

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**DESEMPEÑO DE BROCAS TRICÓNICAS UTILIZANDO EL
PDC COMO INDICADOR DE RENTABILIDAD EN
OPERACIÓN MINERA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Luigi Fernando Meléndez Gonzales

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

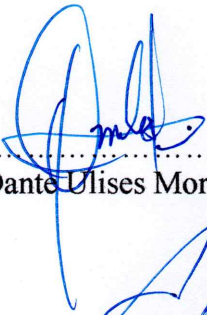
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

“DESEMPEÑO DE BROCAS TRICÓNICAS UTILIZANDO EL PDC COMO INDICADOR DE RENTABILIDAD EN OPERACIÓN MINERA”

Tesis sustentada y aprobada el miércoles 02 de julio de 2025, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera


SECRETARIO


.....
Dr. Carlos Huisa Ceori

VOCAL


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

ASESOR


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, SALOMÓN MEDARDO ORTIZ QUINTANILLA, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 9332-2024-FAIN/UNJBG de la tesis titulado: DESEMPEÑO DE BROCAS TRICÓNICAS UTILIZANDO EL PDC COMO INDICADOR DE RENTABILIDAD EN OPERACIÓN MINERA

Presentado por el Bachiller LUIGI FERNANDO MELÉNDEZ GONZALES, Para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual TURNITIN** cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 10%** Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 15 de octubre de 2025

FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos, DNI Salomón Medardo Ortiz Quintanilla 00425524

ORCID: 0000-0002-5185-9929



Huella digital

FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos, DNI Luigi Fernando Meléndez Gonzales

Código C.U. N°: 2017-101006



Huella digital

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado, en primer lugar, a Dios, quien me ha dado la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar este proyecto de investigación.

Dedico este trabajo a todas las personas que hicieron posible mi formación y desarrollo como profesional. A quienes me acompañaron con su apoyo, aliento y confianza a lo largo de este arduo y gratificante camino que hoy empieza a rendir sus frutos.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que pudiera alcanzar esta meta.

Quiero agradecer profundamente a todos aquellos que me brindaron su apoyo, orientación y confianza a lo largo de este proceso. Desde mis profesores, hasta mis amigos y compañeros, su aliento ha sido fundamental para superar cada desafío. Sin obviar a mi asesor el ingeniero Salomón, quien me tendió la mano, para poder avanzar en este proceso. Tengo tantos más a los que mencionar y aunque no los mencione uno por uno, sepan que cada uno de ustedes ha dejado una huella importante en mi formación y desarrollo.

A mi familia, por su amor incondicional y por estar siempre a mi lado, sin importar las circunstancias.

Finalmente, agradezco a todas las personas que me inspiraron, me guiaron y creyeron en mí. A cada uno de ustedes, gracias de corazón.

CONTENIDO

Dedicatoria	ii
Agradecimiento.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
Introducción	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema a investigar.	3
1.2. Descripción del problema.	5
1.3. Formulación del problema.	6
1.3.1. Problema general.....	6
1.3.2. Problemas específicos.....	7
1.4. Objetivos de la investigación (general y específicos).	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación e importancia de la investigación.	8
1.6. Limitaciones.....	9
1.7. Viabilidad del estudio.	11
1.8. Formulación de hipótesis.....	13
1.8.1. Hipótesis general	13
1.8.2. Hipótesis específicas	13
1.9. Variables (independientes y dependientes).....	14
1.9.1. Variables independientes	14
1.9.2. Variables dependientes	14

1.10.	Operacionalización de variables (indicadores y dimensiones).....	15
-------	--	----

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación.....	16
2.1.1.	Antecedentes nacionales.....	16
2.1.2.	Antecedentes internacionales.....	17
2.2.	Bases teóricas.....	18
2.2.1.	Método de perforación rotatoria.....	18
2.2.2.	Unidad de potencia motriz.....	19
2.2.3.	Sistema de izaje.....	21
2.2.4.	Sistema rotatorio.....	22
2.2.5.	Columna de perforación.....	23
2.2.6.	El sistema de circulación del fluido de perforación.....	23
2.2.7.	Equipos de perforación.....	24
2.2.8.	Partes de la columna de perforación.....	25
2.2.9.	Barras de perforación.....	26
2.2.10.	Estabilizador o adaptador de triconos.....	27
2.2.11.	Brocas tricónicas.....	28
2.3.	Tipos de tricono dependiendo de la formación rocosa.....	31
2.3.1.	Triconos para formaciones blandas.....	31
2.3.2.	Triconos para formaciones medianas.....	32
2.3.3.	Triconos para formaciones duras.....	33
2.4.	Carburo de tungsteno.....	34
2.4.1.	Proceso de fabricación.....	35
2.4.2.	Propiedades físicas.....	35
2.4.3.	Sistema de barrido.....	36
2.4.4.	Criterios de diseño.....	36
2.4.5.	Geometría de los conos.....	37
2.4.6.	Excentricidad.....	38
2.4.7.	Tamaño y disposición de los dientes e insertos.....	38

2.5.	Selección del tipo de tricono.....	38
2.5.1.	Varel.	38
2.5.2.	Core tech	39
2.5.3.	Composición detallada de brocas tricónicas de 10 5/8"	40
2.6.	Variables De Operación	44
2.6.1.	Velocidad de rotación	45
2.6.2.	Velocidad de penetración	47
2.6.3.	Fuerza de empuje y diámetro de perforación.....	49
2.6.4.	Velocidad y caudal del aire de barrido.....	52
2.7.	Parámetros de perforación independientes de la operación.....	54
2.7.1.	Elasticidad.....	54
2.7.2.	Plasticidad.....	55
2.7.3.	Abrasividad	56
2.8.	Selección de toberas.....	57
2.9.	Desgaste del tricono	58
2.10.	Hilos de acoplamiento	59
2.10.1.	Hilos beco	59
2.10.2.	Hilos API.....	61
2.10.3.	Broca varel	62
2.10.4.	Broca core tech.....	63
2.10.5.	Indicadores de rendimiento en perforación	63
2.10.6.	Perforación rotativa con triconos	64
2.10.7.	Factores que afectan el rendimiento de las brocas	65
2.10.8.	Evaluación económica de las brocas.....	66
2.10.9.	Tecnologías de monitoreo en tiempo real	66
2.11.	Definiciones conceptuales	67
2.12.	Total drilling cost (costo total de perforación).....	68
2.12.1.	Costo total de acero de perforación:	69
2.13.	Características de la mina de roca andesítica	71
2.14.	Características geológicas del yacimiento de la mina de roca andesítica	75

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1.	Planteamiento metodológico (tipo, nivel y diseño de investigación).....	78
3.1.1.	Tipo de investigación	78
3.1.2.	Nivel de investigación	78
3.1.3.	Diseño de investigación	79
3.2.	Población y muestra (si es aplicable)	80
3.2.1.	Población	80
3.2.2.	Muestra	81
3.3.	Técnicas de recolección de datos.....	82
3.3.1.	Sistema automatizado de monitoreo: jview	83
3.3.2.	Observación directa de los operadores	84
3.3.3.	Revisión de los reportes generados por jview	84
3.3.4.	Validación de los datos	85
3.4.	Técnicas para el procesamiento de datos	85
3.4.1.	Elección de los datos.....	85
3.4.2.	Cálculo de promedios	86
3.4.3.	Generación de gráficos	87
3.4.4.	Análisis comparativo	87
3.4.5.	Interpretación de los resultados	87

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1.	Descripción de las pruebas experimentales.....	89
4.1.1.	Metraje y PDC: resultados clave	89
4.1.2.	Análisis comparativo.....	90
4.1.3.	Conclusión de las pruebas	91
4.2.	Presentación y análisis de los resultados	91
4.2.1.	Estándar de rendimiento y costo parcial de perforación (PDC)	91
4.2.2.	Resultados de las pruebas en mismas zonas de la mina de roca andesítica	92

4.2.3.	Enfoque en la rentabilidad de las marcas	93
4.2.4.	Conclusiones del análisis de rentabilidad	94
4.3.	Contrastación de la hipótesis.....	94
4.3.1.	Hipótesis general	95
4.3.2.	Hipótesis específicas	95
4.3.3.	Conclusión de la contrastación de Hipótesis.....	97

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1.	Discusión de resultados pruebas	98
5.2.	Influencia de las condiciones geológicas en el rendimiento de las brocas.....	99
5.3.	Efectividad del análisis comparativo mediante PDC	100
CONCLUSIONES		104
RECOMENDACIONES.....		106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107
ANEXOS		113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de variables (Indicadores y dimensiones).....	15
Tabla 2: Equipos usados para las pruebas	25
Tabla 3: Triconos con dientes.....	43
Tabla 4: Triconos con insertos.....	44
Tabla 5: Clasificación de rocas según dureza	45
Tabla 6: Clasificación de rocas según la velocidad de rotación	46
Tabla 7: Velocidades de rotación por tipo de roca.....	47
Tabla 8: Valores límites para triconos de diferentes diámetros	49
Tabla 9: Fuerza de empuje sobre el macizo	51
Tabla 10: Velocidades de aire recomendadas según el tipo de roca	54
Tabla 11: Propiedades de los triconos en la operación minera de roca andesítica	63
Tabla 12: Acceso vía terretre	71
Tabla 13: Valoración del Macizo Rocoso en Mina de Roca Andesítica	74
Tabla 14: Proporción de minerales (en porcentaje) presentes en el Tajo	77
Tabla 15: Promedio de Recorrido Perforado y PDC por Marca de Broca	90
Tabla 16: Comparación de objetivos y resultados: Montoya y Paredes	101
Tabla 17: Comparación de objetivos y resultados: Chura y Propio	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Unidad de potencia	20
Figura 2: Sistema de izaje	21
Figura 3: Sistema de rotación	22
Figura 4: Columna de perforación	23
Figura 5: Plano de cubierta	24
Figura 6: Estabilizador de rodillos	27
Figura 7: Triconos	30
Figura 8: Broca tricónica	31
Figura 9: Tricono de dientes para formación blanda	32
Figura 10: Tricono de dientes para formación media	33
Figura 11: Tricono para formaciones duras	34
Figura 12: Broca tricónica 10 5/8" AP7	36
Figura 13: Geometría de los conos	37
Figura 14: Excentricidad	38
Figura 15: Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad de penetración	46
Figura 16: Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración	48
Figura 17: Rotura de la roca, empuje excesivo	50
Figura 18: Barrido y extracción de detritus	53
Figura 19: Desgaste del tricono	58
Figura 20: Esquemas de roscas con hilos BECO	60
Figura 21: Esquema de hilos API	62
Figura 22: Principios de fuerza de rotación y empuje en la perforación	64
Figura 23: Formula del TDC	70
Figura 24: Geología regional	73
Figura 25: Formato de toma de datos	83

RESUMEN

Durante la perforación en minería a cielo abierto, las brocas tricónicas, como las de 10 5/8", juegan un rol esencial al romper formaciones rocosas mediante compresión y corte. Estas brocas cuentan con tres conos con insertos de carburo de tungsteno que trituran la roca al rotar. Su desempeño depende tanto del diseño como de las condiciones geológicas y parámetros operativos, como la presión de empuje y velocidad de rotación.

El estudio se realizó en una mina del sur del Perú y compara dos marcas de brocas: Varel (establecida) y CoreTech (en fase de prueba). Se evaluaron en base a indicadores clave como el Costo Parcial de Perforación (PDC) y el metraje perforado. La incorporación de herramientas de monitoreo en tiempo real como JView y MineOps permitió recolectar datos precisos sobre el rendimiento de ambas brocas, optimizando la toma de decisiones.

Los resultados muestran que la CoreTech tuvo un mejor desempeño, con un PDC de 1,42 y mayor metraje con 2208,03 metros perforados, lo que la posiciona como una alternativa más eficiente y rentable. Este trabajo también destaca la importancia del uso de tecnologías de monitoreo continuo para optimizar recursos y reducir costos operativos en perforación minera.

Palabras clave: Perforación, broca tricónica, Costo Parcial de Perforación (PDC), metraje perforado, monitoreo en tiempo real.

ABSTRACT

During open-pit mining drilling operations, tricone drill bits—such as the 10 5/8" models—play a key role by breaking rock formations through compression and cutting. These bits feature three cones with tungsten carbide inserts that crush the rock as the bit rotates. Their performance depends not only on their design and quality but also on geological conditions and operational parameters like weight on bit and rotation speed.

The study was conducted at a mine in southern Peru and compares two drill bit brands: Bit 1 (an established brand) and Bit 2 (a new brand under testing). Key performance indicators such as Partial Drilling Cost (PDC) and drilled meterage were used for evaluation. Real-time monitoring tools like JView and MineOps were implemented to collect accurate performance data for both bits, improving decision-making processes.

The results show that CoreTech performed better, with a PDC of 1,42 and a higher drilled footage of 2208,03 meters, positioning it as a more efficient and cost-effective alternative. This study also highlights the importance of using continuous monitoring technologies to optimize resources and reduce operational drilling costs.

Keywords: Drilling, tricone bit, Partial Drilling Cost (PDC), drilled footage, real-time monitoring.

INTRODUCCIÓN

Esta tesis titulada “Desempeño de brocas tricónicas utilizando el PDC como indicador de rentabilidad en operación minera” tiene como objetivo principal determinar la broca tricónica más rentable y eficiente para la operación minera en roca Andesítica, optimizando así el costo total de perforación. La investigación se basa en un análisis comparativo entre marcas tradicionales y nuevas, utilizando indicadores clave como el Costo Parcial de Perforación (PDC) y el metraje perforado.

El trabajo consta de 5 capítulos:

El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, la justificación del estudio, formulación del problema, objetivos generales y específicos, y las hipótesis que fundamentan la investigación. Se analiza la necesidad de evaluar las brocas tricónicas en roca andesítica para optimizar los costos operativos y mejorar la eficiencia.

El Segundo Capítulo cubre el marco teórico, describiendo la tecnología de brocas tricónicas, su diseño y materiales, y la influencia de las condiciones geológicas en su rendimiento. También se abordan los conceptos de PDC y metraje perforado como indicadores de eficiencia económica y durabilidad en la perforación, así como el uso de sistemas de monitoreo en tiempo real (JView y MineOps).

El Tercer Capítulo se enfoca en el material de estudio y el contexto de la mina, detallando las características geológicas y el sistema de operación de perforación. Se describen las marcas de brocas evaluadas: Varel (marca tradicional), y CoreTech (marca nueva en prueba).

El Cuarto Capítulo detalla la metodología de la investigación, especificando el tipo de estudio, población y muestras, y los métodos de recolección y procesamiento de datos. Se explica el uso de herramientas de monitoreo en tiempo real para capturar datos precisos de rendimiento de las brocas durante las pruebas de campo.

El quinto Capítulo contiene el análisis comparativo de rendimiento entre las brocas en función de su PDC y metraje perforado, observando los efectos de las condiciones geológicas de roca andesítica y evaluando la eficiencia de cada marca. Coretech destaca como la opción más rentable, logrando un PDC menor y un mayor metraje perforado en comparación con las otras marcas.

Este análisis justifica la incorporación de CoreTech como proveedor en mina, aportando beneficios económicos y mejoras operativas significativas. La investigación establece un marco de referencia para la evaluación continua de herramientas de perforación y para la toma de decisiones en operaciones mineras a largo plazo, resaltando la importancia de sistemas de monitoreo que permitan optimizar la selección de brocas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, en una mina de roca andesítica al sur del Perú, se emplea principalmente brocas de dos marcas reconocidas en la industria minera: VAREL y EPIROC. Estas brocas han demostrado ser efectivas bajo ciertas condiciones, pero los avances tecnológicos en la fabricación de brocas han llevado al surgimiento de nuevas alternativas en el mercado que prometen mejor rendimiento y rentabilidad. Entre estas nuevas alternativas encontramos las brocas de marcas CoreTech y CAT. Sin embargo, no existe un análisis comparativo detallado entre estas nuevas brocas y las que actualmente se utilizan en esta mina de roca andesítica del sur del Perú. Este estudio selecciona una broca antigua y una nueva para eliminar la incertidumbre a la hora de tomar decisiones de compra y uso de estas nuevas herramientas. Por razones de confidencialidad, las marcas de las brocas analizadas en este estudio han sido reemplazadas por designaciones genéricas. En adelante, se hará referencia a ellas como 'Varel' y 'CoreTech'

1.1. Antecedentes del problema a investigar.

La eficiencia de las brocas utilizadas en operaciones mineras es un factor determinante para el éxito económico y operativo de las actividades de perforación en minas a cielo abierto. Las brocas tricónicas, ampliamente usadas en la perforación de grandes diámetros, han sido objeto de múltiples estudios debido a su resistencia y capacidad de perforar terrenos de alta dureza. A lo largo de los años, investigaciones previas han evaluado el desempeño de brocas en diversas condiciones geológicas, centrándose en indicadores como la velocidad de penetración, el desgaste y los costos de perforación.

En estudios realizados por Mata-Gutierrez (2005) en la Unidad Minera de La Caridad en México y por Llaique-Nuñoncca & Sánchez Guevara (2015) en Cajamarca, se han analizado brocas tricónicas similares a las utilizadas en este estudio. Dichos trabajos destacan la importancia de las condiciones geológicas locales en el rendimiento de las herramientas de perforación, resaltando la necesidad de evaluaciones basadas en datos específicos de cada operación. En el caso de este estudio, la geología está dominada por formaciones de andesita basáltica y rocas volcánicas, asociadas con el Volcánico Quellaveco, lo que plantea desafíos técnicos en términos de desgaste de brocas y velocidad de perforación.

El yacimiento de este estudio, que forma parte de la Subprovincia Cuprífera del Pacífico junto con las minas de Toquepala y Cerro Verde, presenta características geológicas complejas, como fracturamientos, fallas y cavidades, debido a la presencia de estructuras como la Falla Micalaco y la Falla Botiflaca. Estas condiciones geológicas afectan directamente el rendimiento de las brocas tricónicas, requiriendo evaluaciones precisas para seleccionar las herramientas más rentables y eficientes.

En la actualidad, roca andesítica del sur del Perú enfrenta el desafío de optimizar los costos de perforación, en particular el TDC (Total Drilling Cost), que incluye no solo el costo directo de las brocas, sino también factores relacionados con la velocidad de penetración, la durabilidad de las herramientas y la productividad general de la perforación. En este contexto, se decidió realizar una prueba comparativa de varias marcas de brocas tricónicas de 10 5/8" que ya estaban en uso, así como de nuevas marcas introducidas en la mina, utilizando el PDC (Partial Drilling Cost) como indicador de rentabilidad.

Este estudio busca llenar el vacío existente en la literatura sobre la evaluación comparativa de brocas tricónicas bajo condiciones específicas de roca andesítica

del sur del Perú, con el fin de identificar qué marcas ofrecen mejores resultados en términos de rendimiento y costos. El análisis de los datos obtenidos permitirá establecer recomendaciones claras sobre la selección de las herramientas más adecuadas para mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos en esta unidad minera.

1.2. Descripción del problema.

En roca andesítica del sur del Perú, una operación minera de gran escala a cielo abierto ubicada en el sur del Perú, la perforación de grandes diámetros es una de las actividades clave para garantizar la extracción eficiente de minerales. La mina se enfrenta a una constante necesidad de optimizar los costos y mejorar la productividad en sus procesos de perforación, especialmente debido a las condiciones geológicas complejas de la zona, que incluyen formaciones de andesita basáltica y rocas volcánicas, así como la presencia de fracturamientos y fallas geológicas, como la Falla Micalaco y la Falla Botiflaca.

Las brocas tricónicas de 10 5/8" han sido las herramientas predominantes utilizadas en las operaciones de perforación de muchas minas del Sur debido a su robustez y capacidad para enfrentar terrenos de alta dureza. Sin embargo, la constante evolución de la tecnología y la llegada de nuevas marcas al mercado plantean la necesidad de evaluar cuál de estas herramientas es la más adecuada para optimizar los costos y mejorar la eficiencia en la mina.

Se busca determinar cuál de las nuevas marcas tiene un mejor rendimiento en términos de rentabilidad utilizando el PDC (Partial Drilling Cost) como indicador clave, que mide el costo relativo de la broca frente al metraje perforado.

Durante las pruebas iniciales, se observó que de las nuevas marcas introducidas, solo una demostró ser significativamente más rentable que las brocas preexistentes en la mina, mientras que otra no cumplió con las expectativas. Este hecho resalta la importancia de realizar una evaluación comparativa detallada y basada en datos reales, para asegurar que la selección de brocas esté alineada con los objetivos de reducir costos operativos y aumentar la productividad.

El presente estudio busca abordar este problema mediante una evaluación comparativa exhaustiva de las brocas tricónicas utilizadas en roca andesítica del sur del Perú. A través del análisis del PDC, se pretende identificar cuál de las marcas disponibles ofrece el mejor balance entre costo y rendimiento, en función de las características geológicas específicas de la mina y las condiciones de perforación. Resolver este problema permitirá a roca andesítica del sur del Perú optimizar su proceso de perforación y tomar decisiones informadas sobre la selección de brocas, con un impacto positivo tanto en los costos operativos como en la eficiencia general de la operación minera.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general

¿Cuál es el desempeño comparativo de las brocas tricónicas de 10 5/8" de diferentes marcas, utilizando el **PDC (Partial Drilling Cost)** como indicador, para determinar cuál ofrece el mejor balance entre rentabilidad y eficiencia en las condiciones geológicas específicas de una mina de roca andesítica del sur del Perú?

1.3.2. Problemas específicos

- i. ¿Cómo influye la geología del terreno de la mina de roca andesítica del sur del Perú en el rendimiento de las brocas tricónicas de 10 5/8" de distintas marcas?
- ii. ¿Cómo comprobar que en perforación, el PDC es un indicador de rendimiento?
- iii. ¿La nueva marca de broca tricónica ofrece una mejor relación costo-beneficio en comparación con las marcas ya establecidas?

1.4. Objetivos de la investigación (general y específicos).

1.4.1. Objetivo general

Determinar el desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" de diferentes marcas, utilizando el **PDC (Partial Drilling Cost)** como indicador clave, para identificar la marca que ofrece el mejor balance entre rentabilidad y eficiencia en las condiciones geológicas específicas de una mina de roca andesítica del sur del Perú.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Analizar el impacto de las condiciones geológicas de roca andesítica del sur del Perú en el rendimiento y durabilidad de las brocas tricónicas de 10 5/8".
- b. Determinar la broca de 10 5/8" de mejor rendimiento, mediante o según el PDC.

- c. Identificar la marca de brocas tricónicas de 10 5/8" que ofrece la mejor relación costo-beneficio para optimizar los procesos de perforación en mina de roca andesítica del sur del Perú.

