



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

“DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN  
PARA OPTIMIZAR ESTA OPERACIÓN UNITARIA EN MINA  
MODELO A TAJO ABIERTO, CAJAMARCA – PERÚ, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

**Autor (es):**

Bach. Ángel Antonio Llaique Nuñoncca

Bach. William Orlando Sánchez Guevara

**Asesor:**

Mg. Ing. José Alfredo Siveroni Morales

Cajamarca – Perú

2015



COPYRIGHT ©2015 BY

**Ángel Antonio Llaque Nuñoncca**

**William Orlando Sánchez Guevara**

---

Todos los Derechos Reservados.



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

“DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN  
PARA OPTIMIZAR ESTA OPERACIÓN UNITARIA EN MINA  
MODELO A TAJO ABIERTO, CAJAMARCA – PERÚ, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

**Autor (es):**

Bach. Ángel Antonio Llaique Nuñoncca

Bach. William Orlando Sánchez Guevara

**Asesor:**

Mg. Ing. José Alfredo Siveroni Morales

Cajamarca – Perú

2015

## **APROBACIÓN DE LA TESIS**

El(La) asesor(a) y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los Bachilleres: **Ángel Antonio Llaique Nuñoncca** y **William Orlando Sánchez Guevara**, denominada:

**“DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN PARA  
OPTIMIZAR ESTA OPERACIÓN UNITARIA EN MINA MODELO  
A TAJO ABIERTO, CAJAMARCA – PERÚ, 2015”**

---

Ing. José Alfredo Siveroni Morales  
**ASESOR**

---

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León  
**JURADO**  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Roberto Severino Gonzáles Yana  
**JURADO**

---

Ing. Miguel Ulises Aquino Jave  
**JURADO**

## DEDICATORIA

*A mis padres: Mario y Flora quienes con su enseñanza hicieron de mí. Un hombre justo y responsable y a mi querida niña Wendy, a quien quiero con el corazón y a mis hermanos por su apoyo incondicional.*

Angel Antonio Llaique Nuñoncca

*Mientras siga marchando en mi carrera, y por ese inmenso amor que merecen a: Dylan Salvador Amir – fuente de vida, creatividad y heredero de un grano del vasto conocimiento que poseo-, a mi esposa Jenny, y a mis padres Teodelinda y Segundo. A toda mi familia, maestros y amigos que brindan motivación e inspiración para recorrer grandemente una vida de éxito y bienestar pleno.*

William Orlando Sánchez Guevara

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Privada del Norte, nuestra alma mater y de manera particular a los docentes de la Carrera Profesional de Ingeniería de Minas por habernos impartido sus conocimientos valiosos para el aprendizaje y logro de la especialidad.

Así mismo, queremos expresar nuestro reconocimiento y gratitud al Ing. Telly Christian Zúñiga Infante, quién patrocinó la elaboración de esta tesis. Hacemos extensivo el agradecimiento al Ing. José Siveroni Morales y a todas las personas involucradas en el desarrollo del presente trabajo que colaboraron con su apoyo moral desinteresado.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xiii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	xiv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
PRESENTACIÓN .....	xviii
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.    Realidad problemática.....	2
1.2.    Formulación del problema.....	3
1.2.1.    Problema general .....	3
1.2.2.    Problemas específicos .....	3
1.3.    Justificación del problema .....	3
1.3.1.    Justificación teórica .....	3
1.3.2.    Justificación aplicativa o práctica .....	3
1.3.3.    Justificación valorativa.....	3
1.3.4.    Justificación académica. ....	4
1.4.    Limitaciones.....	4
1.5.    Objetivos.....	4
1.5.1.    Objetivo general .....	4
1.5.2.    Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1.    Antecedentes.....	7
2.2.    Bases teóricas .....	8
2.2.1.    Teoría de perforación en rocas .....	8
2.2.1.1.    Conceptualización y tipología fundamental de perforación en roca en minería superficial .....	8
2.2.1.2.    Descripción general de las perforadoras rotativas.....	9
2.2.1.3.    Parámetros de perforación, prácticas operativas .....	10
2.2.1.4.    Velocidad de penetración.....	13
2.2.1.5.    Descripción de la perforadora Pit Viper 271 .....	14

2.2.1.6.	Broca tricónica.....	16
2.2.1.7.	Evaluación del desgaste de las brocas tricónicas .....	20
2.2.1.8.	Uso del aire en la perforación rotativa .....	21
2.2.1.9.	Mecanismo de rotura de la roca.....	23
2.2.1.10.	Profundidad de corte .....	25
2.2.2.	Costo total de perforación .....	27
2.2.2.1.	Estructura del costo de perforación .....	28
2.2.2.2.	Costo total de perforación .....	31
2.3.	Definición de términos básicos.....	32
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES DE MINA MODELO.....		36
3.1.	Ubicación y acceso.....	37
3.2.	Clima, fauna y vegetación .....	38
3.3.	Geología local y regional.....	38
3.3.1.	Estratigrafía sedimentaria y volcánica regional .....	38
3.3.2.	Basamento cretáceo.....	38
3.3.2.1.	Grupo calipuy.....	39
3.3.3.	Geología estructural .....	39
3.3.4.	Alteraciones hidrotermales.....	40
3.3.5.	Mineralización epitermal.....	40
3.4.	Ingeniería.....	41
3.4.1.	Geotecnia .....	41
3.4.1.1.	Propiedades de los suelos y rocas.....	41
3.5.	Antecedentes de costos totales de perforación .....	44
CAPÍTULO IV: HIPÓTESIS.....		47
4.1.	Formulación de la hipótesis.....	48
4.2.	Operacionalización de variables .....	48
4.2.1.	Variable independiente.....	48
4.2.2.	Variable dependiente.....	48
CAPÍTULO V: MATERIALES Y MÉTODOS .....		50
5.1.	Tipo de diseño de investigación .....	51
5.2.	Material de estudio .....	51
5.2.1.	Población .....	51
5.2.2.	Muestra.....	51
5.2.3.	Unidad de estudio.....	51
5.3.	Técnicas, procedimientos e instrumentos.....	51
5.3.1.	Procedimiento previo a la recolección de datos .....	52
5.3.1.1.	Estado de las perforadoras .....	52

5.3.2.	Procedimiento de recolección de datos .....	53
5.3.3.	Fase para procesar datos .....	55
5.3.4.	Fase de optimización de costos en perforación.....	55
5.3.5.	Equipos e instrumentos .....	55
5.3.5.1.	Equipo de medición de peso (pulldown) .....	56
5.3.5.2.	Equipo de medición de presión de aire.....	57
CAPÍTULO VI: DESARROLLO DE ACTIVIDADES .....		59
6.1.	Área de perforación y voladura .....	60
6.1.1.	Proceso de perforación y voladura .....	60
6.2.	Descripción y análisis de pruebas de campo.....	60
6.2.1.	Estado de las perforadoras .....	61
6.2.1.1.	Mediciones peso (pulldown).....	61
6.2.1.2.	Mediciones de presión de aire. ....	63
6.2.2.	Perforaciones realizadas.....	66
6.2.2.1.	Inicio de perforación. ....	66
6.2.2.2.	Determinación del TDC .....	68
6.2.2.3.	Determinación del descarte oportuno (momento óptimo) de la broca.....	68
6.2.2.4.	Perforaciones realizadas en campo (tajos de la Mina Modelo) con las doce brocas tricónicas durante su vida útil.....	70
CAPÍTULO VII: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		107
7.1.	Controles estadísticos y gráficos de costos totales de perforación .....	108
7.1.1.	Resumen de las brocas tricónicas .....	108
7.1.1.1.	Costo total de perforación para diferentes tipos de terrenos.....	110
7.1.2.	Reducción del costo total de perforación .....	111
7.2.	Mejoras de productividad (12 brocas PDB Tools. Inc.).....	114
7.3.	Comparación del TDC obtenido en la investigación y TDC histórico .....	116
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		117
8.1.	Conclusiones .....	117
8.2.	Recomendaciones .....	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		120
ANEXOS .....		124

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla N° 2.1. Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración.
- Tabla N° 2.2. Velocidad de rotación de acuerdo al tipo de roca.
- Tabla N° 2.3. Evaluación del desgaste según IADC.
- Tabla N° 3.1. Relación entre dureza y resistencia a la compresión uniaxial (ISRM).
- Tabla N° 3.2. Propiedades geomecánicas de rocas presentes en Mina Modelo.
- Tabla N° 3.3. Costo total de perforación en diferentes terrenos de Mina Modelo.
- Tabla N° 4.1. Matriz operacionalización de variables.
- Tabla N° 5.1. Especificaciones Pit Viper 271.
- Tabla N° 5.2. Equipos de perforación.
- Tabla N° 5.3. Brocas tricónicas con inserto de carburo de tungsteno.
- Tabla N° 6.1. Valores de Pulldown de acuerdo al diámetro y modelo.
- Tabla N° 6.2. Reporte de medición de Pulldown (Atlas Copco).
- Tabla N° 6.3. Valores de medición de Pulldown en cada perforadora.
- Tabla N° 6.4. Reporte de medición de presión de aire (Atlas Copco).
- Tabla N° 6.5. Resultados de la mediciones de presión de aire.
- Tabla N° 6.6. Parámetros de perforación máximos para operadores de Pit Viper 271.
- Tabla N° 6.7. Doce brocas con número de serie y modelo.
- Tabla N° 6.8. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°01.
- Tabla N° 6.9. Reporte de broca tricónica N°01.
- Tabla N° 6.10. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°02.
- Tabla N° 6.11. Reporte de broca tricónica N°02.
- Tabla N° 6.12. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°03.
- Tabla N° 6.13. Reporte de broca tricónica N°03.
- Tabla N° 6.14. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°04.
- Tabla N° 6.15. Reporte de broca tricónica N°04.
- Tabla N° 6.16. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°05.
- Tabla N° 6.17. Reporte de broca tricónica N°05.
- Tabla N° 6.18. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°06.
- Tabla N° 6.19. Reporte de broca tricónica N°06.
- Tabla N° 6.20. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°07.
- Tabla N° 6.21. Reporte de broca tricónica N°07.
- Tabla N° 6.22. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°08.
- Tabla N° 6.23. Reporte de broca tricónica N°08.

- Tabla N° 6.24. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°09.
- Tabla N° 6.25. Reporte de broca tricónica N°09.
- Tabla N° 6.26. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°10.
- Tabla N° 6.27. Reporte de broca tricónica N°10.
- Tabla N° 6.28. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°11.
- Tabla N° 6.29. Reporte de broca tricónica N°11.
- Tabla N° 6.30. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N°12.
- Tabla N° 6.31. Reporte de broca tricónica N°12.
- Tabla N° 7.1. Resumen de todas las brocas tricónicas.
- Tabla N° 7.2. Selección de dos brocas de diferentes tipos de terrenos.
- Tabla N° 7.3. Mejores en la productividad de perforación.
- Tabla N° 7.4. Promedio de TDC (año 2006 vs 2012 – 2013).
- Tabla N° 7.5. Ahorro mensual y anual del TDC (promedio año 2006 vs 2012 – 2013).

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Tipos de perforadoras.

Figura N° 2.2. Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración.

Figura N° 2.3. Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad.

Figura N° 2.4. Perforación Pit Viper 271.

Figura N° 2.5. Perforación automática, cabina Pit Viper 271.

Figura N° 2.6. Elementos de la broca tricónica.

Figura N° 2.7. Columna 3 (D), describe las características principales de la falla.

Figura N° 2.8. Pasos de rotura de la roca.

Figura N° 2.9. Exceso de peso.

Figura N° 3.1. Ubicación geográfica de la Mina Modelo.

Figura N° 4.1. Matriz operacionalización de variables.

Figura N° 5.1. Equipo de medición de peso o Pulldown.

Figura N° 5.2. Equipo de medición de presión de aire.

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 3.4. Costo Total de Perforación por dureza con diámetro 10 5/8”.

Gráfico N° 6.1. Formato de malla de perforación de producción.

Gráfico N° 6.2. Costo por metro perforado a través del tiempo.

Gráfico N° 6.3. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°01.

Gráfico N° 6.4. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°02.

Gráfico N° 6.5. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°03.

Gráfico N° 6.6. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°04.

Gráfico N° 6.7. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°05.

Gráfico N° 6.8. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°06.

Gráfico N° 6.9. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°07.

Gráfico N° 6.10. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°08.

Gráfico N° 6.11. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°09.

Gráfico N° 6.12. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°10.

Gráfico N° 6.13. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°11.

Gráfico N° 6.14. Efecto del ROP en el TDC de la broca tricónica N°12.

Gráfico N° 7.1. TDC de las doce brocas en función de los diferentes tipos de terrenos.

Gráfico N° 7.2. Comparación de la influencia del ROP de las broca tricónica 3 y 8 del mismo modelo.

Gráfico N° 7.3. Comparación de la influencia del ROP de las broca tricónica 5 y 9 del mismo modelo.

Gráfico N° 7.4. Comparación de la influencia del ROP de las broca tricónica 6 y 11 del mismo modelo.

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Abreviatura/ símbolo	Definición
A:	Área.
B:	Precio de la broca.
BHMT:	Baker Hughes Mining Tools.
CFM.:	Pies cúbicos por minuto.
D:	Costo horario de la perforadora
DOC.:	Profundidad de corte.
EX 722; 712; 532:	Modelos de brocas.
fpm:	Pie por minuto.
ft:	Pie.
ft/lb:	Pie por libra.
h:	Hora.
H <sub>E</sub> :	Horas efectivas de perforación.
H <sub>i</sub> :	Horas de trabajo.
ISRM.:	Clasificación de dureza de roca.
kg:	Kilogramo.
lb:	libra.
m:	Metro lineal.
M:	Total de metros perforados por la broca tricónica.
Mpa:	Mega Pascales.
Nm:	Nanómetro.
PDB Tools. Inc.:	Marca de broca tricónica de tungsteno.
PDC:	Costo parcial de perforación.
psi:	Libras por pulgada cuadrada
pulg:	Pulgada.
PV 271:	Pit Viper 271. Perforadora rotativa de Atlas Copco.
Q:	Caudal de aire.
RCS.:	Sistema de control de equipo computarizado.
ROP:	Velocidad de penetración.
RPM:	Revolución por minuto.
R <sub>T</sub> .:	Recorrido del tricono.

SCFM.:	Pies cúbicos estándar por minuto.
SM.:	Roca del tipo Sílice Masiva.
t:	Tiempo.
T:	Tiempo de operación del tricono.
TCl.:	Insertos de carburo de Tungsteno.
TDC.:	Costo Total de Perforación.
TR:	Total de revolución.
UCS:	Resistencia a la compresión.
V:	Velocidad de aire.
W:	Trabajo realizado por la broca.
WOB:	Peso sobre la broca o pulldown.

## RESUMEN

La investigación fue realizada en Mina Modelo ubicada en el departamento de Cajamarca, en labores de desarrollo, preparación y en tajos, en la perforación de rocas.

La investigación tiene como objetivo principal determinar el Costo Total de Perforación (TDC), que permita la optimización de esta operación unitaria en Mina Modelo.

Las pruebas de campo se realizaron en diferentes tajos de la mina. Los equipos y herramientas que se utilizaron son perforadoras de modelo PIT Viper 271 de la marca Atlas Copco y brocas tricónicas PDB Tools Inc. de diámetro 10 5/8" cuyos Modelos son EX 722 (para terreno duro), EX 712 (para terreno medio), EX 532 (para terreno medio a suave), que son materia de estudio de esta investigación durante el año 2012 – 2013.

Para realizar las pruebas de campo con las brocas tricónicas, fue necesario conocer el estado de los principales sistemas de estas nuevas perforadoras en las cuales se hicieron mediciones de presión de aire y de peso (pulldown), para de esta manera corroborar si están en la capacidad de perforar con un diámetro de 10 5/8", lo cual es materia de estudio.

La investigación analizó y evaluó una muestra de doce perforaciones aleatorias con los diferentes modelos de brocas, líneas arriba mencionadas para determinar la reducción del costo total de perforación (TDC); esto se logró con las nuevas tecnologías de brocas, las cuales son más resistentes al incremento significativo de la velocidad de penetración, además se suma a ello la correcta aplicación de los parámetros de perforación, reduciendo al TDC en 21.42% y 19.45% en terrenos duros y medio a suave respectivamente. Por lo tanto estos modelos de brocas han dado buenos resultados, sobre todo en terrenos duros, ya que este presenta el costo más alto.

**PALABRAS CLAVES:** Brocas tricónicas, costo total de perforación (TDC), optimización, perforadoras, parámetros de perforación, tajos y velocidad de penetración.

## ABSTRACT

This research was realized in Pattern Mine located in the Cajamarca city, in the development of this work, preparation and in the pits, which respect at the drilling of rocks.

The research has as main objective to determine the Total Drilling Cost (TDC), which allows the optimization of this unit operation in Pattern Mine.

Field tests were realized in different pits of the mine, following the schedule, without hampering or delaying the production of the mine. The equipment and tools were used drills PIT Viper 271 from brand Atlas Copco and tricone bits PDB Tools Inc. diameter 10 5/8" whose models are EX 722 (for hard ground), EX 712 (for middle ground ), EX 532 (for medium to soft ground), which is subject of this research during the year 2012-2013.

To perform field tests with tricone bits, it was necessary to know the state of the main systems of these new drills, in which we were measured the air pressure and weight (pulldown), to confirm corroborate if they are able to drill with a diameter of 10 5/8", which is the subject of study.

The research analyzed and tested a random sample of twelve holes with different models of bits, that we were mentioned lines above, to determine the reduction of total cost of drilling (TDC); this was achieved with the new technologies of bits, which are more resistant to increase significantly of the penetration speed, it also adds the proper application of the drilling parameters, reducing the TDC at 21.42% and 19.45% on hard ground medium and soft respectively. Therefore, these models have been successful drills, especially on hard ground, as this has the highest cost.

**KEY WORDS:** Tricone bits, Total Drilling Cost (TDC), optimization, drills, drilling parameters, penetration speed.

# PRESENTACIÓN

La presente tesis Titulada: “Determinación del costo total de perforación para optimizar esta operación unitaria en Mina Modelo a tajo abierto, Cajamarca – Perú, 2015”.

Capítulo I. Generalidades de la investigación.

Capítulo II. Marco teórico.

Capítulo III. Descripción y generalidades de Mina Modelo.

Capítulo IV. Hipótesis y operacionalización de variables.

Capítulo V. Materiales y métodos.

Capítulo VI. Desarrollo de actividades.

Describe el proceso de perforación.

- ✓ Análisis de la prueba de campo.
- ✓ Descripción de las doce perforaciones en estudio.

Capítulo VII. Resultados y discusión

Análisis de los indicadores en la perforación unitaria.

- ✓ Análisis del costo total de perforación para diferentes tipos de terrenos.
- ✓ Análisis del ROP en la reducción del TDC.
- ✓ Análisis de la optimización en operación unitaria.
- ✓ Análisis de ahorro de costo de perforación.

Capítulo VIII. Conclusiones y recomendaciones.

**CAPÍTULO I:**  
**GENERALIDADES DE LA**  
**INVESTIGACIÓN**

## 1.1. Realidad problemática

Debido a la reducción en el precio de los metales en aproximadamente el 10%, las mineras del mundo, las del Perú y las empresas mineras ubicadas en la provincia de Cajamarca no han sido la excepción de sufrir este fenómeno, es por ello que están comenzando a reducir sus costos de sus operaciones.

La problemática surge al detectar que en los últimos meses del 2011 y primeros meses del año 2012, en el área de perforación y voladura de Mina Modelo se observa un decrecimiento en su producción como operación unitaria respecto de los últimos meses del 2010 e inicios del 2011. Al hacer el seguimiento, se detecta que hay desgastes prematuros de brocas tricónicas en los tajos diversos de la mina, por lo cual esta condición no era favorable para lograr los objetivos de producción de Mina Modelo como de la parte de la operación unitaria de la misma. El análisis de la problemática se trabajó con un equipo multidisciplinario que abarcó las áreas de Planeamiento, Geología, Geotecnia, Ingeniería de Perforación & Voladura y Procesos. Cada área aportó uno o dos expertos que se encargaron de analizar y controlar sus indicadores en sus áreas respectivas, pero en especial el área correspondiente al de perforación y voladura.

Actualmente la Mina Modelo en Cajamarca busca una mayor productividad con la finalidad de ser más competitiva en un mercado donde el producto final tiene un precio ya establecido en el mercado internacional. Por lo cual, en el área de perforación de esta mina y con las nuevas tecnologías de brocas tricónicas de tungsteno y teniendo como base la fórmula de Costo Total de Perforación (según fórmula del TDC), este se verá reducido cuando uno de los factores de mayor incidencia mejore y de esta manera permita la optimización la cual tendrá un gran impacto en el TDC, lográndose así que la empresa obtenga una mayor productividad y una mejora en sus costos de operación.

Los factores que intervienen en el costo total de perforación (TDC) son: metros perforados por el tricono, precio de la broca, costo horario de la perforación y la velocidad de penetración, este último factor que al incrementar en los diferentes terrenos operativos, probablemente permitirá reducir el TDC y la optimización en esta operación unitaria.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo influyen económicamente los factores que intervienen en el Costo Total de Perforación (fórmula del TDC), para optimizar esta operación unitaria de Mina Modelo a tajo abierto, Cajamarca – Perú, 2015?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cuál (es) / cuáles (son) los factores de la fórmula del Costo Total de Perforación que tienen mayor incidencia en la reducción del TDC, en Mina Modelo?
- b) ¿En cuánto se reducirán los costos de perforación al evaluar los factores del TDC al utilizar una broca con diámetro 10 5/8” en condiciones geológicas presentes en Mina Modelo?
- c) ¿Cómo comprobar que en perforación unitaria, el TDC brinde la mayor productividad y la vida útil de la broca en Mina Modelo?

## **1.3. Justificación del problema**

### **1.3.1. Justificación teórica**

La presente investigación, tiene por finalidad contribuir con la ampliación de información existente sobre el proceso de perforación a tajo abierto en minería porque esta información no está documentado pese a que muchas unidades mineras lo aplican en los procesos operacionales de perforación teniendo como base la información de sus proveedores.

### **1.3.2. Justificación aplicativa o práctica**

El desarrollo de la presente investigación tiene por finalidad optimizar costos en el proceso de perforación a tajo abierto en la empresa Mina Modelo.

