuyan a la adopción de soluciones mineralizadas, modificando los horizontes dolomíticos de la formación Marcona y de sus elementos calcáreas de las areniscas feldespáticas del desarrollo Cerritos. Ante estos criterios el yacimiento ha sido denominado una mina de reemplazamiento metacromático.

#### ***4.1.2.2. Mineralización y alteraciones***

Este mineral de mena es sumamente importante para estos yacimientos es la magnetita criptocristalina y masiva, las cuales están compuestas con alrededor del 50% de hierro y con abundante pirita diseminada.

Así mismo se hacen presente los minerales de cobre con una composición de alrededor de 0.06% de cobre en función a los criterios del yacimiento que se analice.

Finalmente existe la presencia de otros minerales como la pirrotita, la ganga cobalto en función a la pirita, la actinolita, la epidotita entre otros.

#### **4.1.3. Geología económica**

Marcona este compuesto por un total de 117 cuerpos de mineral, las cuales tienen una ampliación de 10 kilómetros por 15 kilómetros, logrando desarrollar depósitos que se encuentran en gran medida aislados y con medidas variables, los cuales se hallan almacenados en diversas maneras sedimentarias de Paleozoico y Jurásico, estos han sido desarrollados bajo un procedimiento meta somático de característica tabular en función a su forma estructural. Estos cuerpos mineralizados están conformados por zoneamiento vertical. El mineral se encuentra inicialmente compuesto de magnetita y diseminaciones de sulfuro, los cuales estuvieron expuestos a una exuberante oxidación y lixiviación, debido al clima y a la humedad subterránea.

Este material está conformado por casi el 80% de hematita la cual proviene de la magnetita primaria, por otro lado, el grado de lixiviación ha sido influenciado por la concentración de pirita, así mismo, la oxidación intensa conlleva a la formación de hematita ferrosa y magnetita residual en aquellas zonas donde existe mayor concentración

de pirita. La hematita dura de color negro se presenta a través de la oxidación menor y en el que la pirita es nula es porque la oxidación ha sido casi nula. La zona lixiviada presenta una profundidad variable desde 25m hasta 40m, además la zona de transición presenta una profundidad de alrededor de 30m de espesor, encontrándose bajo esta zona al mineral primario.

Estas unidades de intemperismo han desarrollado en cada organismo de mineral 3 etapas verticales por variaciones de las peculiaridades físicas y químicas de la magnetita:

a) Zona de mineral oxidado

Se encuentra cerca de la superficie por las actividades antes descritas, después la magnetita se transforma en hematitas y martitas sustitutas, las cuales están acompañadas por minerales de fierro, brocantitas, crisocolas y sulfatos de hierro menor.

b) Zona de mineral transicional

Es el que se ubica después de la zona oxidada, por los diferentes materiales lixiviados de esta zona. Está conformada por hemetita-martita y jarosita de grano fino y, en menor cantidad, pirita, yeso, anhidrita, brocantita, crisocola, atacamita.

Entre sus principales peculiaridades de esta área es su composición, el posee más del 1% de azufre, y cuenta con una recuperación magnética relativamente baja y un contenido inferior al 15%, así mismo, su capacidad mineral tiene un promedio de 35m.

c) Zona de mineral primario o sulfuroso

Esta zona es una de las principales y más importantes debido a que en sus alrededores se encuentran más del 80% de las reservas de hierro, así mismo la mineralización se mantiene intacta y es considerada como simple, desarrollada a través de la formación de magnetita criptocristalina y masivas, además de calcopirita, pirrotita y siendo la ganga principalmente la actinolita con epidota, calcita, brocanita, clorita y sericita.

Debido a la presencia de estos elementos los minerales de la zona son considerados como mineral de molienda gruesa por su subclasificación, además de molienda fina normal y fina refractario con el objetivo de liberar el azufre durante su manipulación.

Su principal característica de esta zona es su alta recuperación magnética mayor al 65% así como a su contenido de FeO mayor al 15%, pudiendo emplearse en todos los tipos de productos finales.

#### **4.1.3.1. Mineralogía**

Es aquella norma jurídica que regula la explotación de los minerales en Shougang Hierro Perú. En ese sentido debido a lo establecido por ley la extracción en minas se da en función al 50% de Fe. Sin embargo durante las actividades de yacimiento se desarrolla un recurso de dilución denominado-baja ley, la misma que está compuesta por alrededor del 30% de Fe. Posteriormente estos minerales son trasladados hacia un separador magnético denominado Dry Cobbing el cual tiene como propósito elevar la ley hasta un 50% lo que conlleva finalmente a la eliminación de desecho y agrupación del mineral que será trasladado hacia la planta de beneficio.

#### **4.1.3.2. Reservas de mineral**

Cuando un cuerpo de mineral es considerado beneficioso y explotable se le hace un diseño de minado.

Todos los recursos de mineral que están dentro de este diseño de explotación (Tajo), son considerados reservas minables y se les denomina según el desarrollo que se le esté haciendo en la mina en:

- Reservas minables al límite final probable
- Son todos los recursos que están dentro del diseño óptimo de minado.
- Reservas minables del talud actual
- Son los recursos que están dentro de los actuales taludes que se están explotando en este momento sin considerar los futuros desarrollos.

*Tabla 9: Estimado de Reservas Minables en Toneladas Metricas*

| ESTIMACION DE RESERVAS MINABLES AL LIMITE FINAL PROBABLE (TM) |                    |                    |                    |             |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| Mina                                                          | Mineral            | Desmante           | Total General      | Ratio       |
| Mina 2                                                        | 30,543,400         | 75,710,091         | 106,253,491        | 2.48        |
| Mina 3                                                        | 4,096,512          | 4,206,665          | 8,303,177          | 1.03        |
| Mina 4                                                        | 74,930,628         | 54,568,146         | 129,498,774        | 0.73        |
| Mina 5                                                        | 76,190,248         | 147,624,968        | 223,815,216        | 1.94        |
| Mina 9/10                                                     | 41,444,216         | 26,353,976         | 67,798,192         | 0.64        |
| Mina 11                                                       | 33,912,048         | 92,409,621         | 126,321,669        | 2.72        |
| Mina 14                                                       | 69,230,444         | 142,436,597        | 211,667,041        | 2.06        |
| Mina 16                                                       | 9,032,443          | 26,167,149         | 35,199,592         | 2.90        |
| Mina 18                                                       | 19,257,264         | 49,927,081         | 69,184,345         | 2.59        |
|                                                               | <b>358,637,203</b> | <b>619,404,294</b> | <b>978,041,497</b> | <b>1.73</b> |

Fuente: Shougang Hierro Perú

## 4.2. Características geomecánicas del yacimiento

Consideremos varias características de la roca las más principales son la resistencia a la compresión uniaxial, clasificación RMR y GSI, donde esta analizado según el tipo de mineral existente en el tajo, en mina 5 los minerales existentes son: hornfels, magnética, cabrodiorita y dacita.

*Tabla 10: Características de la Roca Mina 5*

| Litología    | Resistencia a la Compresión Simple | Clasificación RMR | Descripción de Roca | GSI |
|--------------|------------------------------------|-------------------|---------------------|-----|
| Magnética    | Clase III                          | 60-67             | Muy Buena           | 60  |
| Andesita     | Clase III                          | 55-60             | Buena               | 55  |
| Dacita       | Clase II – Clase III               | 55-60             | Buena               | 55  |
| Gabrodiorita | Clase II – Clase III               | 60-65             | Buena               | 45  |

Fuente: Shougang Hierro Perú

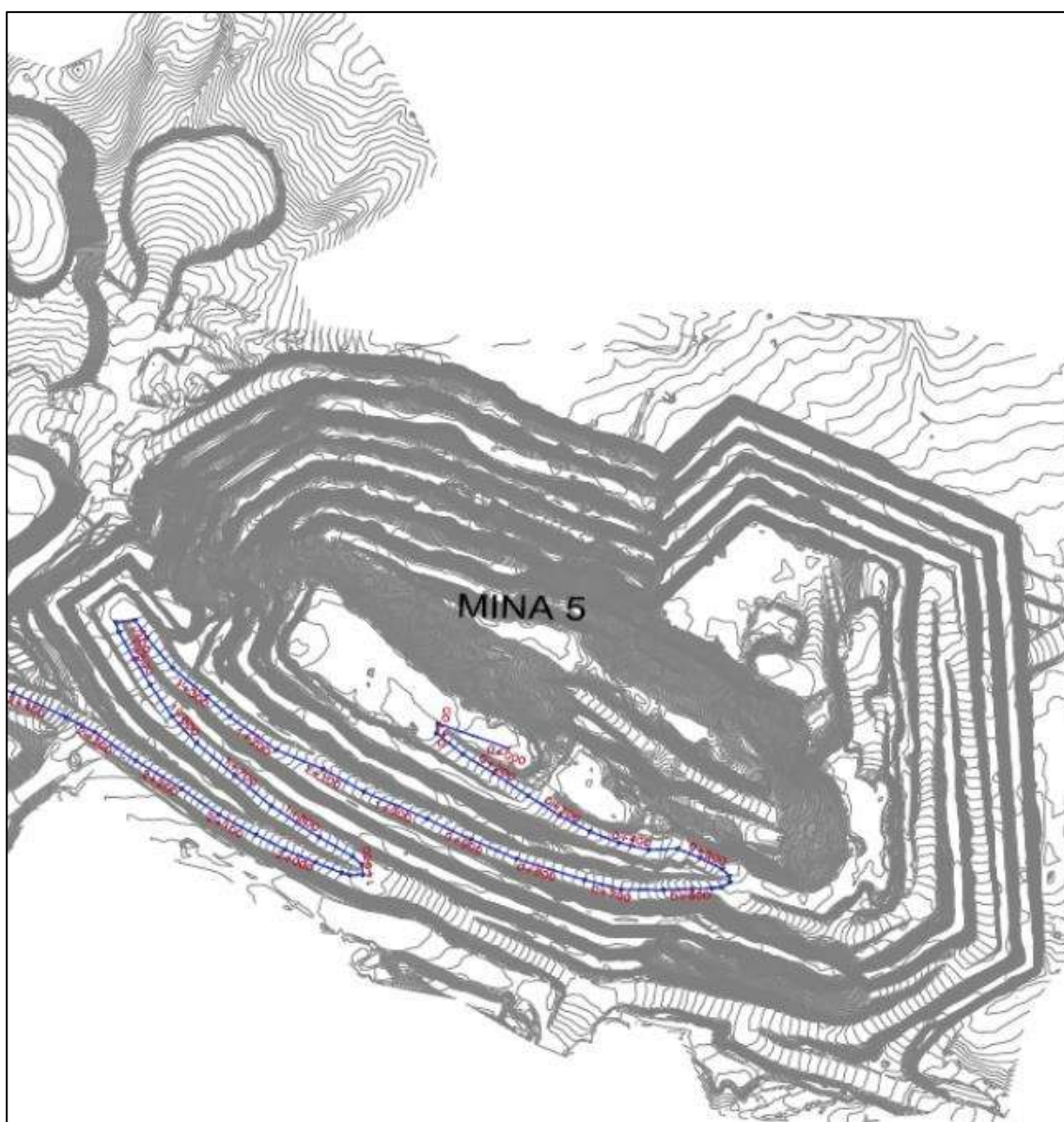
En la mayoría de los tajos que tiene la empresa Shougang Hierro Perú son de roca dura a muy dura y fracturada, debido a esa dureza de la roca se da la posibilidad de construir bancos de mayor altura en la operación, estos taludes en su mayor parte son estables.