1.5. Justificación e importancia de la investigación.

La perforación eficiente en minas a cielo abierto es un proceso clave que impacta directamente en la productividad y los costos operativos de una operación minera. En roca andesítica del sur del Perú, ubicada en el sur del Perú, el rendimiento de las brocas tricónicas de 10 5/8" es fundamental para optimizar la extracción de minerales, dado el alto nivel de dureza del macizo rocoso y las complejas condiciones geológicas, como la presencia de fallas y fracturas.

La necesidad de evaluar y comparar el desempeño de diferentes marcas de brocas tricónicas surge del constante esfuerzo por reducir el costo total de perforación, que incluye tanto los costos directos de las herramientas como los relacionados con su velocidad de penetración, durabilidad y productividad. La reciente introducción de nuevas marcas de brocas en la mina presenta una oportunidad para analizar cuál de estas marcas ofrece un mejor balance entre eficiencia y rentabilidad, medido a través del PDC (Partial Drilling Cost), un indicador económico clave en operaciones de perforación.

Esta investigación es importante porque permitirá identificar la mejor opción de brocas tricónicas en función de su costo-beneficio, lo que tendrá un impacto directo en la reducción de los costos operativos de roca andesítica del sur del Perú. Al optimizar el uso de brocas tricónicas, se pueden lograr importantes mejoras en la velocidad de perforación, el rendimiento de las operaciones y la reducción del

desgaste de herramientas, lo que a su vez se traduce en un incremento en la eficiencia global de las operaciones mineras.

En términos económicos, la optimización del costo de perforación es un factor decisivo para la rentabilidad de las operaciones mineras, especialmente en minas de gran envergadura. Esta investigación ofrecerá a la empresa una base sólida para la toma de decisiones respecto a la selección de proveedores y herramientas de perforación, asegurando que las inversiones realizadas generen el máximo retorno posible y mantengan la competitividad de la mina en el largo plazo.

1.6. Limitaciones.

Durante el desarrollo de esta investigación, se identificaron algunas limitaciones que podrían afectar el alcance y los resultados del análisis comparativo del desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" en roca andesítica del sur del Perú. Estas limitaciones son:

- Disponibilidad de datos históricos: Aunque se cuenta con datos recientes sobre el desempeño de las brocas tricónicas, la disponibilidad de información histórica completa, especialmente sobre las marcas previamente utilizadas en la mina, puede ser limitada. Esto podría restringir la capacidad de realizar comparaciones más detalladas a largo plazo.

Al tener la Coretech como una nueva marca de un nuevo proveedor, no se tenía un récord histórico de funcionabilidad en la unidad minera.

- Variabilidad geológica: Roca andesítica del sur del Perú presenta una geología con variaciones significativas en el terreno en las diferentes fases de minado.

Esta variabilidad puede influir en el rendimiento de las brocas y dificultar la estandarización de las condiciones bajo las cuales se realiza el análisis comparativo. La fase 06 b, el cual presentaba las características con mayor dureza en el macizo rocoso, se mostró con la siguiente geología.

Figura 6

Tipo de roca predominante.



Nota: Departamento de geología de mina de roca Andesítica

- Duración de las pruebas: Las pruebas de rendimiento de las nuevas marcas de brocas introducidas en la mina se realizaron en un período de 2 semanas.
- Factores externos: Variables como las condiciones climáticas, el estado de los equipos de perforación, y las condiciones operativas generales pueden influir en el rendimiento de las brocas, y algunas de estas variables pueden estar fuera del control del investigador, lo que podría afectar la precisión de los resultados.

- Acceso a información de proveedores: La falta de acceso a información técnica detallada sobre las especificaciones de fabricación y los procesos de desarrollo de las brocas 1 y 2 podría limitar la capacidad para analizar en profundidad las diferencias tecnológicas que existen entre las distintas marcas evaluadas.

A pesar de estas limitaciones, se espera que los resultados obtenidos proporcionen información valiosa y fiable para la toma de decisiones respecto a la selección de las brocas tricónicas más eficientes y rentables en las operaciones de perforación de roca andesítica del sur del Perú.

1.7. Viabilidad del estudio.

La viabilidad de esta investigación está garantizada por varios factores clave que aseguran que el estudio pueda desarrollarse de manera efectiva y que los resultados obtenidos sean útiles para la toma de decisiones en roca andesítica del sur del Perú. A continuación, se describen los principales aspectos que hacen posible la realización de este estudio:

- Acceso a datos operativos y técnicos: La mina de roca andesítica del sur del Perú, operada por SPCC, proporciona acceso directo a los datos operativos históricos y actuales sobre el desempeño de las brocas tricónicas utilizadas en las fases de perforación. Esta información incluye indicadores como el PDC (Partial Drilling Cost), de pruebas antiguas.
- Condiciones geológicas conocidas: La geología de roca andesítica del sur del Perú ha sido estudiada ampliamente, y se dispone de información geológica detallada sobre las formaciones que conforman el macizo rocoso, así como de las características geológicas específicas de cada fase de minado. Este

conocimiento geológico es esencial para contextualizar los resultados del rendimiento de las brocas y permite una evaluación precisa de su comportamiento bajo distintas condiciones de terreno.

- **Apoyo técnico y recursos logísticos:** La empresa cuenta con un equipo técnico especializado en perforación, que brinda apoyo en la recopilación de datos y en la ejecución de las pruebas necesarias para el análisis comparativo. Además, el equipo de perforación en roca andesítica del sur del Perú está equipado con la tecnología necesaria para llevar a cabo las pruebas de manera eficiente.
- **Recursos financieros disponibles:** SPCC ha mostrado interés en optimizar los costos operativos relacionados con la perforación, lo que respalda la asignación de recursos financieros para llevar a cabo este estudio. La empresa está dispuesta a invertir en la mejora de los procesos de perforación mediante la evaluación de nuevas marcas de brocas, lo que asegura la viabilidad económica del proyecto.
- **Acceso a nuevas tecnologías:** Las nuevas marcas de brocas tricónicas ya han sido introducidas en roca andesítica del sur del Perú y están disponibles para ser evaluadas en condiciones reales de operación. Esta disponibilidad permite realizar comparaciones directas entre las marcas tradicionales y las nuevas, utilizando los indicadores económicos y de rendimiento pertinentes.
- **Experiencia previa en estudios comparativos:** Existen estudios previos realizados tanto en roca andesítica del sur del Perú como en otras minas de la región, lo que proporciona una base sólida de conocimientos y metodologías que pueden ser replicadas o adaptadas para este estudio. Esto reduce los riesgos

asociados a la implementación del proyecto y aumenta la probabilidad de obtener resultados confiables.

En resumen, la combinación de acceso a datos relevantes, apoyo técnico, recursos financieros y la disponibilidad de nuevas tecnologías hacen que este estudio sea plenamente viable. Además, los resultados tendrán un impacto positivo en la optimización de los procesos de perforación y en la reducción de costos operativos en la mina de roca andesítica del sur del Perú.

1.8. Formulación de hipótesis.

1.8.1. Hipótesis general

La utilización del Partial Drilling Cost (PDC) permitirá determinar el desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" de diferentes marcas, identificando la marca que ofrezca el mejor balance entre rentabilidad y eficiencia en las condiciones geológicas específicas de una mina de roca andesítica del sur del Perú.

1.8.2. Hipótesis específicas

- d. Las condiciones geológicas de la mina de roca andesítica del sur del Perú influirán en el rendimiento de las distintas marcas de brocas tricónicas, de 10 5/8" afectando su durabilidad y velocidad de penetración.
- e. El análisis comparativo según el PDC permitirá identificar la broca de 10 5/8" con mejor rendimiento.
- f. La marca de broca tricónica de 10 5/8" que obtenga el mejor balance entre costo y metraje perforado ofrecerá la mejor relación costo-beneficio, optimizando los procesos de perforación en roca andesítica del sur del Perú.

1.9. Variables (independientes y dependientes).

1.9.1. Variables independientes

Son las variables que se modifican o controlan durante la investigación para observar su efecto sobre las variables dependientes. En este caso, las variables independientes están relacionadas con las características de las brocas tricónicas evaluadas.

- Desempeño de brocas tricónicas utilizando PDC.

El desempeño se verá a través de un análisis comparativo de brocas tricónicas por proveedor:

- Proveedores: 2; Core Tech y Varel
- Perforadoras usadas: 5
- N° de brocas tricónicas: 28

1.9.2. Variables dependientes

Son las variables que se observan y miden para evaluar el efecto de las variables independientes. Estas están relacionadas con el desempeño y la rentabilidad de las brocas.

- Rentabilidad de la operación minera.

La rentabilidad de brocas tricónicas se verá a través de:

- Costo parcial de perforación (PDC) – USD/m
- Rendimiento en metros.

1.10. Operacionalización de variables (indicadores y dimensiones).

Tabla 1

Matriz de Operacionalización de variables

Variable	Indicador	Dimensiones	Medición
INDEPENDIENTE: Desempeño de brocas tricónicas utilizando PDC.	Fabricante de brocas.	Cualitativa	Core Tech Varel
	Equipo de perforación.	Cualitativa	P&H
	Brocas	Cuantitativa	Nº brocas
DEPENDIENTE: Rentabilidad de la operación minera.	Rendimiento	Cuantitativa	Metros perforados (m)
	PDC	Cuantitativa	Dólares por metro (\$/m)

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

Durante el año 2022, la mina de roca andesítica al sur del Perú tuvo un consumo aproximado de 90 brocas de 10 5/8", hasta el mes de octubre, suministrado por la compañía Varel. Este año un nuevo proveedor, Core Tech, ha querido unirse a la competencia. Pasando por una etapa de prueba, donde prometía incrementar la eficiencia, reducir el PDC, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la broca actualmente utilizada, en este trabajo se documentará el estudio comparativo entre ambas marcas.

2.1.1. Antecedentes nacionales

Montoya Villalta (2019) realizó un estudio en la mina Toquepala, evaluando el rendimiento de diferentes marcas de brocas tricónicas. Utilizando indicadores como el costo total de perforación (TDC), costo parcial de perforación (PDC) y el metraje perforado, concluyó que la selección adecuada de brocas puede reducir significativamente los costos operativos y mejorar la eficiencia en la perforación.

Además, con su estudio logro la optimización del costo total de perforación, con una reducción del costo unitario de perforación, 1.01 US\$/m (reducción de 12,85%) para brocas de 11" y una reducción de 0,57 US\$/m para brocas de 12 ¼" (reducción de 7,13%).

Berrospi Ávalos (2024) investigó cómo el incremento en la velocidad de penetración influye en la reducción del TDC en la mina Toquepala. Sus hallazgos indican que una mayor velocidad de perforación disminuye los costos por metro perforado, mejorando la productividad y eficiencia operativa. Esto permitió a la minera alcanzar los objetivos planeados.

Logro optimizar los costos totales de perforación de \$11,66 por tonelada para terreno medio y \$12,61 por tonelada para terreno duro, aunque cabe señalar que el desempeño en sí dependerá de los parámetros que afecten a todo el sistema de perforación.

Villalta Villena (2022) desarrolló un modelo predictivo para anticipar el desgaste de las brocas tricónicas en yacimientos de pórfido de cobre y molibdeno. Este modelo permite optimizar el momento de reemplazo de las brocas, minimizando tiempos de inactividad y costos asociados. Asegurando el proceso de perforación. Donde logro concluir que el rendimiento óptimo de las brocas en mineral debe ser de 1751,16 m con un costo de penetración por metro (PDC) de 2,26 \$/m.

2.1.2. Antecedentes internacionales

Un estudio realizado por Smith et al. (2018) en Australia evaluó el rendimiento de diferentes marcas de brocas tricónicas en formaciones geológicas duras. Los resultados mostraron que ciertas brocas ofrecían una mayor durabilidad y menor costo por metro perforado, destacando la importancia de seleccionar herramientas adecuadas según las condiciones geológicas específicas.

Chen y Zhang (2019) en China analizaron cómo la optimización de parámetros operativos y la selección de brocas adecuadas pueden mejorar la eficiencia en la perforación rotativa en minas de cobre a cielo abierto. Su investigación subraya la necesidad de adaptar las herramientas y técnicas de perforación a las características geológicas del yacimiento para maximizar la productividad y reducir costos.

González et al. (2020) en Chile implementaron sistemas de monitoreo en tiempo real para evaluar el rendimiento de las brocas durante la perforación. Este enfoque permitió ajustes inmediatos en los parámetros operativos, optimizando el rendimiento de las brocas y reduciendo el costo total de perforación.

2.2. Bases teóricas

Las bases teóricas de este estudio se centran en la evaluación y comparación del rendimiento de diferentes marcas de brocas tricónicas de 10 5/8" en operaciones mineras, utilizando el Costo Parcial de Perforación (PDC) como indicador principal de rentabilidad. A continuación, se detallan los conceptos clave y fundamentos teóricos relevantes:

2.2.1. Método de perforación rotatoria

“Este método innovador de perforación representó un cambio radical en comparación con el método de perforación por golpeo”. (Marmaña et al., 2016)

Según Marmaña, las principales innovaciones incluyen:

- La unidad de potencia motriz.

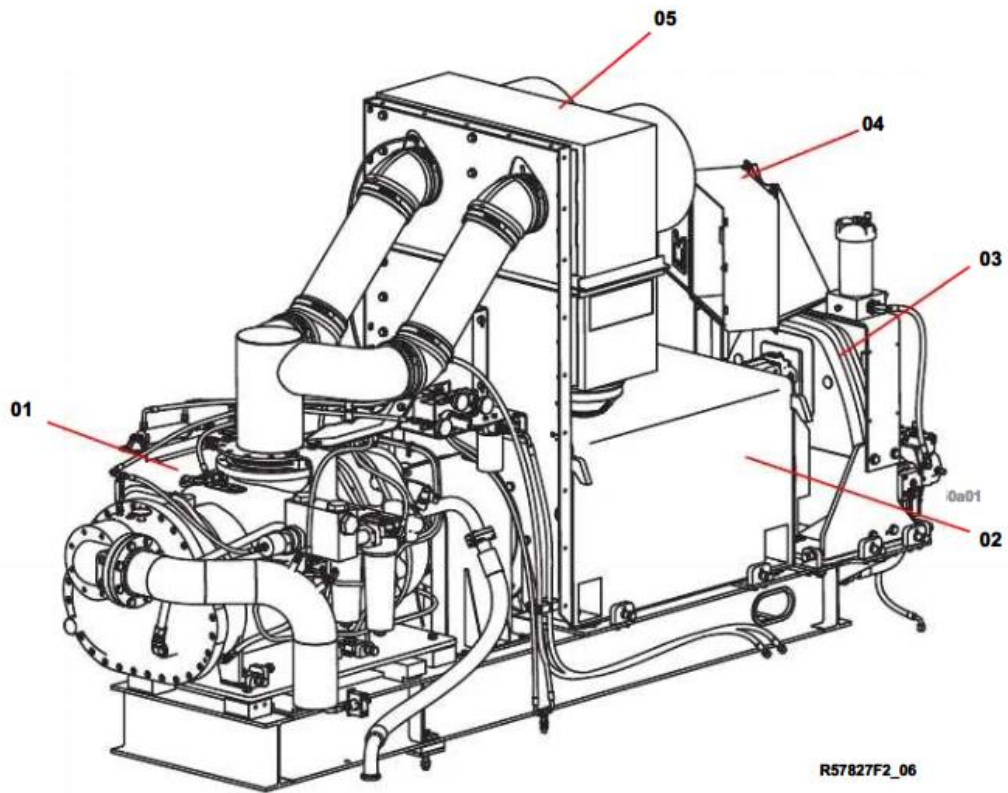
- El sistema de levantamiento o izaje.
- El sistema rotativo.
- La columna de perforación.
- El sistema de circulación de fluidos de perforación.

2.2.2. Unidad de potencia motriz

La potencia de la unidad debe ser adecuada para cumplir con las demandas del sistema de levantamiento, el sistema rotatorio y el sistema de circulación del fluido de perforación.

Figura 1

Unidad de potencia



LEYENDA

01. Compresor Principal de Aire

02. Motor principal

03. Unidad de transmisión de bombas (PDT)

04. Gabinete de I/O de la unidad de potencia

05. Manifold de entrada de aire

Nota: Manual del operador: Perforadora 320 XPC. P&H Mining Equipment (2012)

La potencia máxima teórica necesaria depende de la profundidad máxima alcanzable por el taladro y del peso máximo de la columna de tubos necesaria para revestir el pozo a esa profundidad. (Marmaña et al., 2016)

2.2.3. Sistema de izaje

"Es crucial el sistema de levantamiento en cada etapa de la perforación y para las operaciones subsiguientes para introducir en el pozo la columna de tubos que reviste sus paredes". (Marmaña et al., 2016)

Figura 2

Sistema de izaje



Nota: General Specification. JOYGLOBAL (2016)

Manejar, sostener o extraer cargas pesadas de tubos requiere de un sistema de levantamiento robusto con suficiente potencia, aplicación de velocidades apropiadas, freno eficaz y controles seguros para asegurar la realización de las operaciones sin riesgos para el personal y el equipo. (Marmaña et al., 2016)

2.2.4. Sistema rotatorio

"El sistema rotatorio es un componente esencial del equipo de perforación. A través de sus componentes se perfora el pozo hasta la profundidad del yacimiento petrolífero". (Marmaña et al., 2016)

Figura 3

Sistema de rotación



Nota: General Specification. JOYGLOBAL (2016)

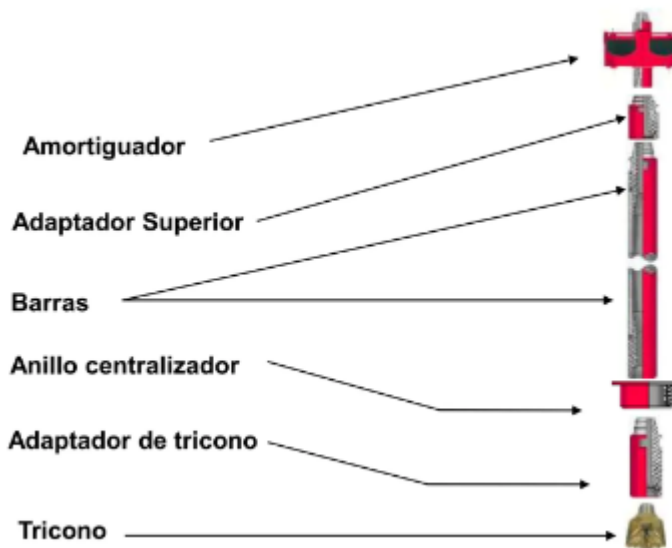
Este sistema incluye la mesa rotatoria o colisa; la junta o unión giratoria; la junta Kelly o el Kelly; la columna o tubería de perforación que lleva la sarta lastra barrena y, finalmente, la barrena. (Marmaña et al., 2016).

2.2.5. Columna de perforación

La columna de perforación consiste en una serie de tubos de acero especialmente fabricados y especificados, que en su extremo inferior lleva enroscada la broca, también fabricada con especificaciones particulares que corta los estratos geológicos para alcanzar el yacimiento petrolífero. (Marmaña et al., 2016)

Figura 4

Columna de perforación



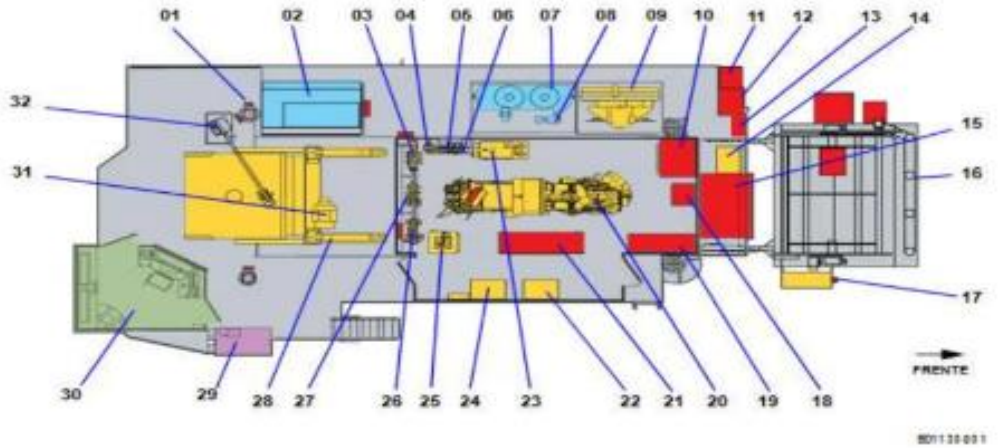
Nota: General Specification. JOYGLOBAL (2016)

2.2.6. El sistema de circulación del fluido de perforación

"El sistema de circulación del fluido de perforación es esencial para el taladro. Sus dos componentes principales son el equipo que forma el circuito de circulación y el propio fluido". (Marmaña et al., 2016)

Figura 5

Plano de cubierta



- | | | |
|--|--|---|
| 01. Aux. Gabinete de Almacenamiento del Control Remoto Colgante del Winche | 11. Interruptor de Desconexión de Alto Voltaje | 20. Unidad de Potencia |
| 02. Tanque de Agua | 12. Transformador de Arranque Suave (opcional) | 21. Gabinete de Control Principal (MCC) |
| 03. Banco de Válvula 3 | 13. Cabina de Arranque Suave (opcional) | 22. Aux. Compresor de Aire - Ubicación Alternativa (opcional) |
| 04. Bancos de Válvulas 6 (opcional) | 14. Aux. Compresor de Aire (opcional) | 23. Tanque Hidráulico |
| 05. Banco de Válvulas 4 | 15. Transformador Principal | 24. Tanque de Rebosado (opcional) |
| 06. Bomba de Baja Presión | 16. Carrete Porta cable (opcional) | 25. Depósito de Grasa |
| 07. Tanque en T | 17. Colgante de Carrete Portacable (opcional) | 26. Banco de Válvula 1 |
| 08. Bomba de Arranque de Circulación de Aceite del Compresor | 18. Calefactor de la Sala de Máquinas (opcional) | 27. Banco de Válvula 2 |
| 09. Enfriador de Aceite | 19. Cabina de Drives de CC | 28. Cilindro del Mástil (2) |
| 10. Cabina de Alto Voltaje (HVC) | | 29. Aire Acondicionado |
| | | 30. Cabina del Operador |
| | | 31. Winche Auxiliar |
| | | 32. Grúa de Brazo (opcional) |

Nota: General Specification. JOYGLOBAL (2016)

2.2.7. Equipos de perforación.

La mina de roca Andesítica tiene como parte de su flota a las siguientes perforadoras primarias: una perforadora P&H 120A, una perforadora Bucyrus 49HR, una perforadora Bucyrus 49RIII, una perforadora CAT MD6640 y dos perforadoras P&H 320XPC.

