



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Reducción de costos de perforación a través del cambio de broca DHD340
por TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina
superficial**

Tesis presentada por:

Quiñones Machacca, Victor

ORCID: 0009-0000-2428-8465

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor(a):

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 16 de Abril del 2026

Dictamen: 017072-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 017072, presentado por:

2013203541 - QUIÑONES MACHACCA VICTOR

Titulado:

REDUCCIÓN DE COSTOS DE PERFORACIÓN A TRAVÉS DEL CAMBIO DE BROCA DHD340 POR TD40 EN PERFORACIONES CON MARTILLO DE FONDO PRECORTE EN UNA MINA SUPERFICIAL

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



REDUCCIÓN DE COSTOS DE PERFORACIÓN A TRAVÉS DEL CAMBIO DE BROCA DHD340 POR TD40 EN PERFORACIONES CON MARTILLO DE FONDO PRECORTE EN UNA MINA SUPERFICIAL

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	16%	3%	8%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJO DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	1library.co Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
3	repositorio.esan.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	victoryepes.blogs.upv.es Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	bibliotecadigital.odepa.gob.cl Fuente de Internet	1%
7	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
8	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
10	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%

Dedicatoria

A mis padres, Octavio y Jesusa; a mi hermana Lizeth; y a mi sobrina Andrea, quienes me han mostrado lo que significa perseverar gracias a su apoyo constante y su amor incondicional. Este éxito es el resultado de todos sus sacrificios.



Agradecimientos

Agradezco a los amigos y compañeros de trabajo, así como a la Universidad Católica de Santa María, por su continuo respaldo durante el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y su atención han sido indispensables para llevar a cabo esta investigación.



RESUMEN

La investigación actual busca alcanzar el objetivo, “Reducir los costos de perforación a través del cambio de broca modelo DHD340 al modelo TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina superficial”. Esta investigación es aplicada y tiene un diseño cuasi experimental; su nivel es comparativo y descriptivo tecnológico. Los instrumentos utilizados son la base de datos del seguimiento de metros perforados y cambio de brocas para perforaciones DTH. Los resultados demuestran que, el cambio al modelo TD40, si reduce los costos de perforación significativamente, mostrando un p(valor) menor al 5%. El PDC promedio del martillo de fondo precorte con el modelo DHD340 fue de 1.20 de enero a setiembre del 2023; mientras que con la implementación del modelo TD40, el PDC promedio fue de 0.53 de octubre del 2023 a diciembre del 2024. Por último, el PDC promedio de la broca, con el modelo DHD340 fue de 2.49 enero a setiembre del 2023; mientras que con la implementación del modelo TD40, el PDC promedio fue de 1.17 de octubre del 2023 a diciembre del 2024.

Palabras clave: PDC, modelo DHD340, modelo TD40.

ABSTRACT

The present research aims to achieve the objective of “reducing drilling costs by switching from the DHD340 bit model to the TD40 model in pre-split down-the-hole hammer drilling at an open-pit mine.” The research is applied, with a quasi-experimental design at the descriptive-technological and comparative level. The instruments used are the database for tracking meters drilled and bit changes for DTH drilling. The results demonstrate that switching to the TD40 model does significantly reduce drilling costs, with a p-value below 5%. The PDC of the pre-cut down-the-hole hammer with the DHD340 model was 1.20 from January to September 2023; whereas, with the implementation of the TD40 model, the average PDC was 0.53 from October 2023 to December 2024. Finally, the average PDC of the drill bit with the DHD340 model was 2.49 from January to September 2023; while with the implementation of the TD40 model, the average PDC was 1.17 from October 2023 to December 2024.

Keywords: PDC, DHD340 model, TD40 model.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO TEÓRICO..... 2

1.1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO..... 3

1.1.1. Problema de investigación..... 3

1.1.2. Descripción del problema..... 3

1.1.3. Preguntas de investigación 3

1.1.4. Operacionalización de variables..... 4

1.2. JUSTIFICACIÓN 4

1.3. OBJETIVOS..... 5

1.4. MARCO TEÓRICO 5

1.4.1. Sistemas de perforación..... 5

1.4.2. Brocas..... 6

1.4.3. Perforación con Martillo de Fondo (DTH)..... 7

1.4.4. Componente de los Equipos de Perforación con Martillo de Fondo (DTH)..... 10

1.4.5. Factores que influyen en el rendimiento de la perforación DTH 11

1.4.6. Parámetros operacionales de perforación DTH..... 18

1.4.7. Presión de Avance Brocas Drillco DTH DHD340 y TD40 19

1.4.8. Martillos Drillco DTH Puma 4.1Q y Puma 4.2HP..... 21

1.4.9. Evolución de la tecnología de perforación DTH (Down-The-Hole)..... 24

1.4.10. Comparativa de Sistemas de encastre y transmisión de energía 25

1.4.11. Impacto económico en la perforación de precorte 25

1.4.12. Variables de desgaste y vida útil en minería superficial 25

1.4.14. Costo Parcial de Perforación (PDC).....	26
1.4.10. Definición de términos.....	26
1.5. ANTECEDENTES	27
1.6. HIPÓTESIS.....	30
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO OPERACIONAL.....	31
2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	32
2.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	32
2.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	32
2.4. CAMPO DE VERIFICACIÓN.....	32
2.4.1. Ámbito	32
2.4.2. Unidades de estudio	32
2.4.3. Temporalidad	33
2.5. ESTRATEGIAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	33
2.6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	33
2.7. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	34
CAPÍTULO III: BROCAS Y MARTILLO DHD340 Y TD40.....	35
3.1. LONGITUD DE PERFORACIÓN CON LA BROCA DHD340 Y TD40.....	36
3.2. LONGITUD DE PERFORACIÓN DEL MARTILLO CON EL MODELO DHD340 Y TD40.....	38
3.3. PDC DE LA BROCA DHD340 Y TD40	41
3.3. PDC DEL MARTILLO DHD340 Y TD40.....	43
3.3. PDC DE LA BROCA Y MARTILLO CON DHD340 Y TD40.....	44
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	46
4.1. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO FÍSICO (METRAJE PERFORADO)	47
4.2. ESTRUCTURA DE COSTOS COMPARATIVA: PDC DHD340 vs. TD40	48
4.3. GASTO OPERATIVO MENSUAL	48
4.4. CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1: PDC DE LA BROCA	49
4.5. CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2: PDC DEL MARTILLO.....	50
4.6. EVALUACIÓN DEL OBJETIVO GENERAL (REDUCCIÓN DE COSTOS TOTALES)	50

4.7. RESULTADOS DE LA SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA	51
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS	56

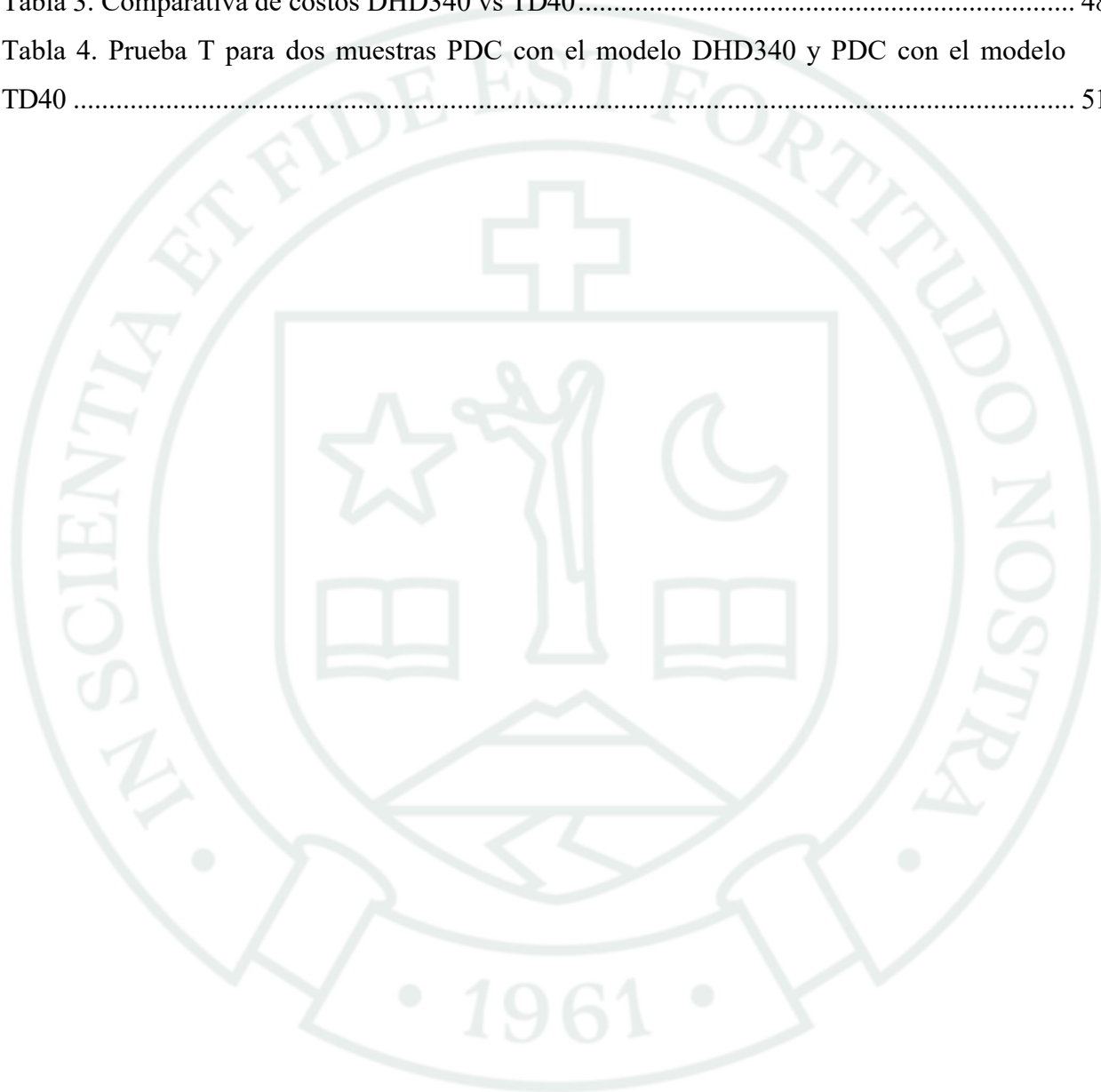


ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Descripción de broca	7
Figura 2. Guía de selección de broca	14
Figura 3 Cuadro de identificación del shank de broca.....	15
Figura 4. Partes de un martillo DTH.....	16
Figura 5. Broca DHD340 Drillco.....	19
Figura 6 Broca TD340 Drillco.	20
Figura 7. Guía de selección de brocas DTH.....	20
Figura 8. Partes del martillo DTH PM4.1Q	23
Figura 9. Partes del martillo DTH PM4.2HP	24
Figura 10. Longitud de perforación de brocas con el modelo DHD340 y TD40 de enero del 2023 a diciembre del 2024.....	38
Figura 11 Longitud de perforación de martillo con el modelo DHD340 y TD40 de enero del 2023 a diciembre del 2024.....	41
Figura 12. Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para brocas con el modelo DHD340 y TD40	42
Figura 13. Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para martillo con el modelo DHD340 y TD40.....	43
Figura 14. Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para broca y martillo con el modelo DHD340 y TD40.....	44
Figura 15. Evolución del PDC	45

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	4
Tabla 2. Características de los martillos DTH PM4.1Q y PM4.2HP	21
Tabla 3. Comparativa de costos DHD340 vs TD40.....	48
Tabla 4. Prueba T para dos muestras PDC con el modelo DHD340 y PDC con el modelo TD40	51



ÍNDICE ANEXOS

Anexo 1 Base de datos	61
-----------------------------	----



INTRODUCCIÓN

En la minería superficial, los costos de perforación representan un componente crucial en el gasto total de la operación, influyendo directamente en la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto. La eficiencia en la selección y uso de herramientas, como brocas y martillos de fondo, es fundamental para optimizar recursos y reducir costos operativos. El cambio de broca del modelo DHD340 al TD40, que ofrece un diseño más robusto y mejoras en la capacidad de perforación, tiene el potencial de disminuir significativamente los costos y mejorar la productividad en perforaciones con martillo de fondo precorte.

La perforación en minería superficial es una actividad fundamental que tiene un efecto directo sobre la eficiencia del proceso extractivo y los gastos de operación. En este escenario, la elección correcta de martillos y brocas para perforar es crucial para maximizar la productividad y disminuir los costos relacionados. En el presente estudio se estudia la disminución de costos a través de la sustitución del modelo DHD340 por el TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte. El martillo TD40 se distingue por su sólida estructura y sus avanzadas habilidades para perforar formaciones rocosas duras de forma más eficaz, al utilizar una fuerza de impacto superior y sistemas de flujo de aire más eficaces. Esto resulta en un rendimiento mejorado y un desgaste reducido. Analizar las repercusiones económicas y operativas de este cambio posibilita detectar avances significativos en el coste parcial de perforación, lo que favorece la competitividad y la sostenibilidad de las operaciones mineras a nivel superficial.

La estructura del estudio se presenta de la siguiente forma: en el primer capítulo se expone con detalle la formulación teórica del problema, que incluye las cuestiones de investigación, las variables, los objetivos, la justificación, la hipótesis, el marco teórico y los antecedentes de investigaciones previas. El segundo capítulo, que incluye el planteamiento operacional, describe la muestra, las técnicas e instrumentos utilizados, el nivel y tipo de investigación, la estrategia para recoger datos y el alcance y las limitaciones del estudio. Los resultados de la investigación experimental que posibilitaron alcanzar los objetivos propuestos y comparar la hipótesis se presentan en el capítulo tres. Por último, se encuentran las sugerencias y conclusiones pertinentes.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1.1. Planteamiento teórico

1.1.1. Problema de investigación

Reducción de costos de perforación a través del cambio de broca DHD340 por TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina superficial

1.1.2. Descripción del problema

Un proceso unitario en el ciclo minero es la perforación, que inicia el proceso de minado y es fundamental para la continuidad de los procesos posteriores. La optimización de estos procesos en la minería se establece mediante el estudio y la evaluación preliminar de las deficiencias detectadas hasta conseguir una mejora constante que posibilite una extracción del mineral lo más eficiente posible.

En la actualidad, Drillco tiene un contrato con la compañía minera donde se lleva a cabo la investigación para usar sus aceros de perforación con martillo de fondo en una cantidad aproximada del 50%. Con el objetivo de disminuir los gastos de perforación, Drillco se encuentra en la necesidad de mejorar su modelo DHD340. A partir de esta mejora nace el modelo TD40, que conlleva una disminución del costo parcial de perforación (PDC) al ser utilizada en el método de perforación con martillo de fondo precorte. Con el propósito de lograr esto, se han estado llevando a cabo diversas pruebas en 2023 para recolectar información sobre la vida útil de la broca y el martillo para cada modelo que se está estudiando. Y así, se podrá esclarecer la disminución del costo parcial de perforación.

1.1.3. Preguntas de investigación

Pregunta general

- ¿Es posible reducir los costos de perforación a través del cambio de broca modelo DHD340 al modelo TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina superficial?

Preguntas específicas

- ¿Cuál es el costo de perforación parcial (PDC) del martillo para ambos modelos de broca DHD340 y TD40?
- ¿Cuál es el costo de perforación parcial (PDC) de ambos modelos de broca DHD340 y TD40?

1.1.4. Operacionalización de variables

Variable independiente

Brocas DTH: Herramienta para realizar taladros en la roca por el método de perforación con martillo de fondo. Compuesta por una cabeza y su vástago.