La mina 5 producción no presenta en el proyecto presencia de agua.

## 4.3. Diseño del tajo

El tajo Mina 5 constituye una de las principales unidades productivas de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú S.A.A., ubicada en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, región Ica. Como componente estratégico del complejo minero Marcona uno de los yacimientos de hierro más importantes del Perú, el Tajo 5 representa un frente clave para la extracción de mineral de hierro, cuya explotación eficiente es fundamental para sostener los planes de producción y la competitividad de la empresa en el mercado global.

*Figura 10: Tajo de Mina 5*



Fuente: Shougang Hierro Perú

#### **4.3.1. Angulo de cara de banco**

El talud es una de las características más definitorias en la explotación de un yacimiento, y a la vez, representa una de las limitaciones operativas más importantes. Es fundamental garantizar la estabilidad y permanencia de cada una de las superficies que lo conforman, razón por la cual es necesario mantener una geometría de diseño óptima y estable. Esto permitirá alcanzar el máximo beneficio económico, asegurando al mismo tiempo un nivel mínimo de riesgo ante posibles fallas o eventos geomecánicos.

### 4.3.2. Diseño de bancos

#### a) Altura de banco

La longitud de un banco se determina según la separación vertical entre cada nivel horizontal dentro del diseño del tajo. Idealmente, estos bancos deberían mantener una longitud uniforme, salvo cuando condiciones geológicas particulares exijan ajustes, los cuales se definirán con base en criterios técnicos relacionados con la capacidad y disposición del material.

En los tajos 5, 11 y 16, la altura del banco se establece en 12 metros. Para optimizar la voladura y garantizar una fragmentación adecuada, se realiza una sobreperforación de 1 metro en el caso del desmonte y de 1.5 metros para el mineral. Esta práctica busca incrementar la eficiencia en el proceso de perforación y, a su vez, mejorar el rendimiento de las palas durante la carga del material.

*Figura 11: Taludes de Mina 5*



Fuente: Elaboración propia

#### b) Ancho de banco

Para que toda operación minera pueda desarrollarse con fluidez y seguridad, es imprescindible disponer de vías de acceso y evacuación apropiadas. Estos caminos hacen posible el desplazamiento ordenado de los camiones de alto tonelaje, permiten el reubicación de las palas mecánicas entre distintos frentes de excavación según las necesidades operativas, y facilitan el tránsito de vehículos y maquinaria de menor porte.

La determinación del ancho de un banco no es casual, sino que se fundamenta en criterios técnicos y de seguridad claramente establecidos. Dicho ancho se define tomando en cuenta, entre otros factores, el método de cuantificación de la hendidura, las técnicas de tronadura amortiguada que se aplican para resguardar la integridad de las paredes del tajo, y el cabal respeto de los protocolos de seguridad implementados en el yacimiento. En términos prácticos, la superficie del banco debe ofrecer el espacio necesario para que los equipos operen sin riesgos. Por ejemplo, un camión minero debe poder maniobrar de manera segura junto a una pala durante la carga. Es por esto que el ancho mínimo del banco se calcula sumando el radio de giro del camión, el ancho de la berma de seguridad y el radio de oscilación del brazo de la pala. Con este diseño, se busca crear un entorno laboral en el que tanto el personal como la maquinaria trabajen con seguridad y eficacia.

#### **4.4. Perforación**

La perforación se basará únicamente de 2 perforadoras de la marca Sandvik DR412i en terreno de mineral (roca dura).

*Figura 12: Perforadoras de Mina 5*



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.1. Diseño de malla de perforación

Una vez que se ha establecido el área de perforación aprobada por el departamento de Planeamiento, se procede a diseñar la malla de perforación. Este diseño se basa en los parámetros geotécnicos proporcionados por el área de Geotecnia, como el tipo de roca, su resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de pre-fracturamiento del macizo rocoso (RQD), entre otros factores clave.

La tabla a continuación presenta los parámetros utilizados, derivados de dichas características geotécnicas.

*Tabla 11: Parámetros de medición*

| Parámetros                            | Tipo de roca     |
|---------------------------------------|------------------|
|                                       | Mineral primario |
| <b>Diámetro del taladro (pulg)</b>    | 11               |
| <b>Altura de banco (m)</b>            | 12               |
| <b>Sobre perforación (m)</b>          | 1.5              |
| <b>Profundidad taladro (m)</b>        | 13.5             |
| <b>Burden (m)</b>                     | 4.7              |
| <b>Espaciamiento (m)</b>              | 5.4              |
| <b>Volumen/ Taladro (m3)</b>          | 304.6            |
| <b>Densidad del material (Gr/cm3)</b> | 4.47             |
| <b>Toneladas / Taladro (tn)</b>       | 1361.4           |
| <b>Perforación específica (Tm/m)</b>  | 100.8            |

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 12: Parámetros por proyecto de perforación*

| Parámetros             | Tipo de roca       |
|------------------------|--------------------|
|                        | Mineral primario   |
| <b>Nº de Taladros</b>  | 180 a 200 Taladros |
| <b>Malla</b>           | Triangular         |
| <b>Diseño de Malla</b> | 4.7 x 5.4 metros   |

Fuente: Elaboración Propia

*Figura 13: Malla triangular*



Fuente: Elaboración Propia

*Figura 14: Proyecto de perforación*



Fuente: Elaboración Propia

#### **4.4.2. Maquina perforadora utilizada**

Para el estudio realizado se tomó como muestra las perforadoras ep-129 y ep-130 que pertenece a la marca Sandvik DR412i, que tiene las características tal como se muestra en la figura:

*Tabla 13: Características de la perforadora DR412i*

|                                                        | MÉTRICO*                | IMPERIAL*           |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Diámetro del Agüjero                                   | 216 - 311 milímetros    | 8 ½ - 12 ¼ pulgadas |
| Profundidad máxima de perforación – "Multi-pass"       | 75 metros               | 246 pies            |
| Profundidad máxima de perforación – "Single-pass"      | 33 metros               | 109 pies            |
| Capacidad del primer paso – "Multi-pass"               | 12.3 metros             | 40.5 pies           |
| Capacidad del primer paso – "Single-pass"              | 18 metros               | 59 pies             |
| <b>ALIMENTACIÓN</b>                                    |                         |                     |
| Desplazamiento máximo                                  | 356 kN                  | 80,000 lbf          |
| Peso máximo de la broca                                | 400 kN                  | 90,000 lbf          |
| Velocidad de alimentación arriba/abajo – "Single-pass" | 0 - 43.9 metros/minutos | 0 - 144 ppm         |
| Velocidad de alimentación arriba – "Multi-pass"        | 0 - 43.9 metros/minutos | 0 - 144 ppm         |
| Velocidad de alimentación abajo – "Multi-pass"         | 0 - 41.2 metros/minutos | 0 - 135 ppm         |
| <b>MOTOR, CAT C27</b>                                  |                         |                     |
| Energía                                                | 652                     | 875                 |
| Revoluciones por minuto (RPM)                          | –                       | 1800                |
| Presión alta                                           | 41 metros³/minutos      | 1,450 scfm          |
| DTH                                                    | 24.1 bar                | 350 psi             |
| Presión bajo                                           | 56.6 metros³/minutos    | 2,000 scfm          |
| Rotaría                                                | 6.9                     | 100 psi             |

Fuente: Catalogo Sandvik

*Figura 15: Perforadora Sandvik*



Fuente: Elaboración Propia

#### ***4.4.2.1. Técnicas de obtención de datos***

Se recolecta la información de campo mediante reportes de perforación por turno, cada operador de las diferentes perforadoras registra los parámetros de perforación en los reportes y observaciones que podría ocurrir durante el transcurso de la perforación, para posteriormente revisarlo en oficina técnica.

#### ***4.4.2.2. Análisis de reporte de perforación***

Para la presente investigación se recopiló información de campo a través de los reportes de perforación por guardia y de la base de datos del sistema donde se registra el metraje de los aceros en tiempo real. Este estudio se desarrolló durante un periodo de cuatro meses, tomando como muestra dos perforadoras.

Para el análisis de los reportes de perforación se empleó Microsoft Excel, donde se almacenaron los datos obtenidos del sistema. Se procesó la información mediante procesos lógicos y secuenciales, con el fin de obtener resultados confiables y válidos. A partir de estos datos, se generaron tablas y gráficas que permitieron interpretar los resultados finales, centrándose especialmente en analizar el impacto de la velocidad de penetración y otras evidencias cuantitativas en la reducción del TDC (costo total de perforación). Asimismo, se utilizó Microsoft Word para la redacción del informe de investigación.

### **4.5. Identificación de factores que afectan la durabilidad y el rendimiento de barras y brocas**

Aquí se presentan los principales factores que influyen en la vida útil y el rendimiento de las barras y brocas utilizadas en la perforación.

Asimismo, se incluirán los valores operativos recomendados por el fabricante de brocas, en este caso Coretech, con el cual se está trabajando en la operación.

#### **4.5.1. Características geomecánicas**

##### ***4.5.1.1. Variación de la calidad de roca***

La mayoría de los tajos operados por Shougang Hierro Perú presentan rocas que varían desde medias hasta duras, muy duras y fracturadas. Dada esta resistencia del macizo rocoso, se permite diseñar bancos con alturas mayores, lo que optimiza la secuencia de explotación. Estos taludes, en su gran mayoría, mantienen una condición de estabilidad adecuada.

Tabla 14: Calidad de roca de Mina 5

| Litología    | Índice RQD | Calidad de Roca |
|--------------|------------|-----------------|
| Magnetita    | 65         | Media           |
| Andesita     | 66         | Media           |
| Dacita       | 55         | Media           |
| Granodiorita | 68         | Media           |

Fuente: Elaboración Propia

#### ***4.5.1.2. Presencia de estructuras geológicas***

Mediante el mapeo geológico realizado a lo largo de los bancos y taludes, se ha identificado que las rocas del yacimiento Marcona están atravesadas por fallas mayores de carácter transversal. Entre estas estructuras principales se destacan: la falla Pista, con rumbo N 65° W y buzamientos de 45° a 60° hacia el NE y de 70° a 74° hacia el SW; la falla Repetición, con rumbo N 45° E y buzamiento de 35° a 65° hacia el SW; y la falla La Huaca, con rumbo N 25° W y buzamientos de 55° a 60° hacia el NE y de 77° a 80° hacia el SW. Acompañando a estas discontinuidades mayores, se presentan también diaclasas y fracturas secundarias, cuyas orientaciones suelen ser paralelas a los planos principales de falla antes mencionados.

#### ***4.5.1.3. Presencia de agua subterránea***

Para Mina 5, la presencia de agua es nula, no se encuentra registro de agua subterránea.

### **4.5.2. Factores inherentes a la máquina perforadora**

#### ***4.5.2.1. Empuje hacia abajo (pulldown)***

Este es un factor de gran relevancia, dado que está directamente relacionado con la calidad del macizo rocoso, en particular con su resistencia a la compresión. Para lograr la fragmentación de la roca, es necesario aplicar una presión específica, ajustada según su dureza.