### **1.3.3. Justificación valorativa**

El desarrollo de la presente investigación tiene por finalidad el fortalecimiento de la industria minera metálica y no metálica, de lograrse la reducción del TDC en la perforación unitaria, el impacto en el campo minero

sería notorio porque el TDC es significativo en la productividad de una actividad minera. Es decir con el desarrollo de este trabajo de investigación se contribuirá al mejoramiento de procesos de perforación, el cual creará valor en las empresas, ayudará en la toma de decisiones, etc.

#### **1.3.4. Justificación académica.**

El fin del desarrollo de este trabajo de investigación es obtener el título profesional de Ingeniero de Minas.

### **1.4. Limitaciones**

El presente trabajo de investigación se basa en la reducción del TDC para optimizar los costos operativos en la Mina Modelo. La investigación se limita por los siguientes aspectos que a continuación se precisan:

- ✓ Según la investigación en la región Cajamarca, hasta la actualidad no existen trabajos, documentos empíricos o tratados científicamente relacionados con el tema de nuestro proyecto; por lo tanto, no se puede hacer comparaciones profundas con situaciones detectadas con anterioridad, de manera que los resultados tendrán validez solo para el ámbito de estudio.
- ✓ Otra dificultad es netamente técnica para la medición de las características presentadas en la perforación a tajo abierto, ya que se requiere realizar una experimentación propiamente dicha.

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar la influencia económica de los factores que intervienen en el Costo Total de Perforación (TDC), que permita la optimización de esta operación unitaria en Mina Modelo a tajo abierto.

#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- ✓ Determinar los factores que intervienen en el TDC y cuál de éstos, tienen mayor incidencia en la reducción del TDC.

- ✓ Seleccionar modelos de brocas, las cuales se probarán en una determinada formación geológica de la Mina Modelo.
- ✓ Determinar el TDC en base a las mediciones realizadas en la perforación para la optimización de la operación unitaria en Mina Modelo.

**CAPÍTULO II:**  
**MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Antecedentes

La perforación de rocas como actividad unitaria en una explotación minera superficial o subterránea, depende de varios factores para que ésta pueda ser productiva y eficiente, con un TDC razonable.

Hasta 1949, la mayor parte de los barrenos para voladura eran realizados mediante perforadoras a rotopercusión y sólo en el caso de rocas muy blandas era aplicable la perforación a rotación mediante brocas de corte o trépanos. La apertura en Estados Unidos de grandes explotaciones de carbón a cielo abierto, con espesores de recubrimiento que alcanzaban hasta 40 m, y la aparición en el mercado de un explosivo a granel barato y de gran eficiencia energética como el ANFO, fueron acontecimientos que impulsaron a los fabricantes de perforadoras a diseñar equipos de gran capacidad, capaces de alcanzar elevadas velocidades de penetración. Simultáneamente, se comenzaron a utilizar de forma generalizada en la minería las brocas denominadas triconos, desarrolladas en el campo del petróleo desde 1907, y a aplicar el aire comprimido como fluido de evacuación del detritus formadas durante la perforación.

Nguyen (1996) en sus investigaciones, formuló la ecuación para determinar el costo de un metro perforado para perforaciones petroleras (*Afrrev Stech. Revista internacional de ciencias y tecnología*, pp. 179).

Jorge Rivera Pacheco (2009), realizó la investigación: *Percusión asistida en la perforación rotativa en minería a tajo abierto*, este nuevo sistema combina dos métodos de perforación convencionales (rotativo y martillo de fondo). La combinación de estos dos métodos resulta en un incremento considerable de la velocidad de penetración del rango de 35% y 50%, logrando resultados en la reducción del costo total de perforación.

Raúl Martín Espinoza Ríos (2011), practicante del área de operaciones de Minería La Zanja, presenta un informe de: *Prácticas en perforación y voladura. Con brocas*

con botones de carburo de tungsteno de diámetro 7 7/8”, perforadoras SKF – 11 se evidencia el cálculo del costo total de perforación. El propósito de este informe es mostrar los detalles de la operación y voladura que se lleva a cabo en minería la Zanja

Juan Cárdenas Valenzuela (2013), publica un Informe de: Perforación y voladura en minería Yanacocha, en el cual se evidencia resultados de costo total de perforación y velocidades de penetración por guardias en el año 2009, utilizando brocas Atlas Copco y sobre las mejoras en voladuras.

El TDC puede reducirse, gracias a la introducción de la nueva tecnología y el desarrollo de las herramientas involucradas en esta actividad, combinada con la aplicación de los parámetros de perforación adecuados para cada tipo de roca.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Teoría de perforación en rocas**

#### **2.2.1.1. Conceptualización y tipología fundamental de perforación en roca en minería superficial**

La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura (Karlinski et al., 2009). Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos o blast holes. Esta operación es necesaria para lograr el confinamiento del explosivo y aprovechar mejor las fuerzas expansivas.

Los tipos principales de perforación en roca utilizados en minería superficial (figura adjunta), son:

- ✓ Perforación Rotopercutiva
- ✓ Perforación Rotativa.

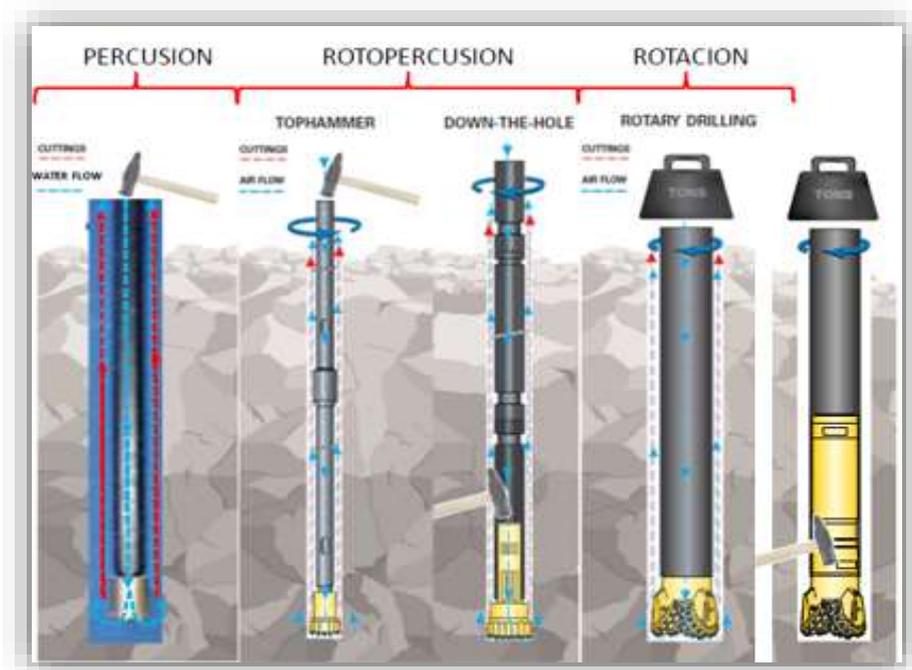


Figura N° 2.1. Tipos de Perforadoras.

Fuente: Blasthole Drilling in Open Pit Mining, Third edition  
 2012, Atlas Copco.

Se basan en principios mecánicos de percusión y/o rotación, cuyos efectos producen el corte, astillamiento y trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la broca y hasta una profundidad dada por la longitud de los barrenos utilizados.

La eficiencia en perforación consiste en lograr la máxima penetración al menor costo.

### 2.2.1.2. Descripción general de las perforadoras rotativas

La apertura de grandes explotaciones a cielo abierto, y la aparición de un explosivo a granel barato y de gran eficiencia energética como el ANFO, impulsaron a los fabricantes de perforadoras a diseñar equipos de gran capacidad.

Simultáneamente se comenzaron a utilizar en forma generalizada en la minería los triconos o brocas, así como también el uso de aire comprimido para evacuar el detritus formado durante la perforación.

### **2.2.1.3. Parámetros de perforación y prácticas operativas**

Las variables externas que afectan el rendimiento de la perforación son las características de la formación rocosa, y la eficiencia de la máquina y del operador; mientras que las variables internas que intervienen en la perforación rotativa son: (López Jimeno. Manual de Perforación y Voladuras de Rocas. Edición Aria Montano 2003 pp. 80):

#### **a) Peso sobre la broca (Pulldown)**

El sistema aplicado sobre la broca debe ser suficiente para vencer la resistencia a la compresión de la roca, pero no debe ser excesivo para evitar fallos prematuros o anormales del tricono.

La velocidad de penetración aumenta proporcionalmente con el empuje, hasta que se llega a un agarrotamiento del tricono contra la roca por efecto del enterramiento de los dientes o insertos, o hasta que por la alta velocidad de penetración y el gran volumen de detritus que se produce no se limpia adecuadamente la zona del taladro.

Algunos valores límites para triconos de diferentes diámetros se muestran a continuación:

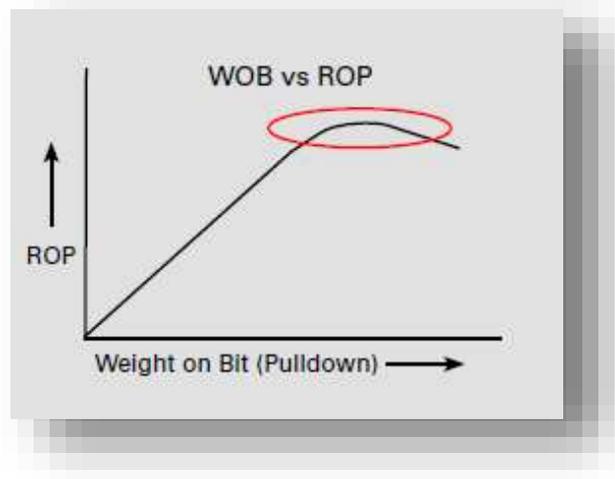


Figura N° 2.2. Efecto del empuje sobre la  
 velocidad de penetración.

Fuente: Blasthole drilling in open pit mining,  
 third edition 2012, Atlas Copco.

Tabla N° 2.1. Valores de empuje para diferentes  
 diámetros.

DIAMETRO DEL TRICONO (pulg)	EMPUJE LIMITE (libras)
5 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	21.000
6 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	31.000
6 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	37.000
7 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	50.000
9	65.000
9 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	79.000
12 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	121.000

Fuente: Manual de Perforación y Voladura,  
 López Jimeno.

### b) Velocidad de rotación RPM

La velocidad de penetración aumenta con la velocidad de rotación en una proporción menor que la unidad, hasta el límite impuesto por la evacuación de detritus.

Las velocidades de rotación varían desde 60 a 120 RPM para los triconos con dientes de acero, y de 50 a 80 RPM para los triconos de insertos de carburo de tungsteno.

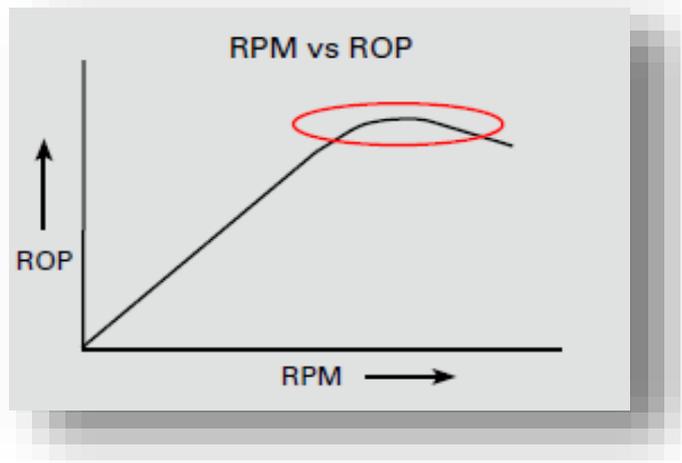


Figura N° 2.3. Efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad.

Fuente: Blasthole Drilling in Open Pit Mining, Third edition 2012, Atlas Copco.

En la siguiente tabla, se pueden apreciar valores aproximados de velocidad según el terreno.

Tabla N° 2.2. Velocidad de rotación de acuerdo al tipo de roca.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM)
Suave	75 - 160
Media	60 - 80
Dura	35 - 70

Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno.

El límite de la velocidad de rotación está fijado por el desgaste de los cojinetes, que a su vez depende del empuje, de la limpieza del taladro y la temperatura; y por la rotura de insertos que es provocada por el impacto del tricono contra la roca.

### **c) Presión de rotación**

La presión de rotación o torque, nos indica la presión ejercida a la broca provocada por la fuerza de empuje o Pulldown y la velocidad de rotación en el fondo del taladro contra la presión ejercida por el terreno.

### **d) Caudal de aire**

Cuando la perforación se efectúa con menos aire que el necesario para limpiar con efectividad el taladro, se producen los siguientes efectos negativos:

- ✓ Disminución de la velocidad de penetración.
- ✓ Aumento del empuje necesario para perforar.
- ✓ Incremento de las averías de la perforadora, debido al sobreesfuerzo.
- ✓ Aumento del desgaste en el estabilizador, barra y tricono.

#### **2.2.1.4. Velocidad de penetración**

La velocidad de penetración depende de muchos factores externos: características geológicas, propiedades físicas de las rocas, distribución de tensiones, etc. Esto hace que la determinación de la velocidad de penetración, sea un poco complicada. Existen dos procedimientos para la determinación de la velocidad de penetración:

- ✓ Recopilación de muestras representativas y realización de ensayos a escala por los fabricantes de triconos; los cuales emiten un informe donde se indica lo siguiente; tipo de tricono

deseado, empuje y velocidad de rotación aconsejados, velocidad de penetración y duración estimada del tricono.

- ✓ Cálculo de la velocidad de penetración a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca.

El control de velocidad de penetración del tricono, en base a la siguiente expresión:

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

Donde:

$V_P$  = Velocidad de Penetración (m/h)

$R_T$  = Recorrido del tricono (m)

$H_E$  = Horas efectivas perforadas.

#### **2.2.1.5. Descripción de la perforadora Pit Viper 271**

Según Brochure Blasthole Drilling in Open Pit Mining de Atlas Copco, tercera edición 2012, la Perforadora PV 271 está diseñada para la Perforación Single Pass, con un Pulldown sobre la broca de 75.000 lb (34 toneladas) aumentando de forma insuperable la productividad de las operaciones mineras.

Su robusto y durable diseño, puede perforar un barreno limpio de 55 pies (16,8 m) en una sola pasada.

La Perforación Single Pass aumenta la eficiencia de perforación (hasta un 25% en material blando), reduce el tiempo de cambio de barras y el riesgo de errores operacionales, otorgando más tiempo a la perforación. Los costos de mantenimiento de los equipos de perforación single pass son más bajos, al utilizar con menor frecuencia el carrusel y los sistemas de enrosque (elementos de alto desgaste).

La PV 271 utiliza sistemas y tecnología de Atlas Copco, confiable y diseñada para ser flexible y adaptarse fácilmente a cualquier

operación de perforación con opción disponible RCS (Sistema de control de equipo computarizado).



Figura N° 2.4. Perforadora Pit Viper 271.

Fuente: Brochure PV 271 de Atlas Copco, tercera edición 2012.



Figura N° 2.5. Perforación automática, Cabina Pit Viper 271.

Fuente: Brochure PV 271 de Atlas Copco.  
tercera edición 2012.

Al sistema RCS se le pueden agregar funciones, como auto-nivelación y auto-desnivelación, navegación de barreno GPS, acceso remoto al equipo con comunicación, desplazamiento remoto inalámbrico, medición durante la perforación, operación remota inalámbrica, y auto perforación.

Los datos técnicos de la perforadora Pit Viper 271 se muestran en la sección de anexos del proyecto.

#### **2.2.1.6. Broca tricónica**

Según el Brochure de brocas tricónicas Atlas Copco, tercera edición 2013, las brocas tricónicas cuentan con tres conos cortadores que giran sobre su propio eje. Varían de acuerdo a su estructura de corte, y pueden tener dientes de acero fresados o de insertos de carburo de tungsteno siendo este último el que se detallará.

El trabajo que realiza las brocas tricónicas se basa en la combinación de dos acciones:

- ✓ Indentación: Los insertos del tricono penetran en la roca debido al empuje (Pulldown) sobre la roca. Este mecanismo equivale a la trituración de la roca.
- ✓ Corte: Los fragmentos de la roca se forman debido al movimiento lateral de desgarre de los conos al girar sobre el fondo del taladro.

Los diferentes modelos de triconos de insertos son:

- ✓ Serie 40, para formaciones suaves.
- ✓ Serie 50, trabaja en formaciones suaves y medianas.
- ✓ Serie 60, utilizados en formaciones medias.
- ✓ Serie 70, usado en formaciones duras.
- ✓ Serie 80, utilizado en formaciones muy duras.

### a) Elementos de la broca tricónica

Los elementos de la broca tricónica son los siguientes:

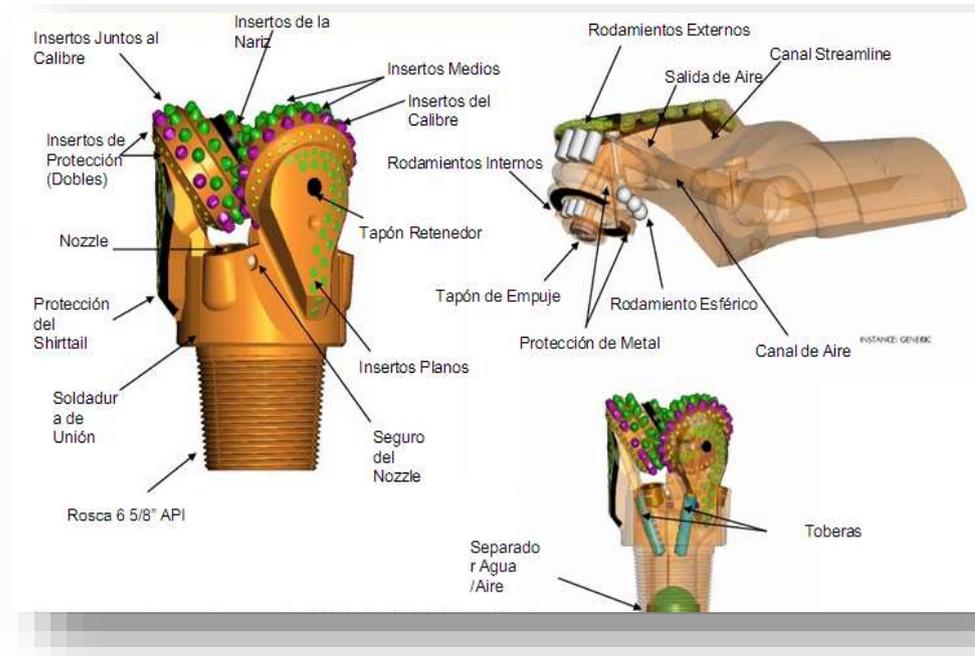


Figura N° 2.6. Elementos de la Broca Tricónica

Fuente: Brochure de brocas tricónicas\_ Atlas Copco.

#### a.1. Conos

Los parámetros de diseño de los conos son:

- ✓ Ángulo del Eje del Cono: Este ángulo determina el diámetro del cono de acuerdo con el diámetro del barreno. Si aumenta el ángulo el diámetro del cono debe disminuir, y recíprocamente
- ✓ Ángulo del Cono: Este ángulo es inversamente proporcional al ángulo del eje del cono, de forma que cuando éste aumenta el ángulo del cono debe disminuir para evitar la interferencia de conos.
- ✓ Longitud de los Insertos: En un tricono de insertos la longitud de éstos está definida generalmente por el tipo de terreno.

- ✓ Espesor del Cono: Se debe disponer de un espesor mínimo para asegurar la resistencia estructural del cono. El espesor está determinado por el tamaño de los cojinetes.

#### **a.2. Rodamientos**

Existen dos tipos de rodamientos en los tricono:

- ✓ Bolas y Rodillos.
- ✓ Rodamientos planos con lubricación.

La pista de rodillos aguanta la mayor parte de la carga radial en el cono, mientras que los cojinetes lo hacen en una pequeña parte; en tanto, que la pista de bolas mantiene el cono en funcionamiento y soporta el empuje hacia el interior.

#### **a.3. Cuerpo del tricono**

El cuerpo del tricono está conformado por tres partes idénticas que se denominan cabeza. Cada cabeza contiene un cojinete integral sobre el cual se inserta el cono y también los conductos a través de los cuales circula el fluido de barrido para limpiar el detritus de perforación.

#### **a.4. Boquillas o nozzles**

Los triconos se diseñan para que una parte del aire, que aproximadamente es un 20%, se aproveche para la refrigeración y limpieza de los cojinetes. El resto de aire pasa a través de una boquilla o “nozzles”, con el fin de limpiar los conos dentados y producir la turbulencia necesaria para iniciar la elevación del detritus a través del espacio anular.

## b) IADC nomenclatura

La clasificación internacional de IADC describe 3 dígitos, en donde diferencia los tipos de brocas tricónicas, los de dientes de acero y los de insertos de carburo de tungsteno, así como la formación rocosa para los que son diseñados.

**b.1. Primer dígito**, esta descripción se encuentra dentro del rango de 1 a 8.

### ✓ **Triconos de dientes de acero:**

1-X-X. Formaciones blandas con baja UCS (Unconfined Compressive Strength).

2-X-X. Formaciones medias con alta UCS.

3-X-X. Formaciones semi duras y abrasivas.

### ✓ **Triconos de insertos TCI:**

4-X-X. Formaciones blandas con bajo UCS.

5-X-X. Formaciones blandas a medias.

6-x-x. Formaciones semi duras.

7-X-X. Formaciones duras y abrasivas.

8-X-X. Formaciones extremadamente duras.

**b.2. Segundo dígito**, Esta es una sub clase de dureza la cual está dentro del rango de 1 – 4.

X-1-X

X-2-X

X-3-X

X-4-X

**b.3. Tercer dígito**, Esta establece las características en relación al tipo de rodamiento. Entre los principales utilizados en minería son:

X-X-2 Tricóno estándar de rodamientos cilíndricos  
abiertos y con barrido exclusivamente con aire.

X-X-4 Tricóno con rodamientos sellados.

### 2.2.1.7. Evaluación del desgaste de las brocas tricónicas

Un trabajo importante en el incremento de la productividad de las brocas tricónicas lo constituye el análisis del desgaste de la estructura de corte, ya que la identificación de las posibles causas ayuda a corregir errores de operación, mejora en la selección y fabricación de las brocas tricónicas. Y por consiguiente el incremento de la eficiencia y la reducción del costo total de perforación.

La IADC desarrolló un sistema para homogenizar la clasificación y evaluación del desgaste de las brocas tricónicas.