Variable dependiente

Costos de Perforación DTH: Indicador que da seguimiento al importe gastado por cada metro de avance realizado en perforación DTH.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable dependiente	Definición	Dimensiones	Indicadores
Costos de Perforación DTH: Indicador que da seguimiento al importe gastado por cada metro de avance realizado en perforación DTH.	Indicador que da seguimiento al importe gastado por cada metro de avance realizado en perforación DTH.	• Costo parcial de perforación Broca (PDC-broca) • Costo parcial de perforación Martillo (PDC-martillo) • Costo parcial de perforación (PDC)	• USD/m • USD/m • USD/m
Brocas DTH: Herramienta para realizar taladros en la roca por el método de perforación con martillo de fondo. Compuesta por una cabeza y su vástago	Herramienta para realizar taladros en la roca por el método de perforación con martillo de fondo. Compuesta por una cabeza y su vástago.	• Tipo de broca • Tipo de martillo	• Modelo • Modelo

Nota. Elaboración propia

1.2. Justificación

La presente investigación se lleva a cabo con el objetivo de plantear una propuesta para la disminución de los costos de perforación mediante la sustitución de broca por un modelo mejorado, que debido a la dimensión del tamaño de las operaciones de Drillco (cerca al 50%), justifica su implementación o cambio de modelo de broca, por un producto resultado de las investigaciones

realizadas por parte del equipo de laboratorio de Drillco. El cual diseñó un modelo mejorado en términos técnicos como por ejemplo número de partes o componentes dentro de la broca en menor cuantía con respecto al modelo anterior DHD340. Así entonces viéndose en la necesidad de reducir sus costos de perforación Drillco, decide que es pertinente el momento para realizar pruebas en campo con el modelo mejorado TD40 y así determinar la factibilidad de reducir los costos de perforación a través del cambio entre modelos de brocas. Para realizar la presente investigación contamos con los equipos de perforación, brocas, martillos y personal capacitado necesarios para llevar con normalidad las pruebas durante el año 2023 aprovechando en mayor dimensión las campañas de precorte de las operaciones mineras.

1.3. Objetivos

El objetivo general es el siguiente:

- Reducir los costos de perforación a través del cambio de broca modelo DHD340 al modelo TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina superficial.

Los objetivos específicos corresponden a:

- Determinar el costo de perforación parcial (PDC) del martillo para ambos modelos de broca DHD340 y TD40.
- Determinar el costo de perforación parcial (PDC) para ambos modelos de broca DHD340 y TD40.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Sistemas de perforación

a) Sistema de perforación de rotopercusión

Es un sistema de perforación que emplea aire comprimido para poner en funcionamiento al martillo o herramienta de perforación y, simultáneamente, genera una circulación y movimiento del detritus hacia fuera de la perforación. Al mismo tiempo que se realiza la percusión, el cabezal de la perforadora proporciona al varillaje un giro rotatorio. Hay maquinaria disponible que puede alcanzar profundidades de hasta 700 metros y con cualquier diámetro (hasta 600 mm), incluso para espacios pequeños. (Camarena Cosme, 2012)

b) Sistema de perforación por percusión

La técnica de perforación implica llevar a cabo un movimiento alternativo de descenso y ascenso de una masa pesada que, al descender, fractura o descompone la roca. Esto provoca que se separen fragmentos de diferentes tamaños, los cuales son después extraídos utilizando una cuchara o válvula de limpieza. Es un método que se puede aplicar a cualquier tipo de material, especialmente a las rocas consolidadas. La perforación por percusión se basa en la noción de un componente metálico que impacta y destruye el terreno: pico o trépano, junto con otro que recoge el suelo desmenuzado: pala o cuchara de válvula. Los resultados son impresionantes con las nuevas y poderosas sondas de percusión. Una ventaja significativa es que el cable se maneja más fácilmente que el varillaje en la perforación rotativa. Otra ventaja es que este proceso no requiere de lodos ni mezclas tixotrópicas, las cuales siempre obstaculizan la circulación del agua a través de los acuíferos. (Camarena Cosme, 2012)

c) Sistema de perforación por rotación

La perforación se realiza mediante el corte por cizallamiento o el desgaste por abrasión. Este efecto ocurre en un esquema utilizando una herramienta de corte 28 que combina presión/peso sobre la formación y un movimiento rotativo, mientras que un fluido limpia, mueve y elimina el detritus extraído. En la perforación a rotación, los parámetros principales que se determinan son: el peso sobre la herramienta, la velocidad de rotación, las propiedades de la herramienta de corte y la naturaleza y dirección del flujo del fluido de perforación. (Camarena Cosme, 2012)

d) Onda de choque

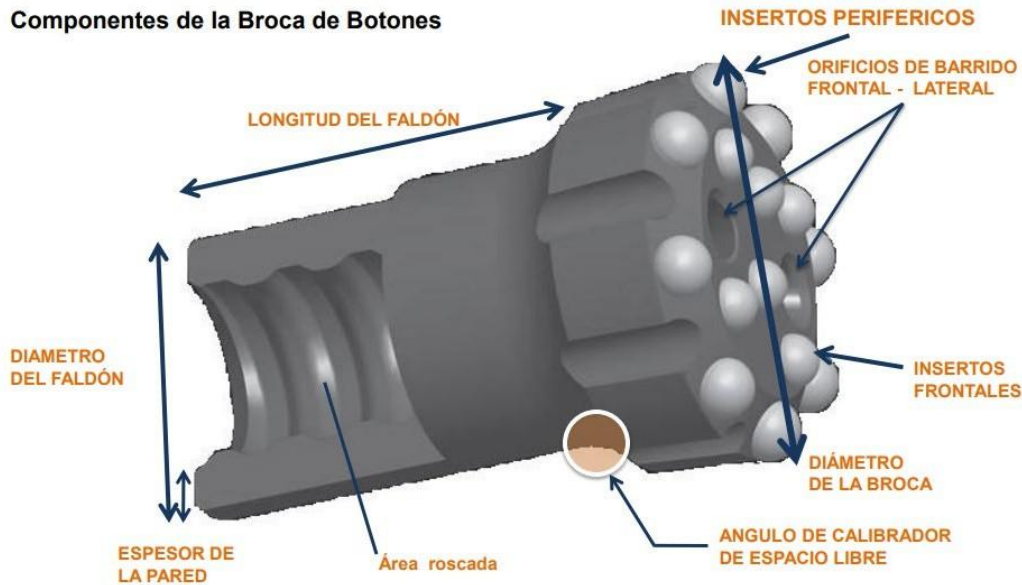
El pistón es el componente principal de la perforación. Este golpea la culata de la barra cuando empuja hacia adelante. La energía cinética del pistón se transmite a la barra como una onda de choque. (Camarena Cosme, 2012)

1.4.2. Brocas

Brocas de perforación: Se clasifica como una herramienta de corte, que tiene insertos centrales y periféricos. Los insertos están hechos de carburo de tungsteno. Asimismo, la broca está en contacto directo con la roca. También, hoy en día hay diferentes clases de brocas para perforar, que se dividen en las siguientes: brocas tricónicas, de botones, especiales y de cortadores fijos. (Huatuco Sovero, 2019)

Figura 1

Descripción de broca



Nota. Tomado de Torres Fidel (2022)

1.4.3. Perforación con Martillo de Fondo (DTH)

La perforación con martillo de fondo (D.T.H. down the hole), inventada por Stenuick en 1951, consiste en que un martillo golpea la propia boca del fondo de la perforación; así evitamos que la energía que se convierte con el golpe de pistón a través del varillaje se pierda (los martillos de cabeza dejan de ser útiles más allá de los 15-20 m). Actualmente conseguimos profundidades que superan los 100 m con rendimientos de perforación de entre 60 y 100 m/turno. La boca y el martillo de fondo son una unidad que se encuentra incorporada en el propio barreno; aunque es habitual que la velocidad de perforación decrezca al aumentar la profundidad del taladro, esto asegura una velocidad de perforación bastante uniforme. La rotación puede ser realizada, bien de forma hidráulica o bien con aire comprimido, no obstante, la activación del pistón es neumática.

El martillo DTH es el cilindro con una longitud que depende de la carrera del pistón y cuya sección es proporcional al diámetro de perforación. En el extremo del cilindro se encuentra la boca de perforación, situada en el portabrocas, y un tubo vacío que sustituye al varillaje, tubo que conecta al martillo con el equipo para conseguir la traslación forzada y el par rotacional. Las perforaciones practicadas con martillo son rectas y tienen resultados excelentes en rocas muy fracturadas. El varillaje consiste en tubos de diámetro constante a lo largo de toda su longitud

careciendo de acoplamientos que puedan obstruir la perforación. El movimiento rotacional lo lleva a cabo un motor hidráulico o neumático que se encuentra en el carro de la misma forma que el sistema de avance. El aire de escape elimina el detritus y lo descarta en el exterior.

El martillo DTH sirve para las rocas de media a alta resistencia a compresión (60-100 MPa), usando como diámetros más frecuentes los de entre 85 mm y 200 mm, no obstante, podría extenderse a diámetros mayores y competir con los sistemas roto-percutivos hidráulicos que llevan el martillo en cabeza. La velocidad de penetración que ofrecen, en diámetros de entre 105 mm a 165 mm, es de 0,5 a 0,6 m/min., siendo las presiones laborales entre 1800 kPa y 2000 kPa y la frecuencia de golpeo de entre 600 y 1600 golpes cpm, requiriendo del empuje apenas 85 kg cada centímetro de diámetro. Es decir, con un diámetro de 125 mm podríamos obtener el doble de potencia que el de 100 mm siempre que la presión y la carrera del pistón sean las mismas.

- Las ventajas de perforar con martillo DTH, en comparación con otros métodos, son las siguientes:
- La velocidad de penetración permanece casi constante al incrementar la profundidad de perforación.
- Excepto en rocas extremadamente abrasivas, los desgastes de las bocas son menores que con martillo en cabeza.
- La vida útil de los tubos es más prolongada que la de las varillas y los manguitos de los martillos en cabeza.
- Se presentan desviaciones reducidas de los taladros, por lo que son aptos para profundidades extensas.
- Menor energía de golpe y mayor frecuencia, lo que es adecuado para macizos con muchas fracturas o poco favorables.
- El par y la velocidad de rotación son más bajas que en otros métodos.
- No requieren de barras de carga, lo que posibilita el uso de pequeños carros perforadores para barrenos con diámetros y profundidades grandes.
- Un costo por metro lineal más bajo que el de la perforación rotativa en diámetros grandes y rocas de gran dureza.
- El uso de aire comprimido es inferior al que se requiere para el martillo neumático.
- El martillo situado dentro de la perforación produce un nivel de ruido más bajo.

Respecto a los problemas de este sistema:

- Disminución de las velocidades en la penetración.
- Para lograr un rendimiento aceptable (cerca de 76 mm), el diámetro menor podrá estar limitado por las medidas del martillo.
- La inversión de un tren de varillas es escasa en relación al alto precio de un martillo de fondo.

Si la fuerza de avance es pequeña provocará:

- Una excesiva abrasión de las estrías del taladro
- Fuertes ondas de retroceso en el varillaje que provocan una gran vibración, que puede dañar las unidades giratorias.
- Una disminución de la velocidad de penetración del martillo.

Si la fuerza de avance es excesiva producirá:

- Un elevado riesgo de congestión
- Esfuerzos flexionales en el varillaje
- Deterioros en la unidad de dotación.

Si la velocidad de rotación es excesivamente elevada producirá:

- Incremento del desgaste en los botones
- Una tensión más alta en las guías deslizantes.

Si la velocidad de rotación es demasiado baja producirá:

- Una baja velocidad de penetración
- Perforaciones irregulares o inestables
- Un mayor riesgo de fractura.

Para que el martillo pueda funcionar de manera fiable es importante hacer todo lo necesario para que la suciedad no pueda penetrar en los tubos de penetración.

- Mantener los tubos de perforación limpios
- Utilizar protectores de rosca
- Limpiar los tubos si es posible utilizando aire comprimido. La avería en la perforación DTH es más probable si la suciedad se presenta con el suministro de aire al martillo. Es mayor la probabilidad de que la suciedad entre en el martillo, y toda la suciedad que penetra a los tubos de penetración va a parar directamente al mecanismo de percusión del martillo; esto incrementa la probabilidad de fallos por desgaste o incluso dañar el tubo de control o el pistón.

- Lubricar el martillo.

1.4.4. Componente de los Equipos de Perforación con Martillo de Fondo (DTH)

Grupo motriz

Es una fuente de potencia principal para cada uno de los elementos. Puede ser un motor eléctrico o de tipo diesel, conectados por medio de un cableado. El tamaño y la potencia vienen determinados por el rendimiento y la capacidad que se requiere. Ojo, las perforadoras neumáticas van funcionando con aire comprimido como fuente de energía.

Separan la percusión y la rotación en las perforadoras, con las que trabajan los martillos de fondo. La percusión se genera mediante la acción de un pistón que se desplaza de forma recíproca y que viene dado mediante la utilización neumática, además de golpear la como la broca. La rotación es variable y se genera mediante la adopción de la cabeza rotadora, siendo luego transmitida a través de la columna de perforación. La CEB ahora se ha introducido al mundo de la perforación; las perforadoras rotatorias y las perforadoras tipo oruga (crawler) pueden hacer uso de martillos de fondo.

Sistema de circulación de aire

El objetivo primordial es el de limpiar la broca y la extracción de los fragmentos de roca a la superficie, está constituido por la tubería, el compresor, las mangueras, el conducto que pasa por el martillo a cabeza rotatoria, la columna de perforación y las boquillas de la broca. Este aire también provoca el funcionamiento del pistón que se encuentra en el martillo de fondo. Por otra parte, la función que posee también es la de mantener la broca fría para no causarle sobrecalentamiento.

Progreso / retroceso

Este mecanismo genera la necesaria fuerza de empuje que debe de ejercer para romper la roca, así como aquella que requiere para sacrificar la columna de perforación, el funcionamiento de la cual se realiza a través de un motor o un cilindro hidráulico. Para trasladar el peso del propio equipo hasta la columna de perforación usa polea (en caso de que sean cables) o un piñón (si son cadenas).

Control de polvos

Esto permite controlar el polvo y demás desechos que se generan en la perforación, y también puede ser utilizado para obtener muestras de roca. Existe un sistema seco que tiene bomba

de vacío/filtro y otro; así como otro sistema húmedo que inyecta el agua en la corriente de aire para evitar que las partículas de polvo suban a la superficie.

1.4.5. Factores que influyen en el rendimiento de la perforación DTH

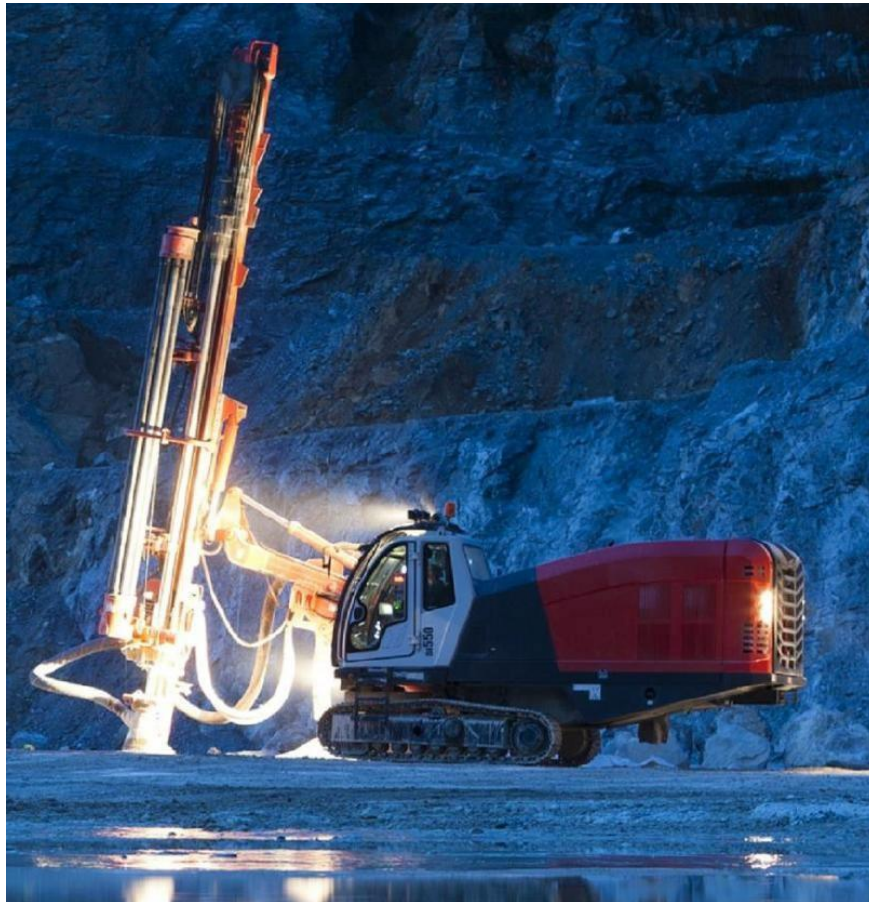
Clase de equipo

La primera cosa necesaria es el diseño de la mina, es decir, la altura del banco, la superficie de trabajo, la selectividad, la producción requerida, en fin... Normalmente es un diseño recomendado y/o solicitado por la empresa minera. Una vez que se toma la decisión previamente dicha, toca seleccionar el tipo de maquinarias a utilizar. Se calcularán los costos de las propiedades y el coste de la operación por hora, las tarifas por hora de las maquinarias (en US\$/m³ o US\$/TM), otros costes, el soporte del servicio, el tiempo de entrega, etc. No obstante lo anterior, se define el impacto económico, la duración del contrato (3 años o menos, 5-10 años), alquiler/venta, el servicio después de la venta, el coste de la energía, otros costes, etc.