La capacidad de empuje de las perforadoras DR412i alcanza hasta 141,096 libras; sin embargo, su aplicación varía según el tipo de roca y el diámetro del tricono utilizado. Sandvik recomienda que el pulldown en roca dura se mantenga dentro del rango de 70,000

a 78,000 libras; en roca media, alrededor de 55,000 libras; y en roca suave, cerca de 35,000 libras.

Para la correcta aplicación del pulldown, es importante considerar los siguientes aspectos:

- La aplicación del pulldown es directamente proporcional a la dureza de la roca; es decir, a mayor dureza, mayor pulldown será necesario.
- Un pulldown excesivo puede comprometer la duración del cojinete de la broca y, en consecuencia, reducir su vida útil.

#### ***4.5.2.2. Presión de aire***

El sistema de aire comprimido cumple la función de suministrar un volumen y presión adecuados para lubricar y enfriar los cojinetes de las brocas, así como para evacuar los detritos generados durante la perforación.

La presión mínima requerida para el enfriamiento y lubricación de los cojinetes es de 40 psi.

Para lograr una evacuación eficiente de los detritos, se requiere una velocidad de barrido que oscile entre 5000 y 7000 pies por minuto en material seco y de baja densidad. Esta velocidad puede incrementarse hasta un máximo de 10,000 pies por minuto cuando las partículas presentan mayor densidad o se encuentran húmedas, ya que en estas condiciones su peso es mayor.

Según las recomendaciones del fabricante, el caudal de aire óptimo para terrenos duros es de 61 m<sup>3</sup>/min, para roca media de 50 m<sup>3</sup>/min y para roca suave de 40 m<sup>3</sup>/min.

#### ***4.5.2.3. Velocidad de rotación***

El régimen de rotación (RPM) está directamente relacionado con el tipo de roca a perforar, variando su aplicación según las condiciones del terreno.

En terrenos duros se recomienda aplicar una velocidad de rotación más baja; los fabricantes sugieren un mínimo de 40 RPM. Por el contrario, en terrenos suaves se puede incrementar el RPM, con un valor máximo recomendado de 200 RPM.

De acuerdo con el catálogo técnico de Sandvik, la velocidad de rotación recomendada para roca dura es de 90 RPM, para roca de dureza media es de 100 RPM y para roca suave es de 140 RPM.

#### ***4.5.2.4. Velocidad de perforación***

La velocidad de perforación se determina en función de factores previamente mencionados, como el pulldown y la velocidad de rotación.

Este factor es uno de los más influyentes en cuanto a la vida útil de las barras y brocas, ya que el operador, basándose en su experiencia y conocimiento, aplicará en la práctica parámetros como el pulldown, la presión de aire y la velocidad de rotación.

Cabe destacar que la capacitación del personal a cargo, gestionada por el área de entrenamiento de mina, se lleva a cabo de manera anual. Durante esta formación, cada operador debe aprobar un examen específico conforme a lo aprendido, con el fin de renovar la licencia que lo autoriza a manipular los equipos de perforación.

#### ***4.5.2.5. Evacuación de residuos***

Este término se refiere a la velocidad con la que los detritos perforados son evacuados del pozo mediante el flujo de aire inyectado. Si la velocidad es excesiva, puede generar un desgaste prematuro en los aceros de perforación. Por otro lado, si la velocidad es insuficiente, puede producirse una remolienda en el tricono debido a que el aire no logra evacuar completamente los detritos, dejando partículas remanentes que ocasionan desgaste y, en algunos casos, atrapamiento de las barras. Dos factores que influyen directamente en la velocidad de barrido son la capacidad del compresor y el espacio anular.

En cuanto a la capacidad del compresor, es importante considerar su valor real, descontando del valor nominal todos los factores que puedan afectar su rendimiento efectivo.

Respecto al espacio anular, este corresponde a la diferencia entre el diámetro del pozo y el de la barra de perforación, es decir, la diferencia entre el diámetro del tricono y el de las barras.

Consideraciones a tener en cuenta en la velocidad de barrido:

- La Velocidad de Barrido deberá ser de 5000 - 7000 ft/min para material seco y ligero.
- La Velocidad de Barrido deberá ser de 7000 - 9000 ft/min para material húmedo y pesado. El agua hace que las partículas se junten, haciéndose más grandes y pesadas al momento de ser barridas.

#### 4.6. Recepción de las barras y brocas utilizadas

Para el trabajo se consideró la perforadora Ep-129 y Ep-130 de los cuales cada máquina perforadora realizó un total de metros perforados durante los 4 meses de estudio, tal como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 15: Metros perforados por equipo*

| <b>Perforadora</b> | <b>Metros perforados</b> |
|--------------------|--------------------------|
| EP – 129           | 36,860 Metros lineales   |
| EP – 130           | 34,264 Metros lineales   |

Fuente: elaboración propia

#### 4.6.1. Duración y rendimiento de barras

##### 4.6.1.1. Rendimiento de barras marca Mammoth

El rendimiento de las barras Mammoth (9 5/8”) se encuentra dentro del rango de 20,000 a 22,000 metros lineales perforados, con un costo unitario de 5,638.45 dólares. Durante el periodo de enero a abril solo se registró el consumo de 3 barras, debido a su extensa vida útil, como se detalla en la tabla adjunta. Es importante señalar que la duración de una barra puede prolongarse mediante la aplicación de soldadura especializada, lo que permite que una unidad pueda mantenerse en servicio durante varios meses.

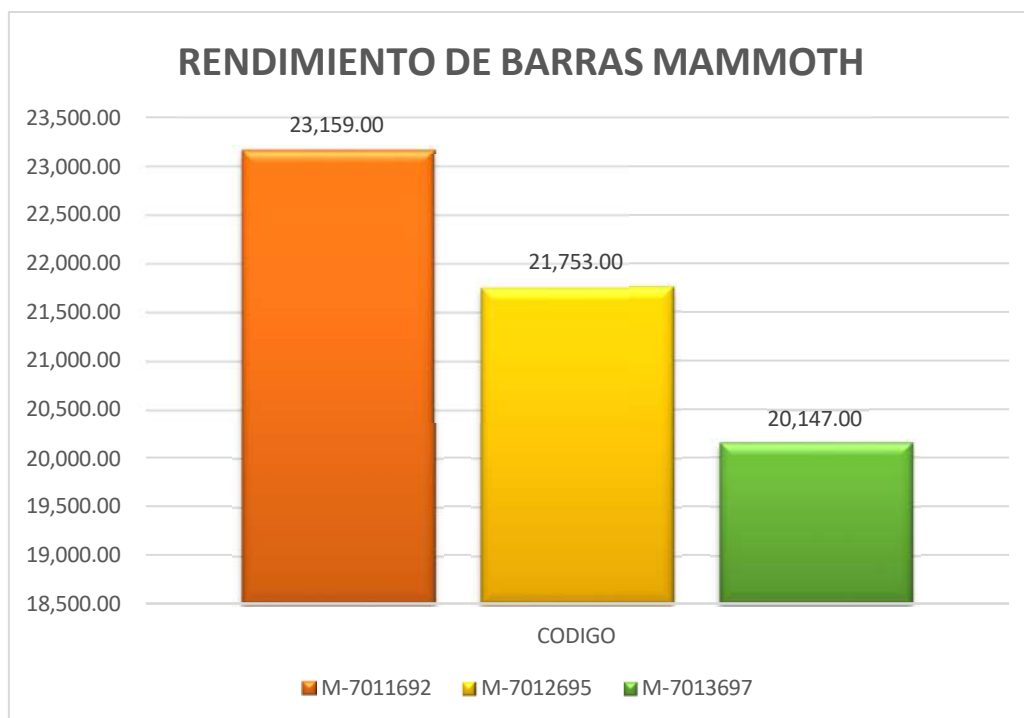
La EP - 129 trabajan con las barras Mammoth

*Tabla 16: Rendimiento de barras Mammoth*

| <b>Mammoth EP-129</b> |                |
|-----------------------|----------------|
| <b>CODIGO</b>         | <b>METRAJE</b> |
| M-7011692             | 23,159.00      |
| M-7012695             | 21,753.00      |
| M-7013697             | 20,147.00      |

Fuente: elaboración propia

*Gráfico 5: Rendimiento de barras Mammoth*



Fuente: Elaboración Propia

#### **4.6.1.2. Rendimiento de barras marca Newman**

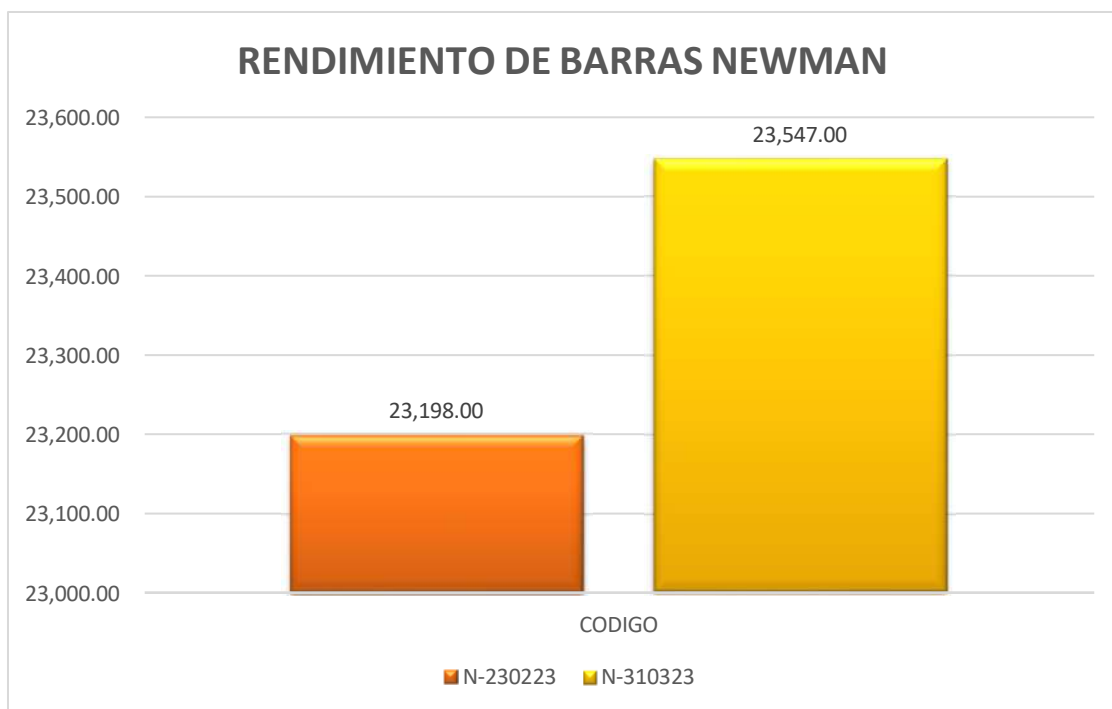
De acuerdo con el catálogo del fabricante, el rendimiento de las barras Newman (9 5/8") oscila entre los 20,000 y 22,000 metros lineales perforados, con un costo unitario de 6,076.85 dólares. Al igual que las barras Mammoth, es posible extender la vida útil de estas barras mediante la aplicación de soldadura especializada. En la siguiente tabla se presenta la duración estimada de las barras Newman, las cuales son empleadas por la perforadora EP-130.