Este código puede ser utilizado en todo tipo de broca tricónica, con insertos de carburo de tungsteno o con dientes de acero, este consiste en describir el desgaste presentado en toda la geometría de la broca.

Tabla N° 2.3. Evaluación del desgaste según IADC.

T				B	G	OBSERVACIONES	
ESTRUCTURA DE CORTE				RODAMIENTOS			
FILAS INTERNAS	FILAS EXTERNAS	CARACTERÍSTICAS DESGASTE	UBICACIÓN	DESGASTE DEL RODAMIENTO	UBICACIÓN	OTRA CARACTERÍSTICA DE DESGASTE	DESGASTE DE LA PATA
(I)	(G)	(D)	(L)	(B)	(L)	(O)	(ST)

Fuente: Mina Modelo.

Columna 1 (I), esta describe la condición de desgaste de la estructura de corte de las filas internas de insertos.

Columna 2 (G), esta describe la condición de desgaste de la estructura de corte de las filas exteriores o del calibre

En la columna 1 y 2, se utiliza una escala lineal la cual describe el desgaste de la estructura de corte, 0 indica que el inserto no presentó ningún desgaste, 8 significa que el inserto presentó un desgaste total.

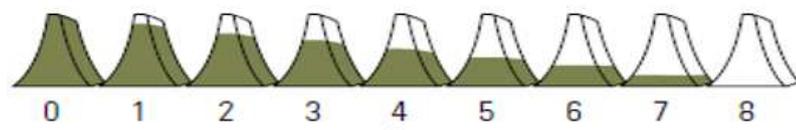


Figura. N° 2.7. Columna 3 (D), describe la característica principal de la falla.

Fuente: Mina Modelo.

### 2.2.1.8. Uso del aire en la perforación rotativa

El aire, puede utilizarse como agente motriz. Para ello es necesario que se comprima, es decir, que tenga una presión mayor que la atmosférica. La unidad de volumen estándar aceptada para trabajo de compresor y cálculos es el pie cúbico (ft<sup>3</sup>), la temperatura estándar es de 70 °F, y la altitud estándar es de 0 pies, es decir, el nivel del mar. La presión atmosférica estándar es de 14,7 psia.

#### a) Influencia del aire en la perforación rotativa

Como se ha mencionado anteriormente el aire comprimido es un factor primordial para el buen funcionamiento de la perforación. Su importancia es vital para proveer un flujo necesario con el fin de, por un lado mantener limpios y refrigerados los rodamientos de la broca, y por otro lado, levantar los detritus de la roca del

fondo del taladro y finalmente evacuarlos por el espacio anular formado entre las paredes del pozo y la barra de perforación.

### **b) Caudal de aire**

El caudal de aire pasa por los nozzles y finalmente viaja a través del espacio anular, formado por las paredes del pozo y la barra de perforación, va a estar directamente relacionado con la capacidad del compresor dispuesto en la perforadora y las condiciones geográficas y térmicas de la zona.

### **c) Velocidad del aire**

La velocidad que lleva el aire al salir por los nozzles y recorrer el espacio anular, está directamente relacionada con el caudal de aire, e inversamente relacionada con el área por el cual pasará dicho aire, todo esto se expresa físicamente en la siguiente fórmula:

$$Q = V \times A \qquad V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q = Caudal de Aire.

A = Área.

V = Velocidad del Aire.

Como se explicó anteriormente, la velocidad del aire es la responsable directa de la evacuación de las partículas fragmentadas de roca o cutting. Para levantar una partícula de material mediante un flujo de aire cualquiera, la velocidad de dicho flujo debe ser mayor a la velocidad con que la partícula cae en forma libre al fondo del pozo

### 2.2.1.9. Mecanismo de rotura de la roca

En el gráfico adjunto, según Blasthole Drilling in Open Pit Mining, Third edition 2012, se muestra los pasos de rotura de la roca:

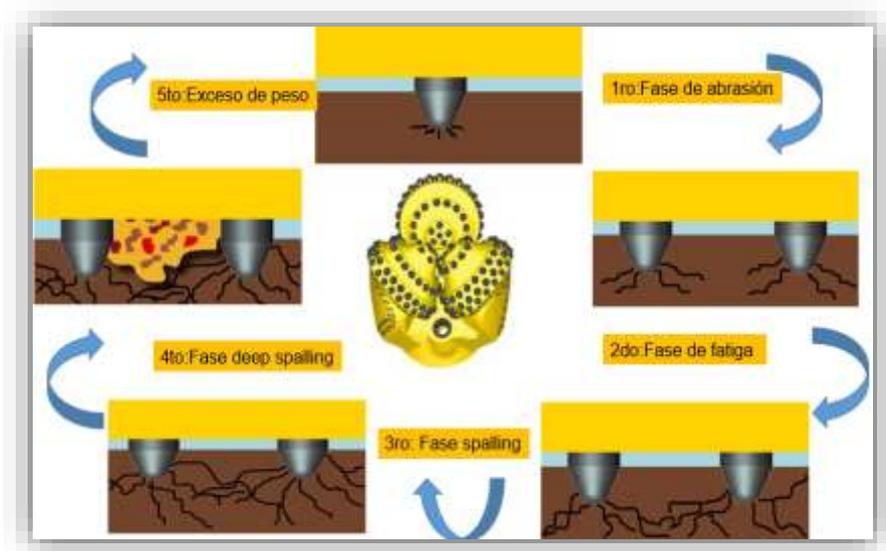


Figura N° 2.8. Pasos de rotura de la roca.

Fuente: Blasthole Drilling in Open Pit Mining, Third edition 2012, Atlas Copco.

#### a) 1ro. Abrasión:

Primera fase de la fractura de la roca, como resultado del poco peso aplicado sobre la broca. Los insertos están en contacto con la roca con una baja presión, lo que genera pequeñas fisuras alrededor del inserto.

#### b) 2do. Fatiga:

En esta fase, se agrega mayor peso sobre la broca combinado con un bajo RPM, lo que causa una mayor penetración del inserto dentro de la roca generando fisuras más persistentes, pero estas no se llegan a conectar entre filas de insertos, y la roca no se llega a romper.

**c) 3ro. Spalling:**

En esta fase, la velocidad de rotación es la misma, pero el suficiente peso es aplicado sobre la broca, lo que genera una efectiva penetración del inserto logrando que las fisuras generadas se crucen entre las filas de insertos.

**d) 4to. Deep Spalling:**

En esta fase, los insertos alcanzaron la velocidad de rotación y presión en la broca óptimos, los cuales provocan la fractura de la roca en pequeños chips, los cuales por la ayuda de la circulación de aire, logran ser evacuados fuera del taladro, es necesario notar que en esta fase, las fisuras generadas por la penetración de los insertos dentro de la roca, se cruzan entre los insertos y entre las filas.

**e) 5to. Exceso de peso:**

Cuando alcanzamos la fase de Deep Spalling, si aplicamos peso adicional, provocaremos una penetración ineficiente, este peso adicional aplicado causará que los insertos se introduzcan totalmente dentro de la roca, reduciendo la velocidad de penetración y erosionando prematuramente la superficie del cono.



Figura N° 2.9. Exceso de Peso

Fuente: Blasthole Drilling in Open Pit Mining,  
Third edition 2012, Atlas Copco.

### 2.2.1.10. Profundidad de corte

Las empresas mineras necesitan eficiencia e innovación para subsistir, el negocio minero actual necesita del incremento de la productividad aprovechando al máximo los recursos disponibles, y esta productividad se logra incrementando la velocidad de penetración y la vida útil de la broca tricónica.

#### a) Definición de Profundidad de corte

La profundidad de corte está definida como la cantidad de roca perforada o removida por una revolución de la broca tricónica (Prabhakaran Centala, 2008, pp.18).

$$DOC = \frac{ROP}{RPM} \quad [1]$$

Donde:

DOC: Profundidad de corte [metros/revolución]

ROP: Velocidad de Penetración [metros/minuto]

RPM: Revoluciones por minuto [revoluciones/minuto]

El total de revoluciones por taladro está dado por:

$$TR = RPM \times t \quad [2]$$

Donde:

TR: Total de revoluciones [Revoluciones].

RPM: Revoluciones por minuto aplicadas para perforar cada taladro [revoluciones/minutos].

t : Tiempo efectivo de perforación [minutos].

## **b) Proceso de cambio e implementación del concepto de profundidad de corte**

La profundidad de corte está estrictamente relacionada a la eficiencia de la perforación, por lo que tenemos dos métodos para cambiar la profundidad de corte:

Verificar que la presión y el volumen de aire, es el recomendado para garantizar la lubricación y enfriamiento de los rodamientos de la broca y a la vez alcanzar una velocidad de salida del detrito óptima.

Variar la presión sobre la broca “Pulldown” de manera sistemática, manteniendo constante las RPM y observar la máxima velocidad de penetración alcanzada.

Antes de iniciar estos dos métodos necesitamos obtener los parámetros estándar para cada zona de la mina, de acuerdo al siguiente procedimiento:

### **b.1. Beneficios de la profundidad de corte**

Una vez que encontramos el Pulldown eficiente y la mejor profundidad de corte, logramos obtener los siguientes beneficios:

Incremento de la velocidad de penetración; incrementando la profundidad de corte significa incrementar la velocidad de penetración, debido a que se está perforando con una menor cantidad de revoluciones de la broca por taladro, reduciendo el tiempo de perforación efectiva.

Reducción del costo total de perforación; de acuerdo a lo planteado en la ecuación [6] donde se indica que el costo total de perforación está en función de los metros perforados y la velocidad de penetración, por lo que

concluimos que al incrementar la velocidad de penetración reducimos el costo total de perforación.

Incremento de la vida de la broca, mayor productividad; debido a que la broca perfora un taladro con la mínima cantidad de revoluciones, y el trabajo que se realiza es menor.

### **b.2. Trabajo realizado por la broca tricónica.**

El trabajo realizado por la broca tricónica está representado por el peso o esfuerzo que se aplica al rodamiento de la broca tricónica, y este es calculado por la siguiente formula:

$$W = [(P \times RPM) \times T] \quad [3]$$

Donde:

- W: Trabajo realizado por la broca tricónica
- P: Pulldown aplicado sobre la broca tricónica [Ton]
- RPM: Revoluciones por Minuto de la broca tricónica
- T: Tiempo de Perforación.

### **2.2.2. Costo total de perforación**

El mejor medio de determinar cuál es la broca ideal a utilizar es hacer una evaluación de los aspectos económicos.

Las dos maneras más comunes de calcular el costo de perforación se conocen por las siglas (Sandvik Mining and Construcción, 2006, pp.18):

PDC (Partial Drilling Cost = costo parcial de perforación) y

TDC (Total Drilling Cost= costo total de perforación).

El costo parcial de perforación es el precio al que se adquirió la broca dividido por la distancia que perfora. El PDC puede expresarse por la fórmula:

$$PDC = \frac{\text{Precio de compra de la broca}}{\text{Distancia perforada (pies o metros)}} \quad [4]$$

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

$$TDC = \frac{\text{Costo de la broca de perforación}}{\text{Metros perforados}} + \frac{\text{Costo de la perforadora por hora}}{\text{Metros perforados por hora}} \quad [5]$$

Si el tiempo de perforación no es problema, el costo parcial de perforación (PDC) es probablemente la mejor forma de evaluar el funcionamiento de la broca. Sin embargo, si tiene poco tiempo para la perforación y está dispuesto a manejar la flota de perforadoras en razón de la productividad, el costo total de perforación (TDC) podría ser un buen criterio.

#### 2.2.2.1. Estructura del costo de perforación

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

En Mina Modelo, todo análisis para determinar el costo total de perforación (Nguyen Jean Paul, 1996 dio la fórmula para la determinación del costo total de perforación), debe realizarse en

base a los factores mencionados anteriormente, mediante la siguiente fórmula:

$$TDC = \frac{B}{M} + \frac{D}{ROP} \quad [6]$$

Donde:

- TDC: Costo Total de Perforación [US\$/m]
- B: Precio de la broca [US\$]
- D: Costo horario de la perforadora [US\$/h]
- ROP: Velocidad de penetración [m/Hora]
- M: Metros perforados por el tricono [m]

Realizando una evaluación de la fórmula [6] tenemos:

El precio de la broca tricónica (B) es diferente para cada empresa minera, ya que se obtiene al ponderar el precio de lista ofrecido por el fabricante por un factor que depende fundamentalmente de la situación geográfica de los proveedores, gravámenes e impuestos que debe tributar cada consumidor, según sea el tipo, marca y diámetro, Por lo anterior, el factor no es estándar para los fabricantes.

$$C_1 = \frac{B}{M} \quad [7]$$

Donde:

- C<sub>1</sub>: Costo del elemento de corte
- B: Precio de la broca tricónica puesta en el terreno [US\$]
- M: Total de metros perforados por la broca tricónica [m]

$$C_2 = \frac{D \times T}{M} \quad [8]$$

Donde:

- C<sub>2</sub>: Costo de la operación Minera
- D: Costo horario del equipo de perforación [US\$/h]
- T: Tiempo de operación del Tricono [h]
- M: Metros perforados por el Tricono [m]

*El Costo horario del equipo de perforación o perforadora (D) está dado por:*

**a) Costo directo:**

Dependiendo del sistema de costos que adopte cada empresa, se pueden determinar los costos directos del equipo por hora, para un periodo determinado a través de:

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad [9]$$

Donde:

di: Costo directo [US\$]

Hi: Horas de trabajo [h]

En donde los costos directos comprenden:

- ✓ Costos de mano de obra (d1)
- ✓ Costo de energía (d2)

Determinado por:

$$\left[ \frac{\frac{US\$ / \text{GalonesD2}}{\text{mes}}}{\frac{\text{Horas de trabajo del equipo}}{\text{mes}}} \right] \quad [10]$$

- ✓ Costos relacionados con la mano de obra (d3)
- ✓ Costos de columna de perforación (d4)
- ✓ Costo de mantenimiento y reparación (d4)
- ✓ Costos Prorratables (d6)

**b) Costo Indirecto:**

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

- ✓ Depreciación del equipo (d7)
- ✓ Seguros e impuestos (d8)
- ✓ Costo de supervisión (d9)
- ✓ Costos de bodegas e inventarios (d10)

**2.2.2.2. Costo total de perforación**

El Costo total de perforación está dado por:

$$C = C_1 + C_2 \quad [11]$$

Reemplazando la ecuación [7] y [8] tenemos:

$$C = \frac{B}{M} + \frac{D \times T}{M} \quad [12]$$

$$C = \frac{B + (D \times T)}{M} \quad [13]$$

**a) Importancia de la velocidad de penetración en la obtención del costo mínimo**

De acuerdo a la ecuación [12] tenemos:

$$C = \frac{B}{M} + \frac{D \times T}{M} \quad [14]$$

Replanteando la variable "T" en el denominador, se obtiene:

$$C = \frac{B}{M} + \frac{D}{M/T} \quad [15]$$

Pero sabemos que  $M/T$  se denomina la velocidad de penetración y se denota como  $ROP$ , luego al reemplazar en la ecuación [15], se obtiene:

$$C = \frac{B}{M} + \frac{D}{ROP} \quad [16]$$

Luego, de la ecuación anterior se concluye que:

$$C = f_{(M,ROP)} \quad [17]$$

El costo es una función de los metros perforados y de la velocidad de penetración obtenida en la perforación (es decir el  $ROP$  y  $M$  son inversamente proporcionales al costo o TDC). Esto quiere decir que a mayor velocidad de penetración, el costo total de perforación se reduce.

Los factores que están relacionados directa e indirectamente con la velocidad de penetración y los demás factores de la fórmula en mención son:

- ✓ Propiedades del Macizo rocoso
- ✓ Broca tricónica adecuada para el terreno a perforar
- ✓ Velocidad de Barrido
- ✓ Velocidad de Salida del detrito
- ✓ Peso aplicado sobre la broca tricónica (Pulldown)
- ✓ Revoluciones por minuto de la broca tricónica (RPM)
- ✓ Análisis de desgaste de la brocas tricónicas
- ✓ Estudios de profanidad de corte

### 2.3. Definición de términos básicos

**Banco:** Unidad básica de explotación en forma de gran escalón constituido por un plano vertical, o frente, y un plano horizontal, o plataforma de trabajo (Fernández de López, Martha. 2003)

**Barreno:** Sinónimo de taladro. Hueco cilíndrico practicado en la roca para alojar explosivo. (López Jimeno, E. 2006).

**Barrido:** Fluído de aire que permite extraer el detrito del fondo de la perforación

**Berma:** Plataforma horizontal de un banco cuando llega a la posición final de la excavación (Ministerio de Minas y Energía. 2003).

**Broca:** Herramienta de corte de metal que se utiliza para penetrar la superficie de una roca o pieza de trabajo y hace un agujero redondo igual a su diámetro

**Broca Tricónica:** Es la herramienta de perforación equipada con tres cortadores en forma de conos, los cuales están montados sobre un eje de rodamientos los que a la vez forman las patas o faldones de la broca, esta construcción integral provee la superficie y resistencia para soportar las cargas que la actual técnica de diseño y exigencias de perforación imponen sobre la broca tricónica.

**Costo:** Valoración monetaria de los gastos incurridos y aplicados en la obtención de un bien (Fernández de López, Martha. 2003).

**Costo total:** Son la suma de los costos fijos y variables para cualquier determinado de producción (Fernández de López, Martha. 2003).

**Costo total de perforación:** Es un concepto en donde se pone en énfasis el costo de la productividad. Implica la evaluación de los costos de perforación, incluyendo los costos directos e indirectos.

**Detritus:** Partículas o esquirlas de roca procedentes de la perforación de un barreno (López Jimeno, E. 2006).

**Empuje:** Fuerza que se aplica para mantener en contacto la broca con la roca.

**Fragmentación:** Tamaño de los trozos de roca volada (López Jimeno, E. 2006).

**Frecuencia:** Parámetro característico de una vibración (Hz o ciclos por segundo).

**Insertos:** Pieza de metal duro que se usa en las brocas de perforación (López Jimeno, E. 2006).

**Maniobra de perforación:** Cualquier operación referida al traslado del equipo de perforación, prolongación del varillaje, retirada de éste, limpieza del barreno, etc. (Fernández de López, Martha. 2003)

**Mina:** Las minas son las fuentes de material que contiene mineral y que se encuentra cerca de la superficie o en el subsuelo (Estudios Mineros del Perú S.A.C. Manual de Minería).

**Mina Modelo:** Empresa minera hipotética para el estudio de la investigación.

**Operación unitaria:** La primera operación en el ciclo productivo de una mina.

**Optimización:** Es realizar una mejor gestión de nuestros recursos en función del objetivo que perseguimos.

**Percusión:** Impactos producidos por los golpes del pistón originan ondas de choque que se transmiten a la broca a través del barreno.

**Perforación:** Cavidad donde serán alojadas las cargas explosivas y accesorios de iniciación (Estudios Mineros del Perú S.A.C. Manual de Minería).

**Proyecto:** Un proyecto es un prospecto que luego del programa de perforación inicial indica la existencia de un posible depósito mineral que requiere mayor evaluación a través de un extenso programa de perforaciones para continuar con la evaluación.

**Revoluciones por minuto (RPM):** La velocidad con que se va penetrando la roca (velocidad de penetración) es directamente proporcional a las revoluciones por minuto.

**Roca:** Una masa que contiene una combinación de minerales. Agregado de minerales de diferentes clases en proporciones variables (Estudios Mineros del Perú S.A.C. Manual de Minería).

**Rotación:** Con este movimiento se hace girar la broca para que los impactos se produzcan sobre la roca en distintas posiciones.

**Tajo:** Escalón o unidad de explotación sobre la que se desarrolla el trabajo de extracción en las minas a cielo abierto (Ministerio de Minas y Energía. 2003).

**Tajo abierto:** Conocido como cielo abierto. Sistema de explotación caracterizado por el uso de bancos o cortes escalonados, aplicado, generalmente, a la extracción de depósitos en vetas localizadas cerca de la superficie y de gran magnitud, que tiene una capa de material estéril de mediana importancia.

**Velocidad de penetración:** Ritmo neto de avance durante la perforación de un barreno (López Jimeno, E. 2006).

**Velocidad de perforación:** Ritmo medio de perforación de barrenos incluyendo los tiempos no productivos (López Jimeno, E. 2006).

**Velocidad ponderada:** Velocidad considerada al final de su recorrido de perforación permitida en la operación de la vida útil de la broca tricónica.

**CAPÍTULO III:**  
**DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES**  
**DE MINA MODELO**

### 3.1. Ubicación

La Mina Modelo es una empresa minera ubicada en la Provincia y Departamento de Cajamarca (ver la Figura N° 3.1. Mapa de Ubicación), entre las minas Tantahuatay, la Zanja y Yanacocha con elevaciones que van desde los 3,700 hasta los 4,000 msnm. La explotación minera emplea métodos de tajo abierto para suministrar mineral tal como sale de la mina, directamente a las instalaciones de lixiviación para la recuperación de oro y plata.

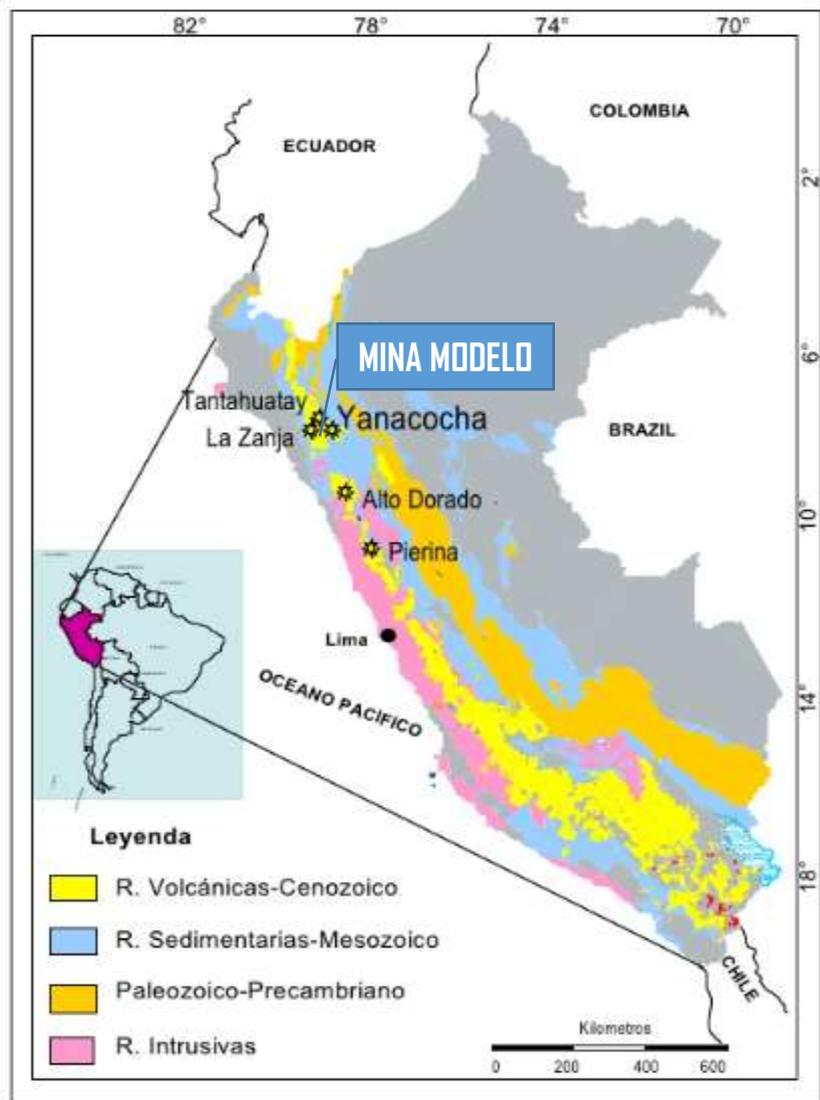


Figura N° 3.1. Ubicación geográfica de la Mina Modelo.