Clase de equipo

El índice de perforabilidad es la resistencia que opone la roca a ser perforada y es para seleccionar el tipo de perforación y la maquinaria adecuada, y se basa, entre otras cosas, en el tipo, la dureza y las dimensiones de los minerales que están incluidos. Por ejemplo, la roca que contiene más cuarzo (cuarcita) será más dura y difícil de perforar, y patrocinará a su vez un desgaste mayor de los aceros de perforación. Por el contrario, si la roca tiene un contenido significativo de calcita (caliza) es una roca de fácil perforabilidad y el desgaste de los aceros que se utilicen para perforar será inferior.

Figura 1 *Perforadora DTH Leopard DI550*



Nota. Tomado de Hoja Técnica DI550. (Sandvik, 2022)

Grupo de martillo y broca

Para perforar taladros de voladura mediante DTH, el diámetro apropiado de los agujeros de perforación se sitúa entre 90 mm y 254 mm (3 ½"–10"). Los orificios más pequeños suelen ser elaborados utilizando un martillo de cabeza, en tanto que los agujeros más grandes obligan a la utilización de máquinas perforadoras rotativas.

Para perforar hasta los 914 mm (36") en aplicaciones para cimentaciones, será posible utilizar martillos DTH de broca única.

La mayoría de las veces, el diámetro más reducido explotado por un martillo DTH es equivalente a su tamaño nominal. Un perforador de 4 pulgadas (102 mm) hará agujeros de 4 pulgadas. El diámetro exterior del martillo es la cantidad que establece la limitación, debido a que, cuando se reduce el diámetro del agujero, la circulación del aire se verá restringida. El tamaño más

grande de los agujeros para perforar con producción es el tamaño nominal del taladro más una unidad. Consecuentemente, el diámetro máximo del agujero hecho con un martillo de 4 pulgadas será exactamente de 5 pulgadas (127-130 mm).

El tipo de formación rocosa y el tamaño del agujero se encuentran estrechamente interrelacionados con la elección del martillo más apropiado. En términos teóricos, el martillo se debería aproximar lo más posible en sus medidas a la dimensión del taladro requerido, dejando solamente el espacio suficiente para el arrastre del detritus.



Figura 2

Guía de selección de broca

Faces	Carbides	Rock hardness		Rock structure		Rock abrasiveness	
Concave	Ballistic	Very hard	Softer	Fissured	Homogeneous	Very abrasive	Nonabrasive
	XT48	↔		↔		↔	
	DP65	↔		↔		↔	
Concave	Spherical	Very hard	Softer	Fissured	Homogeneous	Very abrasive	Nonabrasive
	XT48	↔		↔		↔	
	DP65	↔		↔		↔	
Convex	Ballistic	Very hard	Softer	Fissured	Homogeneous	Very abrasive	Nonabrasive
	XT48	↔		↔		↔	
	DP65	↔		↔		↔	
Convex	Spherical/Ballistic	Very hard	Softer	Fissured	Homogeneous	Very abrasive	Nonabrasive
	DP65 DP65	↔		↔		↔	
Flat	Spherical	Very hard	Softer	Fissured	Homogeneous	Very abrasive	Nonabrasive
	XT48	↔		↔		↔	
	DP65	↔		↔		↔	
Cemented carbides types specifications							

Nota. Tomado de DTH Bits Brochure. (Sandvik, 2023)

Figura 3

Identificación del shank de broca

M 30 • 3" L = 224 mm, 8 Splines	DHD 340 • 4" L = 209 mm, 8 Splines
	
M 40 • 4" L = 228 mm, 12 Splines	QLX40 • 4" L = 209 mm, 12 Splines
	
M 50 • 5" L = 287 mm, 12 Splines	QL 50 • 5" L = 240 mm, 12 Splines
	
M 60 • 6" L = 230 mm, 12 Splines	QL 60 • 6" L = 253 mm, 12 Splines
	
M 80 • 8" L = 329 mm, 12 Splines	QL 80 • 8" L = 332 mm, 16 Splines
	
SD 10 • 10" L = 412 mm, 8 Splines	SD 12 • 12" L = 519 mm, 8 Splines
	
DHD 112 • 12" L = 542 mm, 8 Splines	SD 18 • 18" L = 674 mm, 12 Splines
	
SD 15 • 15" L = 606 mm, 12 Splines	N180 NUMA • 18" L = 603 mm, 12 Splines
	

Nota. Tomado de DTH Bits Brochure. (Sandvik, 2023)

Figura 4

Partes de un martillo DTH



Nota. Tomado de página web Herramientas de Perforación DTH. (Guizhou Vilong Equipment Co., Ltd., 2023)

Velocidad de Barrido

Al momento de seleccionar el diámetro del agujero, en cualquier aplicación, debes pensar minuciosamente la limpieza del mismo. Se recomienda que la velocidad de salida del aire sea algo cercano a los 4,000 o 7,000 pies por minuto (2135 a 1220 m/min). La broca, la tubería de perforación y la capacidad de salida del compresor (CFM) determinarán la velocidad anular o velocidad de salida de agujero. Lo que pudiera ocurrir si la velocidad de anillo está por debajo de los 4,000 pies/min (1220 MPM):

- Acortar la vida útil de la broca: Si la velocidad del aire no es suficiente para llevar a la superficie toda la cristalización de perforación, las partículas más grandes regresarán constantemente al fondo del taladro para depositarse sobre la broca de manera de provocar un desgaste anticipado.
- Disminuyendo la velocidad de perforación: Cuando existe un exceso de aire contra la broca, disminuyendo la velocidad de desplazamiento de los residuos de desmonte antes de volver a golpearla el pistón. De tal forma que, la broca está perforando de nuevo el mismo desmonte en vez de romper piedra nueva.
- Pérdida de instrumentos: Los recortes por la baja velocidad del aire serán capaces de pegarse a las paredes y crear lo que se denomina cuello o collar, lo que dificulta el libre desplazamiento del recorte. Taponamiento de las herramientas en el cuello.
- Pero si la velocidad anular está por encima de los 7,000 pies/min (2135 MPM), se produciría un excesivo desgaste en el martillo, las brocas y la tubería de perforación.

Rapidez de perforación

Este término se emplea para calcular el desempeño de las perforadoras y los aceros de perforación, que se estima en base a la cantidad de metros perforados en un periodo específico, es decir, en metros por horas o metros por minutos.

Profundidad y diámetro de los perforadores

El rendimiento se ve bastante afectado por estos factores; por ejemplo, un taladro con un diámetro más grande requiere más tiempo para penetrar, así como la profundidad de los taladros, donde simplemente agregar una varilla adicional incrementa el tiempo de perforación. En las máquinas perforadas manuales, cuando se incrementa la profundidad de los taladros hasta un límite determinado, la velocidad de perforación disminuye ligeramente; sin embargo, cuando se supera ese límite, la velocidad cae drásticamente.

Presión del aire a presión

Cuando la presión del aire comprimido se incrementa de 5 a 6 atmósferas manométricas, la velocidad de perforación se eleva entre un 25 % y un 30 %, mientras que, si el incremento es de 5 a 7 atmósferas, la velocidad aumenta entre un 45 % y un 65 %. La perforación será efectiva si se mantiene el fondo de los taladros siempre limpio, desechando el detrito inmediatamente después de su formación. Si esto no se lleva a cabo, la trituración de esas partículas requerirá un alto consumo energético y causará pérdidas y desgastes en el rendimiento, lo que conllevará el riesgo de atascamiento.

Dirección de los taladros

Es un factor adicional que debe considerarse, ya que el tiempo empleado para perforar los taladros de contorno en trabajos superficiales o subterráneos con herramientas manuales es entre 8 % y 10 % mayor que el utilizado para perforar otros tipos de taladros. Lo mismo ocurre con los jumbos de perforación radial: perforar hacia arriba después de superar la longitud media retrasa el proceso debido al peso del varillaje.

1.4.6. Parámetros operacionales de perforación DTH

Presión laboral

El martillo BH opera a presiones que oscilan entre 18 y 24 bares (270 PSI - 350 PSI); es importante considerar que la velocidad de penetración aumenta con el aumento de la presión, pero también lo hace el desgaste del acero.

Velocidad de giro

Siempre se debe considerar mantener una adecuada velocidad de rotación (RPM), ya que esto aumentará el rendimiento final de los aceros para perforar. La rapidez de rotación

sugerida entre 10 y 60 rpm. En función del diámetro de la broca y del terreno que se tiene que perforar. Si la penetración instantánea es de 18 m/hora, la rotación debe ser de 30 rpm; por tanto, la broca tiene que perforar entre 10 y 13 mm por giro.

Si la velocidad de rotación es demasiado baja, el rendimiento será bajo; si, en cambio, es muy alta, se producirá un desgaste prematuro excesivo de la broca, la barra y la sarta de perforación en general.

1.4.7. Presión de Avance Brocas Drillco DTH DHD340 y TD40

Para establecer la presión de avance, inicie empujando el tren de martillo y varillaje con máxima presión y rotación del aire. Cuando la rotación comience a disminuir, baje la presión de avance hasta que esta sea uniforme y suave. A 24,1 bar de presión de aire, una estimación de la presión de avance podría ser 9 kg por milímetro de diámetro en roca dura. Si la fuerza de avance es demasiado baja, se generarán oscilaciones, rotación sencilla y una escasa penetración. El sistema de empuje de su perforadora podría resultar dañado por las vibraciones. Si la fuerza de avance es excesivamente elevada, el tren de varillaje se verá obligado a soportar esfuerzos de flexión, lo que obstruirá la rotación.

Regule la fuerza de avance durante toda la perforación; se requiere una mayor fuerza de empuje a 20 metros de profundidad que a 100. A medida que la profundidad crezca, será necesario retener el tren de varillaje.

Brocas apropiadas para cualquier tipo de aplicación están disponibles a través de Drillco. Cubriendo todos los patrones tradicionales de brocas y martillos. En la investigación actual se están analizando las brocas TD40 y DHD340.

Figura 5

Broca DHD340 Drillco



Nota. Tomado de Drillco Drill Bits. (Drillco, 2023)

Figura 6

Broca TD340 Drillco



Nota. Tomado de Drillco Drill Bits. (Drillco, 2023)

Para una buena selección del tipo de broca es importante tener en cuenta el tipo de roca y sus aspectos como: resistencia a la compresión, contenido de sílice, competencia y fracturamiento, la figura 7 nos muestra una guía adecuada para este tipo de selección.

Figura 7

Guía de selección de brocas DTH



Nota. Tomado de Drillco Drill Bits. (Drillco, 2023)

1.4.8. Martillos Drillco DTH Puma 4.1Q y Puma 4.2HP

Los martillos utilizados para las brocas en estudio son P4.1Q y P4.2HP, para DHD340 y TD40 respectivamente. En la Tabla 1 se puede observar las propiedades de estos martillos. Así como las partes de estos en la Figura 8 para P4.1Q y la Figura 9 para el martillo P4.2HP de la broca TD40.

Tabla 2

Características de los martillos DTH PM4.1Q y PM4.2HP

Características	PM4.1Q	PM4.2HP
Peso	36 kg	40 kg
Pistón	DHD340: 7.64kg / 16.81 lb	TD40: 8.8kg / 19.3 lb
Energía pistón	382J	440J
Frecuencia	1700bpm	1700bpm
Potencia	10.82Kw	12.47Kw
Diámetro exterior	100mm - 3.93pulg	103mm - 4.06pulg
Diámetro baja	92mm3 - 62pulg	91mm - 3.58pulg
mm carne	10mm	12mm
Aire (bar)	10.3 - 17.2 - 24.1	17.2 - 24.1 - 31.0 - 34.5
Aire (psi)	150 - 250 - 350	250 - 350 - 450 - 500
CFM	250 - 445 - 640	349 - 515 - 682 - 765

Nota. Adaptado de Parámetros óptimos de operación para martillos DTH. (Drillco, 2022)

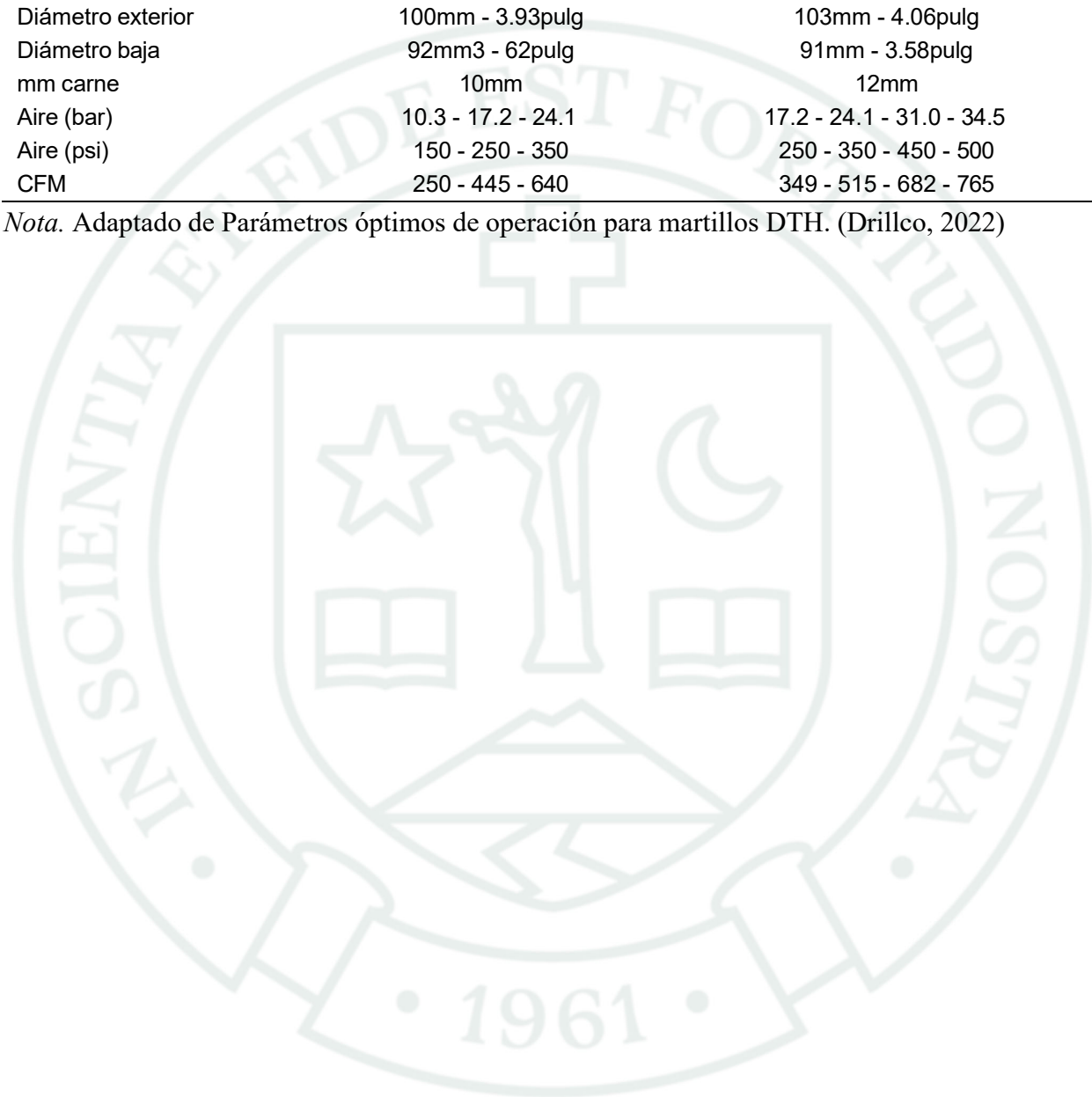
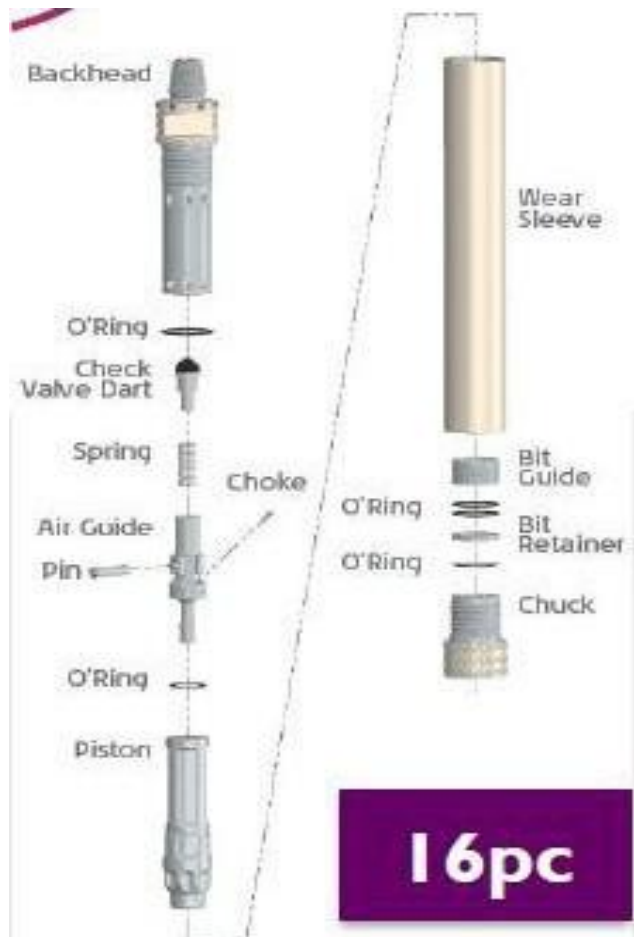