*Tabla 17: Rendimiento de Barras newman*

| <b>Newman EP-130</b> |                |
|----------------------|----------------|
| <b>CODIGO</b>        | <b>METRAJE</b> |
| N-230223             | 23,198.00      |
| N-310323             | 23,547.00      |

Fuente: Elaboración Propia

*Gráfico 6: Rendimiento de barras Newman*



Fuente: Elaboración Propia

#### **4.6.1.3. Comparación de rendimientos de barras por marca en función al costo**

En la siguiente tabla se muestra el rendimiento promedio de las barras en función al costo.

*Tabla 18: Comparación de barras*

| MARCA           | MAMMOTH   | NEWMAN    |
|-----------------|-----------|-----------|
| Metros promedio | 21,686.33 | 23,372.50 |
| PDC (\$/M)      | 0.26      | 0.26      |

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con el cuadro comparativo de rendimiento entre barras de perforación de las marcas Mammoth y Newman, se presentan los siguientes resultados:

#### *Metros promedio perforados por barra:*

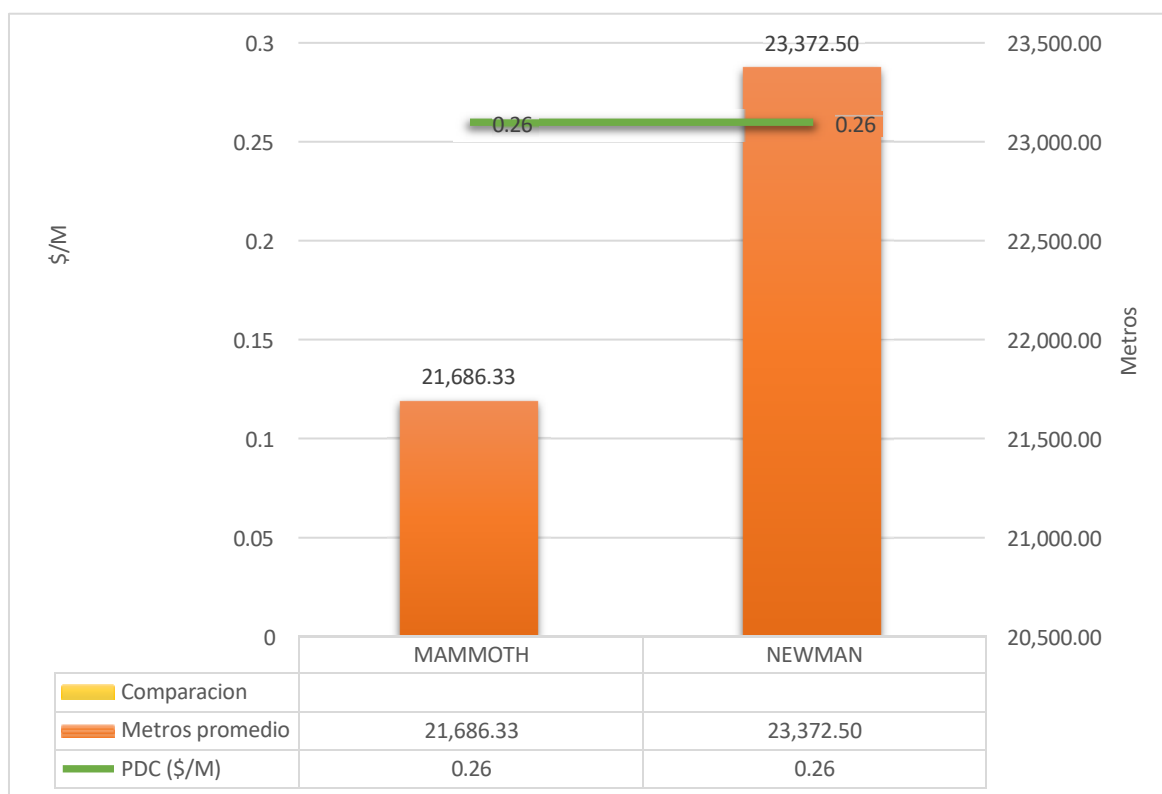
Las barras Mammoth alcanzan un promedio de 21,686.33 metros lineales, mientras que las barras Newman registran un rendimiento ligeramente superior, con 23,372.50 metros lineales perforados por unidad en promedio.

Costo por metro perforado (PDC – Perforation Direct Cost):

Ambas marcas presentan un costo directo de perforación idéntico de 0.26 dólares por metro lineal (\$/m), lo que indica que, desde el punto de vista económico por metro avanzado, no existe diferencia entre las dos opciones en términos de este indicador.

En el siguiente grafico se muestra metros perforados promedio y PDC promedio por marca de barra.

*Gráfico 7: Rendimiento promedio en función al costo*



Fuente: Elaboración Propia

Del siguiente grafico se puede decir que la vida útil promedio de la barra Newman es mayor al de la barra Mammoth, pero costo parcial de perforación de la barra Mammoth es igual al costo parcial de perforación de la barra Newman, por lo que se concluye que la barra Newman tiene un mayor rendimiento que la barra Mammoth a un mismo costo parcial de perforación

#### 4.6.2. Duracion y rendimiento de brocas

De acuerdo con el catálogo del fabricante, las brocas tricónicas Coretech ofrecen un rendimiento estimado de 1800 metros lineales de perforación en condiciones de terreno de alta dureza. Este desempeño también depende, en gran medida, de la habilidad del operador, quien es responsable de gestionar y ajustar los factores de perforación durante la operación.

##### 4.6.2.1. Consumo, rendimiento y vida útil de brocas en los meses de enero a abril

###### Consumo de brocas durante el mes de Enero

Tabla 19: Consumo de brocas enero

| PERFORADORA | SERIE | MES   | TIPO DE ROCA   | METRAJE PERFORADO (M) |
|-------------|-------|-------|----------------|-----------------------|
| EP – 129    | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1860                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1902                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1823                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1820                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1900                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1842                  |
| EP – 130    | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1860                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1835                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1833                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1921                  |
|             | 70    | Enero | Mineral (duro) | 1872                  |

Fuente: Elaboración Propia

En el mes de enero se consumió un total de 11 brocas.

Las brocas tuvieron un desgaste estándar debido a que las brocas de Coretech se acoplaron muy bien al tipo de roca dura - mineral.

###### Consumo de brocas durante el mes de Febrero

*Tabla 20: Consumo de brocas febrero*

| <b>PERFORADORA</b> | <b>SERIE</b> | <b>MES</b> | <b>TIPO DE<br/>ROCA</b> | <b>METRAJE<br/>PERFORADO (M)</b> |
|--------------------|--------------|------------|-------------------------|----------------------------------|
| EP – 129           | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1885                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1874                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1801                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1896                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1841                             |
| EP – 130           | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1902                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1869                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1873                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1981                             |
|                    | 70           | Febrero    | Mineral (duro)          | 1877                             |

Fuente: Elaboración Propia

Asi mismo en el mes de febrero se consumieron un total de 10 brocas

Consumo de brocas durante el mes de Marzo

*Tabla 21: Consumo de brocas marzo*

| <b>PERFORADORA</b> | <b>SERIE</b> | <b>MES</b> | <b>TIPO DE<br/>ROCA</b> | <b>METRAJE<br/>PERFORADO (M)</b> |
|--------------------|--------------|------------|-------------------------|----------------------------------|
| EP – 129           | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1892                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1821                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1793                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1790                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1860                             |
| EP – 130           | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1963                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1898                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1921                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1974                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1879                             |
|                    | 70           | Marzo      | Mineral (duro)          | 1861                             |

Fuente: Elaboración Propia

En el mes de marzo se consumieron un total de 11 brocas

Consumo de brocas durante el mes de Abril

*Tabla 22: Consumo de brocas abril*

| <b>PERFORADORA</b> | <b>SERIE</b> | <b>MES</b> | <b>TIPO DE<br/>ROCA</b> | <b>METRAJE<br/>PERFORADO (M)</b> |
|--------------------|--------------|------------|-------------------------|----------------------------------|
| EP – 129           | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1842                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1865                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1874                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1890                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1847                             |
| EP – 130           | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1921                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1974                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1925                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1934                             |
|                    | 70           | Abril      | Mineral (duro)          | 1899                             |

Fuente: Elaboración Propia

En el mes de marzo se consumieron un total de 10 brocas

*Tabla 23: Consumo de brocas por mes*

| <b>BROCAS CONSUMIDAS POR MES</b> |    |
|----------------------------------|----|
| ENERO                            | 11 |
| FEBRERO                          | 10 |
| MARZO                            | 11 |
| ABRIL                            | 10 |
| TOTAL                            | 42 |

Fuente: Elaboración Propia

La tabla presenta el consumo mensual de brocas tricónicas durante el período evaluado (enero a abril), registrando un total de 42 brocas consumidas en los cuatro meses.

#### 4.6.2.2. Determinación de factores en roca dura – mineral

En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos de campo, donde se muestra el pulldown, caudal de aire aplicado y el RPM.

Tabla 24: Factores en roca dura - mineral

| Nº | Perforadora | Mes     | Tipo de roca | Metros lineales | Velocidad m/hr | x10 <sup>3</sup> (lb) | M <sup>3</sup> /min | RPM  | Rendimiento tal/broca |
|----|-------------|---------|--------------|-----------------|----------------|-----------------------|---------------------|------|-----------------------|
| 1  | EP – 129    | Enero   | Dura         | 1860            | 10.80          | 81.54                 | 59.65               | 91.4 | 137.8                 |
| 2  | EP – 130    | Enero   | Dura         | 1835            | 11.23          | 79.89                 | 59.70               | 90.2 | 135.9                 |
| 3  | EP – 129    | Enero   | Dura         | 1823            | 12.91          | 78.80                 | 59.46               | 89.6 | 135.0                 |
| 4  | EP – 130    | Febrero | Dura         | 1902            | 10.25          | 79.56                 | 61.56               | 90.2 | 140.9                 |
| 5  | EP – 129    | Febrero | Dura         | 1801            | 12.62          | 81.25                 | 61.34               | 90.0 | 133.4                 |
| 6  | EP – 129    | Febrero | Dura         | 1841            | 12.05          | 78.50                 | 59.30               | 88.9 | 136.4                 |
| 7  | EP – 130    | Marzo   | Dura         | 1963            | 11.01          | 79.85                 | 58.30               | 91.5 | 145.4                 |
| 8  | EP – 130    | Marzo   | Dura         | 1898            | 10.60          | 81.87                 | 59.45               | 92.1 | 140.6                 |
| 9  | EP – 129    | Marzo   | Dura         | 1860            | 11.14          | 81.25                 | 61.30               | 88.5 | 137.8                 |
| 10 | EP – 130    | Marzo   | Dura         | 1879            | 10.36          | 81.10                 | 58.36               | 90.6 | 139.2                 |
| 11 | EP – 130    | Abril   | Dura         | 1921            | 10.92          | 81.56                 | 61.25               | 88.9 | 142.3                 |
| 12 | EP – 129    | Abril   | Dura         | 1865            | 10.79          | 79.80                 | 58.17               | 90.4 | 138.2                 |
| 13 | EP – 130    | Abril   | Dura         | 1925            | 10.36          | 81.30                 | 60.12               | 88.3 | 142.6                 |
| 14 | EP – 129    | Abril   | Dura         | 1890            | 11.32          | 78.50                 | 58.67               | 89.8 | 140.0                 |
| 15 | EP – 130    | Abril   | Dura         | 1899            | 12.10          | 79.56                 | 59.00               | 88.1 | 140.7                 |

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la teoría, para roca de dureza dura se recomienda aplicar un mayor pulldown, un mayor caudal de aire y un menor RPM.