Fuente: Obtenido de la página Web.

### **3.2. Clima, fauna y vegetación**

El clima del área de estudio es típico de las regiones andinas cercanas al Ecuador: fresco y húmedo, con una temporada distintiva de lluvias. Las temperaturas son casi relativamente constantes todo el año, y rara vez bajan de cero inclusive en los puntos más elevados de la mina. Las condiciones son a menudo de mucho viento, especialmente a gran altura.

Esta región ha sustentado residentes dedicados al pastoreo durante más de 3 000 años. La zona de la Jalca se usa principalmente para paquer ganado vacuno y ovejas. Las menores alturas de la Jalca se usan a menudo para cultivar cosechas nativas e introducidas. Los cultivos andinos nativos incluyen tubérculos, representados por distintos tipos de papas, fréjoles y cereales.

### **3.3. Geología local y regional**

#### **3.3.1. Estratigrafía sedimentaria y volcánica regional**

La geología de la región de Cajamarca – Mina Modelo está constituida por un basamento sedimentario de edad cretácea que ha sido plegado, fallado, intruído y recubiertos por efusiones volcánicas de edad Terciaria.

Sobreyaciendo a este basamento se ubica regionalmente el grupo Calipuy el cual se subdivide en dos unidades: Volcánicos Llama y Volcánicos Porculla. Sobre ellas yacen con discordancia erosional las tobas ignimbríticas de la Formación Huambos. Turner (1997) considera a la formación Huambos como parte del Grupo Calipuy, pero en el cartografiado hecho por INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 1983) considera a esta formación como una unidad independiente superior.

#### **3.3.2. Basamento cretáceo**

La serie cretáceo inferior, está constituida principalmente por una secuencia de areniscas sílicea con intercalaciones de limonita, correspondientes a la formación Chimú. Estas secuencias están infrayaciendo a una secuencia limo-calcárea correspondientes a las grandes transgresiones Albiánas (Formaciones Santa, Carhuaz y Farrat).

Las rocas del Cretáceo Superior están mejor desarrolladas y conforman una potente secuencia calcárea, correspondientes a las Formaciones: Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual, Mujarrún, Quilquiñán y Celendín.

Las rocas del Cretáceo superior y Paleoceno (Terciario inferior) consisten de capas rojas y conglomerados de la Formación Chota. Las capas rojas están relacionadas con la fase de la orogénica andina del Cretáceo Superior.

### **3.3.2.1. Grupo calipuy**

#### **a) Volcánicos llama**

Es una secuencia volcánica basal dominada por flujos de lava, conglomerados volcánicos y rocas volcanoclásticas. Esta secuencia se localiza al sur del distrito de Mina Modelo y presenta una débil alteración argílica y propilítica. Las dataciones radiométricas (métodos de K-Ar) efectuadas datan de  $54.8 \pm 1.8$  y  $44.2 \pm 1.2$  Millones de años (M.A.).

#### **b) Volcánicos Porculla**

Consiste de rocas piroclásticas intercaladas con niveles lávicos y cortadas por múltiples eventos intrusivos. Según el Dr. Steve Turner.

### **3.3.3. Geología estructural**

La Mina Modelo, se ubica dentro de una intersección de estructuras regionales de orientación NW- SE paralelas a la dirección andina y fallas de dirección NE (trasandinas) del corredor estructural Chicama.

Un conjunto de fallas de rumbo general NW–SE, se disponen con ligeras variaciones de rumbo, A lo largo de este corredor se disponen coincidentemente una serie de ocurrencias de mineralización tanto dentro como fuera de la Mina Modelo.

### 3.3.4. Alteraciones hidrotermales

Los tipos de alteración hidrotermal en Mina Modelo están dominados típicamente por lixiviación ácida y alteración argílica avanzada, típico de yacimientos de alta sulfuración.

La mina se caracteriza por poseer considerables volúmenes de alteración sílice masiva, granular y vuggy en contraste con menores volúmenes de alteración argílica y argílica avanzado. La sílice granular se forma típicamente como una capa de lixiviación por vapores.

### 3.3.5. Mineralización epitermal

La mineralización aurífera de la mina se presenta como cuerpos tabulares inclinados hasta sub verticales en donde la mineralización de alta ley está alineada a lo largo de estructuras de alimentación de alto ángulo y a brechas hidrotermales, bordeado por halos de mineralización de menor ley.

La alteración es típica de un sistema ácido-sulfato (alta sulfuración). Como patrón posee: al Centro sílice porosa (vuggy silica) y sílice masiva, alejándose de este centro se observa sílice-alunita (pirofilita (argílica avanzada), arcillacaolinita (argílica), arcilla mont-morillonita (argílica) y porpílica.

Volumétricamente la alteración más abundante es la arcilla, siendo la más importante para la mineralización de oro la alteración sílicea (vuggy silica, masiva, granular). Edad de la alteración es de 10,9 a 11,6 millones de años. Se han identificado diez centros de mineralización, 7 de ellos contienen más de 1 millón de onzas de oro. La mayor concentración se tiene en sílice brechada con óxido de hierro, en fracturas con óxidos, baritina y jarosita, en sílice granular lixiviada, en sulfuros con pirita, sulfuros de cobre y venillas de cuarzo. La fase de alunita más oro es posterior. La oxidación llega a profundidades de 300 m con hematita, goethita y jarosita.

El 80 % de la reserva de oro está en sílice, con excepción de la sílice opalina. Se tiene oro en menor cantidad en la alunita. Las alteraciones sílice-arcilla

(caolinita) y arcilla (montmorillonita) contienen anomalías geoquímicas de oro. La alteración propilitica es estéril.

La Mineralización de Mina Modelo se resume en: magmatismo y vulcanismo inicial. Silicificación y débil mineralización de oro, con actividad hidrotermal temprana, formación de sílice porosa debajo del nivel freático y sílice granular encima del nivel freático. Erupciones freáticas, por interacción del fluido magmático con aguas subterráneas meteóricas. Evento en el que se forma las brechas hidrotermales con oro y hierro, los fluidos invaden zonas permeables en fracturas de sílice masiva, en la sílice porosa y granular. Emplazamiento de diatremas.

### **3.4. Ingeniería**

#### **3.4.1. Geotecnia**

En este departamento se definen los parámetros de estabilidad de los tajos, de los pads y botaderos. Con estos datos se generan los diseños de pit final, teniendo en cuenta los ángulos de banco y el ángulo interrampas, de acuerdo al tipo de alteración.

También se encarga de analizar las propiedades geomecánicas de los diferentes tipos de materiales que se encuentran en los tajos.

##### **3.4.1.1. Propiedades de los suelos y rocas**

La caracterización geomecánica incluye la definición de las propiedades de resistencia y deformabilidad de las distintas unidades geológicas.

Para las rocas se han caracterizado primero, la roca intacta, sobre la base de ensayos de laboratorio, y luego se ha considerado la escala para estimar las propiedades del macizo rocoso.

##### **a) Suelos**

En el caso de la caracterización de los suelos para el tajo Carola han sido divididos en términos estratigráficos para la

secuencia superior, media e inferior de gravas y luego subdivididos en términos de alteraciones para tener una mejor clasificación de la resistencia en cada suelo. Estos suelos generalmente se presentan en estratos subhorizontales.

Para el tajo Concepción se ha considerado como suelo las alteraciones silica clay 3 por su alto contenido de arcillas y la sílice granular 3 que se muestra deleznable al presionar con los dedos, esta alteración se encuentra expuesta en la pared norte del Mirador, sus propiedades de resistencia fueron estimados a partir de un análisis.

En Anexo se presenta los parámetros de resistencia de los suelos para los Tajos Carola y Concepción.

#### **b) Roca**

Para el caso de la roca, se vienen realizando ensayos de carga puntual con la finalidad de correlacionarlo con la resistencia a la compresión uniaxial de las diferentes alteraciones de los bancos, principalmente del tajo Carola. De acuerdo a los resultados obtenidos, la alteración sílice masiva considerada como sílice total se ha separado en sílice masiva propiamente dicha siendo ésta más densa con un UCS 139 Mpa como promedio y en sílice vuggy que presenta oquedades haciendo que la roca intacta tenga una menor resistencia de 42 Mpa en promedio. Para el caso del tajo Rosita, se ha realizado una investigación geotécnica, que estuvo enfocada básicamente en el mapeo geomecánico del macizo rocoso y en la revisión de la información de los taladros perforados en la zona de estudio, esta labor nos permitió correlacionar la información geológica con una caracterización geomecánica del macizo rocoso. Se pudo identificar, tanto del mapeo geomecánico superficial como de la revisión de taladros geológicos, hasta tres tipos diferentes de alteraciones en la zona, dentro de las cuales tenemos:

**b.1. Sílice masiva:** Material muy competente y de texturas variadas, relacionadas a un cambio notable de su resistencia intacta. Este tipo de alteración fue dividido en tres grupos según su resistencia intacta, que va desde una roca con un ISRM=R4, pasando por un ISRM=R5, hasta un ISRM=R6 (UCS>250Mpa.). Los ensayos de carga puntual, determinaron valores promedio para el cuerpo de SM “Extremadamente Dura” (R6) de UCS=280 Mpa.; para el cuerpo de SM “Muy Dura” (R5) de UCS=220 Mpa y para el cuerpo de SM “Dura” (R4) de UCS=98 Mpa.

La zonificación realizada, a partir de la interpretación geológica y geomecánica, indica que el cuerpo de SM “Extremadamente Dura” (R6), va reduciendo su extensión en profundidad, mientras que los cuerpos de SM “Muy Dura” (R5) y “Dura” (R4), van creciendo en extensión y profundidad.

**b.2. Sílice granular 2 (dura-suave):** Material cuya resistencia intacta indica una clasificación ISRM de “Dura” (R4).

Está asociado a inyecciones de Sílice, que le dan una mayor resistencia intacta, alcanzando un R5 en la escala ISRM. Este cuerpo aflora en pequeñas áreas en las partes altas (nivel 4050), y a profundidad va creciendo, alcanzando su mayor extensión debajo del Nivel 3970.

En algunas zonas pero de poca extensión es probable que aflore un material de competencia media que alcanza un ISRM=R3 con un UCS promedio de 48 Mpa.

**b.3. Sílice granular 3:** Material poco competente, con un ISRM=R0, sus características físicas hacen imposible asignarle un valor de UCS, ya que se presentan totalmente alterados y lixiviados, con un aspecto similar a una arena de

playa. Aflora principalmente en niveles inferiores al 3960 y va asociado a una Sílice Granular suave.

Se puede observar en la tabla adjunta, la relación entre la resistencia a la compresión y la dureza de la roca, que se usó para esta clasificación.

Tabla N° 3.1. Relación entre dureza y resistencia a la Compresión uniaxial (ISRM, 1981).

ISRM	UCS (Mpa)	Clasificación
R6	> 250	Extremadamente Dura
R5	100 - 250	Muy Dura
R4	50 - 100	Dura
R3	25 - 50	Media
R2	5 - 25	Débil
R1	1 - 5	Muy Débil
R0	0.25 - 1	Extremadamente Débil

Fuente: Mina Modelo.

Tabla N° 3.2. Propiedades geomecánicas de rocas presentes en Mina Modelo.

Tajos	ROCA	Resistencia a la Compresión USC (Mpa)	ISRM	Densidad (gr/cc)	Resistencia a la Compresión UCS (Mpa)	Módulo de Young E (Gpa)	Módulo de Poisson $\lambda$
CAROLA	Argílico Avanzado 1	40	R3	2.61	3.16	9.65	0.31
	Argílico Avanzado 2	40	R3	2.52	3.21	8.89	0.30
	Sílice Granular 3	13	R2	1.91	1.01	275.00	0.00
CONCEPCIÓN	Sílice Clay 1	15	R2	2.2	1.20	41.59	0.28
	Sílice Alunita	57	R4	2.19	4.56	41.59	0.28
	Sílice Masiva	70	R4	2.57	5.50	44.59	0.14
VANESSA	Sílice Granular 2	40	R3	2.34	3.20	7.22	0.31
	Sílice Masiva 1	98	R4	2.55	6.00	26.00	0.31
	Sílice Masiva 2	220	R5	2.55	6.00	26.00	0.30
	Sílice Masiva 3	280	R6	2.55	6.00	26.00	0.00

Fuente: Mina Modelo

### 3.5. Antecedentes de costos totales de perforación

La perforación de los taladros de producción se realizó con la perforadora PV 271, utilizando brocas tricónicas de la marca Atlas Copco (con diámetros de 10 5/8"). En el cuadro y gráfico siguientes se evidencian datos históricos que se obtuvieron en

los procesos de perforación, en diferentes terrenos y muestran como resultado los costos totales de perforación TDC. (Referencia Registro de Perforación, periodo Octubre 2006 a Junio 2007”).

Tabla N° 3.3. Costo total de perforación en diferentes terrenos de Mina Modelo.

Fecha	Terreno	Costo Total de Perforación TDC (\$/m)
oct-06	Muy Duro	
	Duro	5.5
	Medio	4.15
	Suave	3.99
nov-06	Muy Duro	
	Duro	5.56
	Medio	5.9
	Suave	2.47
dic-06	Muy Duro	
	Duro	6.19
	Medio	4.22
	Suave	2.94
ene-07	Muy Duro	12.33
	Duro	5.98
	Medio	4.1
	Suave	4.15
feb-07	Muy Duro	
	Duro	
	Medio	4.18
	Suave	2.97
mar-07	Muy Duro	
	Duro	6.06
	Medio	4.16
	Suave	3.5
abr-07	Muy Duro	
	Duro	4.97
	Medio	4.08
	Suave	3.45
may-07	Muy Duro	10.61
	Duro	
	Medio	4.5
	Suave	3.4
jun-07	Muy Duro	11.5
	Duro	5.41
	Medio	4.08
	Suave	3.32

Fuente: Mina Modelo.

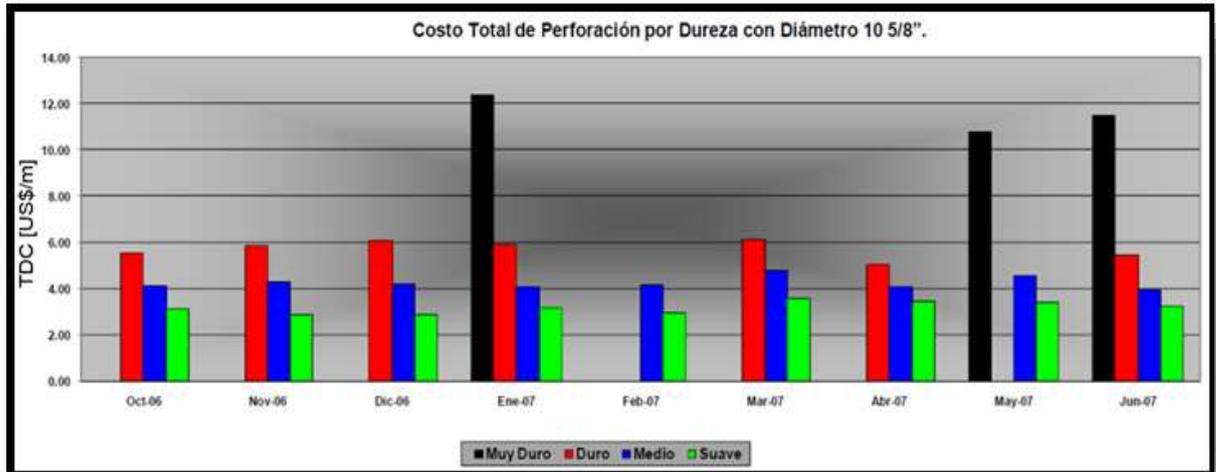


Gráfico N° 3.4. Costo Total de Perforación por dureza con diámetro 10 5/ 8".

Fuente: Mina Modelo.

# **CAPÍTULO IV:**

## **HIPÓTESIS**

#### 4.1. Formulación de la hipótesis

Que al determinar el costo total de perforación (TDC), permitirá la optimización de esta operación unitaria en la Mina Modelo a tajo abierto.

#### 4.2. Operacionalización de variables

##### 4.2.1. Variable independiente

Optimización de perforación a tajo abierto en Mina Modelo.

##### 4.2.2. Variable dependiente

Costo total de perforación (TDC).

Tabla N° 4.1. Matriz operacionalización de variables.

	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES Y SUB INDICADORES
INDEPENDIENTE	Optimización de perforación a tajo abierto en Mina Modelo.	La optimización de perforación, permita obtener una máxima eficiencia de penetración acorde con el tipo de formación y broca seleccionada.	Para optimizar o mejora de la operación en perforación rotativa es necesario observar todo el sistema de perforación como un conjunto, los cuales son: velocidad de penetración y metros perforados para cada broca tricónica.	Velocidad de penetración.	<b>1. Parámetros de perforación.</b>
					<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pulldown (Duro, Medio y Suave).</li> <li>✓ Velocidad de rotación RPM</li> <li>✓ Caudal de aire</li> </ul>
					<b>2. Broca tricónica adecuado.</b>
				<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Marca PDB Tools. Inc.</li> <li>✓ Modelo EX 722 (Duro), EX712(Medio) y EX532(Medio a Suave)</li> </ul>	
				Metros perforados por cada broca tricónica.	<b>3. Propiedades del macizo rocoso. Valores ISRM de R2 - R4.</b>
					<b>1. Perforadora Pit Viper 271.</b>
					<b>2. Aplicación de buenas prácticas de perforación.</b>

DEPENDIENTE	Costo total de perforación TDC.	En el cálculo del Costo Total de Perforación se pone en énfasis el costo de la productividad y este es un factor importante en la mina.	Son los resultados de Costo Total de Perforación TDC, obtenidos al aplicar la Fórmula del TDC con sus respectivos factores intervinientes en el proceso de perforación, expresado en valores con unidades US\$/m, las cuales sirven para tomar decisiones de mayor productividad.	Metros perforados	Incremento de metros perforados
				Taladros perforados	Incremento de taladros perforados
				Reducción del costo total de perforación.	Menor TDC según histórico de datos para terreno duro, medio y de medio a suave.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**CAPÍTULO V:**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## **5.1. Tipo de diseño de investigación**

El tipo de diseño de investigación del presente estudio es No Experimental - Transversal Descriptivo, debido a que en el desarrollo de este proyecto, se describen variables, y analizan su incidencia e interrelación en un momento dado (Ortiz Frida, et al, 2006).

## **5.2. Material de estudio**

### **5.2.1. Población**

En esta investigación, la población está constituida por el conjunto de brocas utilizadas para la perforación en los diferentes tajos de la Mina Modelo.

### **5.2.2. Muestra**

En la presente investigación, para la obtención de la muestra se ha realizado aleatoriamente, para lo cual se han tomado doce (12) brocas con tres tipos de modelos (EX722, EX712 y EX532).

### **5.2.3. Unidad de estudio**

La unidad de estudio de la presente investigación es una broca tricónica de tungsteno en el proceso de perforación unitaria a tajo abierto en Mina Modelo, Cajamarca – Perú, 2015.

## **5.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos**

Para el presente estudio, la técnica utilizada fue una combinación de observación, revisión documental, entrevista y el análisis de una serie de pasos realizados en las pruebas de campo para determinar la influencia económica de la reducción del costo de perforación en el proceso. Para el procedimiento del trabajo y la obtención de los resultados óptimos es necesario tener en cuenta algunos aspectos importantes, los cuales se detallan a continuación.

### 5.3.1. Procedimiento previo a la recolección de datos

#### 5.3.1.1. Estado de las perforadoras

Consistió en verificar el estado actual y las condiciones óptimas operativas de las perforadoras, para ello se realizaron mediciones de presión de aire y de peso (pulldown).

Se utilizaron perforadoras PIT VIPER 271, de mayor envergadura y capacidad. Estas perforadoras llegaron con ciertas especificaciones, de las cuales hay que resaltar la capacidad del compresor, el peso o pulldown máximo, la velocidad de rotación y la presión de aire.

Lo que se hace con las mediciones es comprobar si es que estas máquinas, bajo las especificaciones que poseen, son capaces de perforar con 10 5/8". A continuación en la siguiente tabla se detallan las especificaciones más influyentes de las perforadoras Pit Viper 271.

Tabla N° 5.1. Especificaciones Pit Viper 271

ESPECIFICACIONES GENERALES PIT VIPER 271	
Diámetro de Perforación	9 7/8" - 10 5/8"
Pulldown Máximo	75,000 lbs (34020 kg)
Capacidad Compresor	1,900 CFM (53.81 m3/min)
Presión Compresor	110 psi
Presión Máxima en Broca	160 psi
Torque Máximo	8,700 ft/lb (11.795 Nm)
Rotación	150 RPM
Longitud Máxima Single Pass	55 pies (16.76 m)
Longitud Máxima Multi Pass	105 pies (32.30 m)

Fuente: Brochure, Atlas Copco Blasthole Drills Pit Viper 271.

#### **a) Medición de peso o pulldown**

La medición consiste en sacar el tricono y estabilizador de la columna de perforación. Posteriormente se coloca una balanza debajo de la barra, con una plancha metálica, para que no se hunda. Finalmente se ejerce peso sobre la balanza, registrando valores de acuerdo al manómetro de pulldown en la cabina, para hacer la comparación final entre el valor real obtenido en la medición, y el valor nominal que marcaba en la cabina.