Figura 8

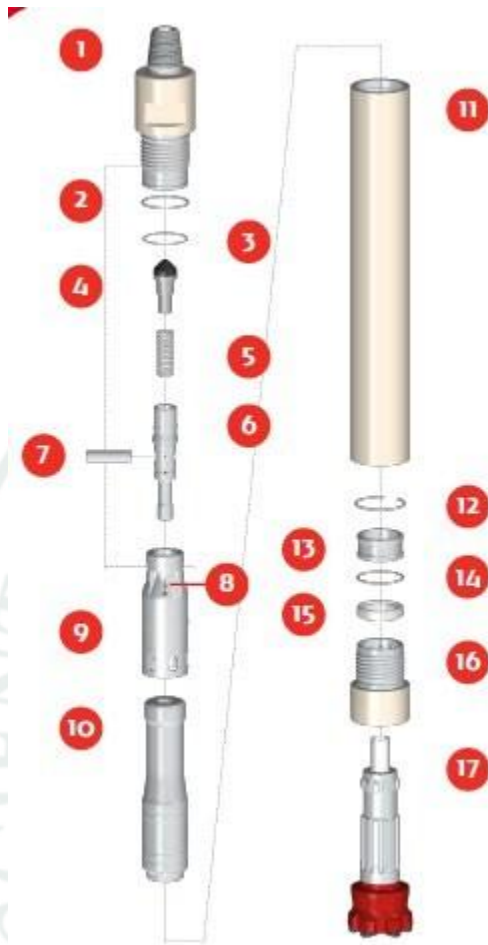
Partes del martillo DTH PM4.1Q



Nota. Tomado de Parámetros óptimos de operación para martillos DTH. (Drillco, 2022)

Figura 9

Partes del martillo DTH PM4.2HP



Nota. Tomado de Parámetros óptimos de operación para martillos DTH. (Drillco, 2022)

1.4.9. Evolución de la tecnología de perforación DTH (Down-The-Hole)

La técnica de perforación con martillo de fondo (DTH) ha sido objeto de constantes innovaciones orientadas a mejorar la transferencia de energía hacia la roca. Según Smith & Rogers (2021), la eficiencia en la fragmentación de roca no solo depende de la presión de aire comprimido, sino de la configuración geométrica de la broca y su acople con el martillo. Investigaciones previas destacan que el diseño de los botones y la disposición de los conductos de barrido son críticos para evitar la sobre-perforación y el desgaste prematuro del acero.

1.4.10. Comparativa de Sistemas de encastre y transmisión de energía

Un punto clave en la literatura reciente es la diferencia entre los vástagos o "shanks" de las brocas. Autores como García (2022) señalan que, mientras el estándar DHD (Down Hole Drill) ha sido el pilar de la industria por décadas debido a su robustez, los sistemas tipo TD han ganado terreno en minería superficial por su diseño optimizado que reduce la pérdida de energía por reflexión de onda. La literatura técnica sugiere que el cambio de un modelo a otro puede influir directamente en la Velocidad de Penetración (ROP), un factor determinante en la estructura de costos operativos.

1.4.11. Impacto económico en la perforación de precorte

El precorte, al ser una técnica de voladura controlada para proteger la estabilidad de los taludes, requiere una precisión diametral rigurosa. En estudios realizados en minas de tajo abierto en Sudamérica, se ha documentado que el 40% de los costos operativos de perforación provienen del consumo de aceros y combustible. Investigaciones de López et al. (2023) demuestran que una mejora del 10% en la vida útil de la broca, mediante la selección de aleaciones superiores o cambios en el modelo de encastre (como el propuesto entre DHD y TD), puede reducir el costo por metro perforado en un rango de 5% a 8%.

1.4.12. Variables de desgaste y vida útil en minería superficial

El estado del arte actual enfatiza el uso de indicadores de desempeño como el Costo por Metro (CPM). Estudios experimentales indican que la broca TD40, al poseer una distribución de carburos de tungsteno adaptada a formaciones de dureza media-alta, presenta una menor tasa de desviación en comparación con modelos tradicionales. Esto no solo reduce el costo directo del accesorio, sino que optimiza el ciclo de vida del martillo de fondo al disminuir el estrés mecánico.

1.4.13. Resumen de la brecha de investigación

Si bien existe literatura sobre la eficiencia de los martillos DTH, hay una escasez de estudios comparativos específicos que cuantifiquen el ahorro real al migrar de DHD40 a TD40 en contextos de precorte para minería superficial. Esta investigación busca llenar ese vacío mediante un análisis de campo que correlacione la durabilidad del acero con la reducción de costos operativos directos.

1.4.14. Costo Parcial de Perforación (PDC)

El costo parcial de perforación (PDC) es un indicador que mide el costo de la operación de perforación por unidad de longitud perforada. Se calcula dividiendo el costo total de la perforación entre la profundidad total alcanzada. El PDC puede variar según las condiciones geológicas, el tipo de equipo, la eficiencia operativa y otros factores. El PDC es útil para comparar el rendimiento de diferentes taladros, diferentes tipos de brocas y martillos. (Altamirano Cueva & Santamaria Valencia, 2019)

El PDC se calcula dividiendo el costo parcial de perforación por la longitud total del taladro perforado. El resultado se expresa en dólares por metro. El PDC puede variar según la ubicación, la profundidad, la complejidad y el tipo de taladro. El PDC es un indicador importante de la rentabilidad y la eficiencia de una operación de perforación.

El PDC de la broca se calculará con la siguiente formula:

- $PDC_{Broca} = \text{Precio de compra de la Broca (USD)} / \text{Longitud total perforada (metros)}$ (1)

El PDC del martillo se calculará con la siguiente formula:

- $PDC_{Martillo} = \text{Precio de compra del Martillo (USD)} / \text{Longitud total perforada (metros)}$ (2)

La suma de ambos PDC, de la broca y el martillo, será nuestro indicador de costos de perforación para la evaluación de las pruebas del cambio de broca. Le llamaremos PDC, y se calculará con la siguiente formula:

- $PDC = PDC_{Broca} + PDC_{Martillo}$ (3)

A diferencia del Costo Total de Perforación (TDC), que toma en cuenta todos los costos asociados a la perforación de los taladros, el PDC toma en cuenta parcialmente un aspecto de los costos totales, como por ejemplo solo el costo del equipo de perforación, la broca, martillo, lubricantes, etc. También se llama PDC a la suma de 2 o más costos parciales.

1.4.10. Definición de términos

- **PDC:** Acrónimo de Costo Parcial de Perforación
- **DTH:** Acrónimo de la técnica de perforación de taladros, donde el martillo se encuentra en el fondo del taladro. Usado con mucha frecuencia en taladros de gran longitud.

- **Broca:** Herramienta para hacer taladros en la roca que se ubica en la punta del barreno o barra de perforación, es la parte que tiene contacto con la roca y tritura está a través de percusión, rotación o una combinación de ambas. Existen diferentes tipos de broca según la dureza de la roca o el tipo de perforación a realizar.
- **Martillo:** Es una herramienta utilizada para realizar taladros en la roca, cuya función es la de golpear el vástago de la broca, el barreno o a la misma broca, transfiriendo de esta forma la energía cinética a la roca permitiendo triturarla. Existen diferente tipos y métodos dependiendo de las características de los taladros y la función de estos.
- **Perforación de precorte:** La meta del precorte es disminuir la presión en el pozo para provocar fracturas entre los pozos vecinos en la fila de precorte. Para crear un plano de corte a través de una grieta, es crucial tener en cuenta una fila de pozos con un espaciamiento estrecho, una baja densidad de carga explosiva y la iniciación simultánea durante el desarrollo.

1.5. Antecedentes

Antecedentes Internacionales

En el artículo de investigación, los autores proponen realizar un modelado numérico para ofrecer una observación detallada de los comportamientos del trabajo interno de los componentes. Debido a que en taladros de gran diámetro no es posible aplicar enfoques empíricos o teóricos convencionales. Luego de realizar las simulaciones estas sugieren tener especial cuidado en la carrera de admisión de la cámara frontal teniendo esta relevancia significativa en el rendimiento del martillo, mientras que aumentar la ranura del pistón reduciría los indicadores del rendimiento del martillo. Al final con estos resultados diseñaron un martillo que probaron en práctica obteniendo 1.7 veces más tasa de penetración que con un martillo convencional. (Cao et al., 2023). Esta investigación nos muestra la relevancia de la innovación en la perforación con martillo de fondo para mejorar los rendimientos y por ende reducir los costos.

En el artículo de investigación “*Design Optimization and Analysis of Piston, Drill Bit for Rock Drill*”, los autores buscan optimizar el diseño de la broca y el martillo con los programas

Anslys para el análisis y Catia para el modelado. El equipo de perforación utilizado es un DTH impulsado por agua desarrollado por G-Drill (Sandvik Rock Tools y LKAB) Al término de la optimización de diseño obtiene un modelo mejorado de broca y martillo que permitirá mejorar los rendimientos de perforación y alargar la vida útil de los componentes (Mohd Sohail et al., 2021). Este artículo nos indica que cuando se utiliza un modelo mejorado de broca y martillo en perforación DTH, esta influencia directamente en el rendimiento y por ende en la reducción de los costos de perforación.

En el artículo de investigación titulado *“Analysis of Button Bit Wear and Performance of Down-The-Hole Hammer Drill”*, los autores investigan el desgaste del botón de la broca y el rendimiento de la perforadora DTH en la mina de oro de Navachab, Namibia. Se analizó la

roca en laboratorio para determinar su composición química, resistencia a la compresión entre otros. Posteriormente relacionan las tasas de desgaste con las propiedades de la roca. La investigación revela que la resistencia a la compresión uniaxial, el contenido de cuarzo equivalente y el contenido de sílice son propiedades dominantes de la roca que afectan la tasa de desgaste de la broca de la perforadora DTH. (Adebayo & Akande, 2015).

En la tesis titulada *“Economics of Rotary vs. Dth drilling”*, el autor realiza una comparación económica entre la perforación DTH y la perforación Rotativa, tomando como premisa la importancia de la presión del aire comprimido para el DTH y la necesidad de que los componentes soporten el impacto de esa fuerza. En cambio, la perforación Rotativa tiene como factor clave la tracción que afecta al rendimiento de esta. Luego de la comparación concluye que el costo inicial de la perforación Rotativa es mayor en comparación al DTH, pero en cambio el costo es mejor en costo por volumen de las rotativas frente a las de DTH (Zhang, 2018).

Antecedentes Nacionales

En el informe de examen profesional titulado *“Optimización del Proceso de Perforación Down The Hole DTH Precorte a través de un Estudio Comparativo de Brocas”*, El autor trata el asunto de optimización debido a un consumo elevado de aceros de perforación, lo que conduce a un incremento en los costos. El objetivo principal es reducir al mínimo el costo total de perforación

DTH durante las operaciones de precorte. Para lograrlo, llevó a cabo pruebas con brocas Mincon de modelos convexos y cóncavos, registrando todos los datos relevantes necesarios como la dureza de la roca, la velocidad de penetración y el tipo de broca, entre otros aspectos, para luego calcular los costos relacionados con ellos. Después de las pruebas, lograron aumentar la velocidad de penetración y reducir el costo total de perforación, lo que resultó en una rentabilidad mayor en comparación con la marca Drillco utilizada anteriormente.. (Vallejos Copacati, 2022)

En la tesis titulada *“Implementación de Martillos y Brocas Rock 66 para Incrementar la Producción de Taladros y Reducir Costos de Perforación en una Empresa Minera de la Mediana Minería en Cajamarca”* el propósito de los autores es poner en marcha martillos y brocas Rock 66, ya que la presencia de arenisca abrasiva ralentizaba el progreso con el modelo previo. Se realizó un monitoreo de la puesta en marcha del modelo rock 66 durante 17 días, estimando los costos, el número de taladros y la velocidad de penetración. Con un incremento de 198 taladros en 17 días, una disminución del costo total de USD 1,761.89 y un aumento promedio de la velocidad de penetración de 10 m/h, se están logrando resultados positivos. (Portal Carrasco & Lozano Tirado, 2020)

En la tesis titulada *“Optimización del Costo de Perforación para Aceros DTH en la Mina Modelo a Tajo Abierto, Huamachuco, 2018”*, con el fin de optimizar el costo de perforación para aceros DTH en mina a tajo abierto, los autores emplearon datos extraídos de bitácoras de perforadoras Sandvik. En este contexto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) sobre las velocidades de penetración de cinco marcas diferentes de acero DTH para evaluar su impacto económico. Como resultado, se logró un ahorro en la marca Mincon, que fue 2.29 USD/hr menor que en las otras cuatro marcas. (Altamirano Cueva & Santamaria Valencia, 2019)

La investigación titulada "Optimización de la perforación y de las brocas de 38,45mm" fue llevada a cabo por Danni Alfredo Camarena Cosme en el año 2012 con el objetivo de reducir los costos en la UEA SEMIGLO de la compañía minera Atacocha S.A. El escritor señala que la meta de este trabajo fue reducir el desmesurado uso de aceros para perforación, por lo que se propuso establecer un taller deafilamiento de brocas. Las conclusiones más relevantes fueron: Se redujo la presencia de taladros desviados debido a las capacitaciones y los métodos de perforación aplicados por los operadores. La eficacia de las brocas y los complementos de perforación aumentó.