Fueron seleccionados por su eficiencia, rendimiento, potencia y tecnología, que permiten eficiencia de perforación en diferentes entornos.

Tabla 2

Equipos usados para las pruebas

Modelo	N° de Triconos Muestreados
P&H 120A	1
P&H 320 XPC	12
CAT MD6640	4
BUCYRUS 49HR	11

Nota: Propia

2.2.8. Partes de la columna de perforación

“Serie de componentes y herramientas utilizadas para llevar a cabo el proceso de perforación en el terreno, con el fin de obtener muestras geológicas, explorar y extraer minerales u otros recursos subterráneos. (Rivera y Román, 2023)

Los principales elementos que componen una columna de perforación son los siguientes:

- **Barrenos:** Son las herramientas de corte utilizadas para perforar el terreno.
- **Brocas:** Son las puntas de corte ubicadas en la parte inferior de los barrenos.
- **Guiador:** Es una herramienta que se coloca en la columna de perforación para mantener la trayectoria recta del pozo.
- **Bit sub:** adaptador de tricono, generalmente incluye una rosca en la parte superior para conectarlo a la columna de perforación y una rosca en la parte inferior para unirlo al tricono.
- **Top sub:** pieza de conexión; colocada en la parte superior de la columna; facilita el manejo, la conexión y la seguridad durante la perforación
- **Shock absorber:** reducir las vibraciones y choques que se producen durante el proceso de perforación.

2.2.9. Barras de perforación

Las barras de perforación, son componentes esenciales en la perforación, ya que transmiten el empuje a la broca y permiten la circulación de aire comprimido para limpiar el pozo y enfriar los cojinetes. Fabricadas comúnmente de acero con un espesor de hasta 1 ½” (38 mm), utilizan roscas tipo API o BECO para su acoplamiento.

Están sometidas a condiciones extremas, por lo que su diseño debe realizarse en colaboración entre ingenieros y usuarios para optimizar su rendimiento y durabilidad. Cada barra tiene una identificación única para facilitar su seguimiento y personalización.

No existe un estándar único de fabricación, ya que el diseño depende principalmente del terreno. Su estructura incluye un tubo con terminales roscados macho y hembra, y su desgaste se evalúa por el adelgazamiento de las paredes del tubo.

Para condiciones de mayor exigencia, se recomienda un mayor espesor de pared para resistir compresión. Dada su importancia y costo, se sugiere:

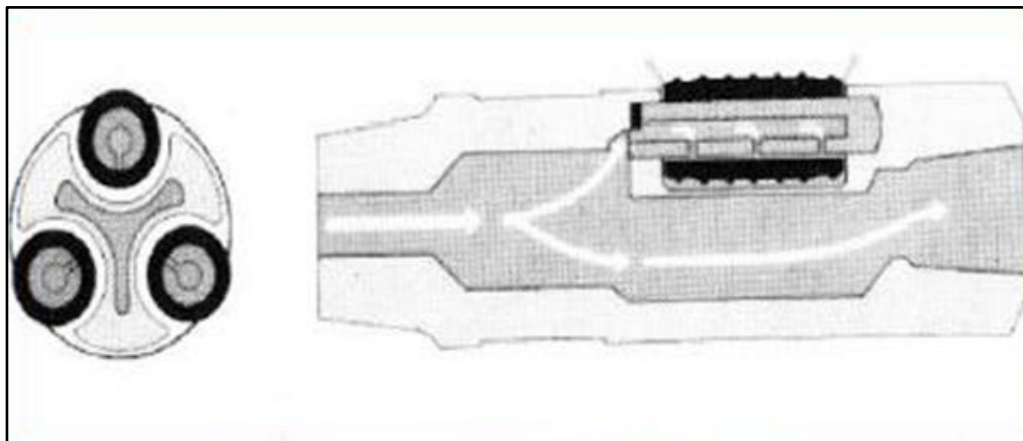
- Usar barras de la misma marca en una misma sarta.
- Preferir barras de pared gruesa, considerando la capacidad de carga de la perforadora.
- Cargas de torsión, tensión y compresión.
- Evaluar aspectos como: profundidad del taladro, volumen de aire, cargas mecánicas, herramientas disponibles, transporte y mantenimiento.

2.2.10. Estabilizador o adaptador de triconos

Umasi, 2013) afirma que: “El estabilizador, colocado sobre la broca, asegura que el tricono gire adecuadamente alrededor del eje del pozo y previene la oscilación y el pandeo del varillaje de perforación”.

Figura 6

Estabilizador de rodillos



Nota: Manual de perforación y voladura. López Jimeno (2003)

Los beneficios de utilizar un estabilizador incluyen:

- Menor desviación en los pozos, especialmente inclinados.
- Mayor durabilidad del tricono, mayor velocidad de penetración debido a un mejor aprovechamiento del empuje.
- Menor desgaste de componentes como los faldones y cojinetes.
- Mayor estabilidad de las paredes del barreno, debido a que las barras de perforación no sufren pandeo.
- Mejora de la carga de explosivo.
- El estabilizador debe tener un diámetro próximo al del barreno,
- normalmente 1/8” (3 mm) más pequeño que el tricono.

Según Umasi existen estabilizadores de aletas y de rodillos.

Los de rodillos, aunque más caros, requieren menos torque y ofrecen una mejor estabilización en terrenos duros después de perforar los primeros barrenos. (Umasi, 2013).

“Los estabilizadores de rodillos con insertos de carburo de tungsteno requieren un menor par de rotación, tienen un mayor costo y son más eficiente que los de aletas”. (Umasi, 2013)

2.2.11. Brocas tricónicas

Existen dos tipos principales de herramientas de perforación: los trépanos cortantes y los trépanos triturantes. Los trépanos cortantes están equipados con filos agudos de diversas formas y se utilizan exclusivamente en materiales más blandos como sedimentos fluviales y suelos semi-consolidados, donde realizan cortes o desgarros en la roca. Por otro lado, los trépanos triturantes consisten en tres rodillos dentados cónicos que giran contra la base del pozo, efectuando la fractura de la roca mediante un proceso de indentación y corte. (Ortiz, 2006).

En las aplicaciones dos tipos de herramienta: trépanos cortantes y trépanos triturantes. Los primeros consisten en una herramienta provista de elementos aguzados, con filos de diversas geometrías, que ejercen sobre la roca una acción de corte o desgarre. Su aplicación es solo posible en formaciones rocosas blancas o semi consolidadas, tales como material de relleno fluvial, suelos u otros. Los trépanos triturantes están conformados por tres rodillos endentados, de forma

cónica que ruedan sobre el fondo del pozo, fracturando la roca por un proceso de indentación y corte.

En la minería moderna, los trépanos triturantes, también conocidos como triconos, son los únicos utilizados para la fragmentación de rocas. Originalmente introducidos en la industria petrolera a principios del siglo XX, estos triconos comenzaron a usarse en grandes operaciones mineras a cielo abierto desde los años 1960, con avances significativos en su diseño y calidad.

En principio los triconos solo eran aplicables en formaciones rocosas más bien blandas a medianas; vale decir, rocas de baja resistencia a la compresión. Actualmente, este tipo de herramienta domina en la minería a gran escala, adecuada tanto para rocas blandas como para las extremadamente duras, con diámetros de perforación que superan los 175 mm. En Chile, por ejemplo, cerca del 80% de la producción de cobre proviene de operaciones que emplean esta técnica de perforación. (Berrospi, 2024).

Los triconos se fabrican en dos variantes: con dientes estampados para rocas menos resistentes y con insertos de carburo de tungsteno para rocas muy duras. Aunque los triconos con insertos son considerablemente más costosos, su vida útil más larga justifica la inversión inicial.

La eficacia de un tricono en la perforación se logra mediante la combinación de acciones de:

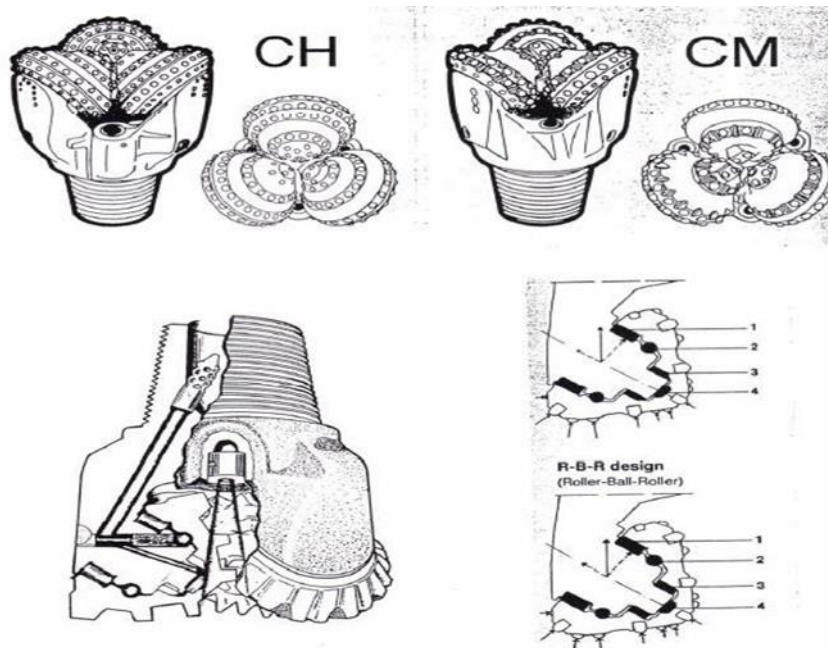
- Indentación

- Corte

Nos indica que: “los dientes o insertos del tricono, al girar en contacto con la roca, la penetran con gran fuerza, triturándola en el proceso”.

Figura 7

Triconos



Nota: Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas triconas en la unidad minera Toquepala. Montoya (2018)

Según Henríquez (2008) las brocas triconas son herramientas de perforación ampliamente utilizadas en la minería a cielo abierto y en la industria petrolera. Están compuestas por tres conos giratorios equipados con insertos de carburo de tungsteno o dientes de acero, diseñados para triturar y cortar la roca durante la perforación. Su diseño permite una distribución equilibrada de las fuerzas, facilitando la penetración en diversas formaciones geológicas.

Figura 8

Broca tricónica



Nota: Captura de imagen propia

Los insertos del tricono se organizan en líneas para lograr una perforación eficiente en la roca. Actualmente, la mayoría de las brocas perforan gracias a insertos fabricados con carburo de tungsteno, una aleación compuesta por tungsteno y cobalto que presenta una gran dureza.

2.3. Tipos de tricono dependiendo de la formación rocosa

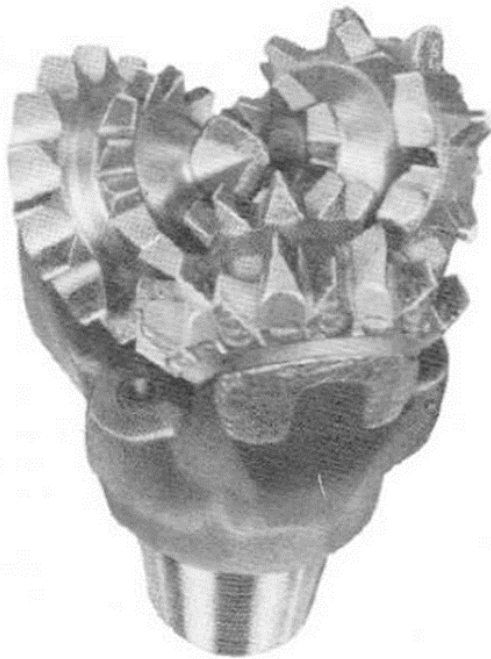
2.3.1. Triconos para formaciones blandas

Jimeno (2003) señala que los triconos diseñados para formaciones blandas están equipados con rodamientos pequeños que son compatibles con dientes largos y con un bajo Pulldown aplicado, adecuados para perforar formaciones blandas y fracturadas.

Además, Jimeno (2003) menciona que la distancia entre los dientes de estos triconos es considerablemente amplia. Los conos tienen una gran desviación, lo que produce un efecto de raspado significativo durante la perforación.

Figura 9

Tricono de dientes para formación blanda



Nota: Manual de perforación y voladura. López Jimeno (2003)

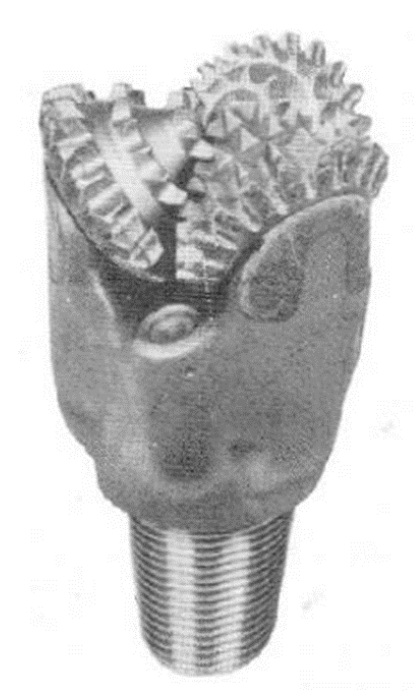
2.3.2. Triconos para formaciones medianas

Jimeno (2003) explica que los triconos diseñados para perforar formaciones de dureza media están equipados con rodamientos de tamaño mediano, que son adecuados para la longitud mediana de los dientes y el nivel moderado de Pulldown aplicado en este tipo de formaciones.

Además, Jimeno (2003) detalla que la longitud de los dientes es similar a la de los triconos utilizados en formaciones blandas, pero con una estructura de corte que está moderadamente reforzada. Esto ayuda a reducir la carga lateral sobre los dientes mediante la disminución del desplazamiento del cono, mejorando así la eficiencia y durabilidad del tricono en estas condiciones específicas.

Figura 10

Tricono de dientes para formación media



Nota: Manual de perforación y voladura. López Jimeno (2003)

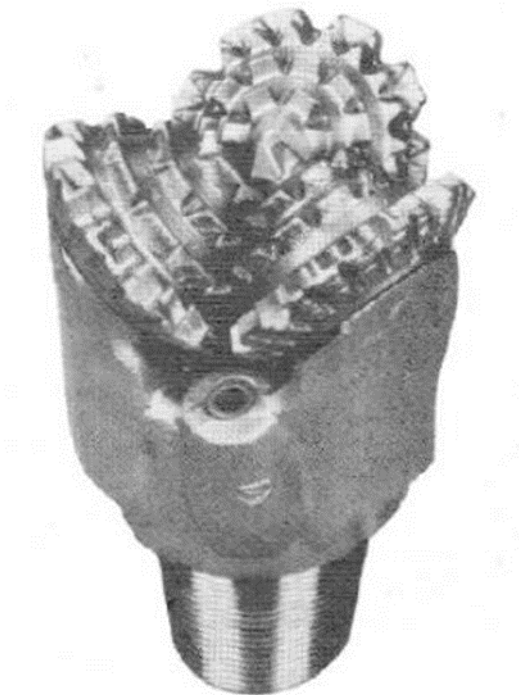
2.3.3. Triconos para formaciones duras

Jimeno (2003) describe que los triconos diseñados para formaciones duras están equipados con rodamientos grandes, adecuados para dientes cortos y fuertes, así como un alto Pulldown, lo cual es necesario para perforar efectivamente este tipo de formaciones.

Además, Jimeno (2003) señala que la distancia entre los dientes es pequeña y los conos tienen un desplazamiento mínimo. Esta configuración aumenta la carga de trituración aplicada sobre la roca y minimiza la carga lateral en los dientes. También menciona que algunos fabricantes establecen normas específicas para la configuración de los cojinetes dentro de cada grupo de diámetros de tricono.

Figura 11

Tricono para formaciones duras



Nota: Manual de perforación y voladura. López Jimeno (2003)

2.4. Carburo de tungsteno

Placencio (2011) relata que las primeras herramientas de minería fabricadas con carburo de tungsteno fueron desarrolladas por Widia en Alemania durante la década de 1930. En 1940, se introdujeron bits de percusión que incorporaban insertos de carburo de tungsteno unidos con bronce. Más adelante, en 1951, se

fabricaron las primeras brocas tricónicas que empleaban insertos de carburo de tungsteno, los cuales eran introducidos a presión en los conos.

2.4.1. Proceso de fabricación

Placencio (2011) describe el proceso de fabricación del carburo, comúnmente conocido como carburo de tungsteno (WC), que es una combinación de tungsteno (W) y carbono (C), junto con un aglutinante de cobalto (Co). El proceso de fabricación involucra los siguientes pasos:

1. Carbonización del tungsteno: Se calienta tungsteno a 1.500 °C (2,732 °F) para formar carburo de tungsteno.
2. Mezcla del carburo de tungsteno: El carburo de tungsteno en forma de polvo se mezcla con cobalto.

2.4.2. Propiedades físicas

- Placencio (2011) afirma que el carburo de tungsteno cementado destaca por tener la mayor resistencia a la compresión entre todos los metales sintéticos disponibles comercialmente.
- Este material también conserva un alto nivel de resistencia, dureza y rigidez a través de un amplio rango de temperaturas. Gracias a su excepcional resistencia a la abrasión y al impacto, el carburo de tungsteno es inigualable como material para fabricar herramientas de corte utilizadas en la perforación y trituración de rocas. Las propiedades más valoradas del carburo de tungsteno en la minería incluyen su resistencia tanto a la abrasión como al impacto (Placencio, 2011).

Figura 12

Broca tricónica 10 5/8" AP7



Nota: Presentación Ams – Rotacan II. Placencia (2006)

2.4.3. Sistema de barrido

El sistema de barrido utiliza aire comprimido para limpiar los detritos de la perforación, con compresores ubicados en la sala de máquinas que inyectan aire a través del cabezal de rotación por el interior de la columna de barras hasta el fondo del pozo. La presión necesaria varía según la longitud del tiro, y se mantiene generalmente entre 2000 y 4000 pie/min (Umasi, 2013).

2.4.4. Criterios de diseño

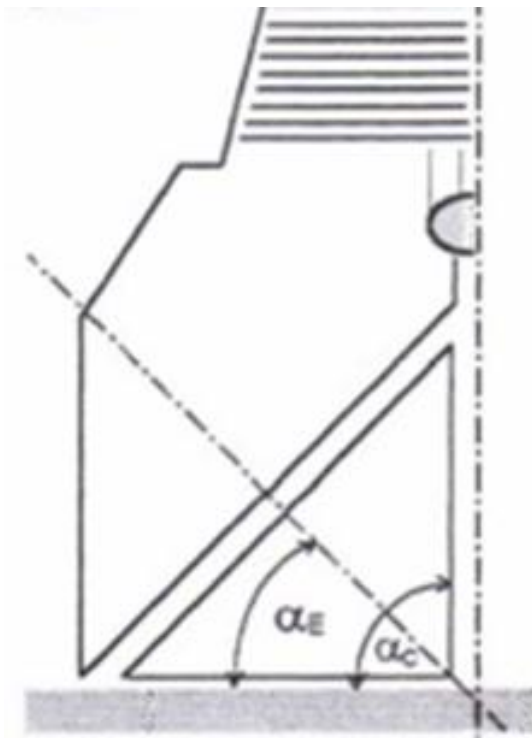
El diseño de los triconos, especialmente sus características geométricas, depende directamente de las propiedades de la roca a perforar.

2.4.5. Geometría de los conos

- Ángulo del eje
 $\alpha_E \rightarrow$ proporcional a la dureza de la roca
- Ángulo del cono
 $\alpha_C \rightarrow$ inversamente proporcional a la dureza de la roca
- Diámetro del cono
 $\varnothing_C \rightarrow$ inversamente proporcional a la dureza de la roca

Figura 13

Geometría de los conos

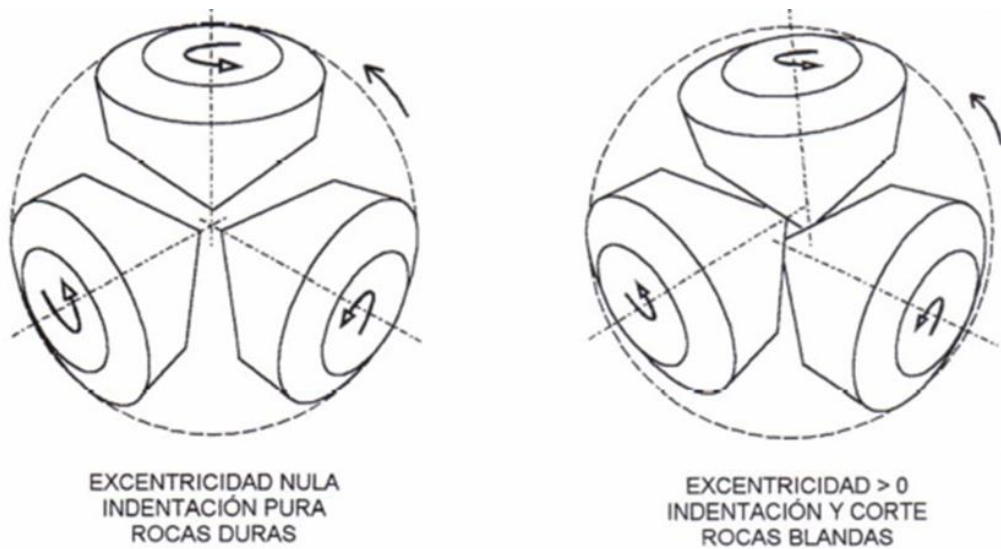


Nota: Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera Toquepala. Montoya (2018)

2.4.6. Excentricidad

Figura 14

Excentricidad



Nota: Estudio comparativo de brocas tricónicas

2.4.7. Tamaño y disposición de los dientes e insertos

- Rocas blandas → dientes o insertos largos y espaciados
- Rocas duras → dientes o insertos cortos y juntos

2.5. Selección del tipo de tricono

2.5.1. Varel.

Fundada en 1947 en Estados Unidos, Varel (actualmente parte del grupo Terelion) representa una trayectoria de más de siete décadas en la vanguardia del diseño y fabricación de brocas de perforación. Su historia está marcada por una continua inversión en investigación y desarrollo, lo que le ha permitido introducir

innovaciones significativas en la industria. Varel se ha consolidado como un proveedor global, con una reputación cimentada en la ingeniería de precisión y la creación de soluciones de alto rendimiento para los sectores de petróleo y gas, y minería.

El enfoque de Varel para sus brocas tricónicas, incluidas las de 10 5/8", se centra en la optimización de cada componente para maximizar la vida útil y la tasa de penetración (ROP). La compañía pone un énfasis particular en tecnologías avanzadas de rodamientos sellados y en la metalurgia de sus insertos de corte de carburo de tungsteno. Un ejemplo de su especialización es el desarrollo de tratamientos patentados, como el "HET™ (High Energy Tumbling) Carbide Treatment", diseñado para mejorar la tenacidad de los insertos y reducir las fallas prematuras, demostrando un compromiso con la ciencia de materiales para resolver los desafíos de la perforación en formaciones geológicas complejas y abrasivas.