Con base en los datos registrados en el cuadro, al aplicar estos parámetros según lo establecido teóricamente, se observa que la vida útil de las brocas ha superado el rango inicialmente definido por el fabricante Coretech.

#### 4.6.3. Fallas frecuentes en la perforación

Las fallas frecuentes que influyen en el proceso de perforación son:

a) Tipo de máquina perforadora

*Figura 16: Perforadora DR412i*



Fuente: Elaboración Propia

b) Mantenimiento de equipo

*Figura 17: Mantenimiento a la perforadora*



Fuente: Elaboración Propia

c) Pull down

d) Velocidad de rotación

*Figura 18: Broca desgastada insertos periféricos*



Fuente: Elaboración Propia

e) Presión de aire

f) Velocidad de perforación

g) Condiciones de terreno

*Figura 19: Terreno mineral de densidad de 4.7gr/gg*



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.6.4. Costo de perforación

Para determinar el costo total de perforación (TDC) se aplicó la formula desarrollada en el marco teórico.

$$TDC = \frac{B}{M} + \frac{D}{ROP}$$

En este caso Para el cálculo del TDC necesitamos saber que el costo horario (D) de la perforadora Sandvik DR412i que es de 390US\$/h, y el precio de la broca (B) Coretech es de 3310.31 US\$.

##### 4.6.4.1. Determinación del costo total de perforación

Se determino el TDC en roca de dureza dura aplicando la formula, como se muestra:

$$TDC = \frac{3310.31US\$}{1860} + \frac{390US\$}{10.80}$$

$$TDC = 37.89 US\$/m$$

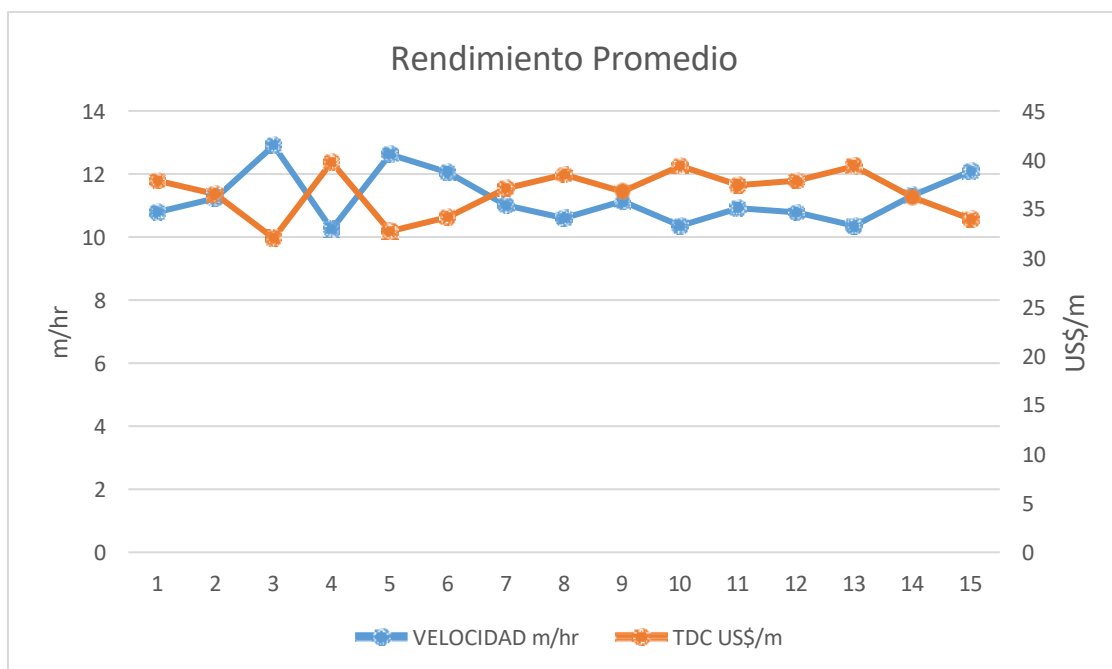
El resultado del cálculo del Costo Total de Perforación (TDC) para roca de dureza dura, aplicando los parámetros operativos y costos de la perforadora Sandvik DR412i y la broca Coretech, es de 37.89 dólares americanos por metro lineal perforado (US\$/m). Este valor integra tanto el costo horario del equipo como el costo de la broca distribuido a lo largo de su vida útil, reflejando la eficiencia económica alcanzada bajo las condiciones técnicas aplicadas.

*Tabla 25: TDC roca dura*

| <b>Nº</b> | <b>Perforadora</b> | <b>Mes</b> | <b>Tipo de roca</b> | <b>Metros lineales</b> | <b>Velocidad m/hr</b> | <b>TDC US\$/m</b> |
|-----------|--------------------|------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1         | EP – 129           | Enero      | Dura                | 1860                   | 10.80                 | 37.89             |
| 2         | EP – 130           | Enero      | Dura                | 1835                   | 11.23                 | 36.53             |
| 3         | EP – 129           | Enero      | Dura                | 1823                   | 12.91                 | 32.03             |
| 4         | EP – 130           | Febrero    | Dura                | 1902                   | 10.25                 | 39.79             |
| 5         | EP – 129           | Febrero    | Dura                | 1801                   | 12.62                 | 32.74             |
| 6         | EP – 129           | Febrero    | Dura                | 1841                   | 12.05                 | 34.17             |
| 7         | EP – 130           | Marzo      | Dura                | 1963                   | 11.01                 | 37.11             |
| 8         | EP – 130           | Marzo      | Dura                | 1898                   | 10.60                 | 38.53             |
| 9         | EP – 129           | Marzo      | Dura                | 1860                   | 11.14                 | 36.78             |
| 10        | EP – 130           | Marzo      | Dura                | 1879                   | 10.36                 | 39.4              |
| 11        | EP – 130           | Abril      | Dura                | 1921                   | 10.92                 | 37.43             |
| 12        | EP – 129           | Abril      | Dura                | 1865                   | 10.79                 | 37.91             |
| 13        | EP – 130           | Abril      | Dura                | 1925                   | 10.36                 | 39.36             |
| 14        | EP – 129           | Abril      | Dura                | 1890                   | 11.32                 | 36.2              |
| 15        | EP – 130           | Abril      | Dura                | 1899                   | 12.10                 | 33.97             |

Fuente: Elaboración Propia

*Gráfico 8 Rendimiento promedio en función al costo*



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico de Rendimiento Promedio permite visualizar la relación entre la velocidad de perforación (en m/h) y el Costo Total de Perforación (TDC en US\$/m). Se observa una tendencia clara: a mayor velocidad de perforación, menor costo por metro.

En las brocas donde se aplicó una mayor velocidad de perforación, el TDC se mantuvo en un rango eficiente, entre 32.03 y 32.74 US\$/m. Por el contrario, en aquellas brocas operadas con velocidades de perforación más bajas, el TDC presentó un incremento significativo, alcanzando valores entre 37.11 y 39.79 US\$/m.

Esto confirma que, en condiciones operativas controladas, optimizar la velocidad de perforación no solo mejora el rendimiento en metros por hora, sino que también reduce de manera importante el costo unitario de la perforación, reflejando una mayor eficiencia operativa y económica en el proceso minero.

## **CAPITULO V:**

### **V. ANÁLISIS Y DISCUCIÓN DE RESULTADOS**

#### **5.1. Evaluación de los factores que afectan la durabilidad y rendimiento**

##### **5.1.1. Evaluación de factores en tipo de roca dura mineral**

Los valores de los factores de perforación recomendados para roca dura, de acuerdo con los fabricantes, se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 26: Valores recomendados*

| <b>FACTORES</b> | <b>VALORES<br/>RECOMENDADOS</b> |
|-----------------|---------------------------------|
| Pulldown        | 70,000 – 78,000lb               |
| Presion de aire | 61 m3/min                       |
| RPM             | 90                              |

Fuente: Catalogo de Sandvik

## A. Análisis de valores promedios

Gráfico 9: Valores promedio



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico de promedios operativos para perforación en roca dura permite comparar los valores aplicados en campo con las especificaciones técnicas recomendadas por los fabricantes.

- **Presión de empuje (Pulldown):** El valor recomendado para roca dura es de hasta 78,000 lb. Sin embargo, el gráfico muestra un promedio operativo de 80,000.29 lb, lo cual supera la recomendación. Este exceso de presión genera una carga adicional sobre los cojinetes de la broca, acelerando su desgaste y afectando negativamente su vida útil.
- **Velocidad de rotación (RPM):** Para este tipo de formación, se recomienda un RPM de 90. La teoría indica que en rocas duras se debe priorizar un mayor empuje (pulldown) con una menor velocidad de rotación. En este caso, el promedio

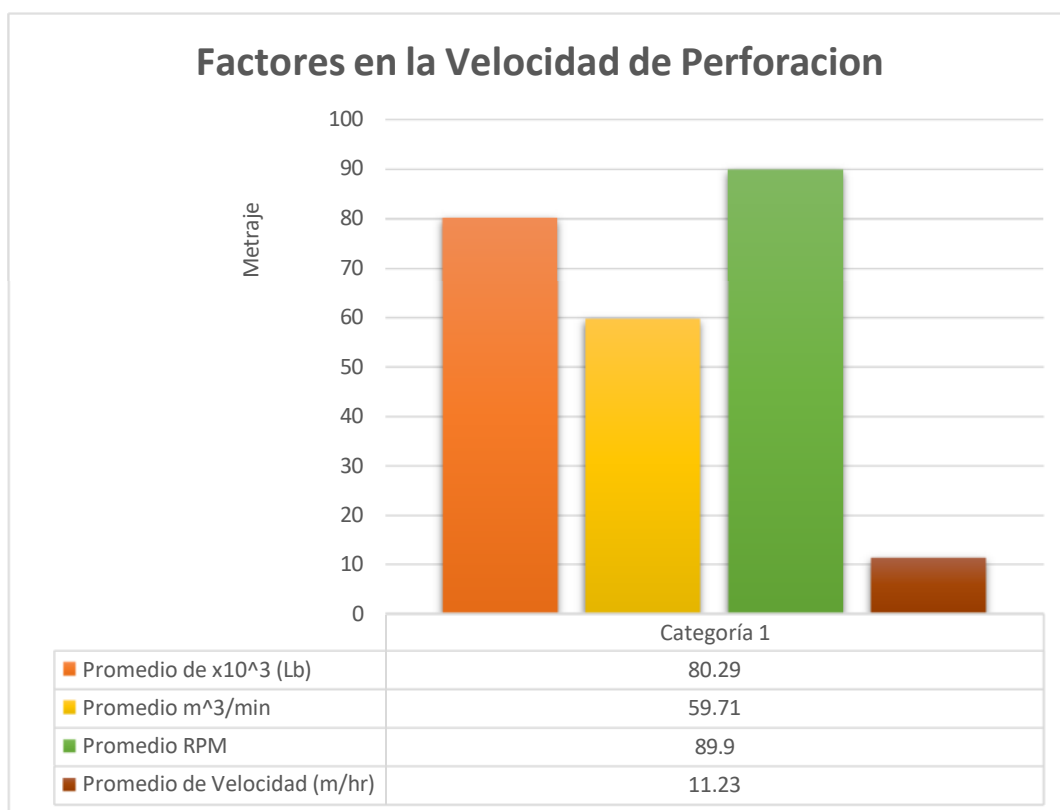
operativo de 89.9 RPM se mantiene prácticamente alineado con el valor recomendado, lo cual es favorable.