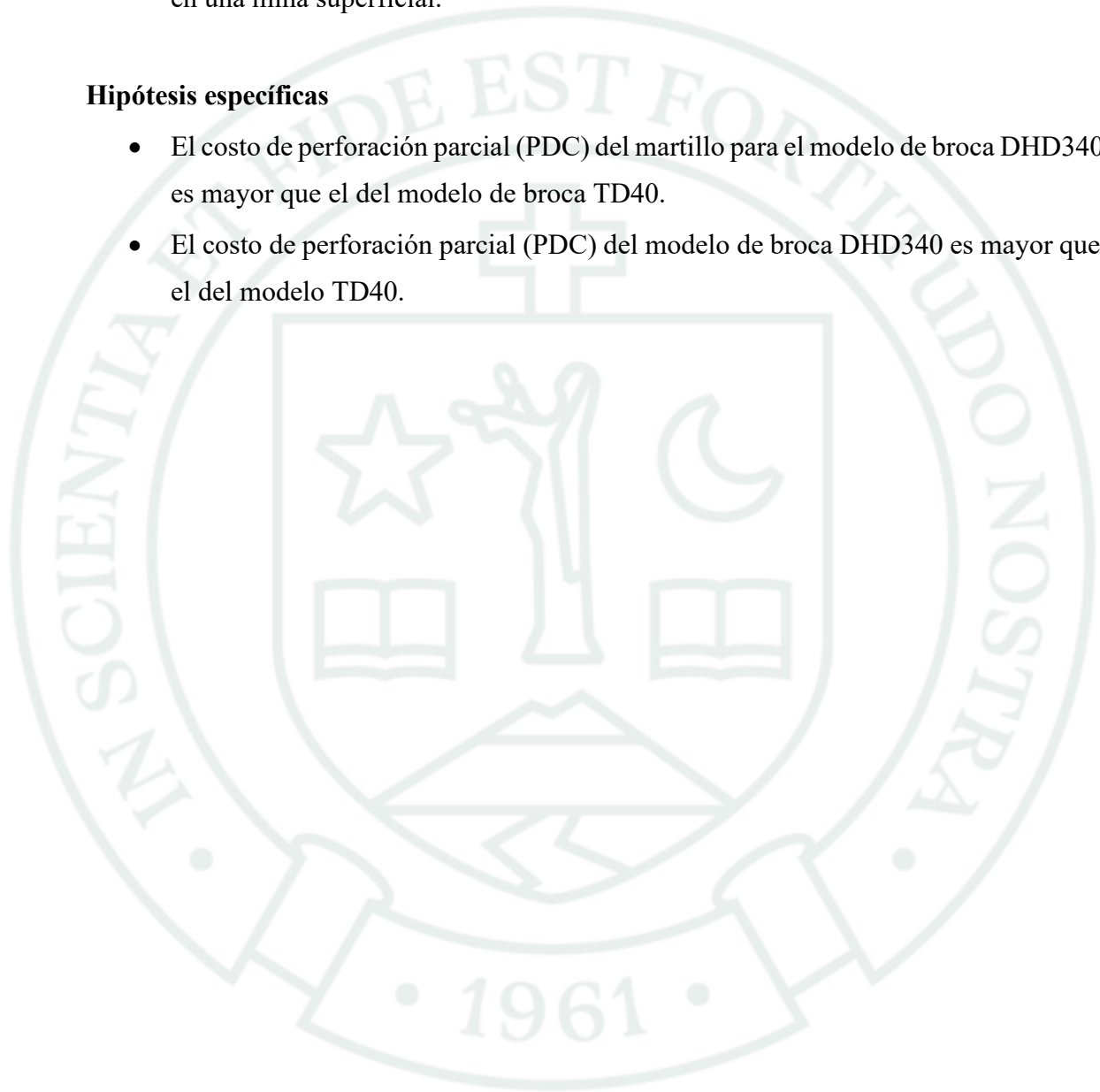
1.6. Hipótesis

Hipótesis general

- A través del cambio de broca modelo DHD340 al modelo TD40, se conseguirá reducir los costos de perforación en perforaciones con martillo de fondo precorte, en una mina superficial.

Hipótesis específicas

- El costo de perforación parcial (PDC) del martillo para el modelo de broca DHD340 es mayor que el del modelo de broca TD40.
- El costo de perforación parcial (PDC) del modelo de broca DHD340 es mayor que el del modelo TD40.





CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO OPERACIONAL

2.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicado porque vamos a usar un diseño de ingeniería para resolver la reducción de los costos de perforación DTH. Dado que el diseño de la investigación es cuasi experimental.



M: Muestra de elementos

X_i : Variable de estudio

P: Aplicación del experimento.

O_i : Resultados de la medición de las variables.

2.2. Nivel de investigación

La siguiente investigación es de nivel descriptivo y comparativo a nivel tecnológico, porque nos proponemos comparar y examinar los resultados obtenidos previamente y posteriormente al experimento.

2.3. Técnicas e instrumentos

Las técnicas que se usarán serán las siguientes:

- La documentación, para la cual tenemos a disposición la base de datos que registra el seguimiento de metros perforados y el reemplazo de brocas en perforaciones DTH.
- Para la segunda observación, se empleará una lista de verificación para poder especificar con precisión qué clase de broca fue utilizada para hacer las perforaciones en los taladros de precorte.

2.4. Campo de verificación

2.4.1. *Ámbito*

Mina superficial.

2.4.2. *Unidades de estudio*

a) Población

La población está constituida por las perforaciones con martillo de fondo precorte realizados en mina durante los meses de enero a diciembre 2023.

b) Muestra

La muestra para considerar serán las perforaciones con martillo de fondo precorte de enero a setiembre 2023, antes del cambio de broca y las perforaciones con martillo de fondo precorte de octubre a diciembre 2023, después del cambio de broca.

2.4.3. Temporalidad

La investigación se llevará a cabo utilizando los datos históricos recopilados entre enero y septiembre de 2023, antes del cambio de broca y las perforaciones con martillo de fondo precorte de octubre a diciembre 2023, después del cambio de broca.

2.5. Estrategias de recolección de datos

El plan de análisis de datos de la presente investigación será el siguiente:

- Recopilación y procesamiento de información histórica sobre las perforaciones efectuadas con la broca DHD340.
- Se establecerá una línea base, para lo cual se calculará los PDC tanto de broca y martillo y la sumatoria de ambos.
- Posteriormente se implementará el cambio de broca por el modelo mejorado TD40
- Se recolectará los datos como longitud de perforación, costo de broca y martillo.
- Con los datos obtenidos de la broca TD40, calcularemos el PDC de broca y martillo y la sumatoria de ambos para el periodo de prueba.
- Finalmente compararemos los resultados de Costos parciales de ambas brocas para establecer cuanto fue la reducción del costo por metro en las perforaciones de precorte con martillo de fondo.

2.6. Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación se centra en cuantificar los costos de la implementación de un modelo mejorado de broca y algunos detalles técnicos de esta.

El estudio se centrará solo en costos parciales de la broca y del martillo que serán utilizado en estas pruebas de campo, mas no tomaremos en cuenta los costos del equipo de perforación.

2.7. Limitaciones de la investigación

Para llevar a cabo este estudio, se cuenta con los datos e información requeridos, bajo la condición de que sean utilizados solamente para fines académicos. Desde el punto de vista económico, es posible financiar la investigación por cuenta propia.



CAPÍTULO III
BROCAS Y MARTILLO DHD340 Y TD40

3.1. Longitud de perforación con la broca DHD340 y TD40

Los equipos de perforación de fondo (DTH) DHD340 son utilizados frecuentemente en trabajos mineros a cielo abierto, como la voladura, el trabajo en canteras o las prospecciones mineralógicas en superficies descubiertas. Estos sistemas se destinan a tareas en minería superficial, barrenos de agua, excavaciones subterráneas, obras de terraplén y estudios geotérmicos, siendo compatibles con equipos de fabricantes como Atlas Copco, Sandvik e Ingersoll-Rand. En contextos de minería a cielo abierto, permiten avances rectilíneos en formaciones rocosas compactas con rangos de diámetro entre 115 y 240 mm, optimizando la transmisión de potencia directamente al frente de perforación para elevar la eficacia operativa. (Prodrill, 2025)

Dentro de las características técnicas, se considera:

- Diámetro estándar de la broca: 115 mm (equivalente a 5 pulgadas), equipada con puntas de carburo de tungsteno y estructura de acero aleado forjado de alta resistencia.
- Variantes de diseño frontal: cóncava, convexa, plana o bicálibre, adaptadas a presiones de aire bajas o altas (65-305 mm).
- Beneficios clave: elevado rendimiento productivo, durabilidad extendida y menor gasto energético, derivados de procesos de templado y mecanizado CNC.

Dichos implementos resultan óptimos para faenas en explotaciones mineras abiertas, en concordancia con análisis previos sobre el modelo DHD340 en técnicas de perforación de precorte. Entre las características de las perforaciones realizadas en la mina superficial con el modelo DHD340, se encuentran:

- Menor consumo de aire y una mayor frecuencia de impactos, lo que se traduce en una eficiencia de perforación entre un 15 y 30% superior en comparación con brocas con válvula de pie.
- Fabricación con botones de carburo de tungsteno, que alargan la vida útil del taladro y ofrecen resistencia al desgaste.
- Diseño robusto con acero aleado de alta calidad y tratamiento térmico avanzado para asegurar un buen rendimiento y durabilidad en condiciones exigentes de perforación.

- Diámetro estándar alrededor de 100 mm (como 102 mm o 4 pulgadas), y peso aproximado de 9 kg, adecuado para perforaciones superficiales y medianas en minería y construcción.
- Configuraciones variadas de cara de broca (cóncava, plana, convexa) para adaptarse a diferentes condiciones del terreno y necesidades de perforación.
- Estas características hacen que la broca DHD340 sea confiable, eficiente y adecuada para operaciones con martillo DTH (down-the-hole) en minería superficial y otras aplicaciones donde se requiere perforación de alta calidad.

Las brocas TD40, compatibles con martillos DTH de 4 pulgadas, destacan en perforaciones para pozos de agua, geotermia y minería, ofreciendo avances rápidos en rocas duras como granito o piedra caliza gracias a su diseño optimizado y materiales resistentes.

Las brocas TD40, son fabricadas con acero aleado de níquel de alta calidad (como 25SiMnCrNi2MoVA) y carburo de tungsteno YK05, incorporan procesos de inserción térmica y mecanizado CNC para mayor durabilidad, consistencia y resistencia al desgaste. Presentan geometrías de cara convexa, cóncava o plana, con diámetros de 110-190 mm (4,3-7,5 pulgadas), ranuras profundas para lavado eficiente y botones agresivos que maximizan la penetración y limpieza del barreno.

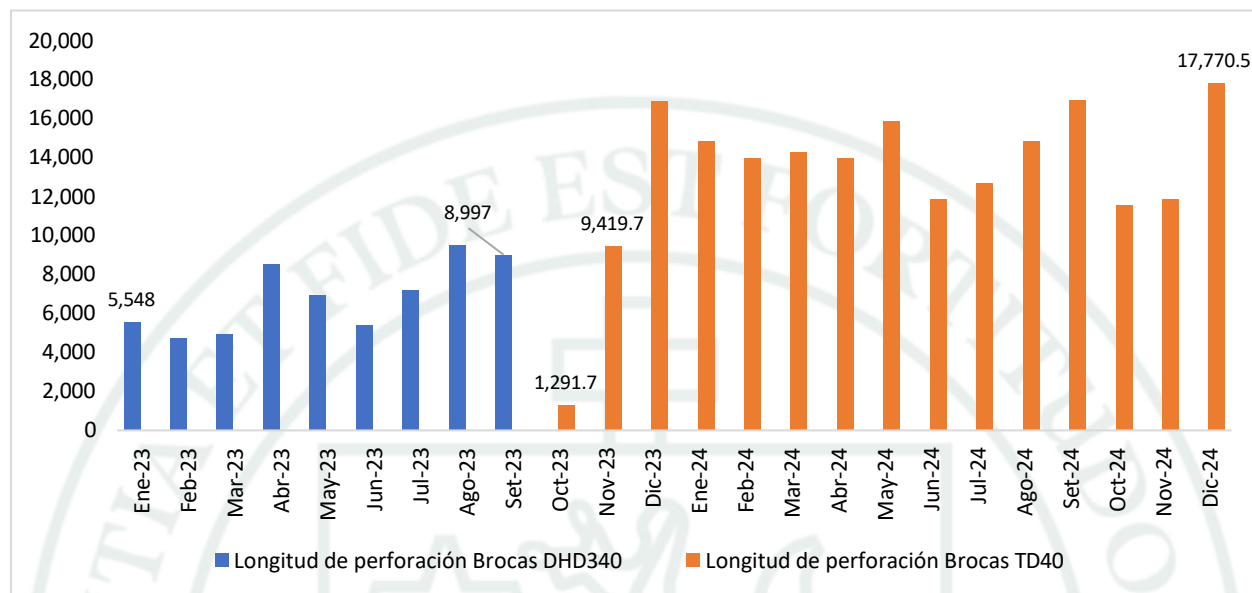
Las brocas TD40, proporcionan alta tasa de penetración, equilibrio entre velocidad, vida útil y estabilidad en terrenos desafiantes, con menor riesgo de interrupciones al prolongar la durabilidad mediante tratamientos térmicos especiales y alivio de estrés. En aplicaciones DTH, requieren ajuste preciso de fuerza de avance y rotación para evitar vibraciones, desgaste excesivo en estrías y roturas de botones, asegurando trituración óptima de roca con rotación equivalente al diámetro de un botón por impacto.

Las brocas TD40, elevan la productividad en minería superficial al combinar potencia, velocidad y bajo mantenimiento, con énfasis en limpieza de agujeros y rendimiento consistente en condiciones variables de roca. (Wontech, 2025)

En la Figura 10, se puede observar la longitud de perforación de brocas con el modelo DHD340 de enero a setiembre del 2023 y con el modelo TD40 de octubre del 2023 a diciembre del 2024. Se puede observar que el modelo TD40 presenta una mayor longitud de perforación.

Figura 10

Longitud de perforación de brocas con el modelo DHD340 y TD40 de enero del 2023 a diciembre del 2024



Nota. Elaboración propia

3.2. Longitud de perforación del martillo con el modelo DHD340 y TD40

El martillo DHD340, clasificado como equipo DTH de 4 pulgadas, se utiliza en perforación de fondo para minería a cielo abierto, canteras, pozos de agua, geotermia y cimentaciones, impulsado por aire comprimido que genera impactos potentes directamente en la broca.

El martillo DHD340, posee un diámetro exterior de 99 mm, longitud aproximada de 1030 mm, peso de 39-43 kg y rosca API 2 3/8", con rango de barrenado de 110-135 mm y presión operativa de 10-25 bares. Su consumo de aire oscila entre 212-530 CFM, con frecuencia de impacto elevada (alrededor de 32 Hz a 18 bares) para maximizar la penetración en rocas duras.

El martillo DHD340, incorpora materiales de alta calidad como acero aleado tratado térmicamente y CNC, con diseño sin válvula de pie que previene fracturas, reduce consumo de aire/aceite (10% menos que modelos valvulares) y eleva la velocidad de perforación en 15-30%. Ofrece estructura simple, fiabilidad prolongada, bajo mantenimiento y estabilidad en aplicaciones exigentes como voladuras mineras. (JP Representaciones, 2025)

El martillo TD40 es un equipo DTH de 4 pulgadas ampliamente usado en minería, perforación de pozos y obras civiles, diseñado para ofrecer desempeño robusto en diversas condiciones. Cuenta con un diámetro exterior de aproximadamente 81-99 mm, peso alrededor de 22-39 kg según el modelo, y rangos de barrenos entre 90 y 135 mm. Funciona con presiones de trabajo entre 0.5 y 2.5 MPa, con frecuencias de impacto en torno a 27 Hz, y consumo de aire en un rango de 80 a 250 litros por segundo a diferentes presiones.

El TD40 dispone de diseño tradicional con válvula de pie, lo que puede implicar mayor desgaste y requerir un mantenimiento más frecuente en comparación con martillos sin válvula. Su rendimiento proporciona penetraciones estables y versátiles en formaciones rocosas variadas, aunque con un consumo energético y de aire mayor que modelos más modernos como el DHD340.

El martillo TD40, es apropiado para condiciones generales de perforación en minería superficial y pozos, resaltando su confiabilidad y adaptabilidad, aunque con menor énfasis en eficiencia energética o mejoras tecnológicas que optimicen velocidad y consumo. (Sollroc Drilling Tools, 2025)

La perforación con el martillo modelo TD40, presenta las siguientes características. Diseñado para ofrecer una velocidad de perforación rápida, con materiales de alta calidad que permiten romper rápidamente rocas duras como granito.