2.5.2. Core tech

En contraste con el extenso legado de Varel, Core Tech emerge como una empresa de origen peruano, fundada en 1996. Su evolución desde la representación de marcas internacionales hasta el lanzamiento de su propia línea de productos para minería en 2015, incluyendo las brocas tricónicas, demuestra una estrategia ágil y un profundo conocimiento del mercado latinoamericano. Core Tech ha logrado una rápida expansión internacional, posicionándose como un competidor dinámico que desafía a las marcas tradicionales.

El enfoque de Core Tech para sus brocas de 10 5/8" se caracteriza por una atractiva propuesta de valor, buscando ofrecer productos de alta calidad, adaptados

a las condiciones geológicas específicas de la región, a precios competitivos. Su estrategia se apoya en un servicio técnico cercano y una capacidad de respuesta rápida a las necesidades del cliente. La existencia de estudios comparativos de rendimiento, como el realizado en una mina en Moquegua, donde se evaluaron modelos como el DH-645 de Coretech frente al RB-63 de Varel, subraya que Core Tech ha alcanzado un nivel de rendimiento que le permite competir directamente con los gigantes de la industria en aplicaciones críticas.

2.5.3. Composición detallada de brocas tricónicas de 10 5/8"

2.5.3.1. Cuerpo de la broca: acero de alta resistencia

El cuerpo de una broca tricónica, que soporta las cargas extremas de la perforación, está fabricado con aceros aleados de alta resistencia y tenacidad. La elección del material busca un equilibrio entre la dureza superficial para resistir la abrasión y la tenacidad del núcleo para evitar fracturas por impacto.

- **Acero Base Común:** Una de las aleaciones más utilizadas para este propósito es el acero AISI 4145 o sus variantes modificadas. Este acero al cromo-molibdeno es conocido por su excelente combinación de resistencia, tenacidad y capacidad de endurecimiento. Su composición química típica es:

- Carbono (C): 0,43% - 0,48%
- Manganeso (Mn): 0,75% - 1,00%
- Cromo (Cr): 0,80% - 1,10%
- Molibdeno (Mo): 0,15% - 0,25%
- Silicio (Si): 0,15% - 0,35%

- Fósforo (P): < 0,035%
- Azufre (S): < 0,040%
- **Tratamiento Térmico:** Es crucial destacar que la composición química por sí sola no define las propiedades finales. El cuerpo de la broca se somete a un riguroso proceso de templado y revenido para alcanzar una dureza superficial elevada en las zonas de mayor desgaste, como los conos y las patas, manteniendo al mismo tiempo un núcleo más tenaz y resistente a la fatiga.

2.5.3.2. Insertos de corte: carburo de tungsteno sinterizado

Los elementos que realizan el trabajo de corte directo sobre la roca son los insertos, fabricados en carburo de tungsteno, un material cermet (cerámico-metálico) de extrema dureza. Estos no son una aleación en el sentido tradicional, sino un material compuesto.

- **Composición Principal:** Se componen de partículas de carburo de tungsteno (WC) aglutinadas con un metal, generalmente Cobalto (Co).
- **Porcentaje de Tungsteno (WC):** Típicamente, los insertos de las brocas tricónicas contienen entre un 88% y un 94% de carburo de tungsteno. Un mayor porcentaje de WC se traduce en una mayor dureza y resistencia al desgaste abrasivo.
- **Aglutinante (Cobalto - Co):** El cobalto actúa como un ligante que proporciona tenacidad al inserto, es decir, la capacidad de absorber energía y resistir la fractura por impacto. El porcentaje de cobalto suele variar entre el 6% y el 12%.

- **Menor % de Cobalto:** Resulta en insertos más duros, ideales para formaciones rocosas muy duras y abrasivas, pero son más frágiles.
- **Mayor % de Cobalto:** Proporciona mayor tenacidad, haciéndolos más resistentes a la fractura en perforaciones con alta percusión o en formaciones no homogéneas.

2.5.3.3. Variaciones en core tech y varel:

Si bien la composición base es similar, marcas como Varel y Core Tech invierten en investigación y desarrollo para optimizar sus insertos. Esto puede incluir:

- **Grados de Carburo de Tungsteno:** Utilizan diferentes tamaños de grano de carburo de tungsteno (desde microgramos hasta granos más gruesos) para ajustar las propiedades de dureza y tenacidad.
- **Aditivos a la Matriz de Cobalto:** Es posible que se añadan pequeñas cantidades de otros elementos como Cromo (Cr) o Níquel (Ni) al aglutinante de cobalto para mejorar la resistencia a la corrosión y la tenacidad a altas temperaturas.
- **Tratamientos Especiales:** Varel, por ejemplo, promociona su "Tratamiento de carburo HET" (High Energy Tumbling), un proceso posterior a la sinterización que mejora la tenacidad de la superficie del inserto, haciéndolo más resistente a la fractura sin sacrificar la dureza.

En un estudio comparativo de rendimiento realizado en una mina en Moquegua, Perú, se analizaron modelos de brocas de ambas marcas, incluyendo a Varel RB-60 y a Coretech DH-645. Aunque el estudio se centró en el rendimiento y el costo, la selección de modelos específicos para diferentes tipos de roca sugiere que ambas compañías ofrecen una gama de insertos con diferentes composiciones y geometrías para adaptarse a las condiciones de perforación.

En resumen, se puede establecer con un alto grado de certeza que las brocas tricónicas de 10 5/8" de Core Tech y Varel poseen un cuerpo de acero aleado tipo AISI 4145 tratado térmicamente, y unos insertos de corte compuestos por un alto porcentaje (alrededor del 90%) de carburo de tungsteno en una matriz de cobalto, cuyas proporciones y tratamientos específicos varían según el modelo de la broca y la aplicación para la cual fue diseñada. La diferenciación competitiva y el avance tecnológico radican precisamente en la optimización de estas composiciones y procesos metalúrgicos.

Tabla 3

Triconos con dientes

TIPO DE ROCA	DISEÑO DE DIENTES		ACCION		MODELO
	Espacio	Altura	Tracción	Corte	
Blandas	████████	████████	■	████████	S (soft)
Medianas	██████	██████	██	██████	M (medium)
Duras	██	██	██████	██	H (hard)
Duras y abrasivas	██	██	██████	██	HR

Nota: Estudio comparativo de brocas tricónicas

Tabla 4*Triconos con insertos*

TIPO DE ROCA	DISEÑO DE DIENTES		ACCION		MODELO
	Espacio	Resalte	Trituracion	Corte	
Blandas (<40 Mpa)	■	■	■	■	HH 33
Medianas (40 a 90 Mpa)	■	■	■	■	HH 44
Semiduras (90 a 170 Mpa)	■	■	■	■	
Duras (170 a 230 Mpa)	■	■	■	■	HH 55
Muy Duras (> 230 Mpa)	■	■	■	■	HH 77

Nota: Estudio comparativo de brocas tricónicas

2.6. Variables De Operación

Según Montoya (2019), las variables operativas que influyen en la eficiencia del sistema, específicamente en la velocidad de penetración, incluyen las siguientes:

- Velocidad de rotación (rpm)
- Velocidad de penetración
- Fuerza de empuje
- Diámetro de perforación
- Velocidad y caudal del aire de barrido
- Desgaste de los trépanos

Además, estas variables están influenciadas por un factor externo al sistema: la dureza o resistencia de la roca. En la perforación rotativa, tanto los estudios

empíricos como las observaciones prácticas muestran una correlación significativa entre la resistencia a la compresión de la roca y la eficacia con la que se transfiere la energía para su fractura, proceso que se da principalmente a través de la indentación.

En cuanto a la clasificación de las rocas según su resistencia a la compresión (Sc), no hay un consenso universal en la literatura técnica, encontrándose clasificaciones que varían desde las más básicas, que solo distinguen entre rocas blandas, medianas y duras, hasta otras más detalladas que incluyen hasta seis o siete categorías. Para los fines del análisis que se discute a continuación, se utilizará la clasificación expuesta en el cuadro siguiente.

Tabla 5

Clasificación de rocas según dureza

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm²]	Sc [MPA]
Muy blandas	<400	<40
Blandas	400-800	40-80
Medianas	800-1200	80-120
Duras	1200-2000	120-200
Muy Duras	>2000	>200

Nota: Estudio comparativo de brocas tricónicas

2.6.1. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación (N), medida en revoluciones por minuto (rpm), muestra una relación inversamente proporcional con la resistencia a la compresión de la roca (Sc). La tabla a continuación presenta las velocidades de rotación observadas en la práctica, correspondientes a los distintos tipos de roca ya mencionados (Ortiz, 2006).

Tabla 6:

Clasificación de rocas según la velocidad de rotación

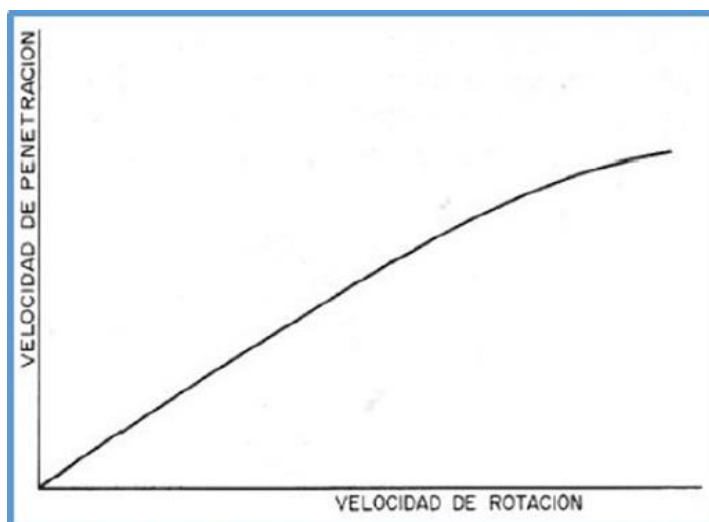
TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm²]	N [rpm]
Muy blandas	<400	120-100
Blandas	400-800	100-80
Medianas	800-1200	80-60
Duras	1200-2000	60-40
Muy Duras	>2000	40-30

Nota: Estudio comparativo de brocas tricónicas

La velocidad de rotación también varía según el tipo de dientes de los triconos. Para aquellos con dientes estampados, la velocidad oscila entre 60 y 120 revoluciones por minuto (rpm), mientras que, para los triconos con insertos, la velocidad se encuentra en un rango de 40 a 80 rpm.

Figura 15

Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad de penetración



Nota: Manual de perforación y voladura López Jimeno.

Tabla 7

Velocidades de rotación por tipo de roca

TIPO DE ROCA	Velocidad de rotación [r/min]
Blandas	75- 160
Medianas	60-80
Duras	35-70

Nota: Perforación rotativa con triconos

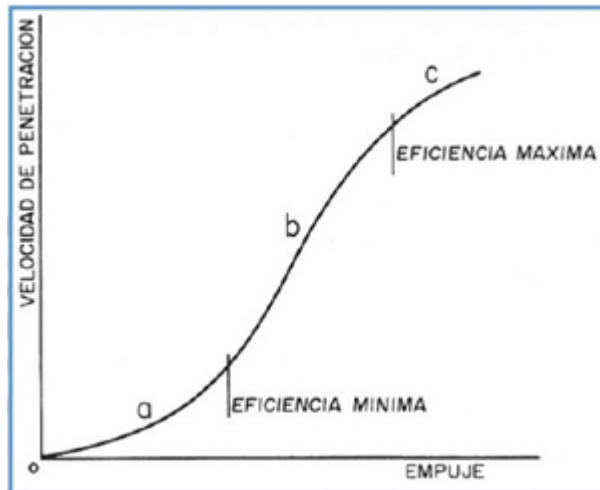
2.6.2. Velocidad de penetración

Según Ortiz (2006), la velocidad de penetración tiende a aumentar con el nivel de empuje hasta que ocurre un agarrotamiento del tricono debido al enterramiento de sus dientes o insertos contra la roca, o bien hasta que la alta velocidad de penetración genera un volumen de detritus que no permite una limpieza eficaz del barreno.

En contextos de formaciones rocosas duras, un excesivo empuje sobre la broca puede deteriorar los insertos antes de que se produzca un agarrotamiento o problemas de limpieza. Este incremento en el empuje también puede reducir la vida útil de los cojinetes, aunque no necesariamente afecte la longitud total perforada por el tricono.

Figura 16

Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración.



Nota: Manual de perforación y voladura López Jimeno

- a. Empuje insuficiente
- b. Avance eficiente
- c. Enterramiento del útil.

Según Jimeno (2003), el "empuje mínimo" necesario para perforar una roca, es decir, el nivel de fuerza por debajo del cual la roca no se perfora, se puede calcular utilizando la ecuación que se proporciona a continuación:

$$Em = 28.5 * RC * D$$

Donde:

- Em = Empuje mínimo (libras)
- RC = Resistencia a la compresión de la roca (Mpa).

- D = Diámetro del tricono (pulg).

Tabla 8

Valores límites para triconos de diferentes diámetros.

DIAMETRO DEL TRICONO (pulg)	EMPUJE LIMITE [libras]
5 ^{1/8}	21000
6 ^{1/4}	31000
6 ^{3/4}	37000
7 ^{7/8}	50000
9	65000
9 ^{7/8}	79000
12 ^{1/4}	121000

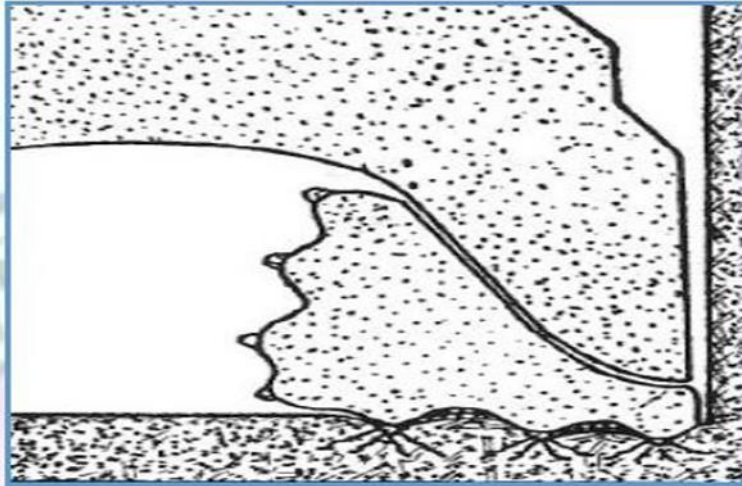
Nota: Manual de perforación y voladura López Jimeno.

2.6.3. Fuerza de empuje y diámetro de perforación

Jimeno (2003) señala que la fuerza de empuje (F) o PullDown, necesaria para perforar, se incrementa proporcionalmente con la dureza de la roca y debe ser suficiente para superar su resistencia a la compresión. Sin embargo, esta fuerza no debe sobrepasar un cierto límite para prevenir daños prematuros en el trépano. En contextos de formaciones rocosas duras o muy duras, un exceso de fuerza puede resultar en la destrucción de los rodamientos, acortando así la vida útil de la herramienta.

Figura 17

Rotura de la roca, empuje excesivo.



Nota: Manual de perforación y voladura López Jimeno.

Ortiz (2006) explica que la durabilidad de los rodamientos depende principalmente del tamaño del trépano o, más específicamente, del diámetro de perforación (\emptyset). Los trépanos de mayor diámetro cuentan con rodamientos más robustos y resistentes debido a su tamaño aumentado.

Además, afirma que la fuerza de empuje se determina en función de dos variables principales: la dureza de la roca y el diámetro de perforación.

También menciona que, dependiendo de la dureza de la roca, la fuerza de empuje mínima necesaria para superar su resistencia a la compresión se puede calcular mediante la siguiente fórmula empírica:

$$F_{min} = 28.5S_c\phi[lbp]$$

Donde:

- S_c : Resistencia a la compresión de la roca (Mpa)
- ϕ : Diámetro de perforación (pulg)

También nos indica que la fuerza de empuje se suele medir en libras-peso (lbp) por unidad de diámetro del trépano, que se expresa en pulgadas (ϕ). En la tabla que se presenta a continuación, se comparan los valores mínimos obtenidos mediante la aplicación de la fórmula mencionada anteriormente con los valores reales observados en operaciones mineras, dependiendo de la dureza de la roca.

Tabla 9

Fuerza de empuje sobre el macizo

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm²]	F'min [lbp/'de ϕ]	F'prac [lbp/'de ϕ]
Muy blandas	<400	<1150	<1150
Blandas	400-800	1150-2300	1500-3000
Medianas	800-1200	2300-3400	3000-5000
Duras	1200-2000	3400-5700	5000-7000
Muy Duras	>2000	>5700	7000-9000

Nota: Perforación rotativa con triconos.

Donde:

- lbp/'de ϕ : Libras peso por unidad de diámetro en pulgadas
- S_c : Resistencia a la compresión de la roca

2.6.4. Velocidad y caudal del aire de barrido

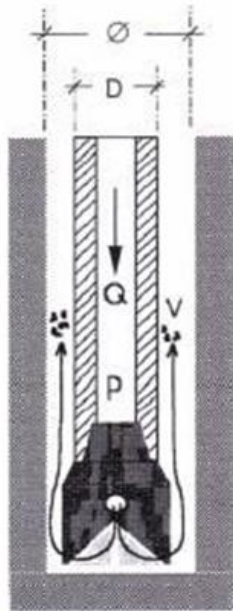
Ortiz (2006) explica que el aire comprimido, inyectado a través del interior de la columna de barras hacia el fondo del barreno, desempeña las siguientes funciones:

- Remover o barrer el detritus acumulado al fondo del taladro.
- Extraer el detritus hacia el exterior.
- Refrigeración y lubricación de los rodamientos del tricono.

La remoción y extracción del detritus de perforación se lleva a cabo mediante la energía cinética del aire que fluye por el espacio anular entre las barras y las paredes del pozo. Así, la eficacia de este proceso depende fundamentalmente de la velocidad del aire (V) en dicho espacio anular y del volumen de aire o caudal (Q) que circula a través del sistema (Ortiz, 2006).

Figura 18

Barrido y extracción de detritus



Nota: Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera Toquepala. Montoya (2018).

Ortiz (2006) señala que la refrigeración de los rodamientos se logra debido al efecto de expansión o caída de presión (ΔP) que ocurre cuando el aire atraviesa el tricóno. Este fenómeno depende de la presión (P) con la que el aire llega a la herramienta.

Además, menciona que, de acuerdo con la práctica minera, las velocidades de aire recomendadas varían según el tipo de roca y están especificadas en la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 10

Velocidades de aire recomendadas según el tipo de roca

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD MINIMA		VELOCIDAD MAXIMA	
	[m/min]	[pies/min]	[m/min]	[pies/min]
Blandas	1200	4000	1800	6000
Medianas	1500	5000	2100	7000
Duras	1800	6000	2400	8000

Nota: Perforación rotativa con triconos.

2.7. Parámetros de perforación independientes de la operación

2.7.1. Elasticidad

Umasi (2013) describe que la mayoría de los minerales que componen las rocas exhiben un comportamiento elástico-frágil, acorde a la ley de Hooke, y se fracturan cuando las tensiones exceden su límite de elasticidad.

Además, Umasi (2013) clasifica las rocas en función de su comportamiento frente a las tensiones provocadas por cargas elásticas en tres grupos distintos:

- a. Elástico – Dúctil o que obedecen la ley de Hooke.
- b. Plástico – frágiles, a cuya destrucción precede la deformación plástica.
- c. Las altamente plásticas o muy porosas, cuya deformación elástica es insignificante.
- d. Las propiedades elásticas de las rocas se definen mediante el módulo de elasticidad "E" y el coeficiente de Poisson "V". El módulo de elasticidad es el factor de proporcionalidad entre la tensión normal aplicada en la roca y su deformación relativa correspondiente, cuyos valores varían típicamente de $0,03 \times 10^4$ y 107×10^5 (0.03×10^4 a $10^7 \times 10^5$) Mpa. Estos valores dependen

esencialmente de la composición mineralógica de la roca, su porosidad y el tipo y magnitud de la carga aplicada (Umasi, 2013).

Umasi (2013) señala que los valores de los módulos de elasticidad en la mayoría de las rocas sedimentarias suelen ser menores en comparación con los minerales que las constituyen. Este parámetro también está influenciado por la textura de la roca, destacando que el módulo de elasticidad es generalmente mayor en la dirección de la estratificación o esquistosidad que en la dirección perpendicular a esta.

Además, el coeficiente de Poisson, que es el factor de proporcionalidad entre las deformaciones longitudinales, varía típicamente entre 0,2 y 0,4 para la mayoría de las rocas y minerales. Sin embargo, el cuarzo presenta un valor normalmente más bajo, alrededor de 0,07 (Umasi, 2013).

2.7.2. Plasticidad

Umasi (2013) explica que en ciertas rocas, antes de su destrucción ocurre una deformación plástica que comienza cuando las tensiones superan el límite de elasticidad de la roca. En el caso de los materiales idealmente plásticos, esta deformación se desarrolla a una tensión constante. Sin embargo, las rocas reales se consolidan durante la deformación, lo que requiere un aumento en el esfuerzo para incrementar la deformación plástica.

Además, la plasticidad de las rocas está influenciada por su composición mineral y tiende a disminuir con un mayor contenido de cuarzo, feldespato y otros

minerales duros. Las arcillas húmedas y algunas rocas homogéneas, por otro lado, muestran altas propiedades plásticas (Umasi, 2013).

Según Umasi (2013), las propiedades plásticas de las rocas pétreas, como granitos, esquistos cristalinos y areniscas, se hacen particularmente evidentes a altas temperaturas.

2.7.3. Abrasividad

Umasi (2013) define la abrasividad como la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante el proceso de rozamiento al moverse.

Umasi (2013) también identifica los factores que aumentan la capacidad abrasiva de las rocas:

- **Dureza de los granos constituyentes:** Las rocas que contienen granos de cuarzo, por ejemplo, son altamente abrasivas debido a la dureza de estos granos.
- **Forma de los granos:** Los granos angulosos presentan una mayor capacidad abrasiva en comparación con los redondeados.
- **Tamaño de los granos:** El tamaño influye directamente en la abrasividad; granos más grandes pueden contribuir a un mayor desgaste.
- **Porosidad de las rocas:** Esta característica crea superficies de contacto más rugosas, lo que provoca concentraciones de tensiones locales y aumenta la abrasividad.

- **Heterogeneidad de las rocas poliminerales:** Incluso si los minerales tienen la misma dureza, las rocas compuestas por una variedad de minerales son más abrasivas, ya que dejan superficies ásperas con presencia de granos duros, como los de cuarzo en el granito.

Estos factores son cruciales, ya que tienen un impacto significativo en la durabilidad de los útiles de perforación.