- Caudal de aire (Presión de aire): El caudal recomendado para una eficiente evacuación de detritos en roca dura es de 61 m<sup>3</sup>/min. No obstante, el promedio registrado en campo es de 59.71 m<sup>3</sup>/min, ligeramente por debajo del óptimo. Un caudal insuficiente puede comprometer la limpieza del fondo del taladro, generando remolienda de los fragmentos de roca por parte del tricono, lo que deriva en un desgaste acelerado de la broca y reduce su rendimiento.

El análisis evidencia una desviación en dos parámetros críticos: un pulldown excesivo y un caudal de aire inferior al recomendado. Estas condiciones, en conjunto, crean un escenario operativo que promueve el desgaste prematuro de las brocas. Optimizar estos factores hacia los rangos técnicos sugeridos es clave para extender la vida útil de los consumibles y mejorar la eficiencia económica de la perforación.

### ***B. Análisis de la influencia de los factores en la velocidad de perforación***

*Gráfico 10: Influencia de los factores en la velocidad de perforación*



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico anterior presenta la relación entre los principales factores de perforación, presión de empuje (pulldown), caudal de aire y velocidad de rotación (RPM) y su impacto en la velocidad de perforación (m/h), específicamente en condiciones de roca dura.

#### Relación entre pulldown, dureza de la roca y RPM:

Se confirma el principio operativo de que el pulldown aplicado es directamente proporcional a la dureza de la roca; es decir, a mayor dureza, se requiere una mayor fuerza de empuje. Por otro lado, la velocidad de rotación (RPM) es inversamente proporcional a la dureza, por lo que en rocas duras se emplean RPM más bajos para proteger la integridad de la broca.

#### Influencia del RPM en la velocidad de perforación:

A partir de los datos del gráfico, se concluye que la velocidad de rotación está directamente relacionada con la velocidad de perforación en los diferentes tipos de roca. Esto significa que, dentro de los rangos óptimos para cada formación, un mayor RPM generalmente se traduce en una mayor velocidad de avance (m/h).

#### Parámetros registrados en roca dura:

Para el caso analizado, los promedios operativos en roca dura fueron:

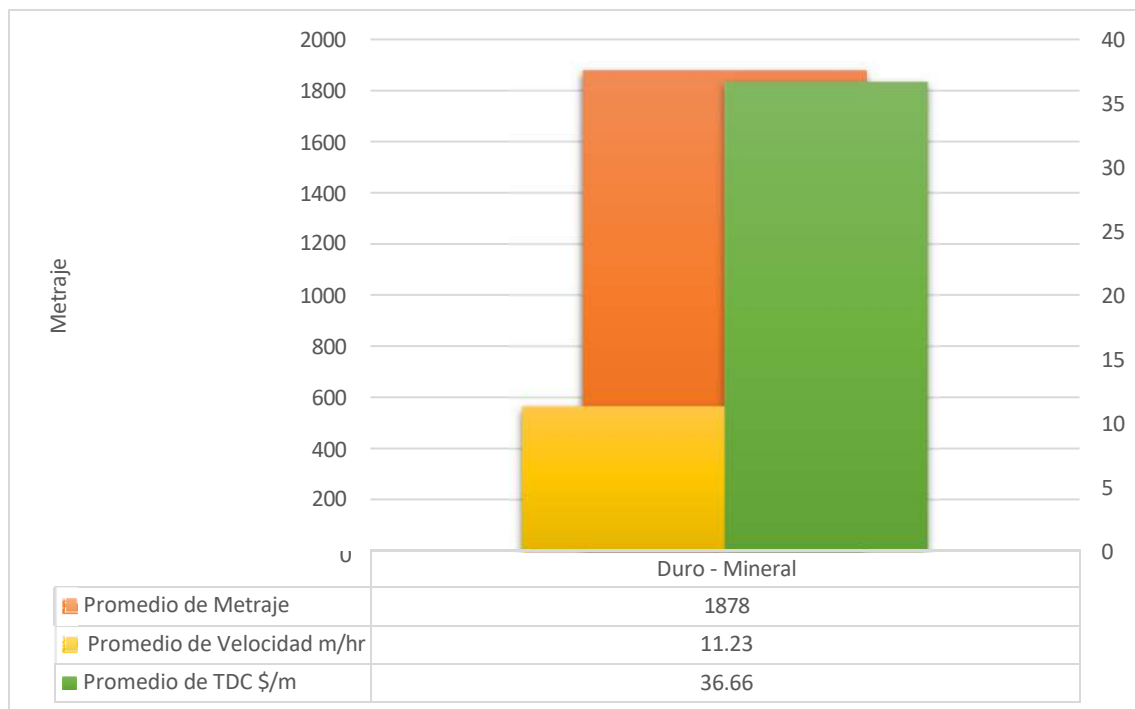
- Pulldown:  $80.29 \times 10^3$  lb
- Caudal de aire: 59.71 m<sup>3</sup>/min
- RPM: 89.9
- Velocidad de perforación resultante: 11.23 m/h

Esta información permite visualizar cómo la interacción de los factores técnico, especialmente el balance entre pulldown y RPM, define directamente la eficiencia de la perforación expresada en metros por hora.

## **5.2. Evaluación de los costos de perforación**

### ***A. Comparación entre el TDC y la velocidad de perforación***

Gráfico 11: TDC vs velocidad de perforación



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico anterior muestra la relación entre la velocidad de perforación (m/h) y el Costo Total de Perforación (TDC en US\$/m) específicamente para el tipo de roca dura en el mineral.

Para las condiciones de roca dura analizadas, se obtuvo una velocidad de perforación promedio de 11.23 m/h, logrando un TDC promedio de 36.66 US\$/m.

La tendencia observada en el gráfico permite concluir que la velocidad de perforación y el TDC mantienen una relación inversamente proporcional en este contexto. Esto significa que, bajo las mismas condiciones de roca, un incremento en la velocidad de perforación (m/h) generalmente se asocia con una reducción en el costo por metro perforado (US\$/m), y viceversa.

Esto refuerza la importancia de optimizar los parámetros de perforación (como el pulldown, RPM y caudal de aire) para maximizar la velocidad de avance, ya que esto no solo mejora la productividad, sino que también conduce a una mayor eficiencia económica al disminuir el costo unitario de la perforación.

### 5.3. Discusión de resultados

La investigación identifica que la durabilidad y el rendimiento de los aceros de perforación en el Tajo Mina 5 están condicionados por la interacción de parámetros operativos y las características geomecánicas del terreno. En el análisis de los factores que afectan las brocas en roca dura, se observó que la presión de empuje (Pulldown) promedio aplicado fue de 80,000.29 lb, cifra que excede el límite recomendado por el fabricante de 78,000 lb. Este exceso de presión genera una carga adicional en los cojinetes, acelerando el desgaste prematuro de la broca. Asimismo, el caudal de aire registrado (59.71 m<sup>3</sup>/min) fue inferior al óptimo de 61 m<sup>3</sup>/min, lo que provoca una limpieza deficiente del taladro y genera remolienda de detritos, impactando negativamente en la vida útil del inserto.

Al comparar estos hallazgos con el antecedente nacional de Wilson Umasi (2013), quien estudió rendimientos de brocas de 12 ¼” en yacimientos skarn, existen puntos de convergencia y divergencia importantes. Umasi concluyó que las brocas de marca Sandvik presentaban una mayor duración y una optimización económica con costos de US\$5.9 por metro

Encontraste la presente investigación, que utiliza brocas Coretech de 11” en un contexto de magnetita y hornfels (roca dura – muy dura)

Costo Total de Perforación (TDC) promediode 36.66 US/m. Esta diferencia sustancial en el costo unitario se explica porque el TDC calculado en este estudio integra no solo el costo de la broca, sino también el costo horario del equipo de perforación (US\$ 390/h), reflejando una evaluación técnico-económica más integral que la de Umasi, la cual parece enfocarse primordialmente en el costo directo del acero.

En cuanto al rendimiento de las barras, los resultados demuestran que la marca Newman superó a Mammoth, alcanzando un promedio de 23,372.50 metros frente a los 21,686.33 metros de la segunda. A pesar de esta diferencia en metraje, ambas marcas presentan un costo directo de perforación (PDC) idéntico de 0.26 \$/m, lo que sugiere que la elección de la barra Newman ofrece una mayor disponibilidad operativa al requerir reemplazos menos frecuentes por el mismo costo unitario.

Finalmente, se válida la relación inversamente proporcional entre la velocidad de perforación y el TDC. Mientras que en brocas operadas a mayores velocidades el TDC se redujo a rangos de 32.03 - 32.74 US/m, aquellas con velocidades menores elevaron el costo hasta los 39.79US/m. Esto refuerza la importancia de la capacitación del operador y el ajuste preciso de los parámetros de perforación para maximizar la productividad y minimizar el impacto económico en la operación minera.

## CONCLUSIONES

Se concluye que la gestión inadecuada de factores como el Pulldown, que alcanzó promedios de 80,000.29 lb excediendo los límites técnicos, y un caudal de aire deficiente de 59.71 m<sup>3</sup>/min, son los principales responsables del desgaste prematuro de las brocas y barras. La optimización de estos factores es fundamental para garantizar la continuidad operativa y alcanzar la vida útil proyectada por los fabricantes en condiciones de alta abrasividad

Se concluye que el exceso de presión de empuje (Pulldown) genera una carga sobre los cojinetes de la broca, mientras que el caudal de aire inferior al óptimo (61 m<sup>3</sup>/min) impide una limpieza eficiente del fondo del taladro, provocando la remolienda de detritos. Este escenario operativo, aunque mantiene velocidades de penetración promedio de 11.23 m/h, compromete la integridad estructural de los insertos y los faldones de las brocas tricónicas

Se concluye que las barras de la marca Newman presentan una mayor eficiencia operativa, alcanzando un promedio de 23,372.50 metros perforados, superando a las barras Mammoth que registraron 21,686.33 metros. Respecto a las brocas Coretech, se registró un consumo total de 42 unidades en el periodo de estudio, logrando rendimientos que superaron el estándar del fabricante de 1,800 metros en roca dura.

Se concluye que la evaluación técnico-económica determinó que existe una relación inversamente proporcional entre la velocidad de perforación y el Costo Total de Perforación (TDC), estableciendo un costo promedio de 36.66 US/m, en roca dura se observa que al optimizar la velocidad de avance de 10.25 m/h a 12.91 m/h, el TDC se reduce significativamente de 39.79US/m a 32.03 US\$/m, lo que resalta el impacto económico de la eficiencia operativa. Asimismo, aunque ambas marcas de barras analizadas presentan un costo directo (PDC) idéntico de 0.26 \$/m, la marca Newman resulta económicamente más favorable para la empresa debido a su mayor rendimiento métrico por unidad adquirida.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda al área de Perforación y Voladura revisar y ajustar los parámetros de perforación en roca dura para alinearlos con las especificaciones del fabricante, controlando estrictamente el pulldown y garantizando el caudal de aire óptimo de 61 m<sup>3</sup>/min para proteger la integridad de las herramientas.