- Construcción robusta con acero de alta resistencia, que garantiza durabilidad en condiciones exigentes.
- Optimización para aumentar la eficiencia en perforaciones con menor consumo de energía y mayor vida útil de la broca.
- Diversas configuraciones de botones y diseños de cara, como convexas, cóncavas o planas, adaptándose a diferentes tipos de formación y condiciones del terreno.
- La forma y estructura permiten una mejor eliminación de residuos y mayor estabilidad durante la perforación, facilitando un proceso eficiente y de mayor duración.
- El modelo TD40 está especialmente diseñado para ofrecer rendimiento y durabilidad mejorados en operaciones mineras, permitiendo una perforación más rápida y eficiente en condiciones difíciles.

Los martillos DHD340 y TD40, ambos de 4 pulgadas para perforación DTH (Down-The-Hole), se emplean en minería superficial, pozos de agua y obras civiles, pero difieren en diseño, eficiencia y rendimiento operativo. (Doblon, 2025)

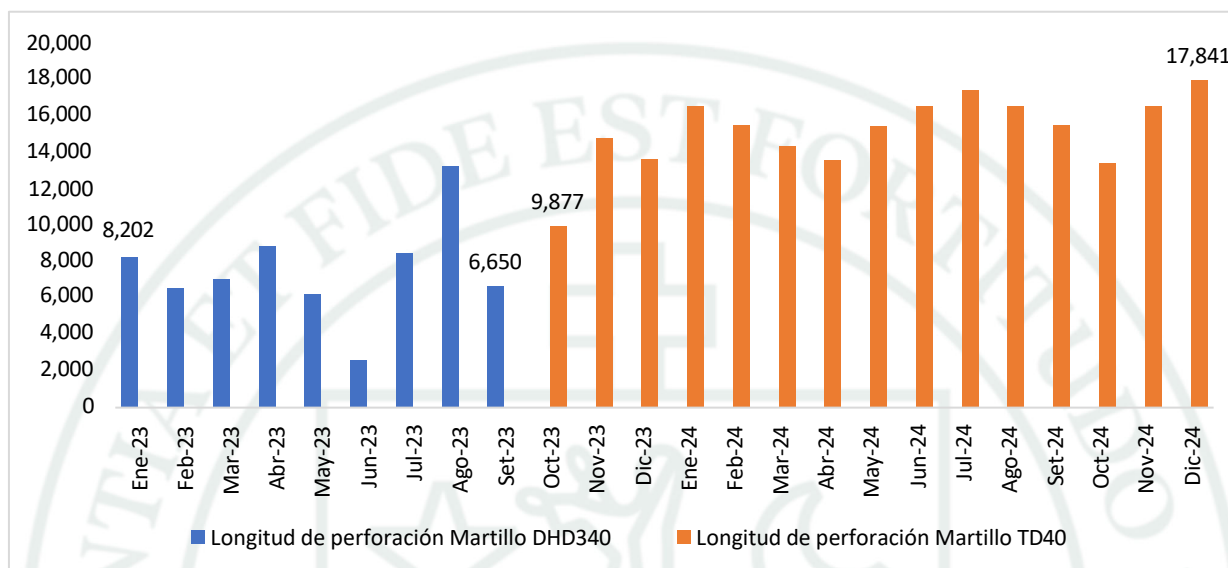
El DHD340 destaca por su configuración sin válvula de pie, que elimina riesgos de fractura, expansión o contracción, con estructura simplificada, piezas duraderas y fácil mantenimiento. En contraste, el TD40 sigue un diseño valvular tradicional más robusto, aunque propenso a mayores desgastes en componentes clave bajo alta presión. El DHD340 logra una velocidad de avance 15-30% superior gracias a menor consumo de aire (212-530 CFM), mayor frecuencia de impactos y eficiencia energética optimizada, ideal para rocas duras en profundidades elevadas. El TD40 ofrece penetración estable en terrenos variados, pero con cadencia de golpes inferior y mayor demanda de aire/aceite, resultando en avances más lentos y costos operativos elevados. Ambos soportan diámetros de barreno de 110-135 mm con rosca API 2 3/8", pero el DHD340 prioriza productividad y longevidad en voladuras mineras, mientras el TD40 se adapta a usos versátiles. (Doblon, 2025)

La Figura 11, muestra la Longitud de perforación de martillo con el modelo DHD340 y TD40 de enero del 2023 a diciembre del 2024. Donde se puede observar que el modelo de martillo TD40 ha permitido incrementar los metros perforados en comparación con el modelo DHD340, debido probablemente al tipo de terreno al que se aplicó la perforación en la minera superficial.

En el estudio, el cumplimiento del objetivo de reducir los costos de perforación mediante la sustitución de la broca DHD340 por el modelo TD40 en perforaciones con martillo de fondo en una mina superficial se fundamenta en las mejoras técnicas y operativas que ofrece este nuevo diseño. El modelo TD40 contribuye a un rendimiento superior al aumentar la vida útil de la herramienta, disminuir la frecuencia de recambios y reducir los tiempos sin actividad productiva, factores que en conjunto permiten optimizar los recursos y bajar los gastos asociados a la operación minera. Además, la eficiencia en la penetración y la rectitud de los agujeros se ve incrementada, propiciando mejores resultados en la tarea de precorte y elevando la productividad general. De este modo, la elección del modelo TD40 responde a una estrategia de gestión orientada a la eficiencia, la reducción de costos y la mejora general de los procesos de perforación, cumpliendo así con el objetivo planteado en la investigación.

Figura 11

Longitud de perforación de martillo con el modelo DHD340 y TD40 de enero del 2023 a diciembre del 2024



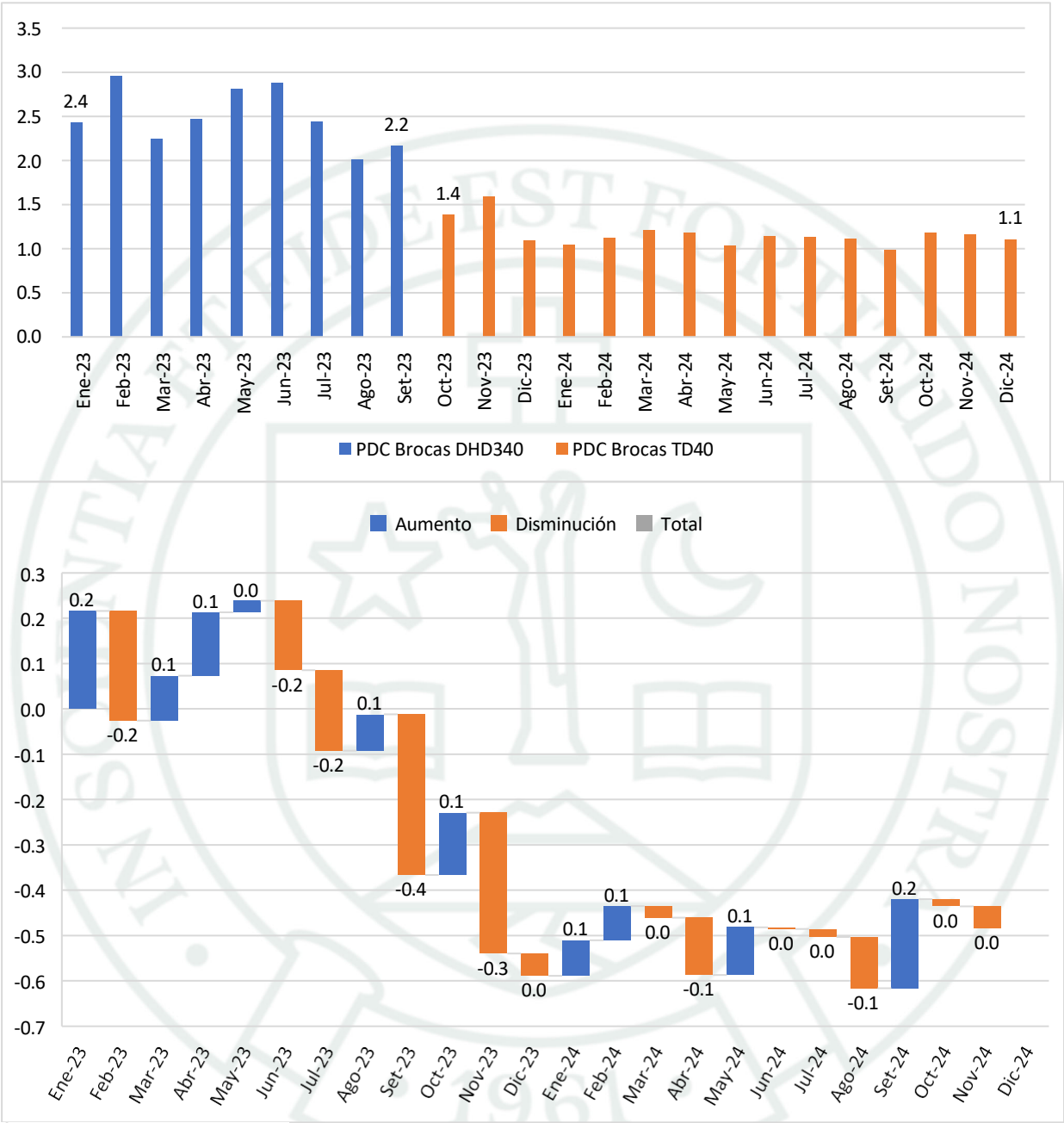
Nota. Elaboración propia

3.3. PDC de la broca DHD340 y TD40

En este momento, se ha alcanzado el primer objetivo concreto: calcular el costo de perforación parcial (PDC) de los dos modelos de broca DHD340 y TD40. La Figura 4, muestra el costo de perforación PDC para las brocas con el modelo DHD340 y TD40. Se observa que, de enero a setiembre del 2023, únicamente con la utilización del modelo DHD340, el PDC oscila en el rango 2 y 3. Mientras que, de octubre del 2023 a diciembre del 2024, con la utilización del modelo TD40, el PDC oscila entre el rango 0.4 y 1.1. Por lo cual, queda evidenciado la diferencia en el costo con el cambio de broca al modelo TD40.

Figura 12

Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para brocas con el modelo DHD340 y TD40



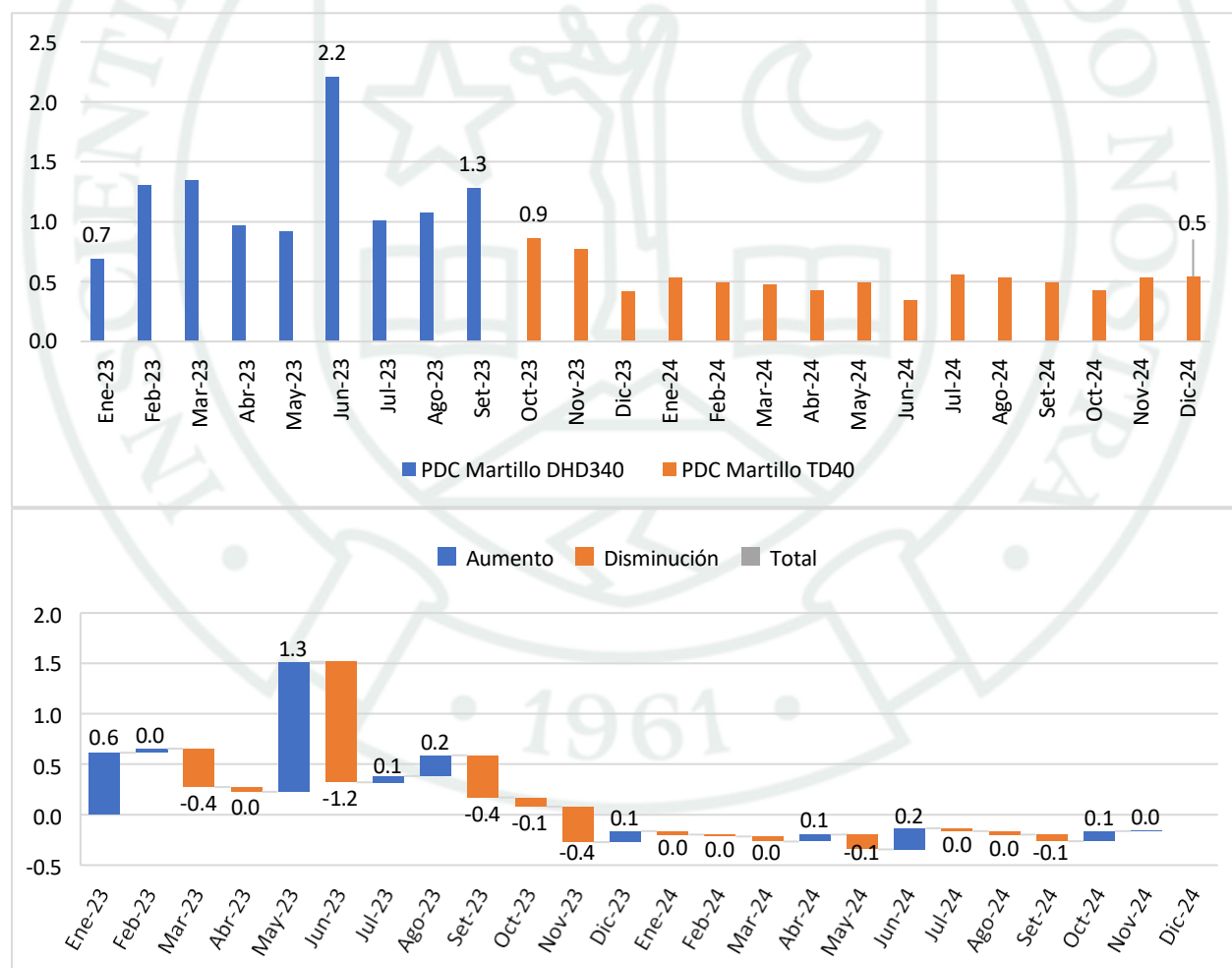
Nota. Elaboración propia

3.3. PDC del martillo DHD340 y TD40

En este punto, se cumplió con el segundo objetivo específico, determinar el costo de perforación parcial (PDC) del martillo para ambos modelos de broca DHD340 y TD40. La Figura 5, muestra el costo de perforación PDC para las brocas con el modelo DHD340 y TD40. Se observa que, de enero a setiembre del 2023, con la utilización del modelo DHD340, el PDC de martillo, oscila en el rango 0.7 y 2.2. Mientras que, de octubre del 2023 a diciembre del 2024, con la utilización del modelo TD40, el PDC de martillo, oscila entre el rango 0.9 y 0.5 respectivamente. Lo cual, indica que, si existe una diferencia en el costo, con el cambio de broca al modelo TD40.