2.8. Selección de toberas

Jimeno (2003) describe que se utiliza aire comprimido, dirigido hacia abajo a través del centro de la barra, para enfriar los rodamientos del tricono y para eliminar el detritus desde el fondo del pozo hasta la superficie a través del espacio anular.

Los triconos están diseñados para que aproximadamente un 20% del aire se utilice en la refrigeración y limpieza de los cojinetes. La mayoría del aire restante se canaliza a través de toberas para limpiar los conos dentados y generar la turbulencia necesaria que facilita el ascenso del detritus a través del espacio anular. Estas toberas están equipadas con diafragmas ajustables que permiten modificar su posición para optimizar las condiciones y lograr una limpieza efectiva en el fondo del barrenado. También es posible emplear toberas intercambiables para el mismo propósito (Jimeno, 2003).

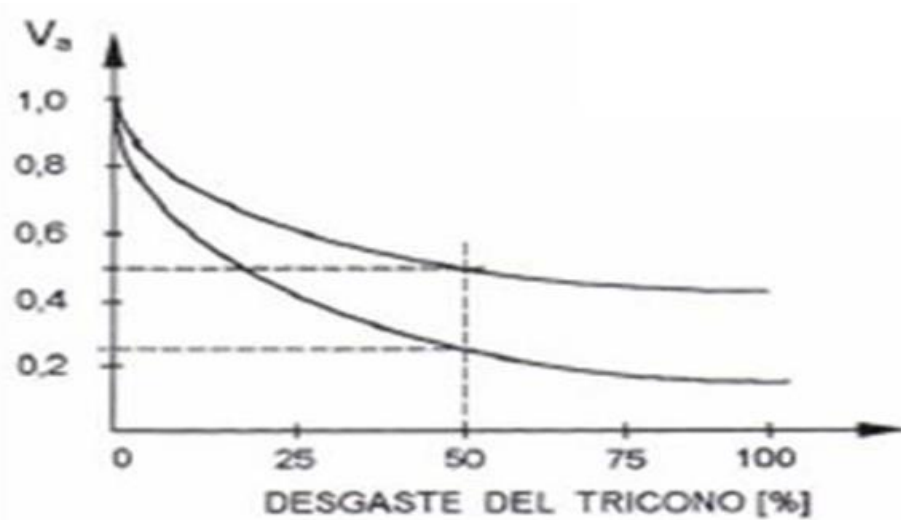
2.9. Desgaste del tricono

Jimeno (2003) explica que el uso de triconos con dientes estampados conlleva una reducción significativa en la velocidad de penetración a medida que la herramienta se desgasta.

Además, se observa en la imagen 29 que, cuando el tricono alcanza la mitad de su vida útil (50%), la velocidad de penetración se ha reducido entre un 50% y un 75% en comparación con la velocidad obtenida con una herramienta nueva.

Figura 19

Desgaste del tricono



Nota: Manual de perforación y voladura. López Jimeno (2003)

2.10. Hilos de acoplamiento

2.10.1. Hilos beco

Ortiz (2006) menciona que el origen y diseño de las barras de perforación provienen del fabricante de equipos de perforación Bucyrus Erie Company. Esta compañía no solo diseñaba y construía equipos, sino que también fabricaba las barras de perforación, buscando un diseño que cumpliera con las características necesarias para operar bajo condiciones mecánicas extremas. Su denominación incluye aspectos dimensionales y de diseño.

A su vez detalla las principales características de las barras de perforación diseñadas por Bucyrus Erie Company, enfatizando su capacidad para soportar condiciones mecánicas extremas y su diseño especializado que incluye aspectos dimensionales específicos.

Principales características de las barras de perforación incluyen:

- **Alta resistencia mecánica:** Las barras están diseñadas para soportar grandes **esfuerzos** tensionales, lo que las hace adecuadas para condiciones de trabajo extremas.
- **Perfil geométrico robusto:** Utilizan un triángulo generador de la rosca de gran altura y espesor, diseñado para resistir altas cargas de fricción.
- **Ángulo de inclinación y longitud entre roscas óptimos:** Estas características aseguran un acoplamiento rápido y eficiente del par torsor, facilitando el proceso de ensamblaje.
- **Uniformidad en las roscas BECO:** Todas las roscas BECO mantienen la misma altura, **distancia** entre hilos y ángulo de inclinación del cono roscado,

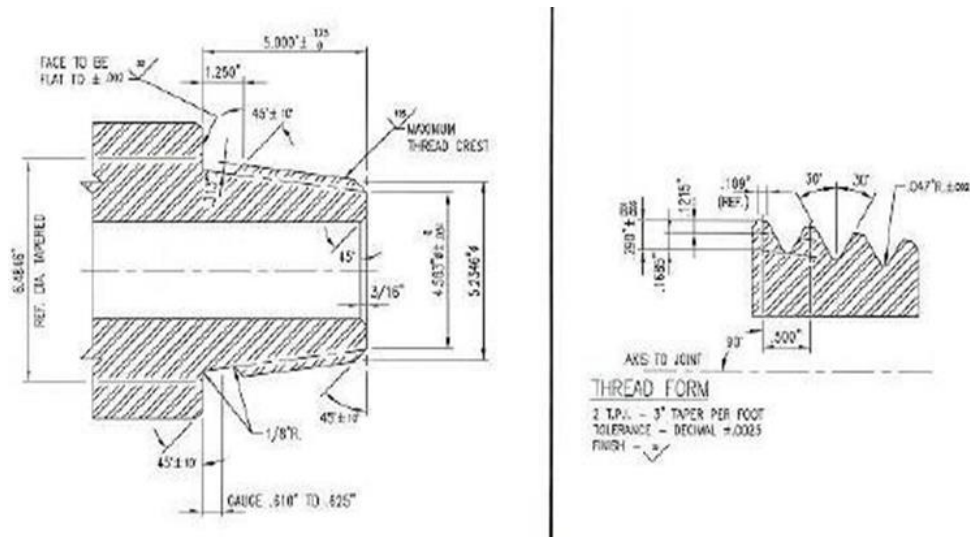
tanto en versiones hembra como macho, garantizando la compatibilidad y eficiencia en las conexiones.

- **Construcción de roscas en relación al diámetro de la barra:** Las roscas BECO se diseñan específicamente para coincidir con el diámetro de la barra de perforación que se utilizará, asegurando un ajuste perfecto y una operación segura.

Nos señala que en las conexiones de barras de perforación, el espejo es la única área de sello. Los hilos acoplados tienen un espacio entre sus filetes y las crestas que sirve dos propósitos: almacenar la grasa de lubricación y facilitar la evacuación de residuos que puedan adherirse. Las dimensiones de las roscas BECO varían desde BECO 3 ½ hasta BECO 10, ofreciendo una gama de opciones para diferentes necesidades de perforación.

Figura 20

Esquemas de roscas con hilos BECO



Nota: Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera Toquepala. Montoya (2018).

2.10.2. Hilos API

Ortiz (2006) explica que el origen y diseño de las especificaciones para barras de perforación provienen del American Petroleum Institute (API). Durante los inicios de la perforación rotativa, era complicado garantizar una compatibilidad perfecta entre hilos de diferentes fabricantes de barras de perforación. Por esta razón, se solicitó al API que desarrollara un estándar que incluyera marcas de identificación y características de diseño para asegurar una alta precisión en las conexiones.

También señala que las especificaciones del API cubren las propiedades mecánicas de los aceros utilizados en la fabricación, los detalles de manufactura y las dimensiones de las barras que serán utilizadas.

Además, describe las principales características de estas especificaciones del API, que incluyen:

- Una rosca de paso fino, con 4 a 5 hilos por pulgada.
- Un ángulo de inclinación diseñado para facilitar el acoplamiento.
- Denominaciones normalizadas por el API que identifican claramente sus características.
- Uso principal en triconos de perforación tanto mineros como petroleros, y en barras de perforación petroleras.

2.10.4. Broca core tech

Estas brocas se presentan como una buena alternativa en la solución a los problemas actuales en la perforación de taladros en minería. Con sus principales beneficio que afirma tener un menor desgaste de conos por su carburo más resistente, que le permite afrontar diferentes tipos de terreno y su sistema de ajuste API, que tiene una mejor sujeción a la columna obteniendo buenos rendimiento como la velocidad de penetración. Ver anexo 2

Tabla 11

Propiedades de los triconos en la operación minera de roca andesítica

Marca	Diámetro de broca	Modelo
VAREL	10 5/8	RB-60
CORE TECH	10 5/8	DH645

Nota: Elaboración propia

2.10.5. Indicadores de rendimiento en perforación

Para evaluar la eficiencia y rentabilidad de las brocas, se utilizan diversos indicadores, entre los cuales destacan:

- **Costo Parcial de Perforación (PDC):** Representa el costo de la broca dividido por la cantidad de metros perforados. Este indicador permite determinar la eficiencia económica de la broca en función de su durabilidad y rendimiento.
- **Metraje Perforado:** Cantidad total de metros que una broca puede perforar antes de requerir reemplazo. Un mayor metraje indica una mayor durabilidad y eficiencia operativa.
- **Velocidad de Penetración (ROP):** Mide la rapidez con la que la broca avanza en la formación rocosa, generalmente expresada en metros por hora.

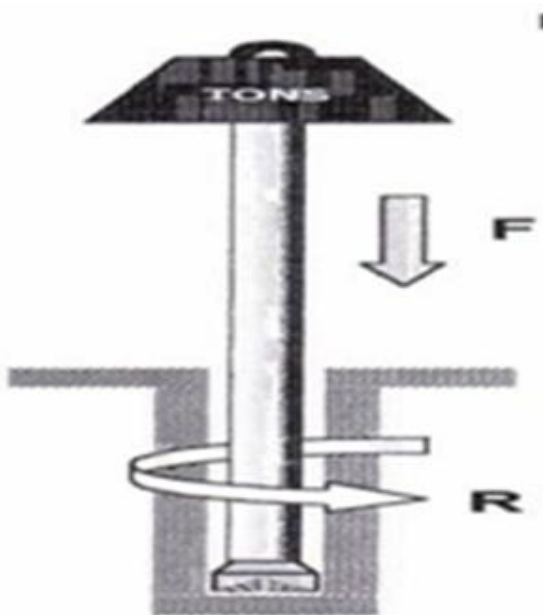
Una mayor ROP puede indicar una mayor eficiencia, aunque debe considerarse en conjunto con la durabilidad de la broca.

2.10.6. Perforación rotativa con triconos

"Este sistema emplea energía rotativa en la herramienta de corte (trépano) junto con una considerable fuerza de empuje". (Ortiz, 2006)

Figura 22

Principios de fuerza de rotación y empuje en la perforación



Nota: Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera Toquepala. Montoya (2018)

En la práctica minera, este sistema de perforación se manifiesta en tres variantes dependiendo del tipo de herramienta utilizada:

- Rotación con trépano cortante

- Rotación con trépano triturante
- Rotación con herramienta abrasiva

Inicialmente usado en la perforación de pozos petrolíferos, limitado a formaciones más bien blandas. Desde principios del siglo XX, con la aparición de los primeros trépanos de rodillos dentados que trituraban la roca, se han desarrollado rápidamente hasta la herramienta conocida hoy como tricono.

A partir de los años 50, esta tecnología comenzó a aplicarse en los primeros equipos rotativos diseñados para realizar perforaciones de tronadura en minas a cielo abierto. Innovaciones posteriores en el diseño de estos triconos y la calidad de los aceros empleados han otorgado a este sistema una gran versatilidad, utilizándose en una amplia variedad de rocas sin restricciones de longitud de los tiros. Su principal limitación es el diámetro de perforación, no aplicándose en diámetros menores a 150 mm para fines de fragmentación de rocas. (Ortiz, 2006).

La perforación rotativa con una herramienta abrasiva, conocida como corona de diamantes o diamantina, se usa exclusivamente para sondeos destinados a la recuperación de testigos de roca con fines de exploración o reconocimiento de cuerpos mineralizados.

2.10.7. Factores que afectan el rendimiento de las brocas

El desempeño de las brocas tricónicas está influenciado por múltiples factores, entre los cuales se incluyen:

- **Condiciones Geológicas:** La dureza, abrasividad y fracturamiento de la roca afectan directamente la vida útil y eficiencia de la broca.

- **Parámetros Operativos:** Variables como la presión de empuje, velocidad de rotación y flujo de aire de barrido influyen en el rendimiento y desgaste de la broca.
- **Diseño y Calidad de la Broca:** La geometría de los conos, la calidad de los materiales y la tecnología de fabricación determinan la resistencia al desgaste y la eficiencia de corte.

2.10.8. Evaluación económica de las brocas

La selección de brocas no solo se basa en su rendimiento técnico, sino también en un análisis económico que considere:

- **Costo Total de Perforación (TDC):** Incluye el costo de la broca, el costo operativo de la perforadora y otros gastos asociados, dividido por los metros perforados. Este indicador proporciona una visión integral de la rentabilidad de la operación.
- **Análisis de Costo-Beneficio:** Comparación entre el costo de adquisición y operación de la broca versus los beneficios obtenidos en términos de eficiencia y productividad.

2.10.9. Tecnologías de monitoreo en tiempo real

La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real, como el MineOps y su módulo JView, permite:

- **Seguimiento Continuo:** Registro en tiempo real de parámetros operativos y rendimiento de las brocas, facilitando la toma de decisiones informadas.

- **Optimización de Operaciones:** Identificación de oportunidades de mejora y ajustes inmediatos en los parámetros de perforación para maximizar la eficiencia.

Estas bases teóricas proporcionan el fundamento necesario para analizar y comparar el rendimiento de diferentes marcas de brocas tricónicas en roca andesítica del sur del Perú, utilizando el PDC como indicador principal de rentabilidad.

2.11. Definiciones conceptuales

En el contexto de la perforación minera y la evaluación de brocas tricónicas, es fundamental comprender ciertos conceptos clave que facilitan el análisis y la interpretación de los resultados. A continuación, se presentan las definiciones conceptuales relevantes:

- **Broca Tricónica:** Herramienta de perforación compuesta por tres conos giratorios equipados con dientes o insertos de carburo de tungsteno. Este diseño permite una distribución equilibrada de las fuerzas durante la perforación, facilitando la penetración en diversas formaciones geológicas.
- **Costo Parcial de Perforación (PDC):** Indicador económico que representa el costo de la broca dividido por la cantidad de metros perforados. Se utiliza para evaluar la eficiencia y rentabilidad de una broca en función de su durabilidad y rendimiento.
- **Metraje Perforado:** Cantidad total de metros que una broca puede perforar antes de requerir reemplazo. Un mayor metraje indica una mayor durabilidad y eficiencia operativa de la broca.
- **Velocidad de Penetración (ROP):** Tasa a la cual la broca avanza en la formación rocosa, generalmente expresada en metros por hora. Una mayor

ROP puede indicar una mayor eficiencia, aunque debe considerarse en conjunto con la durabilidad de la broca.

- **Condiciones Geológicas:** Características físicas y mecánicas de la formación rocosa, como dureza, abrasividad y fracturamiento, que afectan directamente el rendimiento y la vida útil de las brocas durante la perforación.
- **Parámetros Operativos de Perforación:** Variables controlables durante la operación de perforación, incluyendo presión de empuje, velocidad de rotación y flujo de aire de barrido, que influyen en el rendimiento y desgaste de la broca.
- **Costo Total de Perforación (TDC):** Suma de todos los costos asociados a la operación de perforación, incluyendo el costo de la broca, costos operativos de la perforadora y otros gastos relacionados, dividido por los metros perforados. Este indicador proporciona una visión integral de la rentabilidad de la operación.
- **Sistema de Monitoreo en Tiempo Real (MineOps y JView):** Herramientas tecnológicas que permiten el seguimiento continuo de parámetros operativos y rendimiento de las brocas, facilitando la toma de decisiones y la optimización de las operaciones de perforación.

Estas definiciones proporcionan un marco conceptual esencial para el análisis comparativo de diferentes marcas de brocas tricónicas en operaciones mineras, permitiendo una evaluación precisa de su rendimiento y rentabilidad.

2.12. Total drilling cost (costo total de perforación)

Como indica el artículo "Perforación - Costos de perforación" (2011, octubre), el principal objetivo de implementar un plan de control de costos de perforación es obtener datos concretos sobre el costo total de la perforación y el costo individual de cada componente utilizado en el proceso. Un plan de control eficaz permite no

solo acceder a información en tiempo real sino también prever el rendimiento futuro de los aceros. Para lograr esto, es esencial mantener un registro meticuloso de los metrajes perforados por cada acero de perforación.

Según el artículo "Perforación - Costos de perforación" (2011, octubre), el costo de perforación se calcula en términos de metros por dólar, basándose en el metraje perforado dividido por la suma total de los costos en dólares. Los costos totales de perforación incluyen varios componentes clave, tales como:

- Costo de combustible o energía eléctrica.
- Precios de los aceros utilizados.
- Costo por horas hombre.
- Costo de mantenimiento de las maquinarias.
-

Estos factores combinados determinan la eficiencia y la economía del proceso de perforación.

2.12.1. Costo total de acero de perforación:

El artículo "Perforación - Costos de perforación" (2011, octubre) explica que, aunque el costo de los componentes se mide también en metros/dólar, este difiere del costo total. El costo de los componentes se calcula basándose únicamente en el metraje perforado acumulado de cada componente dividido por su precio en dólares.

Además, el artículo menciona que los tipos de aceros de perforación incluidos en la evaluación de costos son los siguientes:

- Amortiguador
- Adaptador superior
- Barra de perforación
- Adaptador inferior o de broca
- Broca, tricono o trepano
- Anillo guía

Este plan permite recopilar información detallada sobre las fallas comunes, la durabilidad máxima y promedio, así como la durabilidad según la ubicación y la exposición a determinados sectores. La acumulación y análisis de estos datos facilitan la predicción de fallas y problemas futuros, permitiendo tomar decisiones informadas y acertadas para optimizar las operaciones de perforación y mejorar la rentabilidad del negocio.

Figura 23

Formula del TDC

$$TDC = \frac{\text{Costo del Tricono (\$)}}{\text{Total de Metros}} + \frac{\text{Costo Horario}(\frac{\$}{h})}{\text{Velocidad de Penetración}(\frac{m}{h})}$$

Nota: Determinación del costo total de perforación para optimizar esta operación unitaria en mina modelo a tajo abierto (2015)

2.13. Características de la mina de roca andesítica

La mina de roca andesítica, ubicada en la región Moquegua, Perú, provincia de Mariscal Nieto, distrito de Torata entre altitudes de 3330 – 3820 m.s.n.m., aproximadamente. Geográficamente se encuentra *ubicado* en las coordenadas UTM.

- 538 200,00 y 542 000,00
- Este 84 000,00 y Norte 87 800,00

Rutas de acceso a la unidad operativa de roca de mina andesítica se puede acceder de dos maneras, detallándose de la siguiente forma:

Vía terrestre: Partiendo desde cualquier ciudad de Perú se debe llegar hasta el departamento de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, donde posteriormente se debe tomar la ruta hacia Torata y luego a la mina.

Tabla 12

Acceso vía terrestre

TRAMO	Distancia (km)	Tiempo (min)	Tipo de vía
Moquegua-Samegua	5	5	Asfaltada
Samegua-Torata	70	45	Asfaltada
Torata-Unidad minera	15	30	Asfaltada

Nota: Área de geología de mina de roca andesítica

Vía aérea: Otra manera de acceder a la unidad operativa de roca andesítica es por la vía aérea, partiendo desde cualquier ciudad del Perú vía aérea y aterrizar en el aeropuerto de Moquegua y seguidamente tomar la ruta vía terrestre descrito previamente.

Torata y luego a la mina Cuajone. El tajo presenta dimensiones aproximadas de 2,300 metros de longitud y 900 metros de ancho, orientado en dirección norte-sur, hacia el este. En el extremo noroeste se encuentra un cuerpo mineralizado de baja ley, cuyas dimensiones son de 850 metros de largo por 550 metros de ancho. Asimismo, en la zona centro sureste del tajo se localiza un área mineralizada que abarca unos 300 metros de longitud por 200 metros de ancho.

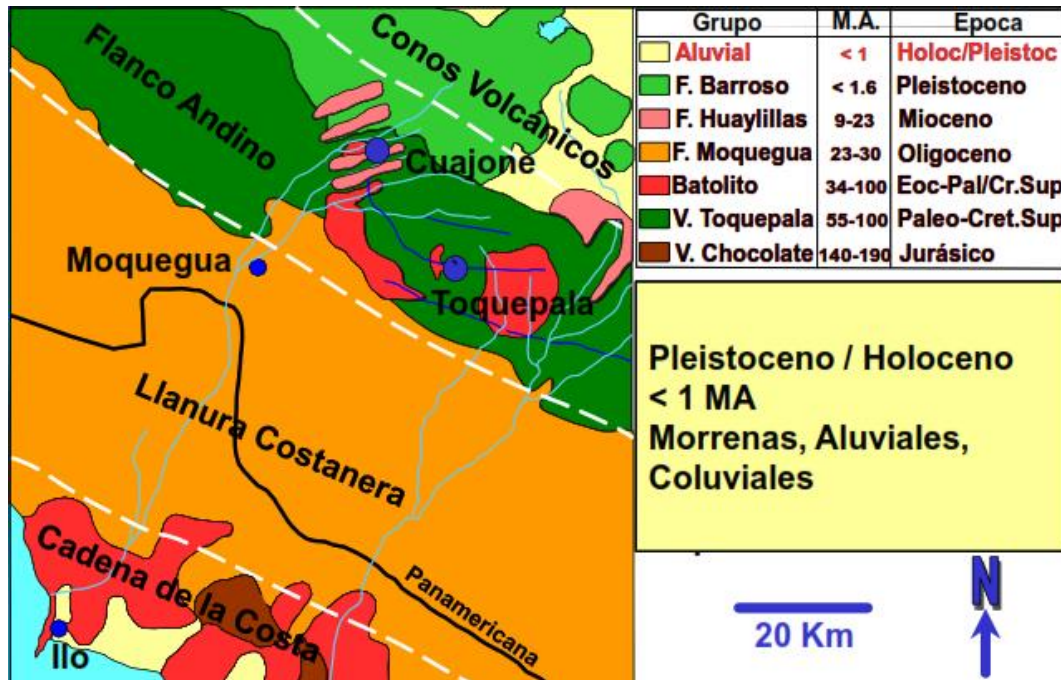
Presenta un entorno geológico complejo con un macizo rocoso predominantemente fracturado. A través de diversos estudios geotécnicos, se han evaluado las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del macizo para optimizar las operaciones mineras a cielo abierto, especialmente en lo relacionado con la estabilidad de taludes.

a) Geología

El yacimiento de la roca de mina andesítica, se encuentra dentro de la cordillera occidental de los andes, dentro de su área, se ven planicies, colinas, montañas, formadas por: valles aluviales, colinas disectadas y montañas moderadamente espinadas.