#### **b) Medición de presión de aire**

Para poder evacuar el detritus de perforación, es necesario contar con la suficiente presión y volumen de aire. Esto está directamente relacionado con el espacio anular, las boquillas o nozzles del tricono, y la capacidad del compresor de la perforadora.

Se realiza una simulación, que se lleva a cabo sacando el tricono de la columna y colocando el equipo de medición que consiste en un tubo metálico con una abertura en la parte inferior, donde se van colocando unos discos de diferente diámetro, que simulan las boquillas de la broca. Con cada disco, se abre la llave y se suelta toda la presión de aire, se registra el valor que se tiene en cabina, y a la vez se registra la presión y temperatura de los manómetros del equipo.

Generalmente se hace con 5 discos, y estos valores son ingresados al programa Airweight.

### **5.3.2. Procedimiento de recolección de datos**

El procedimiento de esta investigación es el siguiente: Una vez verificado el estado de los equipos de perforación (A cargo del personal de Atlas Copco), y continuando con la programación en el área de perforación, se procede con la tarea de perforación en diferentes tajos (ver tabla N°5.2), utilizando

brocas tricónicas de tungsteno marca PDB Tools. Inc para diferentes tipos de terrenos en Mina Modelo.

Tabla N° 5.2. Tajos Mina Modelo.

<b>TAJOS DE MINA MODELO</b>
Rocío
Rosita
Carola
Concepción
Vanessa
Vanessa II

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

Esta fase, implica la recolección de la información requerida mediante la toma de datos, las perforadoras Pit Viper 271 vienen con un sistema denominado RCS (Sistema de control de equipo computarizado), que es el Sistema de control de equipo computarizado que permite transferir los datos de perforación vía satélite hacia la oficina, estos datos son impresos, luego llenados en un formato de control diario de brocas tricónicas que posteriormente fueron utilizados para el procesamiento y análisis del estudio de investigación.

En estos formatos de control diario, haciendo uso de las fórmulas se calculó las velocidades de penetración (ROP) y el Costo total de perforación (TDC). Su finalidad principal es proporcionarnos información sobre las condiciones de trabajo de la broca PDB Tools. Inc. en estudio, y sirve además como un medio de control y revisión de una broca gastada, que también irán en un reporte de broca tricónica descartada. A partir de los datos que nos brinda, se puede realizar un análisis de los desgastes en la broca.

### 5.3.3. Fase para procesar datos

Para esta fase, se utilizó el software Microsoft Excel en donde se almacenaron y se procesaron los datos de la investigación, el análisis de la información se realizó mediante procesos lógicos – secuenciales para la obtención de resultados válidos. Se descifran tablas, gráficas y se interpretan los resultados finales, principalmente, para ver qué efecto tuvo la velocidad de penetración y las evidencias cuantitativas en la reducción del TDC, para operaciones de tajo abierto en Mina Modelo; de igual forma se utilizó Microsoft Word para redactar el informe de investigación.

### 5.3.4. Fase de optimización de costos en perforación

En esta fase de la investigación, se planteó la determinación del TDC para optimizar la operación unitaria. En función de los factores que intervienen en la fórmula del TDC, el cual es factible con los parámetros de perforación adecuados en la operación, se obtiene un incremento de velocidad de penetración (ROP), la cual está en función de los metros perforados por la broca y el total de horas de perforación. Los factores que están relacionados directa e indirectamente con la velocidad de penetración son los siguientes:

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

### 5.3.5. Equipos e instrumentos

- ✓ Equipos de medición de Presión de Aire tipo Bazuca, para determinar las condiciones del compresor de las perforadoras.
- ✓ Equipos de medición de Pulldown BHMT, para corroborar la capacidad de empuje de las perforadas Pit Viper 271.

- ✓ Para el trabajo de perforación se usa el siguiente equipo que se muestra en la tabla N°5.3.
- ✓ Para realizar los cálculos se introduce los datos al Computador y usando el software MS Excel se obtiene los resultados para su análisis e interpretación.

Tabla N° 5.3. Equipos de perforación.

EQUIPO	TRABAJO	MARCA	MODELOS	CÓDIGO TD
Perforadoras	Producción	Atlas Copco	Pit Viper 271	20
				22
				24
				26
				27
				28

Fuente: Mina Modelo.

Tabla N° 5.4. Broca tricónica con insertos de carburo de tungsteno.

BROCA TRICÓNICA			
MARCA	MODELO	DIÁMETRO	NOZZLE
PDB Tools Inc.	EX 712	10 5/8"	5/8"
	EX 722	10 5/8"	5/8"
	EX 532	10 5/8"	3/4"

Fuente: Mina Modelo.

#### 5.3.5.1. Equipo de medición de peso (pulldown)

La prueba de pulldown de BHMT permite un examen y calibración del sistema de empuje descendente de la perforadora, ya sea hidráulico o eléctrico. Se ha desarrollado un gráfico "Indicador vs. Carga" que puede ser usado por el operador de la perforación y otro personal para la aplicación correcta del peso a la broca empleada.

Los componentes que trae el kit de medición son:

- ✓ Celda de carga hidráulica.
- ✓ Adaptador de cepillo.
- ✓ Manguera de presión,
- ✓ Indicador de peso.
- ✓ Caja de madera para su transporte.
- ✓ Software “Airweight”.



Figura N° 5.1. Equipo de medición de peso o Pulldown.

Fuente: Manual Baker Hughes Mining Tools.

### 5.3.5.2. Equipo de medición de presión de aire

La prueba de aire, que consiste en hacer funcionar el sistema de soplado de la perforadora bajo diferentes condiciones de operación, se lleva a cabo mediante la utilización de un equipo de prueba de aire básico, cuyos componentes son:

- ✓ Tubo de aluminio.
- ✓ Placas de orificio variables.
- ✓ Adaptadores de espiga API.
- ✓ Termómetro.

- ✓ Manómetro.
- ✓ Fijadores de orificio (aro de resorte).

El equipo descrito es del tipo “bazuca” y se puede encontrar en dos modalidades, los que utilizan un aro de resorte como fijador de orificio, y los que emplean una tapa de orificio atornillada para cumplir la misma función. Con esta prueba se determina la velocidad de salida de los detritos, y el diámetro adecuado de las boquillas para obtener una presión adecuada.



Figura N° 5.2. Equipo de medición de presión de Aire.

Fuente: Manual Baker Hughes Mining Tools.

**CAPÍTULO VI:**  
**DESARROLLO DE ACTIVIDADES**

En este capítulo, se presentan las actividades y las tareas realizadas en el área de perforación, este proceso empieza con la verificación del estado de las perforadoras y de manera simultánea con brocas tricónicas modelos PDB Tools. Inc., aplicados en cada terreno con características particulares que presenta la Mina Modelo.

## **6.1. Área de perforación y voladura**

Es el área encargada del desarrollo, implementación monitoreo y evaluación de los diseños de perforación y voladura. Los diseños de las mallas se hacen según los parámetros adecuados (Burden y Espaciamiento) dependiendo del tipo de terreno. Se entrega un plano con la información topográfica, donde en cada taladro se muestra su altura respectiva y además estos taladros varían de color de acuerdo a la escala de dureza que presenta el macizo rocoso ver anexo N° 8.

### **6.1.1. Proceso de perforación y voladura**

En la Mina Modelo el proceso de producción cuenta con varios sub procesos dentro de ellos es de perforación y voladura. Este sub proceso se inicia con la planificación de voladura en el cual es necesario especificar los parámetros de perforación y posteriormente de la voladura una vez obtenido los parámetros de la voladura se procede con la perforación, este último es un proceso que consiste en abrir orificios en la roca en el cual se alojarán los explosivos para su siguiente sub proceso.

Cabe resaltar también, que la operación de perforación depende directamente de la dureza y abrasividad del material rocoso. La resistencia del material rocoso es determinante para el método o medio de perforación a utilizar.

## **6.2. Descripción y análisis de pruebas de campo**

Las pruebas de campo se realizaron en diferentes tajos de la Mina Modelo (2012-2013), para lo cual se realizó siguiendo lo programado en el proyecto, sin obstaculizar o retrasar los trabajos de producción de la mina.

Para el desarrollo de estas pruebas, la mina dispuso de la colaboración de los recursos de sus proveedores y contratistas asociados para la recolección de la

información de perforación, la cual es materia de estudio. El proceso para realizar las perforaciones programadas para nuestro trabajo ha sido el protocolo (formatos) estipulado por la Mina Modelo.

A continuación se presentan el estado de las perforadoras y las pruebas en campo de cada broca que se realizaron en diferentes tipos de terrenos, parámetros de perforación y los resultados que se obtuvieron al final de la vida útil de las brocas empleadas como las mejoras en la productividad.

### 6.2.1. Estado de las perforadoras

#### 6.2.1.1. Mediciones peso (pulldown)

La capacidad de aplicar mayor peso o pulldown durante la perforación depende de las libras por pulgada que soporta cada tipo de broca, dependiendo del diámetro, lo cual se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla N° 6.1. Valores de Pulldown de acuerdo al diámetro y modelo.

Diámetro	Modelo	Lbsx plg.	Pulldown Máximo (Lbs)
9 7/8	60	6,000	59,250
9 7/8	70	7,000	69,125
10 5/8	60	6,000	63,750
10 5/8	70	7,000	74,375

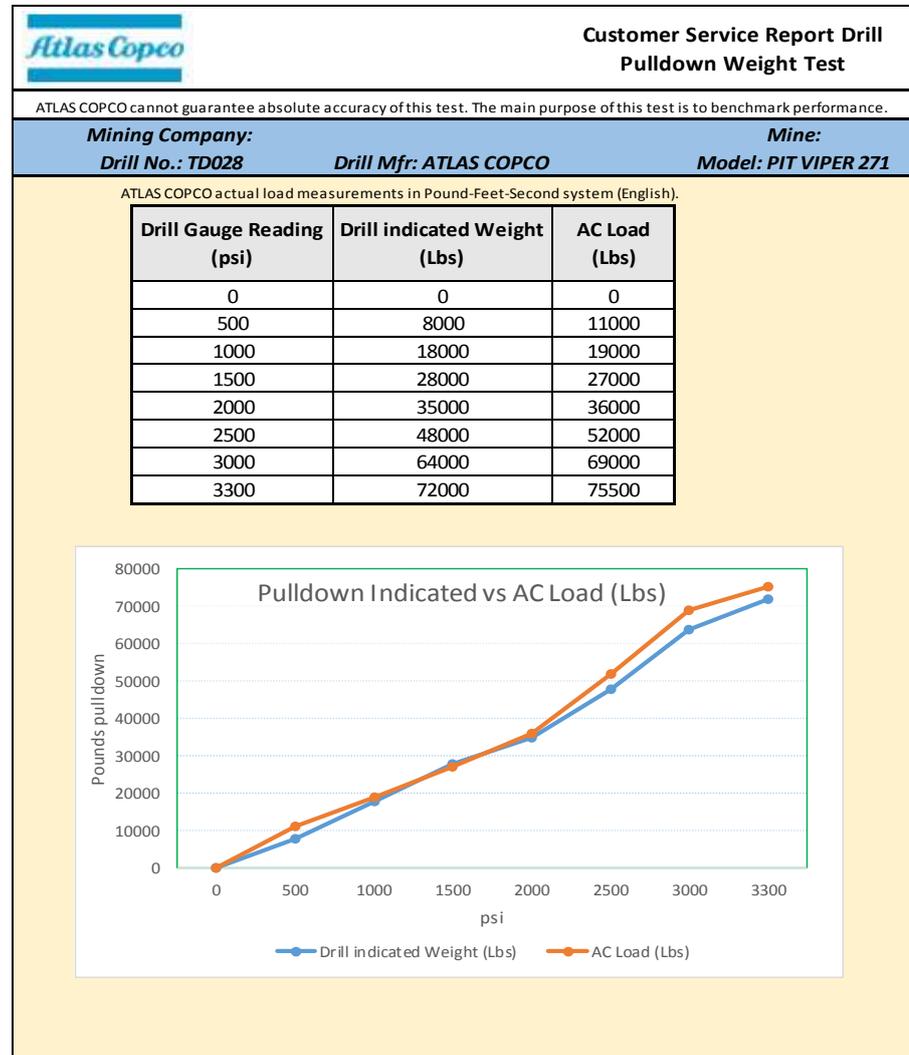
Fuente: Manual de Baker Hughes Mining Tools.

Esta comparación se basa en las especificaciones técnicas de cada fabricante de brocas, lo cual nos indica que a mayor diámetro, mayor capacidad para soportar peso.

Las mediciones de pulldown en las perforadoras están a cargo del personal de Atlas Copco-BHMT. Para el análisis de los resultados se usa el programa Airweight (Software de Atlas Copco), para obtener las curvas comparativas de peso nominal y real.

En la siguiente figura se puede apreciar el reporte entregado de la medición de una perforadora.

Tabla N° 6.2. Reporte de medición de Pulldown (Atlas Copco).



Fuente: Mina Modelo.

Las mediciones se realizaron en las 04 perforadoras PIT VIPER 271, que llegaron primero a la mina. No se toma en consideración las mediciones hechas anteriormente en las perforadoras DML (Pulldown máximo promedio 60,000 lbs.) ya que el diámetro 10 5/8" sólo será usado en las PIT VIPER.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las mediciones en las diferentes perforadoras.

Tabla N° 6.3. Valores de las mediciones de Pulldown en cada perforadora.

MANÓMETRO PERFORADORA (lbs.)	EQUIVALENCIA PESO (lbs.)	REGISTRO DE PESO EN LA BALANZA (lbs.)			
		TD 23	TD 24	TD 26	TD 28
0	0	0	0	0	0
500	8000	9 000	11000	11000	16500
1000	18000	18000	19000	20000	27000
1500	28000	25000	29000	28000	36000
2000	35000	34000	37000	36000	45000
2500	48000	51000	55000	51000	55000
3000	64000	65000	66000	66000	65000
3400	75000	72000	76000	76000	-
3500	76000	74000	-	-	75000

Fuente: Mina Modelo.

Con estas mediciones podemos comprobar que las perforadoras PIT VIPER son capaces de trabajar bajo un pulldown mayor a 70,000 libras.

Si debe tener en consideración que cuando se perforaba con 9 7/8", el pulldown máximo recomendado era de 70,000 lbs. Ahora con 10 5/8", se puede perforar con un 18% más de pulldown, muy importante para incrementar la velocidad de penetración, especialmente en las zonas duras.

#### 6.2.1.2. Mediciones de presión de aire.

El rendimiento de un compresor está sujeto a la altura de trabajo, ya que la capacidad nominal es un valor tomado a nivel del mar, por lo tanto a mayor altura, disminuye la capacidad del mismo. De igual manera, las velocidades de barrido y de salida del detritus están relacionadas con el espacio anular de la perforación, es decir, el espacio entre la barra y la broca.

Las mediciones se realizaron en todas las perforadoras PIT VIPER 271. Para esto se utilizó el software AC-BHMT de Atlas Copco. En la Figura 6.3 se puede apreciar la plantilla utilizada para la simulación y registro de las mediciones.

Tabla N° 6.4. Reporte de medición de presión de Aire (Atlas Copco).

Atlas Copco		AC-BHMT		Customer Service Report		
				Drill Air Compressor Test		
Mining Company:						
Drill No:	TD020	Drill Mfr:		Model:	Pit Viper	
Compressor Mfr:		Rated:	SCFM	1900	PSI	
Altitude, Ft.:	12,966	Air Intake Temp., °F:	52	Compressor Altitude Rating:	1214	
Bit Size, in.:	9	Pipe Dia., in.:	7	Nozzles:	5/8	
				Cab Drilling Psi:	60	
No warranty or guarantee of model or fit is made by the manufacturer of this test. It is for benchmarking and vehicle output only.						
Open Blow Test (Do not attempt on G-D compressors!)						
Cab Pressure:			Receiver PSI			
All calculations are for Minesite conditions.						
Test Orifice Diameter:	1 1/2	1 3/8	1 1/4	1 1/8	1	
Operating Receiver PSI:	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0	
Operating Cab PSI:	40.0	48.0	55.0	68.0	84.0	
Tool Air Pressure:	32.0	38.0	46.0	62.0	78.5	
Tool Air Temperature:	70	72	76	80	81	
dSCFM (Compressed Air):	1183	1150	1124	1202	1296	
Cleaning Index (Lb. Ft./Sec Force):	63,242	82,323	112,511	209,421	339,066	
% of Capacity:	97.4%	94.7%	92.6%	99.0%	99.3%	
Emp Factor:	1.565	1.565	1.565	1.565	1.565	
ACFM (Free Air):	1851	1800	1759	1880	1857	
Mine Bailing Velocity, fpm:	10,607	10,312	10,078	10,773	10,811	
Mine Bailing Velocity, worn pipe, fpm:	7,543	7,333	7,167	7,660	7,688	
Rock Type:	Sandstone Volcanics	Shale Slate	Monzonite Schist Quartzite	Diorite Dabase Gneiss	Limestone Dolomite Trappack	Magnetite Hematite Taconite
Specific Gravity:	2.5	2.6	2.7	2.8	2.7 - 3.0	
Chip Settling Velocity, Enter Chip, Specific Gravity:				2.20	Diameter 1/2	
Note: Add 1 to 2 to SG for water injection or wet holes.					13	
Chip Terminal Settling Velocity, fpm:		3,785	Limit in			
Calculated Chip Diam = 2D+1/SG,0						
Chip Exit Velocity, fpm:	6,522	6,527	6,293	6,988	7,026	
Chip Exit Velocity, fpm:	3,750	3,548	3,362	3,675	3,900	

Fuente: Mina Modelo.

Una vez ingresados los datos de las mediciones, el software calcula la cantidad de aire comprimido, la capacidad a la que trabaja el compresor, halla las velocidades de barrido y de salida del detritus. Obtenidos estos valores, se analiza cada medición, a fin de obtener los valores correctos para el análisis.

Para determinar que medición se acerca más a las condiciones de trabajo de la perforadora, primero se debe buscar el valor de PSI operacional en cabina que se acerque más al valor de PSI en cabina con el cual la perforadora trabaja, se analizan las velocidades obtenidas y se determina si son las apropiadas.

En la siguiente tabla se muestran las mediciones seleccionadas y se puede apreciar las velocidades de barrido y de salida del detritus.

Tabla N° 6.5. Resultados de las mediciones de presión de aire.

DATOS & CÁLCULOS	TD 22		TD 24		TD 25		TD 23	
Diámetro de Prueba	1 1/4		1 1/4		1 1/4		1 1/4	
PSI Operacional Medido	64		66		65		69	
PSI Operacional en Cabina	55		58		58		58	
PSI en Cabina	60		60		60		62	
Presión de Aire en el Equipo	46		45		45		44	
Temperatura del Aire en el Equipo	76		94		82		82	
dSCFM (Aire Comprimido):	1124		1085		1097		1076	
Índice de Limpieza (Lb. Ft./Sec Fuerza):	112511		101120		104499		98607	
% de Capacidad:	92.58%		91.11%		99.33%		88.59%	
Factor Altura/Temperatura:	1.565		1.596		1.565		1.565	
ACFM (Aire Libre):	1759		1731		1716		1683	
Diámetro de la Broca:	9 7/8	10 5/8	9 7/8	10 5/8	9 7/8	10 5/8	9 7/8	10 5/8
Velocidad de Barrido, fpm:	13946	8377	13725	8244	13,607	8173	13346	8016
Velocidad de Barrido, barra gastada 1", fpm:	8191	5891	8061	5797	7991	5747	7838	5637
Velocidad Salida Detritus, fpm:	10161	4592	9903	4422	9822	4388	9561	4231
Velocidad Salida Detritus, barra gastada 1", fpm:	4406	2106	4238	1975	4206	1962	4053	1852

Fuente: Mina Modelo.

La velocidad de barrido debe oscilar entre los 5 000 y 7 000 fpm, mientras que la velocidad de salida del detritus debe ser mayor a 1000 fpm.

De estos resultados podemos concluir que con un diámetro de 9 7/8" las velocidades son muy elevadas respecto a los valores obtenidos para un diámetro de 10 5/8". Esto se debe a que con ambos diámetros se trabaja con barras de 8 5/8", lo cual en el caso de 9 7/8", tiene un espacio anular menor, que genera mayor presión, pero a la vez, desgasta con mayor rapidez las herramientas de perforación, principalmente la broca y la barra.

## 6.2.2. Perforaciones realizadas

### 6.2.2.1. Inicio de perforación.

Antes de iniciar con la tarea de perforación el operador debe de revisar el formato de malla con su respectiva leyenda, donde se indica: dureza del material, inclinación y profundidad requerida para la perforación de los taladros de producción. Según se muestra en el gráfico.

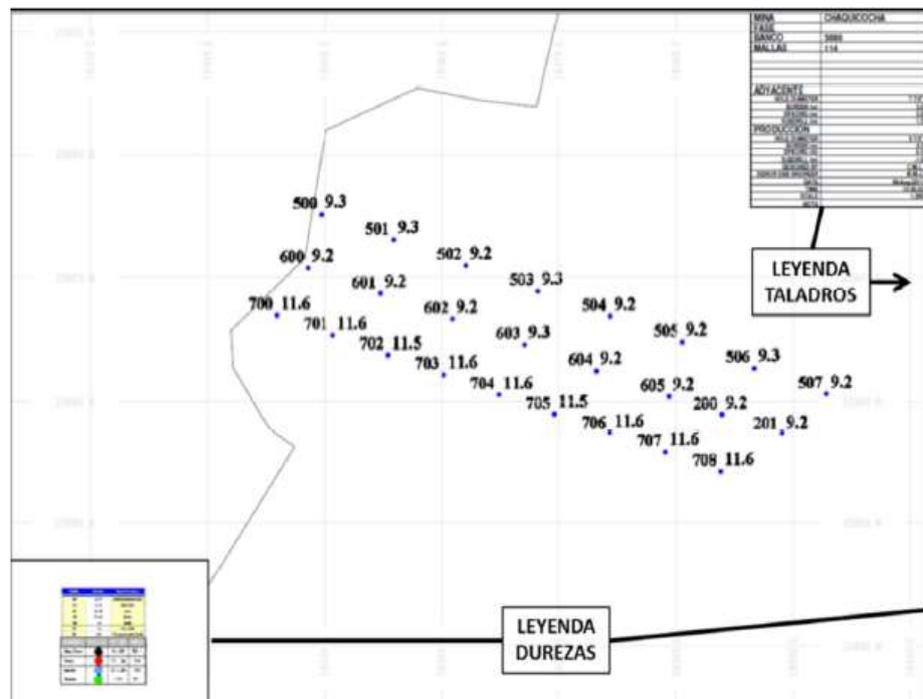


Gráfico N° 6.1. Formato de Malla de perforación de producción.