Figura 13

Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para martillo con el modelo DHD340 y TD40

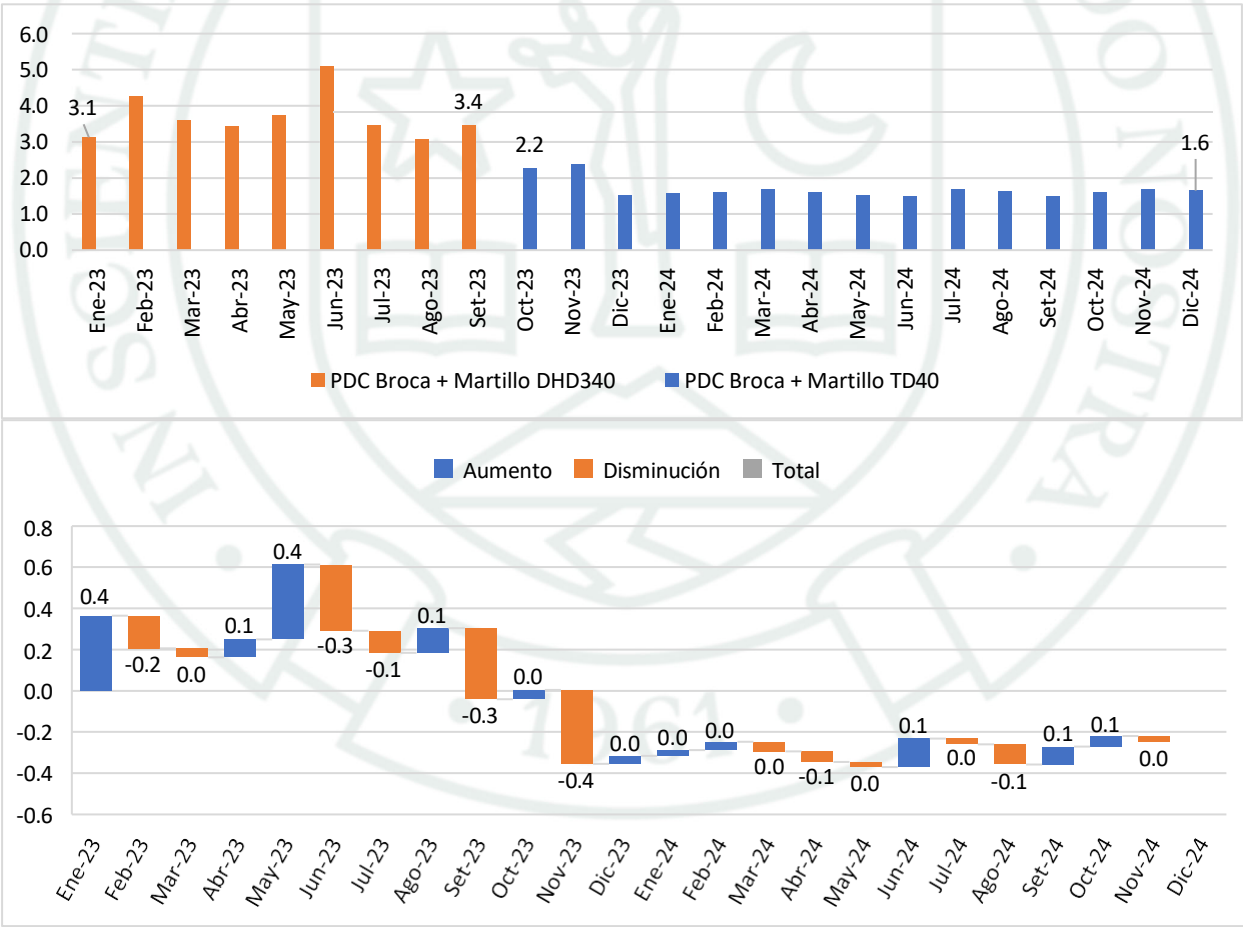


Nota. Elaboración propia

3.3. PDC de la broca y martillo con DHD340 y TD40

En la Figura 14, se muestra la evolución del costo de perforación (PDC) en conjunto, para broca y martillo con el modelo DHD340 y TD40 respectivamente. Se observa que de enero a setiembre del 2023 el PDC inicia en 3.1 y termina en 3.4 con el modelo DHD340 tanto para la broca como para el martillo. Y de octubre del 2023 a diciembre del 2024, el PDC inicia en 1.2 y termina en 1.6 respectivamente, con la utilización del modelo TD40 tanto para la broca como para el martillo de perforación.

Figura 14
Variaciones en el Costo de perforación (PDC) para broca y martillo con el modelo DHD340 y TD40

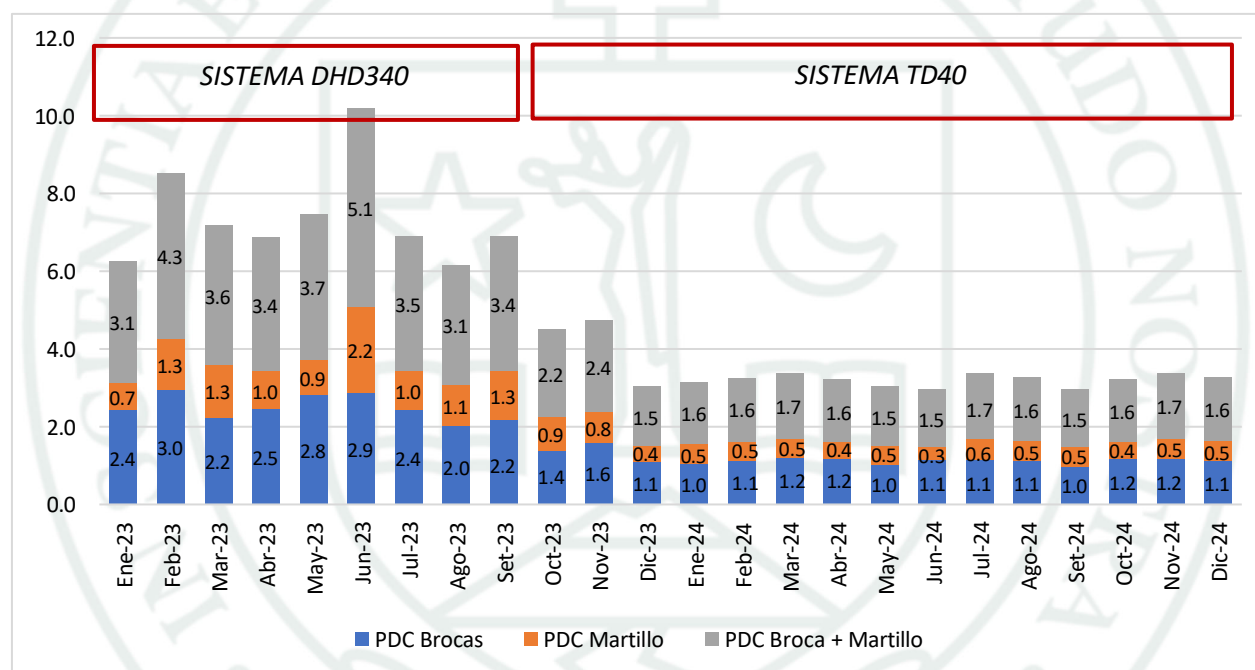


Nota. Elaboración propia

En la Figura 15, se puede observar la evolución del costo, donde la barra de color azul, representa la evolución en el tiempo del PDC de las brocas pasando del sistema anterior DHD340 (enero 2023 – agosto 2023), al sistema optimizado TD40 (octubre 2023 – diciembre 2024). Así mismo la barra naranja y gris representan la evolución del PDC del martillo y total respectivamente. Se puede observar cómo el costo se reduce drásticamente, principalmente por la disminución del gasto en brocas.

Figura 15

Evolución del PDC



Nota. Elaboración propia



CAPÍTULO IV

RESULTADOS

El cambio de la broca modelo DHD340 al modelo TD40 en las perforaciones con el martillo de fondo precorte en una mina superficial, permitió cumplir el objetivo de la presente investigación, al evidenciar la reducción de los costos de perforación.

El cumplimiento del objetivo de reducir los costos de perforación mediante el cambio de la broca modelo DHD340 al modelo TD40 en perforaciones con martillo de fondo precorte se basa en la evidencia técnica y económica de que la selección adecuada de la broca puede optimizar la eficiencia operativa y disminuir los gastos asociados a la perforación minera. El objetivo se considera cumplido al demostrarse que el uso del modelo TD40 genera una reducción significativa en el costo por metro perforado.

El modelo TD40 está concebido para brindar una mejor eficacia en la perforación de rocas abrasivas y duras, así como una mayor resistencia al desgaste; esto significa que la duración útil es más larga y se requiere menos reemplazo constante. En comparación, el modelo DHD340, aunque eficiente en ciertas condiciones, puede presentar un desgaste más acelerado y menor rendimiento en formaciones exigentes. El cambio a TD40 permite aprovechar mejor la energía del martillo de fondo, logrando barrenos más rectos y consistentes, lo que reduce el tiempo de operación y los costos asociados a la mano de obra y el mantenimiento.

4.1. Análisis del rendimiento físico (metraje perforado)

La transición al sistema TD40 permitió un incremento sustancial en la capacidad operativa de la mina.

- **Periodo DHD340 (Ene 23 - Set 23):** Se registró un metraje acumulado de 61,655 m, con un promedio mensual de 6,851 m.
- **Periodo TD40 (Oct 23 - Dic 24):** Se logró un metraje acumulado de 197,795 m, elevando el promedio mensual a 13,186 m.
- **Interpretación:** El sistema TD40 permitió más que duplicar el rendimiento mensual promedio. Esto indica una mayor Velocidad de Penetración (ROP) y una reducción en los tiempos muertos por cambios de acero, optimizando el uso de la perforadora de precorte.

4.2. Estructura de Costos Comparativa: PDC DHD340 vs. TD40

La Tabla 3, compara el peso económico de cada componente en la operación de precorte.

- Reducción del Costo Total – PDC Total: El cambio en el sistema de DHD340 a TD40, reduce el promedio del PDC de \$3.69/m a \$1.69/m, logrando un ahorro directo de \$2.00 por cada metro perforado.
- Eficiencia en el Consumo de Brocas: El cambio en el sistema de DHD340 a TD40, reduce el promedio del PDC de \$2.49/m a \$1.17/m. Esto representa un ahorro unitario de \$1.32, debido a la mayor durabilidad del modelo TD40 que logra perforar más metros antes de su descarte.
- Protección del Martillo: El cambio en el sistema de DHD340 a TD40, reduce el promedio del PDC de \$1.20/m a \$0.53/m, generando un ahorro de \$0.67/m. Esto confirma que el diseño del vástago TD40 reduce el estrés mecánico sobre el cuerpo del martillo, extendiendo su vida útil.
- Composición de Costos: Aunque ambos costos bajaron, en el sistema TD40 el costo de la broca representa el 69% del PDC total, mientras que el martillo el 31%. Esto indica que el foco del control de costos sigue siendo la gestión eficiente del rendimiento de las brocas.

Tabla 3

Comparativa de costos DHD340 vs TD40

Elemento de Costo	Sistema DHD340 (Ene-Set 23)	Sistema TD40 (Oct 23-Dic 24)	Ahorro Unitario
Broca	\$ 2.49	\$ 1.17	\$ 1.32
Martillo	\$ 1.20	\$ 0.53	\$ 0.67
COSTO PARCIAL TOTAL (PDC)	\$ 3.69	\$ 1.69	\$ 2.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Gasto Operativo Mensual

Al proyectar estos costos sobre un avance mensual promedio de 15,000 metros (que es el ritmo que alcanzó la mina con el sistema TD40), la simulación de presupuesto sería la siguiente:

- Presupuesto Mensual con DHD340: $15,000 \times 3.69 = \$ 55,350.00$
- Presupuesto Mensual con TD40: $15,000 \times 1.69 = \$ 25,350.00$
- AHORRO MENSUAL ESTIMADO: \$ 30,000.00

La **distribución porcentual** del gasto, es la siguiente:

- **Sistema DHD340 (Ineficiente)**
 - 67% del costo se utilizaba en reposición de brocas (debido a su baja vida útil de aprox. 750m).
 - 33% del costo se asignaba al martillo (debido a fallas prematuras por transmisión ineficiente de energía).
- **Sistema TD40 (Optimizado)**
 - 69% del costo es para brocas (aunque el costo bajó, sigue siendo el principal consumible).
 - 31% del costo es para el martillo.
 - El ahorro no solo viene de que la broca TD40 dure más metros, sino que, al ser más eficiente, reduce el tiempo de martilleo necesario para avanzar la misma distancia, lo que protege el equipo.

- **Simulación de Retorno de Inversión (ROI)**

Si el cambio de flota de brocas y martillos inicial para pasar de DHD a TD tuvo una inversión estimada de \$50,000 USD (ejemplo de stock inicial):

- $ROI = (Inversión\ Inicial / Ahorro\ Mensual) = \$ 50,000 \div \$ 30,000 = 1.6$ meses
- Resultado de la simulación: El proyecto se pagó a sí mismo en menos de 2 meses de operación gracias a la reducción del PDC.

4.4. Cumplimiento del Objetivo Específico 1: PDC de la Broca

El Costo de Perforación Parcial (PDC) de la broca es el indicador de eficiencia directa del consumible.

- **Línea Base (DHD340):** El PDC promedio fue de 2.49 USD/m. Se observó una alta volatilidad, con un pico de 3.0 en febrero de 2023, lo que refleja un desgaste acelerado o ineficiencia en la transmisión de energía.
- **Implementación TD40:** El PDC promedio descendió a 1.17 USD/m.

- Resultado: Se logró una reducción del 53.01% (100%-46.99%), en el costo de la broca. Es notable que, a partir de diciembre de 2023, el costo se estabilizó cerca de 1.0 - 1.2 USD/m, demostrando que la broca TD40 ofrece un rendimiento mucho más predecible y económico a largo plazo.

4.5. Cumplimiento del Objetivo Específico 2: PDC del Martillo

Este indicador evalúa cómo el diseño de la broca influye en la vida útil del martillo de fondo.

- Con Sistema DHD340: El PDC promedio del martillo fue de 1.20 USD/m, con picos de ineficiencia de hasta 2.2 (junio 2023).
- Con Sistema TD40: El PDC promedio bajó a 0.53 USD/m.
- Interpretación: La reducción del 55.83% (100%-44.17%), en el PDC del martillo confirma la superioridad técnica del sistema TD40. El diseño del vástago (shank) del modelo TD40 permite una transferencia de impacto más limpia, reduciendo el "golpe en vacío" y el estrés mecánico sobre los componentes internos del martillo, lo que extiende significativamente su vida útil.

4.6. Evaluación del Objetivo General (Reducción de Costos Totales)

El análisis del costo combinado (PDC Broca + Martillo) valida la rentabilidad global del proyecto:

- Con el Sistema de Perforación DHD340 (Ene 23 - Set 23). El PDC Total Promedio resulto de 3.69 (USD/m).
- Con el Sistema de Perforación TD40 (Oct 23 - Dic 24). El PDC Total Promedio resulto 1.69 (USD/m).
- La variación porcentual en el PDC fue de 54.20% (100%-45.80%).
- La implementación del sistema TD40 resultó en un ahorro directo de 2.0 USD por cada metro perforado, (3.69-1.69).

Los datos demuestran que, aunque el sistema TD40 puede tener un costo de adquisición mayor, su eficiencia operativa y protección de los activos (martillo) lo convierten en la opción técnica más rentable para perforación de precorte en esta unidad minera.

4.7. Resultados de la significancia estadística

Con el fin de comparar la hipótesis general, se utilizó la prueba T de Student para dos muestras con la suposición de que las varianzas son iguales. Este método estadístico es el más común para verificar si existe una diferencia significativa entre dos muestras experimentales.

La hipótesis nula para la investigación sostiene que no existe una diferencia en el costo de perforación al usar las brocas DHD340 y TD40, mientras que la alternativa sostiene que sí existe una diferencia en el costo entre ambas. Los hallazgos de la prueba T de Student revelaron que el p-valor fue inferior al nivel de significación (0.05), lo cual señala que se descarta la hipótesis nula y se aprueba la alternativa. Esta última establece que, por medio del reemplazo de la broca modelo DHD340 con el modelo TD40, se logró una disminución en los costos de perforación en perforaciones con martillo de fondo precorte en una mina superficial.

Tabla 4

Prueba T para dos muestras PDC con el modelo DHD340 y PDC con el modelo TD40

	<i>PDC Broca + Martillo DHD340</i>	<i>PDC Broca + Martillo TD40</i>
Media	3.69022126	1.62596082
Varianza	0.39593551	0.05483992
Observaciones	9	15
Varianza agrupada	0.17887468	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	22	
Estadístico t	11.5758081	
P(valor)	0.000000000791	
Valor crítico de t	2.07387307	

Nota. Elaboración propia

CONCLUSIONES



Primera. En cuanto a la Reducción del Costo Operativo Total, se cumplió el objetivo general al lograr una reducción del 54.20% en el Costo de Perforación Parcial (PDC) total. El sistema pasó de un costo promedio de \$3.69/m (con DHD340) a \$1.69/m (con TD40), lo que representa un ahorro directo de \$2.0 por cada metro perforado en el área de precorte. Se redujeron los costos de perforación significativamente, mostrando un pvalor menor al 0.05.

Segunda. En cuanto a la Optimización del PDC de la Broca, la implementación del modelo TD40 redujo el costo específico de la broca en un 53.01%. Los resultados demuestran que, el PDC promedio con el modelo DHD340 fue de 2.49; mientras que con la implementación del modelo TD40, el PDC fue de 1.17.

Tercera. En cuanto a la Optimización del PDC del Martillo, los resultados determinaron que, el sistema TD40 protege significativamente los componentes internos del martillo de fondo, reduciendo su PDC en un 55.83% (de \$1.20/m a \$0.53/m). Esto confirma que el diseño del vástago TD40 mejora la transmisión de energía de impacto y reduce el estrés mecánico por reflexión de onda.

Cuarta. El cambio tecnológico permitió un incremento en la productividad en el metraje mensual promedio. Esto demuestra que el sistema TD40 no solo es más económico, sino que incrementa la disponibilidad mecánica y el avance físico de las mallas de precorte.