Figura 24

Geología regional



Nota: Departamento de geotecnia de mina de roca Andesítica.

- **Geología regional**

Se logra observar geomorfológicamente: La cordillera y llanura de la costa, la pared lateral andina y el conjunto de conos volcánicos. Esto ubicado al lado sur a norte del yacimiento.

- **Geología local**

Es una mina de cobre tipo pórfido ubicada en el área de Chuntacala, ubicada en las laderas de los Andes, que está formada por rocas volcánicas y macizos intrusivos, creando un terreno repentino con pendientes pronunciadas cuyos picos llegan a 4000 m.s.n.m.

b) Propiedades del macizo rocoso

Para evaluar las propiedades y la calidad de la roca intacta, se aplicaron diversos sistemas de clasificación del macizo rocoso, entre ellos:

- RQD (1988): Índice de calidad de la roca.
- RMR (1989): Sistema de clasificación del macizo rocoso.
- GSI (2002): Índice de resistencia geológica.

El cálculo de estos índices se realizó mediante el método de levantamiento por celdas de detalle, complementado con el análisis de las propiedades físicas de la roca intacta.

Tabla 13

Valoración del Macizo Rocosos en Mina de Roca Andesítica

	TIPO DE ROCA				
	Andesita	Latita Porfírica	Riolita Porfírica	Toba Cristal	Traquita
UCS (Mpa)	89.74	82.46	76.14	79.38	212.28
PESO UNIT. Hum. [gr/cm ³]	2.77	2.65	2.65	2.31	2.36
Vp (m/s)	2819	2498	2814	2665	2844
Vs (m/s)	1591	1452	1591	1506	1653
E*10 ³ [Mpa]	25.89	31.2	35.6	22.97	34.96
Poisson	0.235	0.23	0.257	0.1285	0.203
INFORMACION GEOMECANICA Y GEOTECNICA					
RQD	45.4	45.2	33.1	59.6	54.8
RMR	57	58	58	72	72
GSI	45-55	50-55	50-55	65-70	65-70

Nota: Departamento de geotecnia de mina de roca Andesítica.

c) Características estructurales

La dirección y disposición de las estructuras geológicas en la mina Cuajone constituye un factor clave en el proceso de perforación, incluyendo el carguío de taladros, el diseño de la malla de perforación, el tipo de amarre y el inicio de las voladuras.

Se pueden distinguir dos categorías principales de estructuras geológicas, siendo una de ellas las denominadas estructuras geológicas definidas. Estas cumplen con las restricciones cinemáticas impuestas por la orientación y geometría de los taludes en relación con las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

Estas estructuras, que se ubican principalmente a nivel de banco, pueden evaluarse mediante métodos analíticos. Su presencia influye en el diseño banco-berma y puede tener un impacto directo sobre la estabilidad del talud. Según su comportamiento, dan lugar a tres tipos principales de fallas: planar, en cuña y por vuelco.

2.14. Características geológicas del yacimiento de la mina de roca andesítica

Es uno de los yacimientos más grandes de cobre de tipo pórfido, cuya mineralización está asociada principalmente a rocas ígneas y volcánicas, como dioritas y andesitas, que contienen cobre en forma diseminada. La geología regional se caracteriza por una serie de fallas y pliegues que controlan la mineralización y la distribución del depósito (Berrospi, 2020).

a) Litología y unidades litológicas

La litología del yacimiento está compuesta por rocas volcánicas y plutónicas. Las principales unidades litológicas incluyen dioritas, andesitas y basaltos, junto con una formación más superficial de conglomerados y tufo volcánico. Estas unidades formaron un sistema mineralizado que es alterado por procesos hidrotermales que enriquecen la mineralización de cobre. Las rocas anfitrionas de la mina de roca andesítica están instruidas por dioritas y otras rocas ígneas que sirven como contenedores del mineral de cobre (Sánchez et al., 2021).

b) Mineralización

Mineralización de Cobre. - El yacimiento Cuajone presenta una mineralización de cobre que supera ligeramente el 0.40%, caracterizándose por una concentración estable y homogénea, con una composición mineral simple.

Las dimensiones aproximadas del tajo principal son de 2,300 metros de longitud por 900 metros de ancho, con una orientación predominante de norte a sur hacia el sector este. En la zona noroeste se localiza un cuerpo de baja ley con dimensiones cercanas a los 850 metros de largo y 550 metros de ancho. Además, en el centro sureste del tajo se identifica una zona mineralizada que abarca unos 300 metros de largo por 200 metros de ancho.

La distribución de la mineralización en el yacimiento de la mina de roca andesítica se presenta de la siguiente manera:

Tabla 14

Proporción de minerales (en porcentaje) presentes en el Tajo.

Tipo de Roca	Porcentaje
Mineral Andesita de tipo Basáltica.	52.0%
Mineral Latita de tipo Porfiritica	46.0%
Mineral Riolita de tipo Porfiritica.	0.9%
Brechas con mineral.	0.9%

Nota: Departamento de geología de mina de roca Andesítica.

Mineralización de molibdeno. - En el yacimiento Cuajone, además del cobre, se obtiene como subproducto principal el molibdeno, cuya ley promedio alcanza aproximadamente el 0,033%.

c) Método de explotación

En la mina de roca andesítica se emplea el método de explotación a tajo abierto. Los bancos tienen una altura de 15 metros, y la extracción del mineral se realiza desde una altitud mínima de 2,995 metros sobre el nivel del mar hasta una máxima de 3,820 m.s.n.m., lo que representa un desnivel vertical de aproximadamente 825 metros.

d) Parámetros metalúrgicos y reservas

El yacimiento de la mina de roca andesítica es uno de los principales productores de cobre en el Perú, con reservas estimadas de aproximadamente 1,64 mil millones de toneladas de mineral, con una ley promedio de 0,57% de cobre. La mina tiene una capacidad de procesamiento de 100,000 toneladas por día, con una recuperación metalúrgica promedio que oscila entre el 81% y el 85%, dependiendo de las características del mineral. Este alto rendimiento metalúrgico es posible gracias a las condiciones geológicas y la calidad del mineral (González & Pérez, 2020).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Planteamiento metodológico (tipo, nivel y diseño de investigación)

3.1.1. Tipo de investigación

El presente estudio es:

Cuantitativo, ya que se centra en la recopilación, análisis y comparación de datos numéricos obtenidos durante las pruebas de las distintas marcas de brocas tricónicas de 10 5/8" en roca andesítica del sur del Perú. La investigación busca cuantificar el desempeño de las brocas en términos de PDC (Partial Drilling Cost) y durabilidad.

Descriptiva, debido a que nos centramos en identificar las características de los hechos, como la medición y evaluación de datos.

Posee enfoque transversal, debido a que recolecta datos en un tiempo determinado, con el propósito de medir objetivamente las diferencias en rendimiento entre las marcas de brocas bajo condiciones controladas, utilizando indicadores económicos y operacionales clave.

3.1.2. Nivel de investigación

La investigación se sitúa en el nivel de investigación experimental y comparativa:

Explicativa, porque busca identificar y comprender los factores que afectan el rendimiento de las brocas tricónicas, tales como las características geológicas del terreno, la durabilidad de las brocas y su velocidad de perforación.

Comparativa, ya que su principal objetivo es comparar el rendimiento de diferentes marcas de brocas tricónicas en las mismas condiciones operativas, evaluando cuál de ellas ofrece el mejor balance entre costo y rendimiento.

Este nivel de investigación permitirá obtener una visión clara de los factores que influyen en la eficiencia de las brocas y cómo optimizar los procesos de perforación en roca andesítica del sur del Perú.

3.1.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental, ya que implica la realización de pruebas controladas para evaluar el desempeño de las diferentes marcas de brocas tricónicas bajo las mismas condiciones geológicas y operativas en roca andesítica del sur del Perú.

Se adoptará un diseño pre experimental, donde se realizarán mediciones antes y después del uso de las nuevas marcas de brocas. El experimento consistirá en comparar los indicadores de rendimiento (como PDC, durabilidad y velocidad de penetración) de las nuevas brocas frente a las ya establecidas en la mina.

El proceso experimental incluirá las siguientes etapas:

Selección de marcas de brocas: Se utilizarán tanto marcas tradicionales como nuevas marcas introducidas en la mina.

Condiciones de prueba: Las brocas serán sometidas a pruebas de perforación en las mismas fases de minado y bajo las mismas condiciones geológicas, minimizando las variaciones externas.

Medición de indicadores: Se registrarán los resultados de cada broca en términos de costo (PDC), metraje perforado, durabilidad y velocidad de penetración.

Análisis comparativo: Se realizará un análisis estadístico para determinar si hay diferencias significativas entre el desempeño de las marcas de brocas, y se evaluará cuál ofrece la mejor relación costo-beneficio.

Este diseño experimental es el más adecuado para asegurar que los resultados obtenidos sean válidos y reflejen el impacto real de las variables evaluadas en las operaciones de perforación en roca andesítica del sur del Perú.

3.2. Población y muestra (si es aplicable)

3.2.1. Población

La población de esta investigación está compuesta por todas las brocas tricónicas de 10 5/8" utilizadas en las operaciones de perforación en la mina de roca andesítica del sur del Perú. Este tipo de brocas es ampliamente utilizado en la mina debido a sus características adecuadas para enfrentar las condiciones geológicas del terreno. Las brocas que se evalúan forman parte de las herramientas operativas regulares y de pruebas de nuevos proveedores que buscan ofrecer soluciones más eficientes en términos de rentabilidad y durabilidad.

3.2.2. Muestra

La muestra seleccionada para este estudio incluye dos marcas de brocas tricónicas: de las ya establecidas en la mina (Varel) y de las nuevas marcas que están en proceso de prueba (CoreTech). Las marcas nuevas están siendo evaluadas con el objetivo de convertirse en proveedores oficiales de la mina, y su desempeño se analiza en función del cumplimiento de los objetivos de metraje perforado especificados en sus contratos de prueba.

Las brocas seleccionadas para la evaluación corresponden a las que fueron utilizadas durante el mes de octubre, en las fases 6 B2 del tajo minero. Estas fases representan divisiones organizadas y escalonadas del tajo que permiten planificar de manera eficiente la explotación minera. La elección de estas fases garantiza que las condiciones geológicas sean consistentes para todas las pruebas.

El número de pruebas realizadas con cada marca es el siguiente:

- CoreTech: 9 pruebas.
- Varel: 19 pruebas.

El muestreo se realizó de forma intencionada, seleccionando las brocas con base en las pruebas realizadas y las condiciones específicas del terreno. Aunque el número de pruebas varía entre marcas, esto se debe a que se adquirieron solo 9 brocas de CoreTech para la fase de evaluación inicial. Para asegurar una comparación precisa, la cantidad de pruebas de Varel se limitó al mismo periodo de tiempo que las pruebas de CoreTech. Todas las brocas fueron evaluadas optando por tenerlas en lo posible bajo las mismas condiciones operativas y con los mismos equipos y personal, lo que permite realizar comparaciones confiables entre ellas.

Las muestras fueron tomadas desde el 02/11/2022 hasta el 09/12/2022, como se ve en las fechas de ingreso de la tabla del Anexo 4.

3.2.2.1. Criterios de selección de la muestra

La selección de las marcas se basó en los siguientes criterios:

- Tamaño de la broca: Se utilizaron exclusivamente brocas de 10 5/8" de diámetro, que es la medida estándar para las operaciones de perforación en las fases seleccionadas de roca andesítica del sur del Perú.
- Periodo de prueba: Las pruebas de rendimiento de las brocas se realizaron durante el mes de octubre, bajo condiciones controladas en las fases 6 B2 y 9 del tajo.
- Pruebas de proveedores: Las Varel está en etapa de evaluación para determinar si cumplen con los requisitos mínimos de metraje especificados en los contratos de prueba. El proceso de selección incluye detener la prueba si el desempeño de las brocas no cumple con los objetivos y solicitar un reembolso al proveedor si es necesario.

3.3. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos para este estudio se realizó mediante una combinación de técnicas automatizadas y supervisión directa por parte del equipo encargado de las operaciones de perforación. A continuación, se detallan las técnicas empleadas para recopilar la información necesaria:

Figura 25

Formato de toma de datos

EQUIPO	# BROCA	N° SERIE	INGRESO	SALIDA	MARCA	MODELO	MEDIDA	RECORRIDO (m)	N° TALADROS	TIEMPO (hrs)	VELOCIDAD PENETRACION (m/h)	DIAS	PDC (US\$/m)	RAZÓN DE DESCARTE	ESTADO

Nota: Elaboración propia

3.3.1. Sistema automatizado de monitoreo: jview

El sistema JView, parte del software de gestión minera MineOps, fue la principal herramienta utilizada para la recolección de datos en tiempo real. Este sistema permitió registrar de manera automática y precisa las siguientes variables clave durante las pruebas de perforación:

- Metraje perforado (en metros)
- Velocidad de penetración (metros por hora)
- Durabilidad de las brocas (medida en días y metros perforados)
- Costo parcial de perforación (PDC)
- Número de taladros realizados
- Razón de descarte de las brocas, ingresada manualmente por el operador de la perforadora al final del ciclo de vida de cada broca.

Estos datos fueron recopilados automáticamente por JView desde las perforadoras, que están equipadas con sensores para medir estas variables durante el proceso de perforación. El sistema recopila los datos de las perforadoras y genera reportes detallados sobre el rendimiento de cada broca en tiempo real. Los reportes

se almacenan en la base de datos del sistema y son accesibles para el análisis posterior.

3.3.2. Observación directa de los operadores

Aunque la mayoría de los datos fueron recopilados de manera automática, los operadores de las perforadoras jugaron un papel clave en la identificación del momento en que las brocas llegaban al final de su ciclo de vida útil. Los operadores realizaron inspecciones visuales de las brocas al término de cada perforación para detectar posibles fallos, como:

- Conos descolgados
- Insertos rotos
- Rotura del cono
- Polines sobrepuestos
- Desgaste de faldones

La información sobre el estado final de las brocas fue ingresada manualmente por los operadores en el sistema JView, lo que permitió complementar los datos automáticos con la observación de las condiciones físicas de cada broca. Esta técnica de recolección de datos fue esencial para registrar la causa exacta del descarte de las brocas.

3.3.3. Revisión de los reportes generados por jview

Los reportes generados por JView fueron revisados y analizados por el equipo de Perforación y Voladura para asegurar que los datos fueran consistentes y reflejaran adecuadamente el rendimiento de las diferentes marcas de brocas

tricónicas. Estos reportes incluyen un registro cronológico de cada perforación realizada, lo que permitió un seguimiento detallado del rendimiento de las brocas a lo largo de su ciclo de vida.

3.3.4. Validación de los datos

Para asegurar la precisión de los datos, se realizaron revisiones periódicas de los informes automáticos de JView en comparación con las observaciones de los operadores. La validación de los datos fue un paso importante para garantizar que la información obtenida reflejara con precisión el desempeño de las brocas y los factores que influyeron en su rendimiento.

En resumen, la recolección de datos se basó principalmente en el uso de herramientas automatizadas como JView, complementadas con observaciones directas de los operadores de las perforadoras. Esta combinación permitió obtener un conjunto de datos confiable y detallado, necesario para llevar a cabo el análisis comparativo del rendimiento de las brocas tricónicas evaluadas.

3.4. Técnicas para el procesamiento de datos

El procedimiento y análisis de datos se dio de la siguiente manera:

3.4.1. Elección de los datos

Primero se seleccionó los datos, los cuales son recopilados a través del sistema JView, que monitorea en tiempo real las variables clave durante las operaciones de perforación, fueron exportados a Excel para su análisis. Estos datos incluyen:

- Metraje perforado
- PDC (Costo por metro perforado en dólares)
- Durabilidad de las brocas (medida en días o metros perforados)
- Número de taladros realizados
- Velocidad de penetración (m/h)

Los datos fueron seleccionados ordenado por marca de broca y diámetro para garantizar que la comparación de resultados fuera precisa. Se tomó en cuenta también incluir solo el tiempo de prueba de la broca Coretech para limitar las diferencias de condiciones con la marca Varel. Quedando la tabla como se ve en el Anexo 4.

En relación a la selección de datos se debe tomar en cuenta los costos por broca, debido a que este servirá para el cálculo del PDC. Ver anexo 7.

3.4.2. Cálculo de promedios

El principal enfoque para el análisis fue calcular el PDC promedio para cada una de las marcas de brocas. Utilizando Excel, se aplicaron fórmulas de promedio a los datos de PDC para cada broca evaluada. Este promedio permitió hacer una comparativa directa entre las marcas tradicionales (Varel) y la nueva marca en prueba (Coretech).

También se calcularon promedios de otras variables, como el metraje perforado, con el fin de obtener un PDC promedio del rendimiento de las brocas. Ver Anexo 8.

3.4.3. Generación de gráficos

Para facilitar la visualización de los resultados, se generó gráfico de barras y líneas en Excel que muestran las diferencias en el PDC y el recorrido promedio entre las diferentes marcas de brocas. Estos gráficos permitieron ilustrar de manera clara qué marcas presentaron el costo más bajo por metro perforado y cuál ofreció la mayor rentabilidad.

Los gráficos incluyen:

- Comparación de PDC entre marcas.
- Comparación del promedio de metraje perforado por marca.

Ver Anexo 9

3.4.4. Análisis comparativo

Utilizando los promedios calculados, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para cada marca. Este análisis permitió identificar qué marcas de brocas fueron más eficientes en términos de costos operativos y cuál ofreció el mejor rendimiento en las condiciones geológicas de roca andesítica del sur del Perú.

3.4.5. Interpretación de los resultados

Finalmente, los resultados obtenidos a través de los cálculos y gráficos generados en Excel fueron interpretados para determinar cuál de las marcas de brocas evaluadas presentó la mejor relación costo-beneficio. El PDC fue el

principal indicador utilizado para determinar la rentabilidad de las brocas, tal como se menciona en el informe de las pruebas anteriores

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en roca andesítica con el objetivo de evaluar el rendimiento de dos marcas de brocas tricónicas de 10 5/8", de ellas la marca nueva (CoreTech) que se encontraban en periodo de prueba, y la marca ya establecida en la operación minera (Varel).

El parámetro clave para evaluar el desempeño de las brocas fue el Costo Parcial de Perforación (PDC), que representa el costo por metro perforado, así como el metraje promedio perforado por cada broca. Para cada una de las marcas se realizaron múltiples pruebas y se registraron los resultados a través del sistema JView, que mide en tiempo real el rendimiento de las perforadoras.

4.1.1. Metraje y PDC: resultados clave

- El metraje normal esperado para las brocas en la mina de roca andesítica es de 1500 metros perforados antes de que lleguen al final de su vida útil. Este umbral fue el punto de referencia para evaluar el rendimiento de las brocas.
- Por su lado, Coretech superó ampliamente las expectativas, perforando en promedio 2208.03 metros, lo que representa un rendimiento muy superior al estándar esperado. Gracias a este alto metraje, su PDC fue el más bajo de todas

las marcas evaluadas, con 1,45 USD/m, lo que demuestra una alta eficiencia y rentabilidad.

- Varel, una marca tradicional, perforó en promedio 1815,58 metros, superando también el estándar de los 1500 metros. Sin embargo, su PDC fue más alto que el de CoreTech, alcanzando un promedio de 1,92 USD/m, lo que indica un mayor costo por metro perforado

4.1.2. Análisis comparativo

Las pruebas demostraron que, las brocas de CoreTech destacaron por su excelente desempeño. Estas últimas no solo superaron significativamente el metraje esperado, sino que también ofrecieron el PDC más bajo, lo que las convierte en la opción más rentable en las condiciones geológicas de mina de roca andesítica.

Tabla 15:

Promedio de Recorrido Perforado y PDC por Marca de Broca

Etiquetas de fila	Promedio de RECORRIDO (m)	Promedio de PDC
Coretech	2208,03	1,42
Varel	1815,58	1,92

Nota: Propio

La tabla muestra los resultados promedio de metraje perforado y PDC para cada marca de broca, datos sacados del Anexo 4, del cual se filtran por modelo para obtener el promedio por cada uno, posterior a eso el PDC se obtiene de la formula:

$$PDC = \frac{\text{Costo del tricono}}{\text{Metraje perforado}}$$

Donde:

Costo del tricono: Los proveedores, coloca un precio para las brocas, en dólares.

Metraje perforado: Se usa promedio de metros perforados por modelo, en metros.

Vemos que la marca tradicional, Varel, ofreció un rendimiento aceptable, superando el estándar de la mina de roca andesítica en términos de metraje perforado. Sin embargo, Coretech fue superior en todos los aspectos evaluados.

4.1.3. Conclusión de las pruebas

El rendimiento de las brocas mostró diferencias significativas entre la marca nueva y la tradicional. Mientras que CoreTech emergió como la opción más rentable, con un metraje alto y un bajo PDC. Varel mantuvo un desempeño estable, aunque con un PDC mayor en comparación con CoreTech.

4.2. Presentación y análisis de los resultados

4.2.1. Estándar de rendimiento y costo parcial de perforación (PDC)

Según el jefe del área de voladura, se espera que las brocas tricónicas utilizadas en la mina de roca andesítica tengan una vida útil de 1500 metros perforados antes de ser reemplazadas. Este valor se utiliza como referencia para evaluar la eficiencia y la rentabilidad de las diferentes marcas de brocas probadas.

El Costo Parcial de Perforación (PDC) es el indicador clave de rentabilidad en este estudio, ya que representa el costo por metro perforado. Un PDC bajo indica una mayor rentabilidad y eficiencia en el uso de la broca.

4.2.2. Resultados de las pruebas en mismas zonas de la mina de roca andesítica

La prueba experimental se llevó a cabo en una zona específica de la mina de roca andesítica. Se probaron las dos marcas de brocas: Varel y Coretech. Esto permitió comparar el desempeño de las brocas en condiciones geológicas similares y obtener resultados consistentes. Ver Anexo 9.

En el gráfico del Anexo 9, se muestra la relación inversa entre el metraje perforado y el PDC. Las brocas que logro un mayor recorrido (como CoreTech) presenta un PDC más bajo, lo cual indica una mejor rentabilidad. En el caso de Coretech, con menor metraje perforado, su PDC fue más alto comparativamente, aunque no posee falta de eficiencia ni rentabilidad. Para tomar en cuenta se usó la perforadora P&H 320XPC para las pruebas. La cual figura en los Anexos, Tipo de Perforadora Utilizada y a su vez en los Anexos como Desempeño de brocas utilizadas, tenemos los datos de cada broca utilizada durante la prueba.