Se recomienda a la parte de Entrenamiento de Perforación implementar un protocolo de monitoreo en tiempo real del pulldown y del caudal de aire, junto con Capacitación específica a los Operadores, para evitar la remolienda y el estrés mecánico excesivo en los cojinetes y faldones de las brocas.

Se recomienda a la parte técnica de Pervol priorizar la adquisición de barras Newman por su mayor rendimiento métrico y estandarizar el uso de brocas Coretech, complementado con un programa continuo de registro de metros perforados por broca para validar y supervisar su desempeño.

Se recomienda tener conocimiento de la ficha técnica de los Aceros como objetivo operativo la optimización de la velocidad de penetración dentro de los rangos técnicos seguros, ya que es el principal factor para reducir el TDC. Para la selección de barras, considerar el costo total de propiedad, favoreciendo a la marca Newman por su mayor vida útil a igual PDC.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aparco Huillcas, A. (2019). *Optimización de la vida útil de los aceros de perforación para la reducción de costos en Mina san Vicente – Cia. San Ignacio de Morococha S.A.A. año 2018*. Huacavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- Atlas Copco. (2017). *Manual de perforación*. Lima: Atlas Copcp.
- Bieniawski. (1989). *Clasificación geomecánica*.
- Camus, J. (2002). *Management of Mineral Resources: Creating Value in the Mining Business*. Colorado USA: Society for Mining Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Chirinos Andía, A. M. (2015). *Control de aceros de perforación, factores que influyen la vida útil, su relación con el paralelismo y profundidad en el proyecto de expansión k-115 JCC contratistas generales s.a. Sociedad Minera Cerro Verde*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Herrera Herbert, J. (2018). *Métodos de Minería por Transferencia*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - España.
- Llaique Nuñoncca, Á. A., & Sánchez Guevara, W. O. (2015). *Determinación del Costo Total de Perforación para Optimizar esta Operación Unitaria en Mina Modelo a Tajo Abierto, Cajamarca - Perú, 2015*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- López Jimeno, C. (2019). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Lozano, A. (2019). *Martillo Schmidt - Esclerómetro*. Lima: Geoinstruments S.A.C.
- Mayoral Fernandez, R. (2012). *Optimización técnico – económica de perforación de barrenos en terrenos homogéneos. Búsqueda de leyes de desgaste para bocas de perforación*. Asturias: Universidad de Oviedo - España.
- Ramírez Oyanguren, P. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos de la Ingeniería de Taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - España.
- Wilson Umasi, C. (2013). *Estudio de comparación entre rendimientos en brocas de 12 ¼" en yacimientos Skarn a tajo abierto para selección óptima*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.

## **ANEXOS**

## **1. ASPECTOS GENERALES ACTUALES DEL AREA DE ESTUDIO**

### **1.1. HISTORIA DE LA MINA SHOUGANG HIERRO**

- 1906: El Ing. Federico Fuchs descubrió las desviaciones que se presentaban en sus compas cuando realizaba estudios a un prospecto de cobre a los alrededores.
- En 1914 Fuchs regreso a la zona de descubrimiento para realizar mayores estudios junto con Roberto Letts y Justo Pastor un residente de la zona; a quien se le comento sobre los hallazgos de unas piedras duras de color negro que yacían sobre una pampa de Marcona.
- En 1915 se hizo el gran anuncio acerca del descubrimiento, el cual estuvo a cargo del Ing. Futchs, expandiendo la noticia a través de las publicaciones de la Sociedad de Ingenieros del Perú.
- En 1924 en el Perú se creó la comisión siderúrgica Nacional con el objetivo de analizar los recursos del carbón y hierro en el país, siendo declarado reserva nacional al distrito de Marcona.
- En 1940 la empresa Brassert Company of NY continuo con la indagación y explotación del mineral, aportando además con el desarrollo e implementación de programas para el desarrollo del área, estas investigaciones fueron dirigidas por expertos desde Mancha A, lo que conllevó a 2000 metros de perforación diamantina.
- En 1943 en el Perú se creó la sociedad Santa, con el objetivo de desarrollar una producción nacional para la producción de acero con hornos y molinos en la ciudad de Chimbote, otorgando a la concesión de Marcona como capital.
- En 1951 el geólogo Fernández, en ese entonces consultor especialista de la corporación Santa, llevo a cabo el primer levantamiento geológico en la región a una escala de 1:50,000 y 1:20,000 de escala en la zona local; en ese sentido el distrito fue reconocido por su gran potencial en la producción de minerales de fierro en Sub-América.
- En 1953 se desarrolló el área E-Grid dirigido por Marcona Mining Company, en San Juan, por facilidades en el puerto y para el embarque, construyéndose una planta de chancado, vías de acceso y campamentos. Los anfitriones fueron La Cypress Minas Corp. y Utah, quienes dirigieron el primer embarque de este mineral.

- En 1975 se creó a la compañía “Minera del Hierro del Perú” denominada Hierro Perú S.A, establecida bajo Decreto de Ley N° 21228, para la nacionalización del espacio minero y metalúrgico de Marcona ordenando la nacionalización de los recursos peruanos de la filial de Marcona “Mining Company”.
- La empresa China “Shougang Hierro Perú S.A.A”, inicio sus actividades en 1993 a través del proceso de privatización.
- Durante el año 2000 se concretó la alianza estratégica para la gestión de riesgos empresariales denominado Join Venture, facultada por las empresas “Shougang Hierro Perú S.A.A” y “Rio Tinto Mining & Exploration”.
- Durante el 2008 la empresa minera “Shougang Hierro Perú S. A.A” da inicio al esparcimiento de sus obras a través de la investigación de la mancha “N-13” y mina “14” realizando una inversión de alrededor de 2000 millones de dólares, denominado hoy en día como la Zona Nueva.

## **1.2. GEOLOGIA DEL YACIMIENTO**

### **1.2.1. GEOLOGIA REGIONAL**

Esta zona se encuentra en la cordillera de la costa, constituida por granodiorita de antigüedad cretácico superior que doctrino inicialmente a metamórficos entre el inicio y fin de la formación de la tierra, rocas metamórficas marinos durante la era paleozoica del periodo de turba inferior y meta-volcánicos mesozoico de edad Jurásica, todas las cuales están muy avanzados. Así mismo, encontramos rocas con precipitaciones del cretácico menor y superior, precipitación terciario muy oblicuo y no muy solidificados (Carrillo, 2019).

Así mismo, existen grandes cantidades de rocas intrusivas en diversas presentaciones como diques o efusiones tabulares que atraviesan y trozan todas las formaciones, siendo consideradas en su gran mayoría vetas post-mineral lo que en conjunto con el fallamiento producen estructuras complejas debido a los cambios en los movimientos orogénicos andinos.

#### **1.2.1.1. ESTRATIGRAFIA**

La veta caja está constituida primariamente de Hornfels Filítico Cuarzoso, Colomítica, Filitas negras y Hornfels Silisicado y presenta al mismo tiempo andesitas, dioritas,

granodioritas dacitas y diques básicos presentado en representación de organismos hipabisales que se describen a continuación.

### **Andesitas**

Son formas de Sills y Stock determinados y caracterizados (N-S, N.W y S-E), los cuales se forman del proceso de mineralización, los cuales son petrográficamente andesitas porfíricas con elevados ferrocristales de plagioclasa que poseen un color negruzco grisáceo y levemente rosáceo.

### **Dioritas**

Este tipo de roca se presenta en forma de rumbo NW, la cual esta compuesta por grano fino además de plagioclasas y cuarzo.

### **Granodioritas**

Este tipo de roca también es considerada un post-mineral en forma de diques delgados bajo las características NS y MW y SE, la cual posee una contextura fina equigranular, compuesto por diversos minerales como las plagioclasas y también de otros minerales complementarios como la diorita.

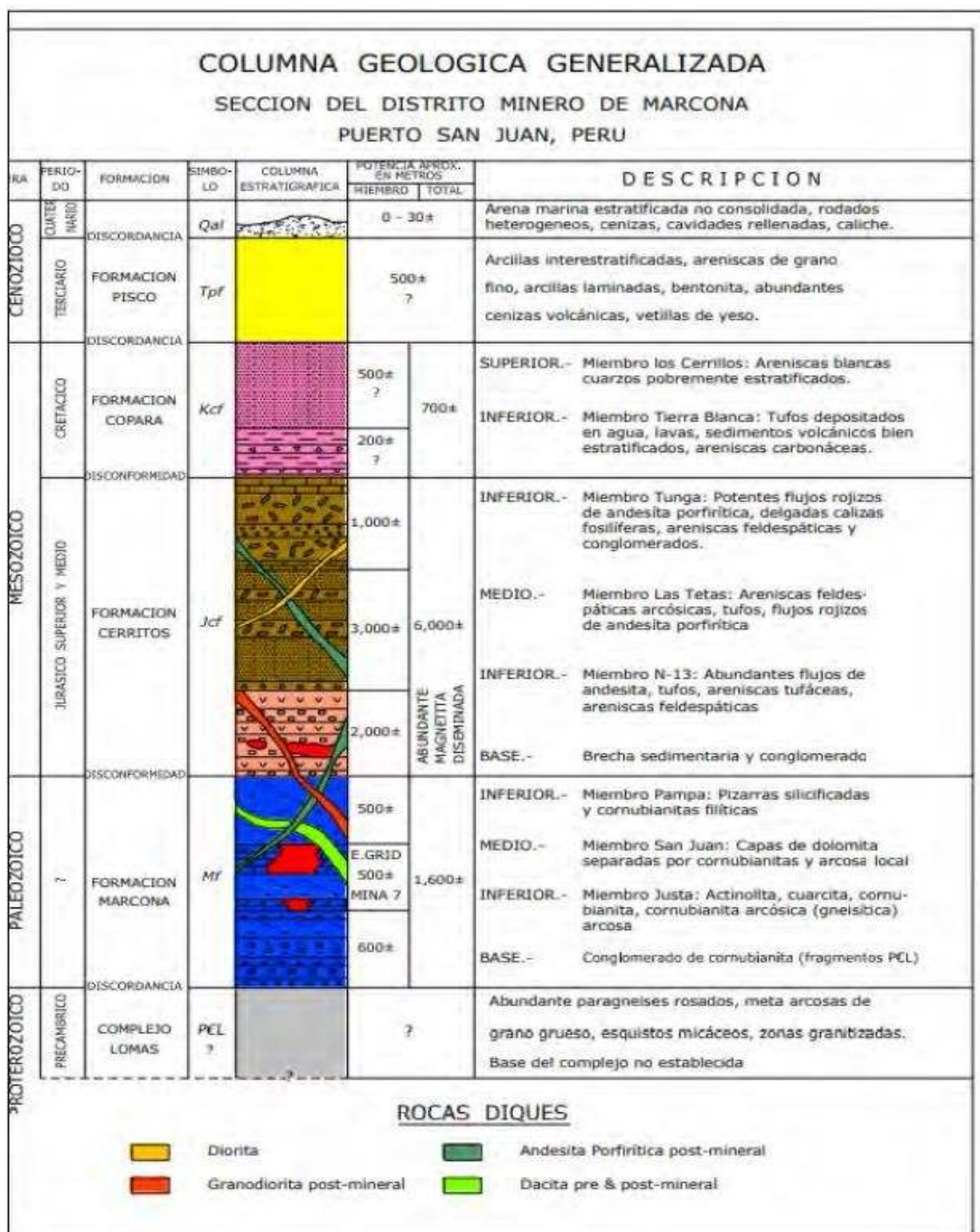
### **Dacitas**

Este tipo de veta es la más predominante en el yacimiento de Marcona, la cual tiene una estructura de diques y mantos intrusivas, las cuales son muy anormales; así mismo la veta porfírica de característica rosa verde está desarrollado por andesita, clinopiroxenos, minerales opacos y algunas veces hornblendas. Se presenta antes y después de formado el mineral.