Fuente: Mina Modelo.

La perforación de taladros se realizará con una secuencia ordenada, asimismo la perforadora se tiene que ubicar de manera perpendicular a la cresta. Asimismo, se tendrá en cuenta los parámetros de perforación que se muestran en el Cuadro 6.6, según el diámetro de broca a utilizar.

Tabla N° 6.6. Parámetros de perforación máximos para operadores de Pit Viper 271.

<b>PARÁMETROS DE PERFORACIÓN</b>				
Diámetro de broca 9 7/8"				
Tipo de terreno	Peso Máx sobre la broca	Velocidad de rotación	Presión de aire en cabina	Psi DML (Máx)
Material Duro	65000 Libras	80 - 90 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	3200
Material Medio	50000 Libras	90 - 100 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	2900
Material Suave	28,000 Libras	100 - 110 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	1600
Diámetro de broca 10 5/8"				Psi Pv 271 (Máx)
Material Duro	73000 Libras	80 - 90 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	3400
Material Medio	55000 Libras	90 - 100 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	2600
Material Suave	30000 Libras	100 - 110 RPM	Min. 45 psi, Max. 58 psi	1400

Fuente: Mina Modelo (Cartilla que el operador maneja).

Las pruebas de campo se realizaron en diferentes tajos (6 tajos) de la Mina Modelo, con diferentes características de terreno (duro, medio y de medio a suave), se utilizaron seis perforadoras Pit Viper 271 de producción y 12 brocas tricónicas Marca PDB Tools. Inc. como se muestran en la tabla N° 6.7

Tabla N° 6.7. Doce Brocas con número de serie y modelo.

Broca	Número de Serie o Código	Modelo de Broca	Tipo de Terreno
			Medio - suave
BROCA 1	A403020	EX712	Medio - suave
BROCA 2	A4-6200059	EX722	Duro
BROCA 3	A4-06585	EX722	Duro
BROCA 4	A46200063	EX722	Duro
BROCA 5	A4-02509	EX712	Medio
BROCA 6	A4-02894	EX532	Medio –Suave
BROCA 7	A4-61002	EX722	Duro
BROCA 8	A4-6200065	EX712	Medio – suave
BROCA 9	A4-6200055	EX712	Medio
BROCA 10	A4-6200052	EX712	Medio – suave
BROCA 11	A4-61109	EX532	Medio -Suave
BROCA 12	A4-6202127	EX722	Duro

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### 6.2.2.2. Determinación del TDC

La velocidad de penetración (ROP) se determinó mediante la fórmula mostrada a continuación.

$$ROP = \frac{M}{T}$$

Donde:

ROP: Velocidad de penetración [m/h]

M: Total de metros perforados por la broca tricónica [m]

T: Tiempo de operación del Tricono [h].

Y el costo total de perforación mediante la fórmula:

$$TDC = \frac{B}{M} + \frac{D}{M/T}$$

Donde:

TDC: Costo Total de Perforación [US\$/m]

B: Precio de la broca en [US\$]

D: Costo horario de la perforadora [US\$/h]

El costo total de perforación (TDC) es una función de los metros perforados y de la velocidad de penetración obtenida en la perforación (es decir el ROP y M son inversamente proporcionales al costo o TDC). Esto quiere decir que a mayor velocidad de penetración, el costo total de perforación se reduce.

### 6.2.2.3. Determinación del descarte oportuno (momento óptimo) de la broca

La única razón para retirar una broca de servicio es que su uso ya no sea económico; esto normalmente sucede cuando un rodamiento se traba o falla la estructura de corte, en cualquiera de estos casos, la broca deja de ser económica, porque no perfora o lo hace con extrema lentitud. Hay una razón menos sutil para dejar

de usar una broca, es el desgaste gradual de la estructura de corte que va disminuyendo la velocidad de penetración.

El descarte oportuno de la broca se analizó usando la metodología síntoma y causa, sin abarcar todas solo de las más comunes en el desgaste.

Un método experimentado para determinar el momento preciso para suspender la perforación y efectuar un cambio de broca consiste en ir calculando los costos por metro parciales y graficar (Gráfico N° 6.2) los mismos contra el tiempo.

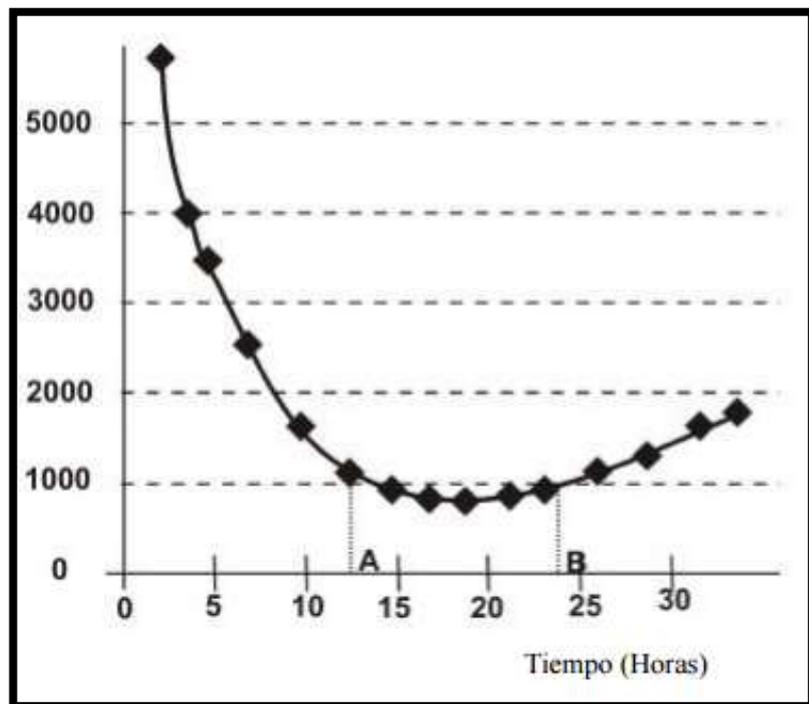


Gráfico N° 6.2. Costo por metro perforado a través del tiempo.

Fuente: Mina Modelo.

El costo por metro perforado al inicio de la perforación con cualquier tipo de broca representará siempre el costo por metro más alto debido a que los metros perforados son pocos. Lo anterior se observa en el gráfico N° 6.2: conforme se incrementa la longitud perforada, y el tiempo, se tendrá una tendencia a disminuir el costo

por metro, como se muestra en la región 0A de la gráfica adjunta. Posteriormente tendrá un comportamiento más o menos constante, después de la estabilización del costo por metro (región AB) y, finalmente, se observará que se incrementa el costo por metro (de la región B en adelante). Esto podría indicar que la vida útil de la broca ha terminado. El costo por metro aumenta en razón del grado de desgaste que ha alcanzado la broca tricónica en su estructura de corte, en el caso de brocas de diamante como los de insertos de tungsteno.

De lo anterior se concluye que el momento óptimo para efectuar el cambio de broca es el punto B. es obvio que a partir de éste, el costo por metro se empieza a incrementar porque se incrementa el tiempo de perforación y no así los metros perforados.

La aplicación de este método puede complicarse si no se tiene la experiencia de campo suficiente para visualizar qué está pasando con todos los parámetros involucrados: si el contacto geológico es el mismo, puesto que tienen propiedades en algunos casos totalmente diferentes, y la dureza, el factor más importante en cuanto al rendimiento de barrena. Lo que no sería recomendable es cambiar la broca si los tiempos de perforación se incrementan y mucho menos si la broca que se está utilizando puede perforar en el cambio de contacto geológico.

#### **6.2.2.4. Perforaciones realizadas en campo (tajos de la Mina Modelo) con las doce brocas tricónicas durante su vida útil**

En adelante se describirán las perforaciones para las 12 brocas tomadas en cuenta para el presente trabajo como también consideraremos el ROP final de cada broca como la velocidad ponderada para su respectiva diferencia y análisis.

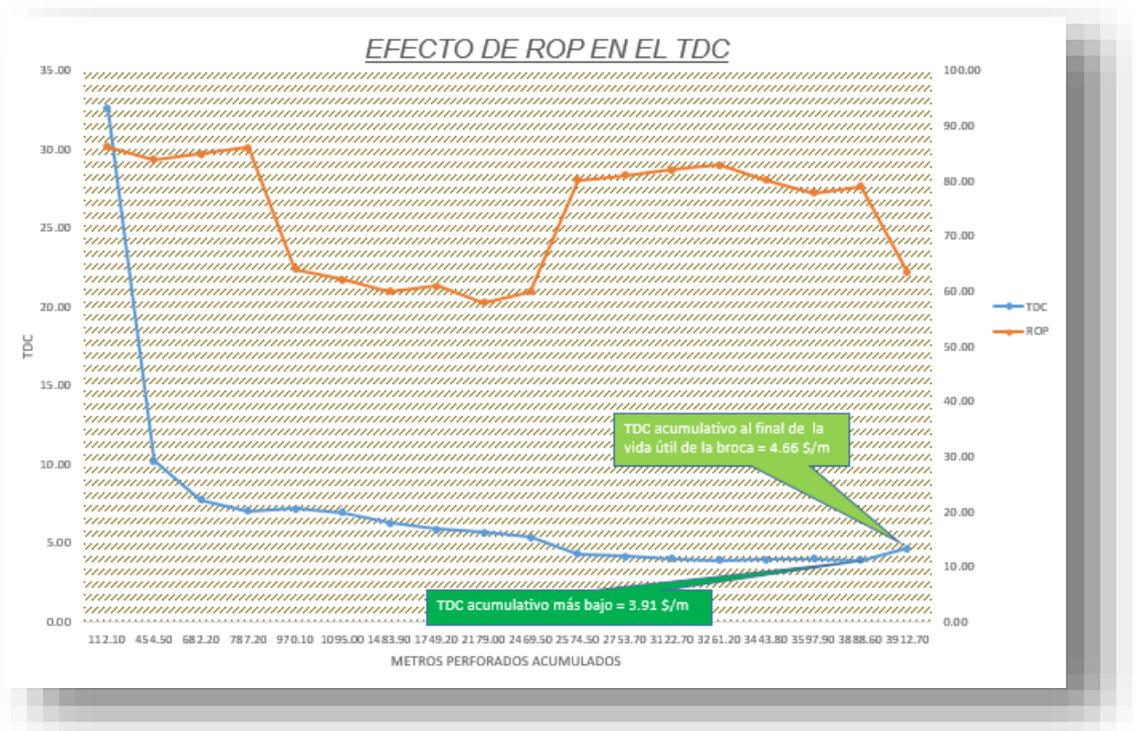


**Observaciones:**

La broca perforó el 57% de su vida útil en el tajo Vanessa Nv.3770 con muy buena velocidad de penetración y el 43% en el tajo Carola Nv.3480 donde en este último baja la velocidad debido al terreno mítoso.

Esta broca llegó a 3912.70 m, con una velocidad ponderada de 63.42 m/h con un TDC=4.66 US\$/m.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 01.



Gráfica N° 6.3. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 01.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se observa en el gráfico, que la reducción significativa en la velocidad de penetración produce un aumento en el TDC, en el último tramo de su recorrido de la broca deja de ser económica y la estructura de corte se vuelve ineficaz por

desgaste y erosión, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.66 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 3.91 US\$/m. Además cabe indicar que el TDC óptimo para poder descartar la broca sería en el TDC acumulativo más bajo de 3.91 US\$/m.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 01:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.9. Reporte de broca tricónica N° 01.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		x
25/01/2012	20/04/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Terreno mitoso	Incomp.
					x	x	
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
1200 -2500 PSI		90 - 110	53 -65	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)	
10 5/8''	3020	#970015	EX712	PDB	16mm	3912.7	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.		TDC	
55.24	340	63.42	3349	241.03		4.66	
<u>Fotografía 01</u>				<u>Fotografía 02</u>			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	4	Desgaste normal y rotura de insertos					
Insertos Externos	7	Desgaste normal					
Origen del Descarte	ER - BT	Interferencia de conos y broca apretada (Cono 1 y 2)					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)					
Condición de Rodamiento	6						
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Erosión de cono 1 y 2					
Otros Desgastes	BT	Rotura de inserto					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste de shirttail					
Comentario							
La Broca se Descarto por interferencia de conos, erosión del cono 1 y 2							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 02:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Abril del 2012 en el nivel 3770\_3780, con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 406 taladros en terreno duro, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.10. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 02.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:18/05/2012		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
<i>Marca :</i> PDB Tools Inc.		<i>Diámetro :</i> 10 5/8"								
<i>Modelo :</i> EX722		<i>Nozzle :</i> 5/8"								
<i>Código :</i> A4-6200059		<i># Ensamblaje :</i> ###								
<i>Precio :</i> 3349 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b>										
<i>Mina :</i> Mina Modelo		<i>Material :</i> Duro								
<i>Tajo :</i> Vanessa		<i>Características :</i> Silice masiva,granular.								
<i>Banco :</i> 3770_3780		<i>Perforadora :</i> PV-271 (26)								
<i>Profundidad :</i> 12 m		<i>Compresor :</i> 1900 cfm								
		<i>C.H.P.:</i> 241.03 US\$/h								
<b>III. Parámetros de Perforación Aplicados</b>										
FECHA	GUARDIA	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
31-mar	II	Vanessa II_4050	Duro	154	154.00	3.50	44.00	27.22		
02-abr	I	Vanessa_3770	Duro	379.8	533.80	5.84	65.03	9.98		
02-abr	II	Vanessa_3770	Duro	229	762.80	3.52	65.06	8.10		
03-abr	I	Vanessa_3770	Duro	471.9	1234.70	7.37	64.03	6.48		
03-abr	II	Vanessa_3770	Duro	443.5	1678.20	6.93	64.00	5.76		
04-abr	I	Vanessa_3780	Duro	220.9	1899.10	3.51	62.93	5.59		
04-abr	II	Vanessa_3770	Duro	88	1987.10	1.42	61.97	5.57		
05-abr	I	Vanessa_3780	Duro	232.2	2219.30	3.69	62.93	5.34		
05-abr	II	Vanessa_3780	Duro	482.7	2702.00	7.54	64.02	5.00		
06-abr	I	Vanessa_3780	Duro	356.6	3058.60	5.75	62.02	4.98		
06-abr	II	Vanessa_3780	Duro	437.7	3496.30	7.18	60.96	4.91		
07-abr	I	Vanessa_3780	Duro	386.4	3882.70	6.23	62.02	4.75		
07-abr	II	Vanessa_3770	Duro	533.5	4416.20	8.89	60.01	4.77		
08-abr	I	Vanessa_3770	Duro	80.5	4496.70	1.32	60.98	4.70		
08-abr	II	Vanessa_3770	Duro	46.4	4543.10	0.75	61.87	4.63		
09-abr	I	Vanessa_3770	Duro	127.2	4670.30	2.04	62.35	4.58		
FECHA	GUARDIA	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
31-mar	II	65,000	80	54	Normal	1	1	1	1	
02-abr	I	64,000	85	52	Normal	1	1	1	1	
02-abr	II	66,000	83	54	Normal	1	1	1	2	
03-abr	I	63,000	81	54	Normal	1	2	2	2	
03-abr	II	64,000	80	55	Normal	2	2	2	2	
04-abr	I	61,000	83	54	Normal	2	2	3	2	
04-abr	II	62,000	84	55	Normal	2	3	3	3	
05-abr	I	68,000	86	54	Normal	3	3	3	3	
05-abr	II	65,000	80	54	Normal	3	4	3	3	
06-abr	I	67,000	80	55	Normal	4	4	3	4	
06-abr	II	64,000	89	55	Normal	4	5	4	4	
07-abr	I	66,000	88	55	Normal	4	5	4	4	
07-abr	II	68,000	85	53	Normal	5	6	4	4	
08-abr	I	65,000	84	55	Normal	5	7	5	5	
08-abr	II	63,000	85	54	Normal	6	7	6	5	
09-abr	I	64,000	87	55	Normal	6	8	7	5	

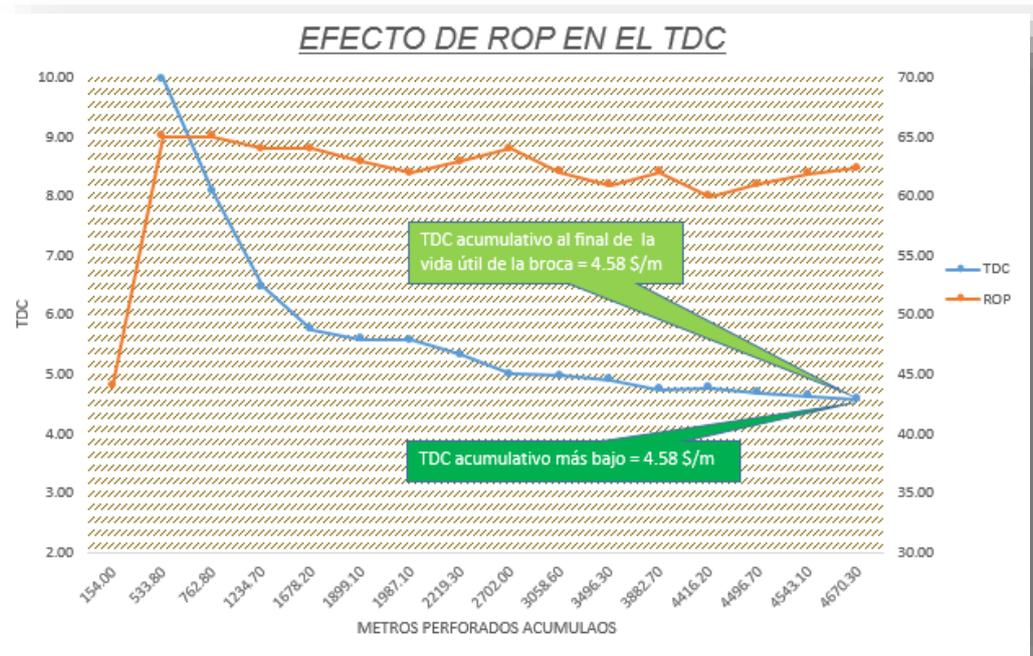
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

La broca perforó solo en el tajo Vanessa Nv.3770 en terreno de dureza R5 (100-200Mpa), Esta broca llego a 4670.30 m con una velocidad ponderada de 62.35 m/h y TDC=4.58 US\$/m.

Esta zona del tajo contiene Azufre Nativo, se perforó con los parámetros adecuados de perforación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 02.



Gráfica N° 6.4. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 02

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

En el gráfico se muestra el efecto del ROP en el TDC. En el último tramo de su corrida de perforación se aprecia que disminuye el ROP hasta 60.01 m/h, produciendo un aumento repentino del TDC, luego aumenta la velocidad significativamente, mejorando así la reducción del TDC; es por ello que el descarte

oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.58 US\$/m, y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 4.58 US\$/m.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 02:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.11. Reporte de broca tricónica N° 02.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		
31/03/2012	09/04/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Incomp.
				x		x	
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
2800 -32000 PSI		80 - 90	56	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)	
10 5/8 ''	6200059	##	EX722	PDB	16mm	4670.3	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.		TDC	
75.48	406	62.35	3349	241.03		4.58	
<u>Fotografía 01</u>				<u>Fotografía 02</u>			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	6	Desgaste normal y rotura de insertos					
Insertos Externos	8	Rotura de insertos y desgaste normal					
Origen del Descarte	ER - BT	Erosión cono 3, insertos rotos y Cruzamientos de Polines (Cono 3)					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)					
Condición de Rodamiento	7	(Cono 3 mas Daño)					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Erosión de cono 3					
Otros Desgastes	CT	Insertos Astillados					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado					
Comentario							
La Broca se Descarto por Erosión de (Cono 3), Inserto astillado y cruzamiento de polines (Cono 3)							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 03:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Abril del 2012 en el nivel 3780\_3770, con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 438 taladros en terreno duro, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.12. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 03.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:17/05/2012			PÁGINA 1 de 1			
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
<b>Marca :</b>	PDB Tools Inc.		<b>Diámetro :</b> 10 5/8"							
<b>Modelo :</b>	EX722		<b>Nozzle :</b> 5/8"							
<b>Código :</b>	A4-06585		<b># Ensamblaje :</b> #970006							
<b>Precio :</b>	3349 US\$									
<b>II.- Datos de Operación</b>										
<b>Mina :</b>	Mina Modelo		<b>Material :</b> Duro							
<b>Tajo :</b>	Vanessa		<b>Características :</b> Sílice masiva, granular y azufre nativo.							
<b>Banco :</b>	3780_3770		<b>Perforadora :</b> PV-271 (28)							
<b>Profundidad :</b>	12 m		<b>Compresor :</b> 1900 cfm <b>C.H.P.:</b> 241.03 US\$/h							
<b>III. Parámetros de Perforación</b>										
FECHA	GUARDIA	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
09-abr	B	Vanessa 3780	Duro	380.0	380.00	5.76	65.97	12.47		
10-abr	A	Vanessa 3780	Duro	387.5	767.50	6.05	64.05	8.13		
11-abr	A	Vanessa 3780	Duro	172.0	939.50	2.65	64.91	7.28		
11-abr	B	Vanessa 3770	Duro	448.0	1387.50	7.23	61.96	6.30		
12-abr	A	Vanessa 3770	Duro	380.9	1768.40	6.05	62.96	5.72		
12-abr	B	Vanessa 3770	Duro	574.9	2343.30	8.98	64.02	5.19		
13-abr	B	Vanessa 3770	Duro	433.4	2776.70	6.77	64.02	4.97		
14-abr	A	Vanessa 3770	Duro	337.2	3113.90	5.19	64.97	4.79		
14-abr	B	Vanessa 3770	Duro	475.3	3589.20	7.43	63.97	4.70		
15-abr	A	Vanessa 3770	Duro	589.7	4178.90	9.36	63.00	4.63		
15-abr	B	Vanessa 3770	Duro	565.5	4744.40	9.12	62.01	4.59		
16-abr	A	Vanessa 3770	Duro	301.3	5045.70	4.88	61.74	4.57		
FECHA	GUARDIA	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
09-abr	B	63,000	82	53	Normal	1	1	1	1	
10-abr	A	62,000	83	55	Normal	1	1	1	1	
11-abr	A	66,000	83	54	Normal	1	2	1	1	
11-abr	B	65,000	85	55	Normal	1	2	1	1	
12-abr	A	65,000	80	53	Normal	2	2	1	2	
12-abr	B	66,000	80	55	Normal	2	2	2	2	
13-abr	B	63,000	89	52	Normal	2	3	2	2	
14-abr	A	66,000	88	55	Normal	2	3	3	2	
14-abr	B	67,000	85	52	Normal	2	4	3	3	
15-abr	A	60,000	84	55	Normal	3	4	4	3	
15-abr	B	63,000	85	52	Normal	3	5	5	3	
16-abr	A	64,000	86	55	Normal	3	5	6	4	

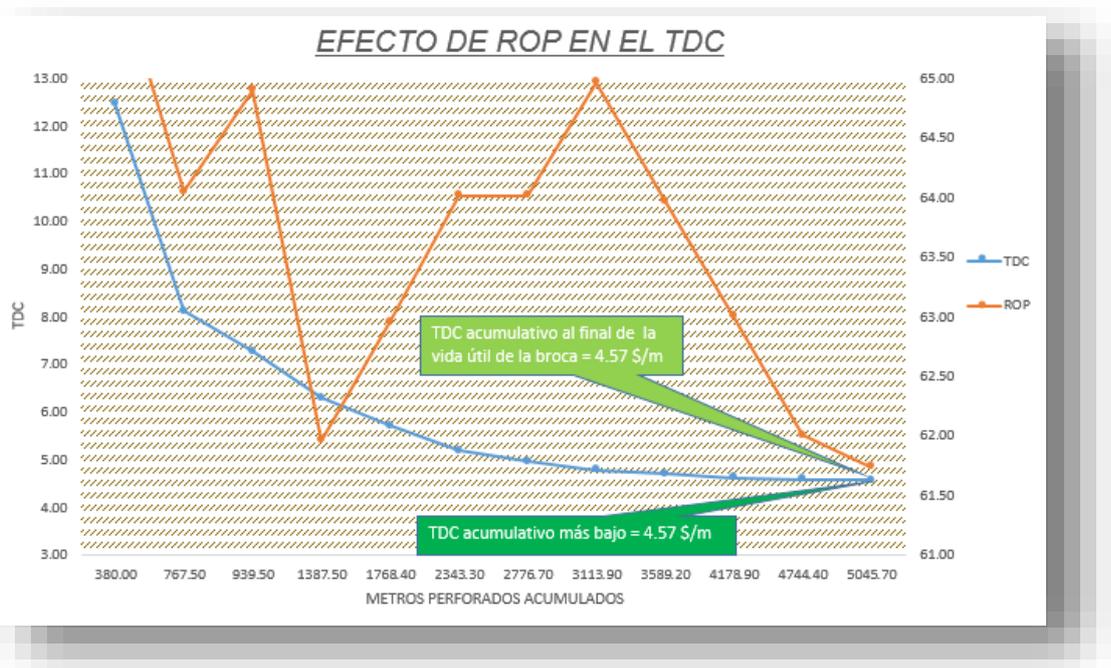
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Observaciones:

La broca perforó solo en el tajo Vanessa Nv.3780 y 3770 en terreno de dureza R5 (120-200Mpa), esta broca llegó a 5045.64 m con una velocidad ponderada de 61.74 m/h y TDC=4.57 US\$/m.