Primera. Se recomienda la estandarización del sistema TD40, con la migración total y definitiva al sistema de brocas y martillos TD40 para todas las operaciones de precorte en la mina, dado que los datos de 15 meses (Oct-23 a Dic-24) demuestran una estabilidad de costos superior al sistema tradicional.

Segunda. Dado que la TD40 tiene un rendimiento elevado, se aconseja llevar a cabo entrenamientos sobre el afilado de brocas e instaurar un programa de capacitación para los operadores en cuanto al momento más adecuado para afilar. Conservar la forma de los botones de carburo de tungsteno podría disminuir aún más el PDC.

Tercera. Se recomienda realizar monitoreos de la presión de aire, supervisando que las perforadoras operen en los rangos de presión recomendados para el martillo TD40 (350-450 PSI), para evitar el desgaste prematuro del cuerpo de la broca y asegurar que el ahorro se mantenga constante.

Cuarta. Se recomienda realizar un análisis de desviación de taladros, dado que, la TD40 mostró un mejor desempeño mecánico, sería valioso realizar un estudio complementario sobre la desviación de los taladros de precorte, lo cual podría generar ahorros adicionales en el factor de carga de explosivos y la estabilidad de las paredes del tajo. Finalmente, sugerir documentar y publicar estos resultados para la comunidad minera, como aporte a mejores prácticas en la selección y uso de brocas en perforaciones superficiales.

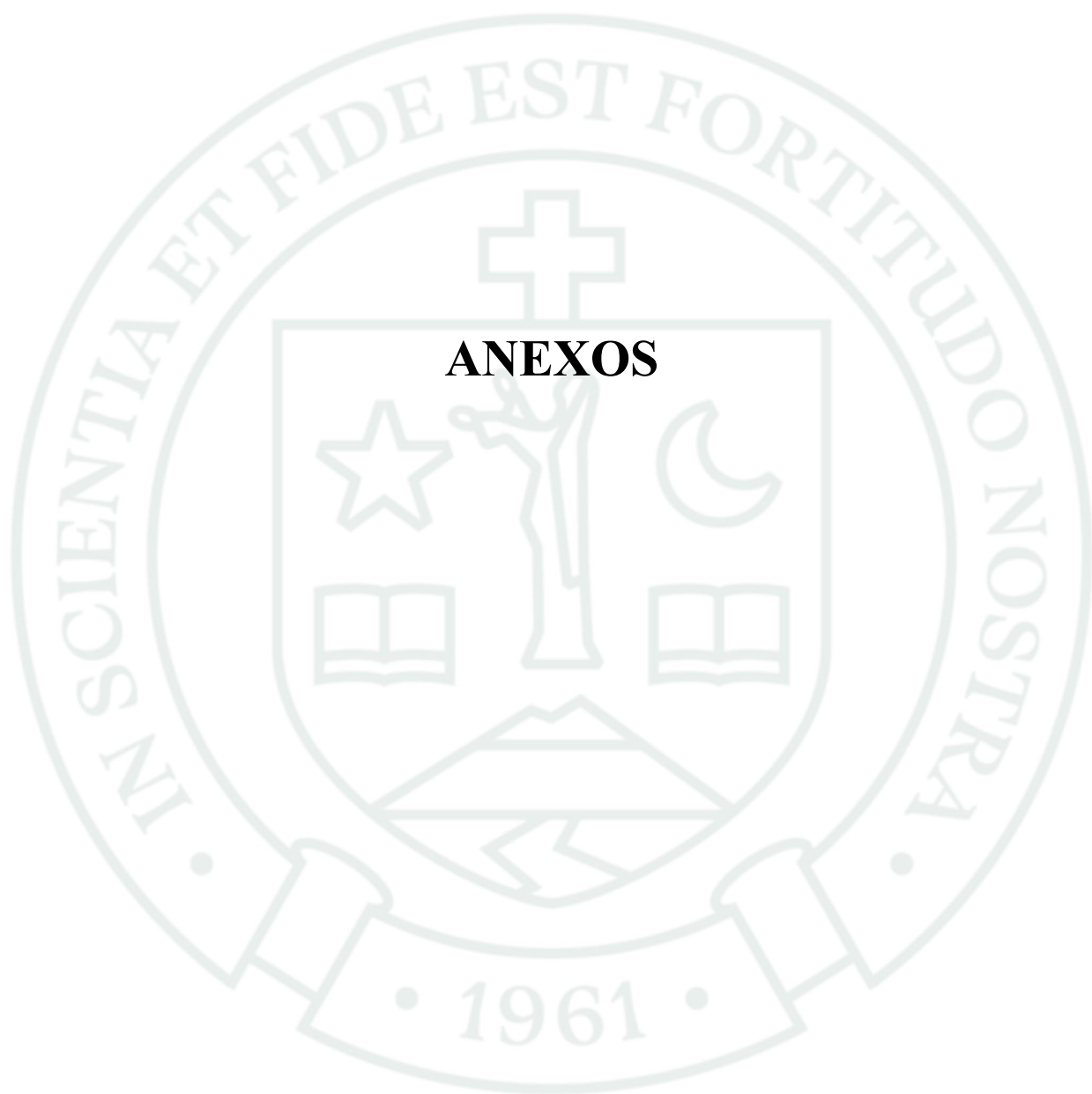


REFERENCIAS

- Adebayo, B., & Akande, J. M. (2015). Analysis of Button Bit Wear and Performance of Down-The-Hole Hammer Drill. *Ghana Mining Journal*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.4314/gm.v15i2>
- Altamirano Cueva, H. M., & Santamaria Valencia, O. M. (2019). *Optimización del costo de perforación para aceros DTH en la mina modelo a tajo abierto, Huamachuco, 2018* [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21220>
- Camarena Cosme, D. A. (2012). Optimización de las brocas de 38,45mm y del sistema de perforación, con fines de disminuir costos en la UEA SEMIGLO de la empresa minera Atacocha S.A.
- Cao, P.-L., Cao, H.-Y., Cao, J.-E., Wen, C.-D., Chen, B.-Y., & Yao, S.-S. (2023). Performance of large-diameter pneumatic down-the-hole (DTH) hammers: A focus on influences of the hammer structure. *Petroleum Science*, 20(4), 2399-2412. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.028>
- De La Cruz Rivas, A. W., & Oré Barja, J. J. (2020). Implementación de la herramienta digital “Dashboard” en el control de las operaciones de producción y desarrollo en la Empresa Contratista Minera Miro Vidal y CÍA.S.A.C - Mina Animón.
- Doblon. (2025). Martillo DHD 340. Obtenido de <https://doblon.com.co/producto/martillo-de-fondo-dhd-340/>
- Drillco. (2023). *Drillco Brill Bits* [Sitio web]. Drillco Brill Bits. <https://www.drillco.com/our-products/drill-bits>
- Drillco. (2022). *Parámetros óptimos de operación para martillos DTH*. Drillco.
- Fabricante de equipos de afilado de brocas CME. (s.f.). Retrieved from <http://www.occidentalds.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/VS-220-HD-SP.pdf>
- Guizhou Vilong Equipment Co., Ltd. (2023). *Martillos DTH, Martillos en fondo | Guizhou Vilong Equipment Co.,Ltd.* Herramientas de Perforación DTH. <https://es.rotarypercussivedrill.com/Products/Martillos-DTH.html>
- Huatuco Sovero, C. Y. (2019). Influencia de la supervisión de las brocas de botones para evaluar su vida útil en la Unidad Minera Colquijirca-Sociedad Minera El Brocal S.A.A.

- Huatuco Sovero, C. Y. (2019). Influencia de la supervisión de las brocas de botones para evaluar su vida útil en la Unidad Minera Colquijirca-Sociedad Minera El Broca1 S.A.A.
- JP Representaciones. (2025). Martillo DHD 340. Obtenido de <https://jgrepresentaciones.com.co/home/index.php/producto/martillo-de-fondo-dhd-340-dhd340-dth-martillo-x-2-3-8api-reg-thread/>
- Mohd Sohail, K. S., Belladi Sharath, S., Kotla Kiran Kumar, C., & Sainath, Mr. M. (2021). Design Optimization and Analysis of Piston, Drill Bit for Rock Drill. *International Journal of Merging Technology and Advanced Research in Computing*, 9(34). <http://ijmtarc.in/Papers/Current%20Papers/IJMTARC-210602.pdf>
- Ortiz Brioso, Y. W. (2019). Control de aceros de perforación de jumbos para su optimización y reducción de costos en la Compañía Minera Casapalca S.A.
- Portal Carrasco, W. N., & Lozano Tirado, R. (2020). *Implementación de martillos y brocas rock 66 para incrementar la producción de taladros y reducir costos de perforación en una empresa minera de la mediana minería en Cajamarca* [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24113>
- Prodrill. (2025). Obtenido de <https://www.rock-drill-bits.com/es/dth-hammer/dhd340-dhd350-dth-hammer.html>
- Sandvik. (2022, junio 29). *Leopard™ DI550 Equipo de perforación con martillo de fondo/Sandvik DI550 Perforadora con martillo de fondo (DTH) y motor diésel* [Hoja Técnica]. Leopard™ DI550. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforaci%C3%B3n-de-superficie/leopard-di550-equipo-de-perforaci%C3%B3n-con-martillo-de-fondo--dth/>
- Sandvik. (2023). *Brocas DTH* [Brochure]. Brocas DTH. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/herramientas-de-perforaci%C3%B3n/herramientas-de-perforaci%C3%B3n-de-martillo-de-fondo/brocas-dth/>
- Sinche G., L. (2022). Training drill steel.
- Sollroc Drilling Tools. (2025). Martillo TD40. Obtenido de <https://spanish.dth-tools.com/quality-11223495-4-inch-dth-hammer-drilling-cop44-dhd340-sd4-ql40-m40-td40-mach44-down-the-hole>
- Torres Fidel, L. (2022). Afilado de brocas – criterio de descarte Cia Minera Huarón.

- Urquiza Apaza, H. E. (2019). Análisis del consumo de barrenos y brocas en corporación minera Ananea S.A.
- Vallejos Copacati, K. M. (2022). *Optimización del proceso de perforación down the hole dth precorte a través de un estudio comparativo de brocas*. [Informe de examen profesional, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/372>
- Wontech. (2025). TD40 - 115F8A: Proyecto de pozo geotérmico de Rototec. Obtenido de <https://www.wontech-drill.com/es/td40---115f8a-drill-bit-rototecs-geothermal-well-project>
- Yañez. (2018). Informe de prácticas preprofesionales.
- Zhang, S. (2018). *Economics of Rotary vs. DTH Drilling* [Master's Thesis, Montanuniversität Leoben]. Publications and Theses. <https://pure.unileoben.ac.at/en/publications/economics-of-rotary-vs-dth-drilling>



ANEXOS

Anexo 1. Base de datos

Anexo 1 Base de datos

Periodo	BROCAS			BROCAS			MARTILLO			MARTILLO		
	DHD340		PDC Brocas DHD340	TD40		PDC Brocas TD40	DHD340		PDC Martillo DHD340	TD40		PDC Martillo TD40
	Longitud de perforación Brocas DHD340	Costo de perforación Brocas DHD340		Longitud de perforación Brocas TD40	Costo de perforación Brocas TD40		Longitud de perforación Martillo DHD340	Costo de perforación Martillo DHD340		Longitud de perforación Martillo TD40	Costo de perforación Martillo TD40	
Ene-23	5,548	13,500	2.4	0.0	0	0.0	8,202	5,680	0.7	0	0	0.0
Feb-23	4,732	14,000	3.0	0.0	0	0.0	6,530	8,520	1.3	0	0	0.0
Mar-23	4,903	11,000	2.2	0.0	0	0.0	6,985	9,400	1.3	0	0	0.0
Abr-23	8,518	21,000	2.5	0.0	0	0.0	8,816	8,520	1.0	0	0	0.0
May-23	6,937	19,500	2.8	0.0	0	0.0	6,176	5,680	0.9	0	0	0.0
Jun-23	5,378	15,500	2.9	0.0	0	0.0	2,574	5,680	2.2	0	0	0.0
Jul-23	7,174	17,500	2.4	0.0	0	0.0	8,423	8,520	1.0	0	0	0.0
Ago-23	9,469	19,000	2.0	0.0	0	0.0	13,202	14,200	1.1	0	0	0.0
Set-23	8,997	19,500	2.2	0.0	0	0.0	6,650	8,520	1.3	0	0	0.0
Oct-23	0	0	0.0	1,291.7	500	0.4	0	0	0.0	9,877	8,520	0.9
Nov-23	0	0	0.0	9,419.7	15,000	1.6	0	0	0.0	14,697	11,360	0.8
Dic-23	0	0	0.0	16,861.4	18,500	1.1	0	0	0.0	13,560	5,680	0.4
Ene-24	0	0	0.0	14,848.1	15,491	1.0	0	0	0.0	16,446	8,712	0.5
Feb-24	0	0	0.0	13,925.6	15,668	1.1	0	0	0.0	15,401	7,602	0.5
Mar-24	0	0	0.0	14,258.4	17,253	1.2	0	0	0.0	14,275	6,772	0.5
Abr-24	0	0	0.0	13,935.5	16,430	1.2	0	0	0.0	13,500	5,745	0.4
May-24	0	0	0.0	15,833.7	16,311	1.0	0	0	0.0	15,346	7,570	0.5
Jun-24	0	0	0.0	11,848.1	13,489	1.1	0	0	0.0	16,446	5,712	0.3
Jul-24	0	0	0.0	12,670.5	14,370	1.1	0	0	0.0	17,341	9,649	0.6
Ago-24	0	0	0.0	14,848.1	16,547	1.1	0	0	0.0	16,446	8,712	0.5

Periodo	BROCAS			BROCAS			MARTILLO			MARTILLO		
	DHD340		PDC Brocas DHD340	TD40		PDC Brocas TD40	DHD340		PDC Martillo DHD340	TD40		PDC Martillo TD40
	Longitud de perforación Brocas DHD340	Costo de perforación Brocas DHD340		Longitud de perforación Brocas TD40	Costo de perforación Brocas TD40		Longitud de perforación Martillo DHD340	Costo de perforación Martillo DHD340		Longitud de perforación Martillo TD40	Costo de perforación Martillo TD40	
Set-24	0	0	0.0	16,925.6	16,724	1.0	0	0	0.0	15,401	7,602	0.5
Oct-24	0	0	0.0	11,509.5	13,606	1.2	0	0	0.0	13,334	5,726	0.4
Nov-24	0	0	0.0	11,848.1	13,783	1.2	0	0	0.0	16,446	8,712	0.5
Dic-24	0	0	0.0	17,770.5	19,664	1.1	0	0	0.0	17,841	9,649	0.5

Nota. Elaboración propia



DHD340	TD40	DHD340	TD40	DHD340	TD40
Longitud de perforación Broca + Martillo DHD340	Longitud de perforación Broca + Martillo TD40	Costo de perforación Broca + Martillo DHD340	Costo de perforación Broca + Martillo TD40	PDC Broca + Martillo DHD340	PDC Broca + Martillo TD40
13,750	0	19,180	0	3.1	0.0
11,262	0	22,520	0	4.3	0.0
11,887	0	20,400	0	3.6	0.0
17,334	0	29,520	0	3.4	0.0
13,114	0	25,180	0	3.7	0.0
7,952	0	21,180	0	5.1	0.0
15,596	0	26,020	0	3.5	0.0
22,671	0	33,200	0	3.1	0.0
15,646	0	28,020	0	3.4	0.0
0	11,169	0	9,020	0.0	1.2
0	24,117	0	26,360	0.0	2.4
0	30,421	0	24,180	0.0	1.5
0	31,294	0	24,202	0	1.6
0	29,326	0	23,270	0	1.6
0	28,533	0	24,025	0	1.7
0	27,436	0	22,175	0	1.6
0	31,180	0	23,882	0	1.5
0	28,294	0	19,200	0	1.5
0	30,011	0	24,019	0	1.7
0	31,294	0	25,259	0	1.6
0	32,326	0	24,327	0	1.5
0	24,844	0	19,332	0	1.6
0	28,294	0	22,495	0	1.7
0	35,611	0	29,314	0	1.6

Nota. Elaboración propia