### **Diques Básicos**

Estas se localizan en almacenamientos de mineral, en las lomas Marcona y cerritos, así mismo esta se presenta de forma irregular antes de la mineralización y está compuesta por basáltico doleríticos, y luego de transferir una mineral a una sustancia, siendo andesíticos-dioríticos, presentándose de manera usual.

Gráfico 12: Columna geológica de mina Shougang Hierro Perú.



Fuente: Shougang Hierro Peru

### 1.2.2. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El conjunto estratigráfico del yacimiento este compuesto por una estructura homoclinal, con dirección al suroeste y noroeste que oscila entre 35° y 65° de buzamiento al noroeste. Por otro lado las precipitaciones poseen una dirección hacia el noroeste y desviaciones al noroeste desarrollando un anticlinal, la cual se encuentra actualmente erosionado.

Bajo este panorama geológico surgen los cuerpos de mineral los cuales están conformados con una secuencia uniforme de restos o flanco del pegamiento más complejo. Sin embargo, esta estructura resulta de la complejidad de los fallamientos e intrusiones además de los movimientos telúricos.

Fallamiento y estructura. A continuación, se presentan los 3 principales métodos de fallamientos, desarrollados en diferentes etapas:

#### **A. Fallas pistas**

Estas se producen antes y después de la mineralización, de característica gravitacional rumbo a N° 60 E y de 60° NE de buzamiento. Así mismo los plegamientos menores están conformados por fracturamientos fuertes de la alienación Marcona.

#### **B. Falla repetición**

Se presentan en características tensionales y compresionales de forma inversa con dirección paralela de estratificación M45°E luego de la mineralización. Estas fallas se pueden encontrar al sur del yacimiento cinco, poniéndose en contacto con la formación Marcona y Cerritos

#### **C. Falla la Huaca**

Estas fallas se presentan post mineral, siendo consideradas a las más actuales en paralela con la “cordillera de los Andes N25°E”, iniciando la regeneración, omisión de estratos y a las transformaciones bruscas desde diversos ángulos de orientación y buzamiento.

### **1.3. METODO DE EXPLOTACION**

La minería superficial comprende dos etapas: la primera etapa que es el pre minado o desbroce que consiste en descubrir el yacimiento hasta dejarlo en condiciones de poder entrar en producción al ritmo previsto en el proyecto, la segunda etapa consiste en el minado o producción de la mina que se caracteriza por la implementación de toda la infraestructura para poder producir el mineral en distintas cantidades y calidades exigidas. Para el cumplimiento de la producción se debe realizar la construcción del proyecto que entre otros aspectos debe considerar: el desbroce dichamente, la construcción de canchas de almacenamiento de mineral, estéril, material orgánico, relaves, la construcción de plantas: de tratamiento, de mantenimiento, de agua; la construcción de infraestructura física para oficinas, talleres, laboratorios, campamentos; etc.

### **1.3.1. CAPACIDAD DE PRODUCCION**

La explotación de Mina 5 se realiza por fases (Push Backs).

La altura de Banco es de 13 m dependiendo del tipo de roca varían las alturas, con rampas de diseño de 9% de gradiente, anchos de rampas de 18 m, taludes de trabajo de 70° y banquetas de 5m. La producción diaria es de 24,000 TM de Mineral al día y 24,000 TM de desmonte actualmente.

### **1.3.2. DISEÑO DEL TAJO**

La longitud de un banco se da en función al distanciamiento vertical por cada nivel horizontal en función al tajo. Estos bancos deben contener la misma longitud a diferencia de que se presenten otras situaciones geológicas, lo que dependerá de los criterios físicos del almacenamiento.

En la mina 5 la altura del banco es de 12 m, y en mina 11 y 16 la altura del banco es de 13m en ambos casos con una sobre perforación de 1 metro para el desmonte y 1.5 metros para el mineral. Esto con el objetivo de incrementar la eficiencia de la perforación y el rendimiento de las palas.

### **1.3.3. CICLO DEL MINADO**

#### **1.3.3.1. PERFORACION**

Se realiza la perforación vertical (cuerpos de mineral de hierro) mediante taladros; se realizan 2 tipos de perforación: Perforación Primaria y Perforación Secundaria si es necesario el caso.

La perforación de mina 5 se realizan con equipos con equipos Diesel EP – 129 y EP – 130 estos equipos son de marca Sandvik de 11" de diámetro.

El diseño de mallas de perforación es generado en el gabinete de topografía y planeamiento según las condiciones del terreno, dureza, diámetro del taladro, las mallas más comunes que se maneja entre proyectos se van ajustando de acuerdo a la dureza del terreno, buscando optimizar el rendimiento de perforación y minimizar los costos, la sobreperforación en el proyecto varía entre 1 m - 2m.

En nuestro caso en mina 5 producción la malla es triangular de 4.7m x 5.3m

#### **1.3.3.2. VOLADURA**

Las voladuras son producidas por explosivos y accesorios los cuales detonan para producir el efecto de liberación violenta de energía, convirtiéndose en gases con alta presión y temperatura con liberación de calor, estos explosivos, se clasifican de forma cinética y de forma energética dependiendo de la velocidad de propagación y de la cantidad de energía necesaria para su activación respectivamente. La finalidad de las explosiones es fracturar la roca, o lograr un empuje hacia adelante o hacia la cara libre. La voladura se hace con Heavy Anfo 37,46,45,55 dependiendo del caso, se hace el carguío de taladros con camión fábrica Orica y los accesorios de voladura tanto como Famesa y Orica.

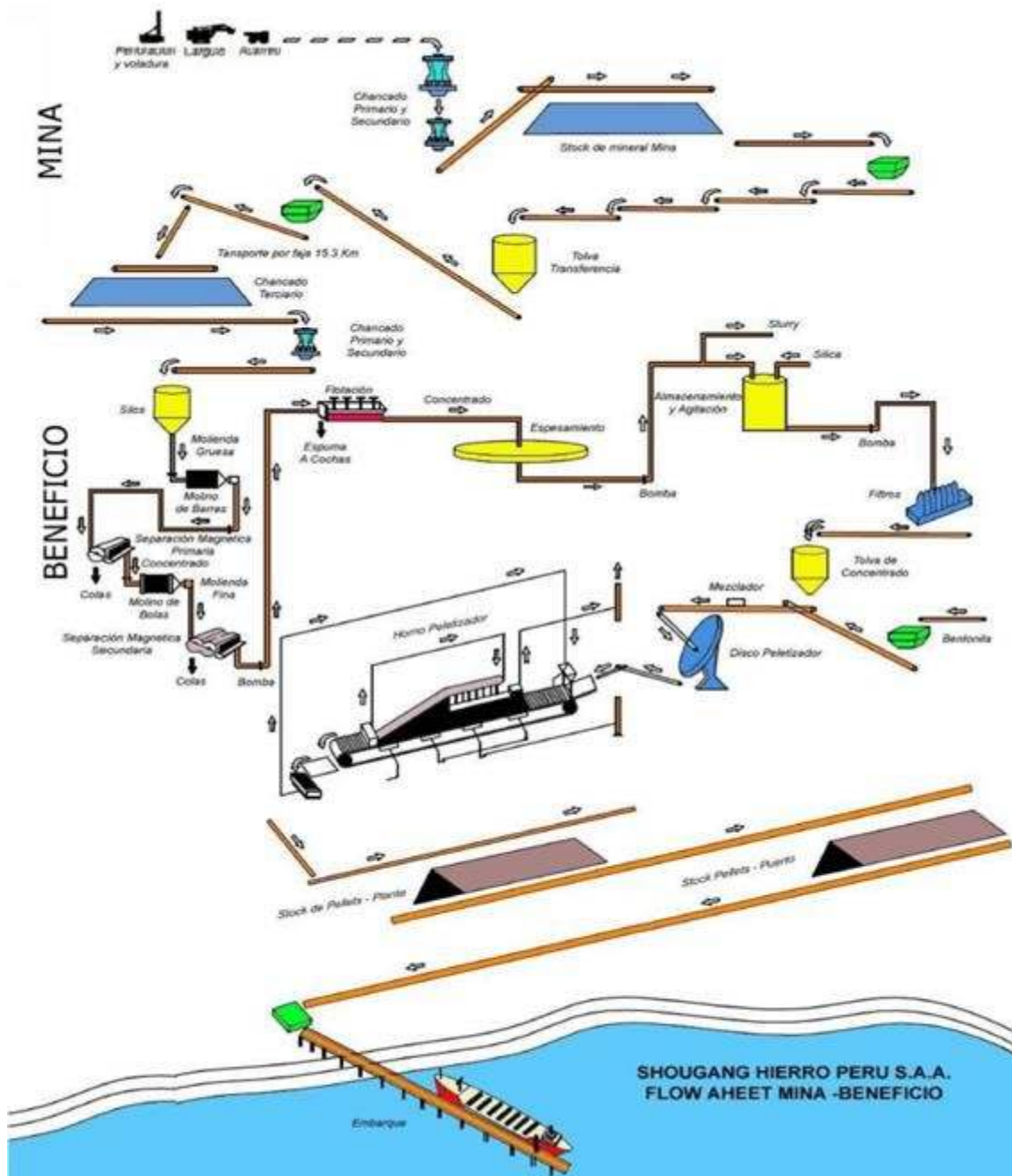
#### **1.4. CHANCADO (MINA)**

Para este subproceso del chancado en mina se realiza el chancado de minerales y baja ley. Y para esto se utilizan 2 plantas chancadoras que son las siguientes:

- Planta 1: Chancado de Mineral.
- Planta 2: Chancado de Mineral y baja Ley.

##### **1.4.1. FLOW SHEET**

Gráfico 13: FLOW SHEET



Fuente: Shougang

#### 1.4.2. PRODUCTOS

El producto depositado en canchas de Stock de Puerto, es enviado mediante dispositivos denominados Chutes al Túnel de Embarque.

Mediante un sistema de Fajas, el producto es transferido a la zona de Embarque.

Posteriormente, el producto pasa por una balanza, la cual pesa el tonelaje embarcado.

Finalmente, el producto es transportado por una Faja al Muelle, en el cual se ubica otro equipo Apilador Móvil denominado Gantry, que lo deposita en las bodegas del Barco. Durante todo el proceso, se toman muestras de las cuales son enviadas al laboratorio, el cual está dividido en:

- Laboratorio Metalúrgico: Donde se realizan pruebas físicas
- Laboratorio Químico: Donde se realizan pruebas químicas