Esta zona del tajo contiene Azufre Nativo, se perforó con los parámetros adecuados de perforación

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 03.



Gráfica N° 6.5. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 03.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Interpretación:

En el gráfico se muestra el efecto del ROP en el TDC, que al final de la vida útil de la broca, la velocidad de penetración se reduce significativamente, debido a que la estructura de corte se vuelve ineficaz por rotura, erosión y desgaste, es por ello, que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.57 US\$/m, y consideramos también un TDC acumulativo más bajo que en este caso tiene el mismo valor.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 03:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.13. Reporte de broca tricónica N° 03.

Titulo: Reporte de Broca Tricónica Descartada						
<u>Tipo de Terreno</u>						
			Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía		x		
09/04/2012	28/04/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú	Duro	Suave	Abrasivo	Incomp.
			x		x	
<u>Parámetros de Perforación</u>						
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros	
2800 -32000 PSI		80 - 90	54	Normal	correcta aplicación	
<u>Datos de Broca</u>						
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)
10 5/8"	6585	#970006	EX722	PDB	16mm	5045.7
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC	
79.47	438	61.74	3349	241.03	4.57	
						
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>						
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes				
Insertos Internos	3	Desgaste normal de insertos				
Insertos Externos	5	Desgaste normal de los insertos				
Origen del Descarte	ER - BT	Erosión cono 2 y Cruzamientos de Polines (Cono 2)				
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)				
Condición de Rodamiento	6	(Cono 2 Mas Daño)				
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Erosión de cono 3				
Otros Desgastes	CT	Insertos Astillados				
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado				
Comentario						
La Broca se Descarto por Erosión de (Cono 2) y cruzamiento de polines (Cono 2)						

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 04:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Abril del 2012 en el nivel 3760\_3770 con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 368 taladros en terreno duro, los data se muestran a continuación.

Tabla N° 6.14. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 04.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:22/05/2012		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b> Marca : PDB Tools Inc. <span style="float:right">Diámetro : 10 5/8"</span> Modelo : EX722 <span style="float:right">Nozzle : 5/8"</span> Código : A4-6200063 <span style="float:right">'Ensamblaje : ###</span> Precio : 3349 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b> Mina : Mina Modelo <span style="float:right">Material : Duro</span> Tajo : Vanessa <span style="float:right">Características : Silice masiva,granular y azufre nativo.</span> Banco : 3760_3770 <span style="float:right">Perforadora : PV-271 (28)</span> Profundidad : 11.5 m <span style="float:right">Compresor : 1900 cfm</span> <span style="float:right">C.H.P.: 241.03 US\$/h</span>										
<b>III. Parámetros de Perforación Aplicados</b>										
FECHA	GUARDIA	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
18-abr	A	Vanessa_3760	Duro	384	384.00	5.73	67.02	12.32		
18-abr	B	Vanessa_3760	Duro	384	768.00	6.00	64.00	8.13		
19-abr	A	Vanessa_3760	Duro	390.3	1158.30	6.19	63.05	6.71		
19-abr	B	Vanessa_3760	Duro	420	1578.30	6.56	64.02	5.89		
20-abr	A	Vanessa_3760	Duro	516.9	2095.20	8.34	61.98	5.49		
20-abr	B	Vanessa_3760	Duro	340	2435.20	5.40	62.96	5.20		
21-abr	A	Vanessa_3760	Duro	421.9	2857.10	6.80	62.04	5.06		
21-abr	B	Vanessa_3760	Duro	395	3252.10	6.27	63.00	4.86		
22-abr	A	Vanessa_3760	Duro	564.7	3816.80	9.11	61.99	4.77		
22-abr	B	Vanessa_3760	Duro	417.7	4234.50	6.73	62.07	4.67		
FECHA	GUARDIA	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
18-abr	A	66,000	84	54	Normal	1	1	1	1	
18-abr	B	64,000	85	52	Normal	1	2	1	1	
19-abr	A	65,000	84	54	Normal	2	2	1	2	
19-abr	B	68,000	86	54	Normal	2	3	2	2	
20-abr	A	65,000	85	54	Normal	2	4	2	3	
20-abr	B	67,000	80	55	Normal	3	5	3	3	
21-abr	A	70,000	90	55	Normal	3	5	5	4	
21-abr	B	66,000	88	55	Normal	3	6	5	4	
22-abr	A	68,000	90	53	Normal	4	7	6	5	
22-abr	B	64,000	84	55	Normal	4	7	7	5	

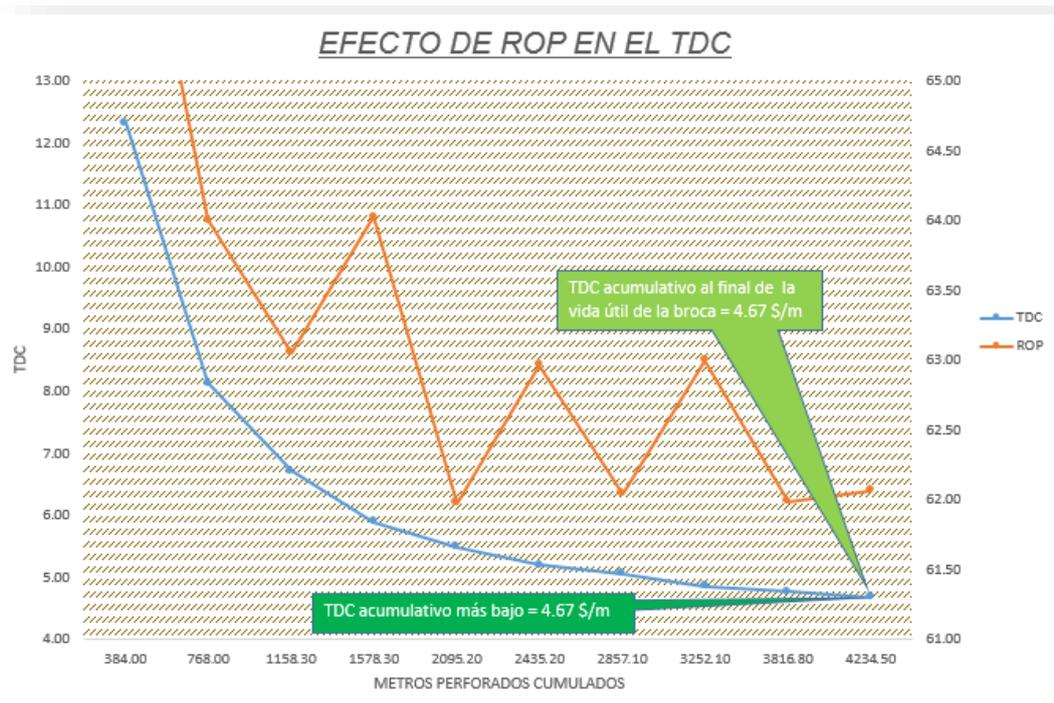
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Observaciones:

La broca perforó solamente en el tajo Vanessa Nv.3760 en terreno de dureza R5 (120-200Mpa), Esta broca llego a 4234.50 m. con una velocidad ponderada de 62.07 m/h y TDC=4.67 US\$/m.

Esta zona del tajo contiene Azufre Nativo, se perforó con los parámetros adecuados de operación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 04.



Gráfica N° 6.6. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 04.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Interpretación:

En el gráfico, se muestra el efecto del ROP en el TDC, que al final de la vida útil de la broca la velocidad de penetración se reduce significativamente, ya que la estructura de corte se vuelve ineficaz por pérdida de los insertos y desgaste, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulado al final de la vida de la broca es 4.67 US\$/m, y consideramos también un TDC acumulado 4.67 US\$/m el cual es el más bajo.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 04:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.15. Reporte de broca tricónica N° 04.

Titulo: Reporte de Broca Tricónica Descartada								
<u>Tipo de Terreno</u>				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.	
Montaje	Desmontaje	Compañía		x				
18/04/2012	22/04/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Incomp.	
				x		x		
<u>Parámetros de Perforación</u>								
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros			
2800 -32000 PSI		80 - 90	55	Normal	correcta aplicación			
<u>Datos de Broca</u>								
Diámetro	Numero de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)		
10 5/8"	6200063	##	EX722	PDB	16mm	4234.5		
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC			
67.30	368	62.07	3349	241.03	4.67			
<u>Fotografía 01</u>				<u>Fotografía 02</u>				
								
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>								
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes						
Insertos Internos	4	Desgaste normal y rotura de insertos						
Insertos Externos	7	Desgaste normal y rotura de insertos						
Origen del Descarte	ER - BT	Erosión cono 2, Insertos rotos e Insertos astillados (Cono 2 y 3)						
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)						
Condición de Rodamiento	7	(Cono 3 mas Daño trabado)						
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Erosión de cono 2						
Otros Desgastes	CT	Insertos Astillados, perdida de insertos en la nariz						
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado						
Comentario								
La Broca se Descarto por Erosión de (Cono 2), perdida de Inserto en la nariz inserto astillado y rotura de inserto								

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

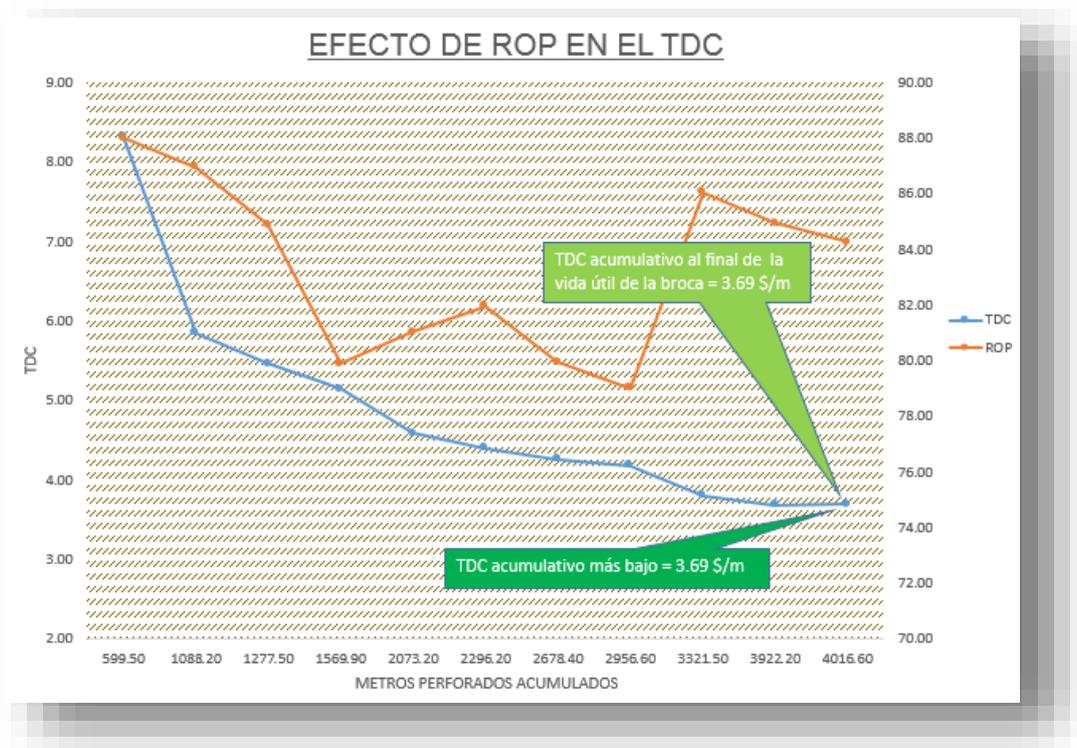


### Observaciones:

La broca perforó solo en el tajo Vanessa Nv.3760 y 3770 en terreno de dureza R2-R4 (20-75Mpa), esta broca llegó a 4016.60 m con una velocidad ponderada de 84.29 m/h y TDC de 3.69 US\$/m, el cual es un excelente resultado.

El modelo EX712 dio muy buenos resultados en terreno medio a suave, se observa cómo va evolucionando el desgaste de la broca durante la perforación, el operador aplica los parámetros adecuados durante la perforación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 05.



Gráfica N° 6.7. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 05.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Interpretación:

Como se observa en el gráfico, que la reducción en la velocidad de penetración produce un aumento en el TDC en la última parte de su recorrido de la broca, el

cual deja de ser económica y la estructura de corte se vuelve ineficaz por desgaste y cruzamiento de polines, no perfora o lo hace con extrema lentitud, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 3.69 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo con el mismo valor.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 05:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.17. Reporte de broca tricónica N° 05.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		
16/04/2012	07/05/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
					x		
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown	R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros			
1600 -2600 PSI	90 - 100	55	Normal	correcta aplicación			
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)	
10 5/8"	2509	##	EX512	PDB	16mm	4016.6	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC		
47.98	349	84.29	3349	241.03	3.69		
Fotografía 01		Fotografía 02		Fotografía 03			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	4	Desgaste normal de insertos y rotura de insertos					
Insertos Externos	6	Desgaste normal de insertos y erosión de insertos de calibre (cono2)					
Origen del Descarte	ER-BT	Erosión cono 2 y cruzamiento de polines (cono 2)					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)					
Condición de Rodamiento	8	Cono 2 mas dañado					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Erosión del cono 2					
Otros Desgastes	CT	Insertos internos cono 3 astillado					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste de shirttail					
Comentario							
La Broca se descarto por erosión de cono 2 y cruzamiento de polines ( cono 2), erosión insertos de calibre.							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 06:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Mayo del 2012, en el nivel 3396\_3456\_3468\_4050 del tajo Rosita con una profundidad de banco de 14 m, con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 703 taladros en terreno mitoso, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.18. Datos y resultados de ROP Y TDC de broca tricónica N° 06.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:12/06/2012		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
<b>Marca :</b> PDB Tools Inc. <b>Modelo :</b> EX532 <b>Código :</b> A4-02894 <b>Precio :</b> 3349 US\$			<b>Diámetro :</b> 10 5/8" <b>Nozzle :</b> 3/4" <b># Ensamblaje :</b> #970002							
<b>II.- Datos de Operación</b>										
<b>Mina :</b> Mina Modelo <b>Tajo :</b> Carola_Rosio <b>Banco :</b> 3396_3456_3468_4050 <b>Profundidad :</b> 14 m			<b>Material :</b> Medio a Suave <b>Características :</b> Terreno Mitozo <b>Perforadora :</b> PV-271 (27) <b>Compresor :</b> 2600 cfm <b>C.H.P.:</b> 241.03 US\$/h							
<b>III. Parámetros e Perforación Aplicados</b>										
FECHA	TURNO	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
05-may	B	Rosita 3396	Terreno-Mitoso	15.0	15.00	0.20	75.00	226.48		
06-may	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	173.1	188.10	2.37	73.04	21.10		
06-may	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	813.7	1001.80	11.00	73.97	6.60		
07-may	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	427.0	1428.80	5.93	72.01	5.69		
07-may	Noche	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	1028.7	2457.50	14.49	70.99	4.76		
08-may	Dia	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	364.7	2822.20	5.07	71.93	4.54		
08-may	Noche	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	750.0	3572.20	10.56	71.02	4.33		
09-may	Dia	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	516.3	4088.50	7.07	73.03	4.12		
09-may	Noche	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	710.0	4798.50	10.14	70.02	4.14		
10-may	A	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	459.9	5258.40	6.76	68.03	4.18		
10-may	II	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	710.3	5968.70	10.29	69.03	4.05		
11-may	A	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	26.4	5995.10	0.38	69.47	4.03		
11-may	II	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	379.7	6374.80	5.75	66.03	4.18		
13-may	II	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	403.2	6778.00	6.20	65.03	4.20		
14-may	Dia	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	176.3	6954.30	2.67	66.03	4.13		
17-may	B	Rosio 4050	Terreno-Mitoso	501.8	7456.10	6.35	79.02	3.50		
18-may	I	Rosio 4050	Terreno-Mitoso	210.0	7666.10	2.73	76.92	3.57		
18-may	B	Rosio 4050	Terreno-Mitoso	118.9	7785.00	1.52	78.22	3.51		
19-may	I	Rosio 4050	Terreno-Mitoso	491.6	8276.60	7.56	65.03	4.11		
19-may	B	Rosio 4050	Terreno-Mitoso	158.3	8434.90	2.49	63.57	4.19		
FECHA	TURNO	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
05-may	B	27,000	98	65	Normal	1	1	1	1	
06-may	A	22,000	105	65	Normal	1	1	1	1	
06-may	B	18,000	110	65	Normal	2	1	1	1	
07-may	A	17,000	96	62	Normal	2	1	1	2	
07-may	Noche	16,000	110	65	Normal	2	2	1	2	
08-may	Dia	14,000	110	60	Normal	2	2	1	2	
08-may	Noche	16,000	110	65	Normal	2	2	1	2	
09-may	Dia	20,000	95	65	Normal	2	2	1	2	
09-may	Noche	26,000	105	65	Normal	3	3	2	2	
10-may	A	15,000	105	60	Normal	3	3	2	2	
10-may	II	17,000	98	60	Normal	3	3	2	3	
11-may	A	15,000	110	60	Normal	3	3	2	3	
11-may	II	20,000	105	65	Normal	4	3	2	3	
13-may	II	20,000	105	65	Normal	4	3	2	3	
14-may	Dia	16,000	100	65	Normal	4	3	3	4	
17-may	B	26,000	105	60	Normal	4	4	3	4	
18-may	I	25,000	100	58	Normal	5	4	3	4	
18-may	B	27,000	98	58	Normal	5	4	3	4	
19-may	I	23,000	100	60	Normal	5	4	3	5	
19-may	B	20,000	110	58	Normal	5	4	3	5	

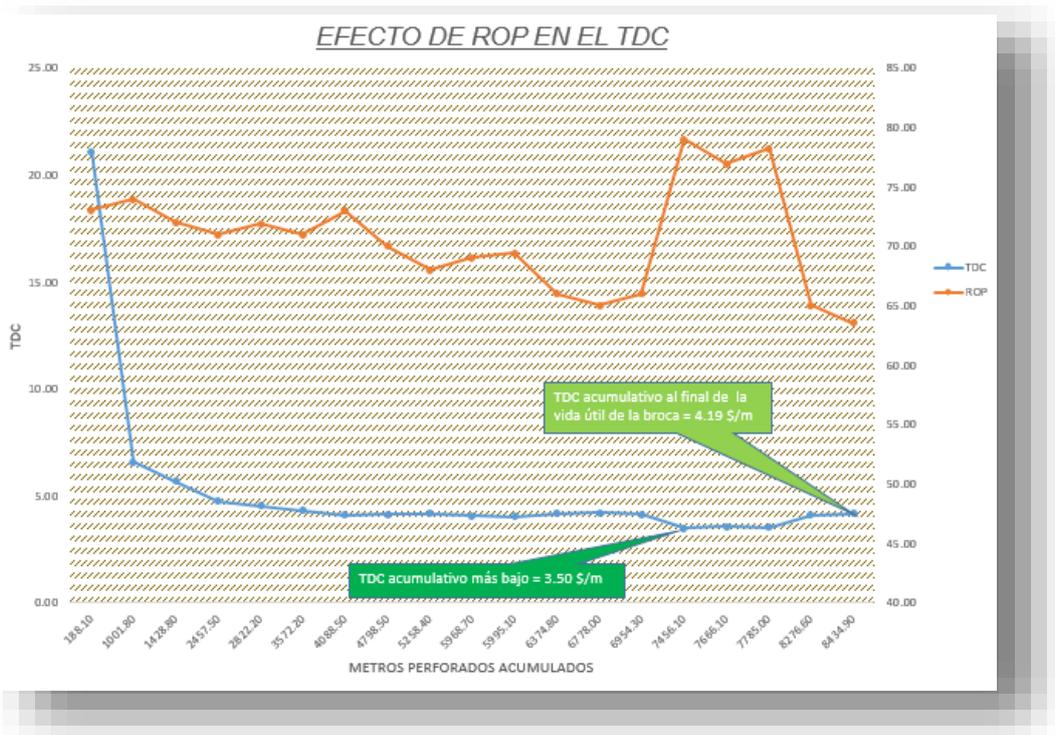
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

Esta broca llegó a 8434.90 m con una velocidad ponderada de 63.57 m/h y TDC de 4.19US\$/m; evidenciándose que los resultados son buenos a pesar del terreno mitoso. Este modelo EX532 se comporta muy bien en terreno media a suave.