- CoreTech, en contraste, superó ampliamente el estándar esperado, con un promedio de 2208,03 metros perforados y el PDC más bajo de 2,91 USD/m. Estos resultados posicionan a Coretech como la opción más rentable, ya que ofrece un alto rendimiento en términos de metraje perforado y un bajo costo operativo.
- La marca tradicional, Varel, tuvo un desempeño aceptable, perforó 1815,58 metros en promedio, con un PDC de 4,83 USD/m. Aunque ambas marcas cumplieron con el estándar de rendimiento, su rentabilidad fue menor en comparación con Varel.

4.2.3. Enfoque en la rentabilidad de las marcas

La operación en la mina de roca andesítica, se desarrolla sobre un yacimiento de pórfido de cobre, cuyas características geomecánicas de alta dureza y abrasividad representan un desafío constante para los consumibles de perforación. En este contexto, la optimización de la vida útil de las brocas tricónicas es un factor crítico para el control de costos operativos. Por ello, la gestión minera establece indicadores de rendimiento (KPIs) para evaluar la eficiencia de estas herramientas.

Bajo estas condiciones la gestión minera estableció para la evaluación del rendimiento de las brocas tricónicas en la mina de roca andesítica, un estándar operativo interno de 1500 metros perforados como mínimo por unidad.

Debido a que el yacimiento de pórfido de cobre de la mina de roca andesítica, caracterizado por su alta dureza y abrasividad, exige el uso de herramientas de alto rendimiento para mantener la rentabilidad. Estudios realizados en yacimientos peruanos similares, como Toquepala y Tintaya, demuestran que la optimización de los parámetros de perforación permite alcanzar vidas útiles significativas. Por lo tanto, el estándar de 1500 metros se presenta como un objetivo alcanzable y un indicador de eficiencia en la gestión de la perforación y voladura de la mina

Dado que la rentabilidad es el enfoque principal de este análisis, los resultados sugieren que CoreTech la opción más rentable entre las marcas evaluadas. Su rendimiento no solo supera el estándar de 1500 metros, sino que también ofrece el menor costo por metro perforado, lo cual es beneficioso para la operación en términos económicos.

- CoreTech: Con un PDC de 2,91 USD/m, demuestra ser la opción con mejor relación costo-beneficio, destacándose como la broca más eficiente para las operaciones en roca andesítica.
- Varel: Aunque cumple con el estándar de 1500 metros, su PDC es más alto que los de CoreTech, lo que reduce su rentabilidad relativa.

4.2.4. Conclusiones del análisis de rentabilidad

El análisis comparativo demuestra que Coretech es la opción más rentable, ofreciendo un alto rendimiento en términos de metraje perforado y un bajo PDC. En contraste la marca tradicional, Varel, es una opción estable que cumple con el rendimiento esperado, pero no alcanzan la misma rentabilidad que Coretech.

La presentación de estos resultados permite a la mina de roca andesítica tomar decisiones informadas sobre la selección de brocas, priorizando aquellas que maximicen la rentabilidad en función de su costo por metro perforado y su vida útil.

4.3. Contrastación de la hipótesis

En este apartado se presentan los resultados de la contratación de las hipótesis formuladas, evaluando si los resultados obtenidos confirman o rechazan cada una de ellas. Los indicadores clave utilizados en la contrastación son el Costo Parcial de Perforación (PDC), como medida de rentabilidad, y el metraje perforado, que sirve para evaluar la eficiencia y durabilidad de las brocas en la mina de roca andesítica.

4.3.1. Hipótesis general

Hipótesis General: La utilización del Partial Drilling Cost (PDC) permitirá determinar el desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" de diferentes marcas, identificando la marca que ofrezca el mejor balance entre rentabilidad y eficiencia en las condiciones geológicas específicas de una mina de roca andesítica del sur del Perú, para determinar la más rentable entre la Varel y la Coretech.

- **Resultado:** Al finalizar la evaluación, se determinó que el Partial Drilling Cost (PDC) fue una herramienta efectiva para analizar la rentabilidad en el desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" en roca andesítica. Los resultados obtenidos indicaron que la Coretech mostró el mejor rendimiento, destacándose como la opción más rentable en comparación con la broca evaluada como Varel. Esto confirma la utilidad del PDC como indicador clave para la toma de decisiones en procesos de perforación, optimizando costos y eficiencia operativa.

4.3.2. Hipótesis específicas

Hipótesis Específica 1

Hipótesis: Las condiciones geológicas de roca andesítica influirán de manera diferenciada en el rendimiento de las distintas marcas de brocas tricónicas, afectando su durabilidad y velocidad de penetración.

- **Resultado:** Aunque las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones geológicas de roca andesítica para minimizar las variaciones, se observó que las propiedades de la roca, como su dureza y abrasividad, afectaron de manera uniforme el desempeño de ambas brocas. Esto permitió una evaluación objetiva de la durabilidad y velocidad de penetración, confirmando que las diferencias

en rendimiento se atribuyen a las características propias de cada broca y no a las variaciones geológicas.

Hipótesis Específica 2

Hipótesis: El análisis comparativo según el PDC entre ambos tipos brocas tricónicas (Broca 01 y Broca 02), nos permitirá identificar la mejor.

- **Resultado:** El análisis comparativo basado en el Partial Drilling Cost (PDC) entre las brocas tricónicas 01 y 02 permitió identificar que la Broca 02 demostró un mejor rendimiento. Este indicador resultó fundamental para evaluar la relación costo-beneficio, consolidando su utilidad en la elección de herramientas de perforación más rentables.

Hipótesis Específica 3

Hipótesis: La marca de broca tricónica de 10 5/8" que obtenga el mejor balance entre costo y metraje perforado ofrecerá la mejor relación costo-beneficio, optimizando los procesos de perforación en la mina de roca andesítica del sur del Perú.

- **Resultado:** La hipótesis es confirmada. Coretech mostró la mejor relación costo-beneficio, la Broca 02, al presentar un mejor rendimiento bajo las condiciones geológicas de roca andesítica, mostró una reducción significativa en el tiempo total de perforación. Este resultado sugiere un impacto positivo en la productividad de la operación minera, optimizando los recursos y mejorando la eficiencia operativa.

4.3.3. Conclusión de la contrastación de Hipótesis

La contrastación de hipótesis confirma que Coretech es la opción más rentable y eficiente para las operaciones de perforación en la mina de roca andesítica, cumpliendo tanto con la hipótesis general como con la mayoría de las hipótesis específicas. Sus valores de PDC y metraje perforado son superiores, lo que valida su elección como la mejor opción en términos de rentabilidad y eficiencia operativa.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados pruebas

En el presente, de manera general, se estableció como propósito principal llevar a cabo una elección eficiente de brocas tricónicas, a partir del estudio comparativo del rendimiento entre los modelos RB-60 y DH645 (para un diámetro de 10 5/8”). En este análisis cabe definir que los datos de Core Tech se sacaron durante su periodo de pruebas, específicamente en los meses de noviembre y parte del mes de diciembre. Para ello, se tomó como indicadores clave: el costo parcial de perforación (USD/m), lo que permitió identificar valores representativos para cada modelo, tomando en cuenta la cantidad de brocas utilizadas, el costo unitario de estas, las características del terreno (litología) y el tipo de perforadora empleada.

Los resultados sometidos a la comparación, demostraron que el modelo DH645 es más eficiente que el RB-60. Al registrar un menor PDC promedio, 1,42 USD/metro y 1,92 USD/metro, respectivamente. También se consideraron elementos como el tipo de perforadora, la resistencia del terreno y las principales causas por las que se descartaron las brocas evaluadas, lo cual sienta las bases para futuras investigaciones.

Finalmente, se identificó que la principal causa del menor costo parcial de perforación (PDC) en los modelos de prueba se debe a que presentan, en promedio, un mayor metraje perforado y, además, un precio significativamente más bajo. Esta

combinación favorece una reducción en los costos operativos, lo que representa una ventaja importante si se opta por su implementación.

En cuanto al cumplimiento de los objetivos específicos, el primero fue alcanzado satisfactoriamente, ya que se logró identificar y analizar los metrajes alcanzados, en este periodo correspondiente a la fase 6b de la mina de roca andesítica, donde cabe destacar que esta fase es la más abrasiva.

Cabe destacar también el logro del segundo objetivo específico, donde los indicadores operativos correspondientes a cada tipo de broca en conjunto con los filtros aplicados, fueron fundamentales para realizar la comparación entre los modelos, destacando, como se mencionó previamente, el enfoque prioritario hacia la evaluación económica. Dándonos en promedio, 1,42 USD/metro por parte de Core TECH y 1,92 USD/metro por parte de Varel. Este beneficio se explica por el mayor rendimiento en términos de metraje y el menor precio unitario de cada broca, lo que implica una menor cantidad de brocas necesarias.

Por último, el previo mencionado y el gasto total de brocas con base en un metraje mensual específico representan una aplicación práctica de los resultados obtenidos. Bajo este enfoque, se nos permitió identificar que las brocas tricónicas de 10 5/8'' de Core Tech ofrecen la mejor relación costo beneficio.

5.2. Influencia de las condiciones geológicas en el rendimiento de las brocas

Las condiciones geológicas del yacimiento Cuajone, caracterizado como un pórfido de cobre con rocas ígneas duras y abrasivas como andesitas y dioritas, ejercen una influencia directa y crítica sobre el rendimiento y la vida útil de las herramientas de perforación. La alta abrasividad y competencia del macizo rocoso

provocan un desgaste acelerado, haciendo de la selección de la broca un factor determinante para la eficiencia operativa y económica.

En este contexto, la presente investigación analiza el desempeño comparativo de brocas tricónicas de 10 5/8", con el objetivo de identificar el modelo más eficiente para las condiciones geomecánicas específicas de la mina. La correcta selección de la herramienta busca generar impactos positivos directos, tales como:

- **Optimización económica:** Reducir el costo por metro perforado al maximizar la vida útil de cada broca.
- **Aumento de la productividad:** Disminuir la frecuencia de recambio de herramientas y, por ende, los tiempos de inactividad de los equipos de perforación.
- **Control de proveedores:** Facilitar una evaluación objetiva y basada en datos del rendimiento de brocas, fortaleciendo la gestión de la cadena de suministro.

5.3. Efectividad del análisis comparativo mediante PDC

Los estudios revisados ofrecen una visión amplia sobre cómo mejorar tanto el rendimiento como los costos asociados a la perforación mediante el uso de brocas tricónicas en distintas operaciones mineras.

Tabla 16:*Comparación de objetivos y resultados: Montoya y Paredes*

Estudio	Objetivo del estudio	Resultados principales
Montoya 2018	Analizar la eficiencia y el potencial de reducción de gastos en perforación en la mina Toquepala	Se logró disminuir el costo por metro perforado en 1,01 US\$/m para brocas de 11" (lo que representa un 12,85%) y en 0,57 US\$/m para brocas de 12 ¼" (equivalente a un 7,13%). El ahorro anual proyectado alcanzó los 1 730 736 US\$ para las de 11" y 976 752 US\$ para las de 12 ¼".
Paredes Muñoz 2020	Investigar la eficiencia y costos de perforación de brocas tricónicas en una operación minera en Cajamarca	Se identificaron variaciones en la resistencia al desgaste y el desempeño de las brocas, lo cual influyó directamente en la disminución de costos operativos y en un incremento en la productividad minera.

Nota: Elaboración propia

Al contrastar estos hallazgos con los obtenidos en la presente investigación aplicada en la unidad minera Toquepala, se pueden identificar conclusiones clave.

El análisis comparativo entre las investigaciones previas y resultados propios en Toquepala evidencia la dificultad de establecer un único modelo de alto desempeño para todas las condiciones. La selección adecuada del tipo de broca debe considerar diversos factores como el comportamiento operativo, la velocidad de avance y el costo total por metro perforado. Si bien los modelos de la marca Cenerg muestran mejoras destacables en ciertas métricas, los equipos de Terelion se destacan por su rendimiento constante, particularmente en brocas de 12 ¼". Por tanto, la elección de brocas debe concebirse como un proceso dinámico, apoyado en datos actualizados y adaptados a condiciones particulares de cada faena minera.

El trabajo de Montoya (2018) evidenció reducciones notables en los costos unitarios de perforación al emplear brocas de 11" y 12 ¼" en Toquepala, con ahorros del 12,85% y 7,13%, respectivamente. Estos resultados respaldan la

necesidad de aplicar estrategias de optimización que reduzcan los costos operativos en minería, aspecto crucial para garantizar la rentabilidad de los proyectos extractivos.

Asimismo, el estudio realizado por Paredes Muñoz (2020) en una mina de Cajamarca, destacó diferencias marcadas en cuanto a durabilidad y eficiencia entre modelos de brocas, lo que repercute directamente en costos y la productividad. Esto concuerda con los datos obtenidos en mina de roca andesítica, donde los modelos de Core Tech y Varel, vieron una mejora en velocidad de perforación y rendimiento general, aunque con variaciones dependiendo del tamaño de las brocas evaluadas.

Por otro lado, tenemos:

Tabla 17:

Comparación de objetivos y resultados: Chura y Propio

Estudio	Objetivo del estudio	Resultados
Chura (2024)	Selección de brocas tricónicas, mediante análisis de performance, en Moquegua, en 2023	En sus indicadores de PDC, vemos que el PDC promedio por parte de Core Tech es de 1.9, un PDC promedio, y por parte de Varel es de 2.7. Respecto al metraje promedio Varel tiene 1617,4 metros perforados y Core Tech tiene 2018.6 metros perforados.
Propio	Determinar desempeño de las brocas tricónicas de 10 5/8" de diferentes marcas, utilizando PDC como indicador.	Core Tech obtuvo 1,92 US\$/m, y la DH-645 presentó valor de 1,42 US\$/m, respectivamente. Donde vemos que se tiene un apoyo del 17.7%. En metraje por parte de Core Tech 2208.03 metros perforados, y por parte de Varel tenemos 1815.58 metros perforados, es decir tenemos una mejora de un 22% en cuestión de metraje recorrido

Nota: Elaboración propia

Donde observamos que los resultados en ambos casos no son muy distintos, y que los cambios más significativos son por parte de Varel donde se ve en promedio

que tiene una disminución de 200 metros perforados. Por su parte el PDC, se mantiene sin muchos cambios, afirmando la superioridad de Core Tech.

CONCLUSIONES

El análisis de rendimiento en la fase 6B2, cuya geología que tiene presente rocas ígneas duras y abrasivas como andesitas y dioritas, reveló diferencias significativas en los modos de falla de las brocas tricónicas de 10 5/8". Esta variabilidad geomecánica parece influir de manera distinta en el diseño de cada marca:

- La broca CoreTech DH45 mostró un perfil de descarte dominado por el desgaste de sus componentes de corte. Sus principales razones de falla fueron Insertos Rotos (44%) y Faldones Desgastados (22%), sugiriendo un patrón de desgaste predecible frente a la abrasividad de la roca.
- Por su parte, la broca Varel R8-60 presentó una mayor diversidad de modos de falla, incluyendo un porcentaje significativo de fallas estructurales o catastróficas. Sus descartes se distribuyeron entre Insertos Rotos (26%), Conos Descolgados (26%) y Rotura de Cono (16%). Este patrón sugiere una menor tolerancia a los esfuerzos imprevistos o a la fatiga del material en las condiciones variables del macizo rocoso.

De forma global, la principal causa de descarte para el total de brocas analizadas fue por Insertos Rotos (32%), lo cual es consistente con la perforación en un pórfido de cobre abrasivo como el de Cuajone. Sin embargo, la clara diferencia en los perfiles de falla secundarios indica que cada modelo de broca responde de manera única a las condiciones operacionales y geológicas de la mina.

Los valores obtenidos para los modelos evaluados fueron los siguientes:

En cuanto a las brocas de 10 5/8", la RB-60' obtuvo 1,92 US\$/m, y la DH-645 presentó valor de 1,42 US\$/m, respectivamente. Donde vemos que se tiene una mejora del 17,7%. También tenemos que en promedio alcanzaron, en cuestión de metraje por parte de Core Tech 2208.03 metros perforados, y por parte de Varel tenemos 1815,58 metros perforados, es decir tenemos una mejora de un 22% en cuestión de metraje recorrido.

Considerando principalmente el indicador económico del costo parcial de perforación (P.D.C.), se estableció que el modelo más adecuado fue el DH-645 de Coretech para el de 10 5/8", ya que estos modelos presentaron menores costos promedio por metro perforado, con diferencias de 0,47 USD/m en comparación con sus respectivos pares. Esta elección se justifica además por la proyección de una reducción en el número de brocas requeridas mensualmente en los siguientes periodos, lo que implica una disminución en los costos asociados. En promedio, se espera una mejora económica que va desde un 2% hasta un 16% para el diámetro 10 5/8".

RECOMENDACIONES

Selección de la broca tricónica de mejor rendimiento.

Se deben realizar más pruebas con la marca CoreTech para saber si se debe incorporar a CoreTech como proveedor de brocas en la mina de roca andesítica. Se debe busca zonas más abrasivas para ver su rendimiento en términos de PDC y metraje perforado.

Considerar las condiciones geológicas en la selección de brocas

Recomiendo que al sistema de monitoreo en tiempo real (JView) se le agregue la capacidad de recolectar y analizar datos en tiempo real del tipo de roca al que se enfrenta la broca tricónica. Que nos entregue la dureza de la roca y el nivel de fractura miento del terreno, y en base a eso un tiempo de vida estándar para hacer la verificación, para cambio de aceros.

Optimización continua mediante el monitoreo en tiempo real

Recomiendo que se opte a futuro por brocas tricónicas equipadas con sensores que monitorean el torque, la temperatura y el desgaste. Los sensores de fondo de pozo pueden medir vibración y temperatura, y la telemetría se utiliza para la transmisión de datos. Además, he confirmado que el aprendizaje automático (ML) y la inteligencia artificial (IA) se aplican para el mantenimiento predictivo (predicción del desgaste y detección de fallas de la broca), la optimización de los parámetros de perforación y la detección de anomalías e implementarlo a los sistemas de monitoreo en tiempo real, como JView y MINEOPS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berrospi Avalos, E. R. (2024). Reducción del costo de perforación incrementando la velocidad de penetración en el tajo de la fase 1 de la mina Toquepala [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Cerro de Pasco, Perú.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley.
- Brown, E. T. (1981). Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods. Pergamon Press.
- Deere, D. U. (1967). Rock Quality Designation (RQD) in Exploration. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Departamento de Ingeniería Minas Universidad de Santiago de Chile. (s.f.). (2015) Perforación y Tronadura.
- Garrido Llosa, Juan José. (2015). Mejora y control de estándares en perforación y voladura para la reducción de costo en mina Animon. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Ingeniería.
- González, J., & Pérez, R. (2020). Geología y minería en la zona de Cuajone: Contexto y desarrollo de la explotación de cobre. Revista de Geología Económica, 32(4), 202-215.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. GeoEng2000 Conference.

- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2018). Caracterización Petromineralógica de los Yacimientos Toquepala y Cuajone (Boletín Serie B: Geología Económica No. 49).
- 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.
- López Jimeno, Carlos; LÓPEZ JIMENO, Emilio; Pernia Llera, José María Y Pla Ortiz De Urbina, Fernando (2003): Manual de Perforación y Voladura de Rocas, Edición Instituto Geológico y Minero de España; Madrid; 2003.
- Montoya Villalta, F. A. (2019). Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera Toquepala - Southern Perú Cooper Corporation (2018). Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María. Arequipa, Perú.
- P&H Mining Equipment, Inc. (2012). Manual del operador: Perforadora 320 XPC. Peak Services.
- Roldan Juarez, Américo. (2012). Parámetros de perforación y rendimiento de las brocas tricónicas en el tajo abierto de la mina Tintaya y propuesta para el tajo abierto Antapaccay 2012. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.
- Sánchez, D., Rodríguez, V., & Vargas, E. (2021). El yacimiento Cuajone: Geología, mineralización y exploración. Editorial Geosistemas.
- Superintendencia de Geología Mina, Southern Perú Copper Corporation – Cuajone (2022): Geología de depósitos de roca andesítica del sur del Perú.

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. (2019). Reducción del costo de perforación incrementando la velocidad de penetración en el tajo de la Fase 1 de la Mina Toquepala.

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. (2019). Reducción del costo de perforación incrementando la velocidad de penetración en el tajo de la Fase 1 de la Mina Toquepala.

Universidad Nacional de Moquegua. (2019). Minimización del costo total de perforación DTH precorte en base a un estudio comparativo de brocas para maximizar la rentabilidad de las operaciones de la empresa Pevoex Contratistas S.A.C. en mina Cuajone.

Universidad Nacional de Moquegua. (2019). Minimización de costo de perforación DTH en base a estudio comparativo de brocas para maximizar rentabilidad de operaciones de empresa Pevoex Contratistas S.A.C. en mina Cuajone.

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. (2018). Análisis de costos unitarios en minería convencional en CIA Minera Ares S.A.C.

Villalta Villena, J. L. (2022). Modelo predictivo de rendimiento de triconos aplicado a la perforación rotativa en un yacimiento tipo pórfido cobre y molibdeno [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Arequipa, Perú.

PAGINAS WEB

- América Sur Internacional. (2011). Presentacion Ams – Rotacan II. Disponible en:
<https://es.scribd.com/presentation/63253891/Presentacion-Ams-rotacan-II>
- Berrospi, L. (2020). Estudio geológico y minero del yacimiento Cuajone. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
<https://www.unsa.edu.pe/investigaciones/cuajone>
- Carrasco, M., & Chávez, F. (2019). Caracterización de la mineralización del yacimiento Cuajone: Implicaciones en la minería del cobre. Instituto de Geología y Minería, Perú. <https://www.igm.gob.pe/informes-geologicos>
- Correa Arroyave, Álvaro. (2009). La geomecánica en la perforación y voladura de rocas.
Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/62235523/La-Geomecanica-El-La-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas>
<http://www.ryderperu.com/index.php/triconos/>
- Huanca, L. (2020). Estudio de estabilidad de taludes en la mina Cuajone utilizando el criterio de Hoek-Brown. Repositorio UNSAAC.
<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8655>
- Huisacayna Sana, Joseph; Barriga Ramos, Mayron Joel; Flores Cobos, Daniel Octavio; Suero Concha, Jesús Alejandro; Garnica Metas, José Luis Carlos: Trabajo de investigación: Southern Copper Corporation (Cuajone). (2013). Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/169518756/minera-Cuajone-pptx>

- Marmaña Custodio, Abril Guadalupe; Mateo Gomez, José; Nuñez Fuentes, Diego Antonio; Perez Villar Alejandro; Sulvaran Torres, Roman Alexander. (2016). Perforación rotatoria, antecedentes y características. Recuperado de <https://es.scribd.com/presentation/327204761/Perforacion-Rotatoria-Antecedentes-y-Caracteristicas>.
- Mendez Ortiz, Julián. (2006). Perforación por rotación. Disponible en: <https://es.slideshare.net/miguelminero/perforacion-y-voladura-16841997>.
- Mincon Perú S.A.C. (2022). Rotary Drill Bits. Disponible en: <https://www.mincon.com/product-article-link.html?id=100#features>
- Perforación, Costos de perforación (2011, octubre). Recuperado de <http://perforacionytronadura.blogspot.com/2011/08/costos-de-perforacion.html>
- Placencia, Jorge. (2011). Perforación rotativa de brocas triconicas con rodamientos refrigerados por aire. Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/63253891/Presentacion-Ams-rotacan-II>
- Ríos, J., & Ríos, V. (2021). Caracterización del macizo rocoso y modelamiento numérico en el talud noreste de la fase III de la mina Cuajone. OneMine. <https://onemine.org/documents/caracterizaci-n-del-macizo-rocoso>
- Ryder Perú. (2022). Cenerg Global Tools. Disponible en: Superintendencia de Geología Mina, Southern Perú Copper Corporation – Cuajone (2022): Mina Cuajone. *Rotafolio Español*
- Tamaya Consulting. (2012). Diseño y planificación Proyecto Mina Macumba – Proyecto a cielo abierto. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/99531369/Plan-minero-y-calculo-de-equipos>

Tumbaco, J. (2018). Informe técnico sobre la estructura y alteración geológica de Cuajone. Universidad de Moquegua.
<https://www.unmoquegua.edu.pe/informes-tecnicos>

Varel International. (2022). Roller Cone Drill Bits. Disponible en: <http://www.varelmining.com/>

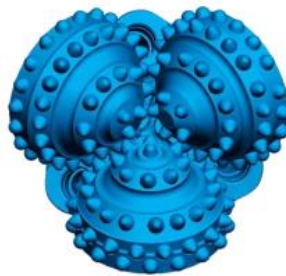
ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia de desempeño de brocas tricónicas utilizando el PDC como indicador de rentabilidad en operaciones mineras

Aspecto	Pregunta de investigación / Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicador
Problema general	¿Cómo se puede optimizar la selección de brocas tricónicas en roca andesítica del sur del Perú para mejorar la rentabilidad y eficiencia operativa?	Objetivo general: Determinar la broca tricónica más rentable y eficiente para roca andesítica del sur del Perú	La utilización de una nueva marca de brocas tricónicas reducirá significativamente el PDC y mejorará la eficiencia operativa.	Variable dependiente: Rentabilidad y eficiencia operativa	Costo Parcial de Perforación (PDC), metraje perforado
Problema específico 1	¿Cómo influyen las condiciones geológicas de roca andesítica del sur del Perú en el rendimiento y durabilidad de las brocas tricónicas de 10 5/8"?	Analizar el impacto de las condiciones geológicas de roca andesítica del sur del Perú en el rendimiento y durabilidad de las brocas tricónicas.	Las condiciones geológicas (dureza, abrasividad, fracturamiento) afectan directamente el rendimiento y la vida útil de las brocas.	Variable dependiente: Condiciones geológicas de la Roca Andesítica	Dureza de la roca, abrasividad, fracturamiento de la roca
Problema específico 2	¿Cuál es la broca tricónica de 10 5/8 pulgadas que ofrece el mejor rendimiento en términos de Costo Parcial de Perforación (PDC) en operaciones mineras?	Determinar la broca de 10 5/8 de mejor rendimiento mediante el PDC.	El análisis comparativo según el PDC entre la Varel y la Coretech nos permitirá identificar la mejor.	Variable independiente: Marca de la broca	Velocidad de penetración, durabilidad de la broca
Problema específico 3	¿Cuál es la marca de brocas tricónicas que ofrece la mejor relación costo-beneficio para optimizar los procesos de perforación en roca andesítica del sur del Perú?	Identificar la marca de brocas tricónicas que ofrece la mejor relación costo-beneficio para optimizar los procesos de perforación.	La marca de broca con el menor PDC y mayor metraje perforado será la más rentable y eficiente para optimizar los procesos de perforación en roca andesítica del sur del Perú.	Variable dependiente: Rentabilidad y eficiencia operativa	Costo Parcial de Perforación (PDC), metraje perforado

Anexo 2: Ficha técnica: broca DH645 – 10 5/8” Core Tech

ROTARY DRILLING TOOLS
DH645 10 5/8” (270 mm)



IADC: 6-4-5



- 10 5/8” DH715 blasthole bits are designed for drilling hard formations.
- Rock compressive strength ranging from 37,000 to 44,000 psi.
- Formation drilled may consist of sandstone, granite, taconite and banded iron ore.
- Designed and manufactured with the latest technologies.
- Tools rock bits are the next evolution.

Recommended Operating Parameters

- Rotary Speed: 60 - 90 rpm.
- Weight on Bit: 42,500 - 85,000 lbs.

PRODUCT FEATURES

• Bearing Type:	Sealed
• Configuration:	Roller-Ball-Roller
• Cutting Structure:	TCI
• Gage Row:	Conical
• Inner Rows:	Bullet
• Nose Row:	Conical
• Bevel Row:	Round
• Bit Connection:	6 5/8” API / 6” BECO
• Circulation Type:	Jet
• Head Type:	Full Armor
• Hardfacing	Standard
• Armor:	Round (TCI)
• Head Feature:	Fluid Dynamic Profile
• Reaming:	None
• Bit Weight:	163 lbs / 74 kg

Perú
 ☎ +51 (1) 255 5701
 ✉ ventas@coretech.com.pe

México
 ☎ +52 (662) 215 4317
 ✉ ventas@coretech.com.mx

Colombia
 ☎ +57 (4) 322 8782
 ✉ ventas@coretech.com.co

www.coretech.com.pe



CORETECH

Anexo 3: Rangos de brocas Varel

DIAMETER		SOFT TO MEDIUM				MEDIUM TO HARD		HARD TO VERY HARD		PIN SIZE		APPROX. WEIGHT			
in	mm	→				→		→		Inches	lbs	kg			
6.25	159					RB53				3 1/2	42	19.1			
6.75	171			RB40	RB50		RB60		RB70	3 1/2	46	20.9			
7.375	187			RB40	RB50					3 1/2	58	26.3			
7.875	200		RB30	RB40	RB50	RB53	RB60	RB63		4 1/2	76	34.5			
8.5	216			RB40					RB67	4 1/2	83	37.6			
8.75	222							RB63		4 1/2	83	37.6			
9	229	RB20	RB30	RB40	RB43	RB53	RB60		RB67	4 1/2	96	43.5			
9.875	251		RB35	RB40		RB53	RB60	RB63	RB67	RB70	6 5/8	145	65.8		
10.625	270	RB25	RB30	RB40	RB43	RB47	RB53	RB60	RB63	RB67	6 5/8	157	71.2		
11	279					RB53	RB60	RB63	RB67	6 5/8	193	87.5			
12.25	311			RB40	RB43	RB47	RB53	RB60	RB63	RB67	RB70	6 5/8	225	102.1	
13.75	349				RB43		RB53	RB57		RB67	6 5/8	292	132.4		
15	381					RB53	RB60			7 5/8	362	164.2			
16	406						RB60*			7 BECO	580	263.1			



RB60

25,000 to 45,000 psi
COMPRESSIVE STRENGTHS

60 to 100 rpm
ROTATION SPEED

All sizes
JET CIRCULATION

3,000 to 6,000 lbs/inch
DRILLING WEIGHTS

Product Range

DIAMETER		SOFT TO MEDIUM				MEDIUM TO HARD		HARD TO VERY HARD		PIN SIZE		APPROX. WEIGHT	
in	mm	→				→		→		Inches	lbs	kg	
6.75	171			DF43		DF60		DF67		3 1/2	42	19.1	
7.875	200			DF43		DF60	DF63		DF70	4 1/2	76	34.5	
9	229					DF60				4 1/2	96	43.5	
9.875	251		DF30			DF60		DF67		6 5/8	145	65.8	
10.625	270		DF30		DF53		DF63	DF67		6 5/8	157	71.2	
11	279						DF63			6 5/8	193	87.5	
12.25	311				DF53	DF60				6 5/8	225	102.1	

Anexo 4: Data 10 5/8"

EQUIPO	# BROCA	N° SERIE	INGRESO	SALIDA	MARCA	MODELO	MEDIDA	RECORRIDO (m)	N° TALADROS	TIEMPO (hrs)	VELOCIDAD PENETRACION (m/h)	DIAS	PDC (US\$/m)	RAZÓN DE DESCARTE	ESTADO
D11	""	1724130	04/11/2022 18:34	06/11/2022 15:48	Varel	RB-60	10.625	817.50	51	26.06	31.37	1.09	4.27	Insertos Rotos	MUERTA
D14	""	1720970	02/11/2022 15:40	10/11/2022 17:03	Varel	RB-60	10.625	6,291.80	380	134.56	46.76	5.61	0.55	Conos Descolgados	MUERTA
D14	""	1720969	10/11/2022 17:03	12/11/2022 23:58	Varel	RB-60	10.625	1,220.00	74	29.25	41.70	1.22	2.86	Conos Descolgados	MUERTA
D14	""	1719698	12/11/2022 23:58	16/11/2022 21:37	Varel	RB-60	10.625	2,615.50	158	62.98	41.53	2.62	1.33	Insertos Rotos	MUERTA
D14	""	1720971	16/11/2022 21:37	19/11/2022 16:19	Varel	RB-60	10.625	1,720.00	105	44.29	38.84	1.85	2.03	Otro	MUERTA
D14	""	1720973	10/11/2022 09:34	16/11/2022 09:33	Varel	RB-60	10.625	115.00	7	3.80	30.26	0.16	30.35	Polines Sobrepuestos	MUERTA
D14	""	1720968	20/11/2022 10:06	20/11/2022 16:41	Varel	RB-60	10.625	185.50	11	4.78	38.83	0.20	18.81	Polines Sobrepuestos	MUERTA
D14	""	1720979	20/11/2022 16:41	22/11/2022 19:22	Varel	RB-60	10.625	1,300.00	78	30.52	42.59	1.27	2.68	Tapado	MUERTA
D14	""	1720976	22/11/2022 19:22	28/11/2022 18:25	Varel	RB-60	10.625	3,592.50	220	101.79	35.29	4.24	0.97	Conos Descolgados	MUERTA
D14	""	1720967	28/11/2022 18:25	05/12/2022 18:11	Varel	RB-60	10.625	3,198.90	194	94.62	33.81	3.94	1.09	Insertos Rotos	MUERTA
D14	""	6267579	05/12/2022 18:11	06/12/2022 03:40	CORETECH	DH645	10.625	252.00	15	6.28	40.13	0.26	12.70	Faldones Desgastados	MUERTA
D14	""	6267578	06/12/2022 03:40		CORETECH	DH645	10.625	2,503.90	153	74.21	33.74	3.09	1.28		ACTIVA
D16	""	1719705	03/11/2022 14:58	08/11/2022 09:10	Varel	RB-60	10.625	1,881.00	113	78.03	24.10	3.25	1.86	Conos Descolgados	MUERTA
D16	332	1720998	08/11/2022 09:10	10/11/2022 22:30	Varel	RB-60	10.625	949.00	59	40.01	23.72	1.67	3.68	Rotura de cono	MUERTA
D16	""	1720968	10/11/2022 22:30	16/11/2022 10:19	Varel	RB-60	10.625	1,910.50	115	76.60	24.94	3.19	1.83	Por Pruebas	MUERTA
D16	""	6267587	16/11/2022 10:19	21/11/2022 21:30	CORETECH	DH645	10.625	2,285.80	136	83.45	27.39	3.48	1.40	Insertos Rotos	MUERTA
D16	""	6267576	21/11/2022 21:30	26/11/2022 08:59	CORETECH	DH645	10.625	1,759.60	106	72.20	24.37	3.01	1.82	Insertos Rotos	MUERTA
D16	""	6267579	26/11/2022 08:59	02/12/2022 08:31	CORETECH	DH645	10.625	1,809.80	124	77.31	23.41	3.22	1.77	Cambio de Terreno	MUERTA
D17	""	1720978	07/11/2022 12:19	10/11/2022 09:34	Varel	RB-60	10.625	1,190.00	71	44.97	26.46	1.87	3.33	Conos Descolgados	MUERTA
D17	""	1720973	10/11/2022 09:34	16/11/2022 09:33	Varel	RB-60	10.625	3,082.70	191	98.67	31.24	4.11	1.28	Por Pruebas	MUERTA
D17	""	6267571	16/11/2022 09:33	25/11/2022 09:37	CORETECH	DH645	10.625	4,387.40	271	133.48	32.87	5.56	0.73	Insertos Rotos	MUERTA
D17	""	6267572	25/11/2022 09:37	03/12/2022 08:30	CORETECH	DH645	10.625	3,930.00	242	122.71	32.03	5.11	0.81	Faldones Desgastados	MUERTA
D17	""	6267567	03/12/2022 08:30	09/12/2022 05:23	CORETECH	DH645	10.625	2,183.50	133	79.15	27.59	3.30	1.47	Insertos Rotos	MUERTA
D17	""	6267583	09/12/2022 05:23		CORETECH	DH645	10.625	760.30	46	35.0792	21.67	1.46	4.21		ACTIVA
D18	""	1724124	03/11/2022 17:47	06/11/2022 03:49	Varel	RB-60	10.625	1,307.20	78	41.10	31.81	1.71	3.03	Insertos Rotos	MUERTA
D18	""	1724133	12/11/2022 04:15	14/11/2022 08:51	Varel	RB-60	10.625	843.50	50	30.95	27.25	1.29	4.69	Rotura de cono	MUERTA
D18	""	1724131	20/11/2022 14:46	22/11/2022 20:28	Varel	RB-60	10.625	926.50	55	39.02	23.74	1.63	4.27	Rotura de cono	MUERTA
D18	""	1724143	01/12/2022 08:14	04/12/2022 06:06	Varel	RB-60	10.625	1,349.00	82	48.09	28.05	2.00	2.93	Insertos Rotos	MUERTA

Esta tabla presenta un registro de control y evaluación del rendimiento de brocas de perforación utilizadas en los equipos D11 a D18. El objetivo de este seguimiento es realizar un análisis comparativo del desempeño operativo y la eficiencia económica de cada herramienta, basándose en métricas clave de producción y costo.

A continuación se detalla cada sección de la tabla:

- EQUIPO: El código del taladro o perforadora donde se instaló la broca (ej. D14, D17). Permite analizar si el rendimiento varía entre máquinas.
- N° SERIE: Identificador único de la broca, esencial para la trazabilidad de su ciclo de vida.
- INGRESO y SALIDA: Fechas y horas que marcan el inicio y el fin del uso de la broca, determinando su tiempo en servicio.
- ESTADO: Condición final de la herramienta. MUERTA indica que fue descartada, mientras que ACTIVA significa que seguía en uso al momento del reporte.
- MARCA y MODELO: Fabricante (Varel, COJETECH) y modelo específico (R8-60, DH45). Fundamental para comparar la calidad y el rendimiento entre proveedores.
- MEDIDA: Diámetro de la broca, que es constante en 10.625 pulgadas para todos los registros.

- **RECORRIDO (m):** Total de metros perforados por la broca. Es un indicador primario de su vida útil y durabilidad.
- **N° TALADROS:** Número de perforaciones realizadas.
- **TIEMPO (hrs):** Horas totales de operación.
- **PENETRACIÓN (m/h):** Tasa de penetración (ROP - Rate of Penetration), calculada como Recorrido / Tiempo. Mide la velocidad y eficiencia de la perforación. Un valor más alto es mejor.
- **DÍAS USO:** Longevidad de la broca en el campo.
- **PDC (\$/m) - Partial Drilling Cost:** Esta es la métrica de eficiencia económica clave. Se calcula dividiendo el costo de adquisición de la broca por los metros totales que logró perforar (Costo de la Broca / Recorrido). Un PDC más bajo indica una mayor rentabilidad, ya que significa que el costo de la herramienta se distribuyó a lo largo de más metros perforados. A diferencia del Costo Total de Perforación (TDC), este indicador aísla el costo directo del consumible (la broca) por unidad de producción (metro).
- **RAZÓN DE DESCARTE:** Justificación técnica para retirar la broca. Es información vital para entender los modos de falla más comunes (ej. "Insertos Desgastados", "Conos Descolgados", "Rotura de cono") y compararlos entre marcas y modelos, lo que puede guiar futuras decisiones de compra y mejoras operativas.

Anexo 5: Tipos de perforadoras utilizadas



Rangos operacionales		
Diámetro del orificio	De 270 a 444 mm.	De 10 5/8 a 17 1/2 pulg.
Profundidad máx. de orificio, 1 pasada:		
Estándar	19,8 m.	65 pies
Opcional	21,3 m.	70 pies
Profundidad máx. de orificio, varias pasadas:		
Portatubo simple	39,6 m.	130 pies
Portatubo doble	59.4 m.	195 pies
Carga máxima de barrenas	68.038 kg.	150.000 libras

Mástil		
Construcción	Formas estructurales de tipo reticulado en aleación de acero	
Mástil de una pasada:		
Estándar	19,81 m.	65 pies
Opcional	21,3 m.	70 pies
Levante y descenso	267 mm.	10,5 pulg.



Compresor Nominal:
 3600 cfm y 55 psi
 DIAMETRO
 311 mm - 12 1/4 pulg
 PROFUNDIDAD (single pass)
 19.8 mt, 65 pies
 MOTOR PRINCIPAL
 Eléctrico 700 HP
 EMPUJE
 68,038 kg - 150,000 lb
 PESO
 165,564 kg - 365,000 lb
 ALTURA
 28 metros



BUCYRUS 49 HR

Diámetro del pozo	12 3/4"	311 mm
Profundidad del pozo	65.6'	20 m
Altura al tope del pasamanos en la cabina del operador	18'6"	5.64 m
Suelo al tope de la plataforma	6'4"	1.93 m
Suelo a la base de la plata extensible trasera	2'0"	0.65 cm
Suelo al tope del techo de sala de maquinas	14'10"	4.52 m
Ancho total de la maquina	23'9"	7.24 m
Eje central de la maquina hasta el lado izquierdo	11'10"	3.61 m
Eje central de la maquina hasta el lado derecho	11'11"	3.63 m
Eje central de la maquina al extremo externo oruga 36" L.I	10'5"	3.17 m
Eje central de la maquina al extremo externo oruga 36" L.D	9'7"	2.92 m
Eje central de la maquina al eje pata nivelación trasera L.I.	7'6"	2.29 m
Eje central de la maquina al eje pata nivelación trasera L.D.	7'3"	2.21 m
Eje central del pozo al eje central del eje de igualación	0'5"	0.12 m
Altura al tope de unidad de presurización sala de maquinas	16'6"	5.03 m
Altura al tope del portacable	10'1"	3.07 m
Suelo a la base de la pata extensible delantera	2'1"	0.63 m
Diámetro de las zapatas de las patas flexibles	3'8"	1.12 m
Eje central del pozo al eje central para extensible trasera	15'3/4"	4.59 m
Longitud toral de las orugas	24'0"	7.24 m
Eje central del pozo a parte trasera cabina del operador	10'2"	3.10 cm
Distancias entre ejes patas extensibles delantera y trasera	36'2"	11.02 m
Longitud total de la maquina	48'4"	14.73 m
Longitud total de la maquina con portacable	55'8"	16.97 m
Longitud total de la maquina con mástil de 20 m en descanso	121'3"	36.95 m
Altura total de la maquina con mástil de 20 m de descanso	31'3"	9.52 m



CAT MD6640

Especificaciones



Carga de la broca

hasta 64.000 kg (hasta 141.096 lb)

Diámetro del orificio

244 - 406 mm (9,6 - 16")

Motor

Motor de inducción de CA: eje doble 522-746 kW (600 hp)

Profundidad del orificio de una sola pasada

18,3 - 21,3 m (60 - 70')

Peso en orden de trabajo

154000 kg

Profundidad del orificio de múltiples pasadas

Hasta 85,3 m (280')

Anexo 6: Referencia de estado de las brocas durante las pruebas



VAREL



CORE TECH

Nota: propia

Anexo 7: Costos por broca, para el caso de estudio

Marca	Modelo	Diametro	Costo (US\$)
Varel	RB-60	10 5/8	3488.59
Core Tech	DH-645	10 5/8	3200.00

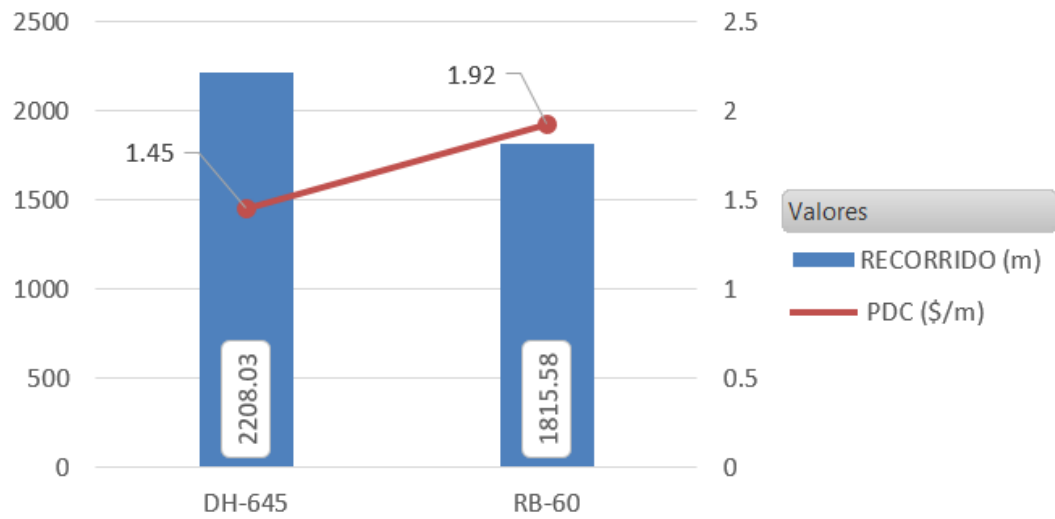
Nota: Propio.

Anexo 8: Calculo de promedios.

MODELO DE BROCA	RECORRIDO TOTAL (m)	RECORRIDO PROMEDIO (m)	BROCAS CONSUMIDAS	PDC (\$/m)
RB-60	34496.10	1815.58	19	1.92
DH-645	19,872.30	2208.03	9	1.45

Nota: Propio.

Anexo 9: Grafico Comparativo



Nota: Propio

Anexo 10: Costos por broca

Marca	Modelo	Diámetro (pulg)	Costo (US\$)
Varel	RB-60	10 5/8	3488,59
Core Tech	DH-645	10 5/8	3200,00

Nota: Area de P&V.