Además cabe señalar que, la velocidad de penetración se ve afectada debido al terreno mitoso, y la inestabilidad del taladro para el armado durante la perforación. Se observa también que la curva del descarte oportuno de la broca nos refleja que se está descartando en un buen punto sin afectar la operación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 06.



Gráfica N° 6.8. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 06.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se observa en el gráfico, que la reducción en la velocidad de penetración produce un aumento en el TDC en la última parte de su recorrido de la broca, deja de ser económica y la estructura de corte se vuelve ineficaz por desgaste, no

perfora, lo hace con extrema lentitud, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.19 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 3.50 US\$/m. Además cabe indicar que el TDC óptimo para poder descartar la broca sería en el TDC acumulativo más bajo.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 06:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.19. Reporte de broca tricónica N° 06.

Titulo: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		x
05/05/2012	19/05/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
					x		x
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
800 -1400 PSI		100 - 110	58 -65	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf. (m)	
10 5/8 "	2894	#97002	EX532	PDB	16mm	8432.9	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC		
55.24	703	63.57	3349	241.03	4.19		
Fotografía 01		Fotografía 02		Fotografía 03			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	5	Desgaste normal y erosión de insertos de la nariz cono (1,2 y 3)					
Insertos Externos	4	Desgaste normal y erosión de insertos periféricos					
Origen del Descarte	CR - SD	Perdidas de narices (coring),desgaste de shirttail (3 conos)					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos)					
Condición de Rodamiento	6						
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Perdidas de insertos en la nariz					
Otros Desgastes	BT	Rotura de inserto					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste de shirttail					
Comentario							
La Broca presenta "Coring" Erosión de los insertos de la nariz de los tres conos como se observa la fotografía posibles causas: -erosión del cono por material delesnable							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 07:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Mayo del 2012, en el nivel 3456\_3468\_3480 del tajo Rosita, con una profundidad de banco de 14 m, se utilizó broca modelo EX 712 con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 511 taladros en terreno Mitoso, los datos se muestra a continuación.

Tabla N° 6.20. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 07.

TÍTULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDIO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:09/08/2012		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
Marca : PDB Tools Inc.		Diámetro : 10 5/8"								
Modelo : EX712		Nozzle : 5/8"								
Código : A4-6200065		# Ensamblaje : #####								
Precio : 3349 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b>										
Mina : Mina Modelo		Material : Medio a Suave								
Tajo : Rosita		Características : Terreno Mitoso								
Banco : 3456_3468_3480		Perforadora : PV-271 (22)								
Profundidad : 14 m		Compresor : 1900 cfm								
		C.H.P. : 241.03 US\$/h								
<b>III. Parámetros de Perforación Aplicada</b>										
FECHA	TURNO	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
19-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	269.7	269.70	4.65	58.00	16.57		
20-may	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	120.0	389.70	1.94	61.86	12.49		
20-may	B	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	358.2	747.90	5.87	61.02	8.43		
21-may	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	168.8	916.70	2.81	60.07	7.67		
21-may	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	545.6	1462.30	8.94	61.03	6.24		
22-may	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	320.5	1782.80	5.17	61.99	5.77		
22-may	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	470.4	2253.20	7.71	61.01	5.44		
23-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	205.0	2458.20	3.42	59.94	5.38		
23-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	440.9	2899.10	7.60	58.01	5.31		
24-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	310.0	3209.10	5.25	59.05	5.13		
24-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	351.0	3560.10	6.05	58.02	5.10		
25-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	387.6	3947.70	6.46	60.00	4.87		
25-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	421.8	4369.50	7.27	58.02	4.92		
26-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	419.0	4788.50	6.98	60.03	4.71		
26-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	326.7	5115.20	5.54	58.97	4.74		
27-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	321.8	5437.00	5.55	57.98	4.77		
27-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	475.0	5912.00	8.33	57.02	4.79		
28-may	A	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	340.4	6252.40	5.87	57.99	4.69		
28-may	B	Rosita 3480	Terreno-Mitoso	200.0	6452.40	3.51	56.98	4.75		
29-may	A	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	280.0	6732.40	4.83	57.97	4.66		
29-may	B	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	169.2	6901.60	2.94	57.55	4.67		
FECHA	TURNO	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
19-may	A	30,000	100	65	Normal	1	1	1	1	
20-may	A	28,000	96	65	Normal	1	1	1	1	
20-may	B	27,000	94	65	Normal	1	2	1	1	
21-may	A	30,000	98	60	Normal	2	2	1	1	
21-may	B	28,000	100	60	Normal	2	2	2	2	
22-may	A	25,000	110	60	Normal	2	3	2	2	
22-may	B	27,000	95	65	Normal	2	3	2	2	
23-may	A	26,000	98	65	Normal	3	3	2	2	
23-may	B	28,000	90	65	Normal	3	3	2	2	
24-may	A	25,000	92	60	Normal	3	3	3	2	
24-may	B	24,000	98	60	Normal	3	3	3	3	
25-may	A	23,000	110	60	Normal	3	4	3	3	
25-may	B	25,000	105	65	Normal	3	4	4	3	
26-may	A	24,000	105	65	Normal	4	4	4	3	
26-may	B	26,000	100	65	Normal	4	5	4	3	
27-may	A	24,000	105	60	Normal	4	5	4	4	
27-may	B	20,000	100	60	Normal	4	5	5	4	
28-may	A	22,000	98	60	Normal	4	6	5	4	
28-may	B	23,000	100	65	Normal	4	6	6	4	
29-may	A	17,000	94	65	Normal	4	6	6	4	
29-may	B	18,000	95	65	Normal	4	7	7	5	

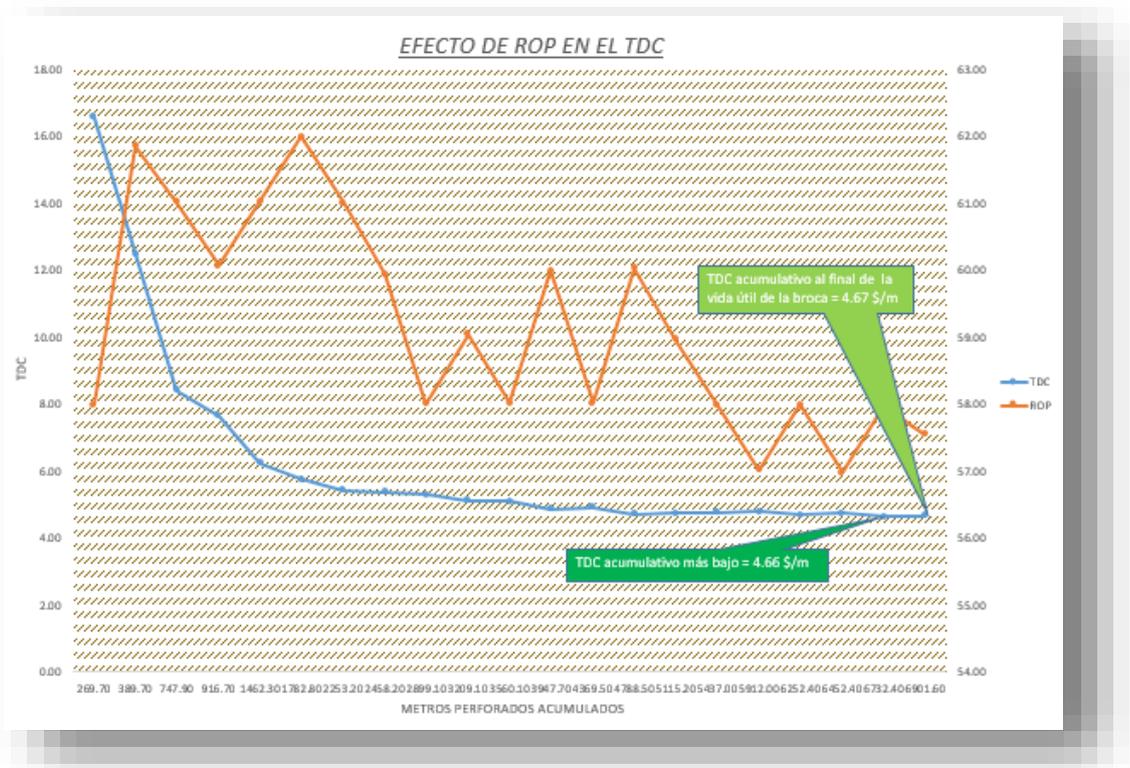
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

Esta broca llegó a perforar 6901.60 m con una velocidad ponderada de 57.55 m/h y TDC de 4.67 US\$/m los resultados son muy buenos a pesar del terreno mitoso.

La velocidad de penetración se ve afectada debido al terreno mitoso y la inestabilidad del taladro para el armado durante la perforación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 07.



Gráfica N° 6.9. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 07.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se ve en el gráfico, Se observa la curva del descarte oportuno de la broca y nos refleja que esta broca se está descartando en un buen punto sin afectar la operación.

El TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.67 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 4.66 US\$/m. Además cabe indicar que el TDC óptimo para poder descartar la broca sería en el TDC acumulativo más bajo de 4.66 US\$/m.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 07:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.21. Reporte de broca tricónica N° 07.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada						
<u>Tipo de Terreno</u>						
			Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía		x		x
19/05/2012	29/05/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú	Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
				x		x
<u>Parámetros de Perforación</u>						
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros	
500 -2200 PSI		90 - 110	60 - 65	Normal	correcta aplicación	
<u>Datos de Broca</u>						
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)
10 5/8''	6200065	##	EX712	PDB	16mm	6901.60
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC	
116.69	511	57.55	3349	241.03	4.67	
<u>Fotografía 01</u>			<u>Fotografía 02</u>			
						
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>						
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes				
Insertos Internos	4	Desgaste normal de insertos.				
Insertos Externos	7	Desgaste normal y rotura de insertos de calibre.				
Origen del Descarte	ER	Cruzamiento de polines y posibles erosión de conos (1,2 y 3).				
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste normal de insertos internos y externos.				
Condición de Rodamiento	6					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Posible erosión, cruzamineto de polines.				
Otros Desgastes	BT-CT	Rotura de insertos de calibre cono (1,2 y 3), internos astillados.				
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado del faldon.				
Comentario						
La Broca se descarto por cruzamiento de polines y rotura de insertos de calibre (cono 1,2 y 3), por desgaste.						

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 08:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Mayo - Junio del 2012, en el nivel 3750\_3760\_3456 en los tajos Vanessa \_ Carola, con una profundidad de banco de 11.5 m, se utilizó broca modelo EX 722 con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 546 taladros en terreno Medio \_ Duro, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.22. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 08.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA								PDB EQUIPAMIENTO		
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:02/07/2012		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b> Marca : PDB Tools Inc. <span style="float:right">Diámetro : 10 5/8"</span> Modelo : EX722 <span style="float:right">Nozzle : 5/8"</span> Código : A4-61002 <span style="float:right"># Ensamblaje : #####</span> Precio : 3349 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b> Mina : Mina Modelo <span style="float:right">Material : Medio_Duro</span> Tajo : Vanessa_Carola <span style="float:right">Características : Silice masiva,Granular 2</span> Banco : 3750_3760_3456 <span style="float:right">Perforadora : PV-271 (27)</span> Profundidad : 11.5 m <span style="float:right">Compresor : 2600 cfm</span> <span style="float:right">C.H.P.: 241.03 US\$/h</span>										
<b>III. Parámetros de Perforación Aplicadas</b>										
FECHA	GUARDIA	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
27-may	II	Vanessa_3750	Medio_Duro	162.0	162.00	3.38	47.93	25.70		
28-may	A	Vanessa_3750	Medio_Duro	265.5	427.50	5.90	45.00	13.19		
28-may	II	Vanessa_3750	Medio_Duro	355.2	782.70	8.07	44.01	9.75		
29-may	A	Vanessa_3750	Medio_Duro	210.0	992.70	4.67	44.97	8.73		
29-may	II	Vanessa_3750	Medio_Duro	320.0	1312.70	7.44	43.01	8.16		
30-may	A	Vanessa_3750	Medio_Duro	656.3	1969.00	15.26	43.01	7.31		
31-may	B	Carola_3456	Medio_Suave	205.8	2174.80	3.03	67.92	5.09		
01-jun	A	Carola_3456	Medio_Suave	309.0	2483.80	4.75	65.05	5.05		
09-jun	A	Vanessa_3760	Medio	295.2	2779.00	3.47	85.07	4.04		
09-jun	B	Vanessa_3760	Medio	654.1	3433.10	7.88	83.01	3.88		
10-jun	A	Vanessa_3760	Medio	359.0	3792.10	4.38	81.96	3.82		
10-jun	B	Vanessa_3760	Medio	944.5	4736.60	11.24	84.03	3.58		
11-jun	A	Vanessa_3760	Medio	681.6	5418.20	8.52	80.00	3.63		
11-jun	B	Vanessa_3760	Medio	859.2	6277.40	11.54	74.45	3.77		
FECHA	GUARDIA	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
27-may	II	66,000	80	58	Normal	1	1	1	1	
28-may	A	64,000	85	58	Normal	1	2	1	2	
28-may	II	65,000	83	56	Normal	2	2	1	2	
29-may	A	50,000	90	56	Normal	2	3	2	2	
29-may	II	48,000	98	55	Normal	2	3	2	2	
30-may	A	55,000	96	58	Normal	3	3	2	3	
31-may	B	35,000	94	56	Normal	3	3	3	3	
01-jun	A	37,000	95	55	Normal	3	4	3	3	
09-jun	A	45,000	96	54	Normal	3	4	4	3	
09-jun	B	44,000	98	55	Normal	3	4	4	4	
10-jun	A	46,000	95	53	Normal	4	5	5	4	
10-jun	B	45,000	97	55	Normal	4	5	6	4	
11-jun	A	42,000	94	54	Normal	5	6	7	5	
11-jun	B	40,000	95	56	Normal	5	6	8	5	

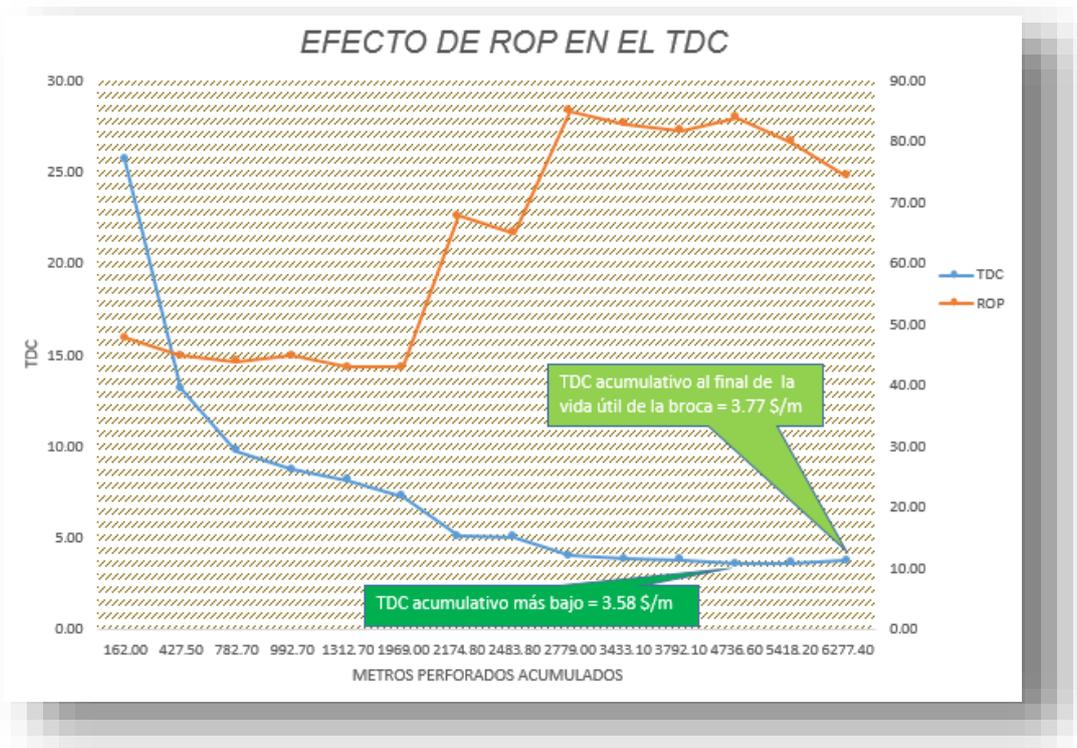
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

La broca perforó en el tajo Vanessa Nv.3750\_3760 y tajo Carola Nv.3456 en terreno de dureza R3-R4 (25-100Mpa), esta broca llegó a 6277.43 m con una velocidad ponderada de 74.45m/h y TDC de 3.77 US\$/m.

También se observa, que esta broca perforó en diferentes durezas de roca de media a duro mayormente, es por la geología variable del macizo rocoso, las velocidades son muy buenas.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 08.



Gráfica N° 6.10. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 08.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se aprecia en el gráfico, que la reducción en la velocidad de penetración produce un aumento en el TDC, en la última parte de su recorrido de la broca deja

de ser económica y la estructura de corte se vuelve ineficaz, por desgaste no perfora o lo hace con extrema lentitud, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 3.77 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 3.58 US\$/m. Además cabe indicar que el TDC óptimo para poder descartar la broca sería en el TDC acumulativo más bajo de 3.58 US\$/m.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 08:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.23. Reporte de broca tricónica N° 08.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		
27/05/2012	11/06/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Incomp.
				x	x		
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua		Obs. de Aplicaciones de Parámetros	
1400 -2800 PSI		80 - 110	56	Normal		correcta aplicación	
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)	
10 5/8 "	61002	##	EX722	PDB	16mm	6277.40	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.		TDC	
99.53	546	74.45	3349	241.03		3.77	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Fotografía 01</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Fotografía 02</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Fotografía 03</p>  </div> </div>							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	5	Desgaste normal de insertos.					
Insertos Externos	6	Desgaste normal y erosión de insertos.					
Origen del Descarte	ER-BT	Erosión rodamientos cono 1 y 2, erosión insertos rotos, Cruzamiento de polines (cono 1, 2).					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos).					
Condición de Rodamiento	8	Cono 2 mas dañado.					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Posible erosión de cono 2					
Otros Desgastes	CT	Insertos internos cono 2 astillado.					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado.					
Comentario							
El descarte se realizo erosión de rodamientos, cruzamiento de polines en el cono 1 y 2, insertos de calibre erosionados del cono 1 y 2, erosión de insertos de la nariz " Coring)							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 09:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Junio del 2012, en el nivel 3456\_3760 en los tajos Carola - Vanessa con una profundidad de banco de 12 m, se utilizó broca tricónica modelo EX 712 con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 595 taladros en terreno medio, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.24. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 09.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017			VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:26/06/2012		PÁGINA 1 de 1			
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
<b>Marca :</b> PDB Tools Inc.				<b>Diámetro :</b> 10 5/8"						
<b>Modelo :</b> EX712				<b>Nozzle :</b> 5/8"						
<b>Código :</b> A4-6200055				<b># Ensamblaje :</b> #####						
<b>Precio :</b> 3349 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b>										
<b>Mina :</b> Mina Modelo				<b>Material :</b> Medio						
<b>Tajo :</b> Carola_Vanessa				<b>Características :</b> Silice masiva y granular 2.						
<b>Banco :</b> 3456_3760				<b>Perforadora :</b> PV-271 (27)						
<b>Profundidad :</b> 12 m				<b>Compresor :</b> 2600 cfm						
				<b>C.H.P.:</b> 241.03 US\$/h						
<b>III. Parámetros de Perforación Aplicadas</b>										
FECHA	GUARDIA	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
01-jun	B	Carola_3456	Medio	597.3	597.30	9.05	66.00	9.26		
02-jun	A	Carola_3456	Medio	627.9	1225.20	9.81	64.01	6.50		
02-jun	B	Vanessa 3760	Medio	713.6	1938.80	7.84	91.02	4.38		
03-jun	A	Vanessa 3760	Medio	1204.8	3143.60	13.39	89.98	3.74		
03-jun	B	Vanessa 3760	Medio	752	3895.60	8.55	87.95	3.60		
04-jun	A	Vanessa 3760	Medio	590	4485.60	6.78	87.02	3.52		
04-jun	B	Vanessa 3760	Medio	367.7	4853.30	4.38	83.95	3.56		
05-jun	A	Vanessa 3760	Medio	795.9	5649.20	9.36	85.03	3.43		
05-jun	B	Vanessa 3760	Medio	420.4	6069.60	4.89	85.97	3.36		
06-jun	A	Vanessa 3760	Medio	506.4	6576.00	5.96	84.97	3.35		
06-jun	B	Vanessa 3760	Medio	270	6846.00	3.19	84.64	3.34		
FECHA	GUARDIA	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
01-jun	B	45,000	100	60	Normal	1	1	1	1	
02-jun	A	46,000	95	58	Normal	1	2	2	1	
02-jun	B	52,000	98	60	Normal	1	2	2	2	
03-jun	A	50,000	94	62	Normal	2	3	3	2	
03-jun	B	51,000	98	60	Normal	2	3	3	3	
04-jun	A	49,000	96	59	Normal	2	3	3	3	
04-jun	B	50,000	94	62	Normal	3	4	4	3	
05-jun	A	47,000	95	63	Normal	3	4	5	3	
05-jun	B	49,000	98	60	Normal	4	5	6	4	
06-jun	A	45,000	94	59	Normal	4	5	7	4	
06-jun	B	43,000	96	58	Normal	4	5	7	4	

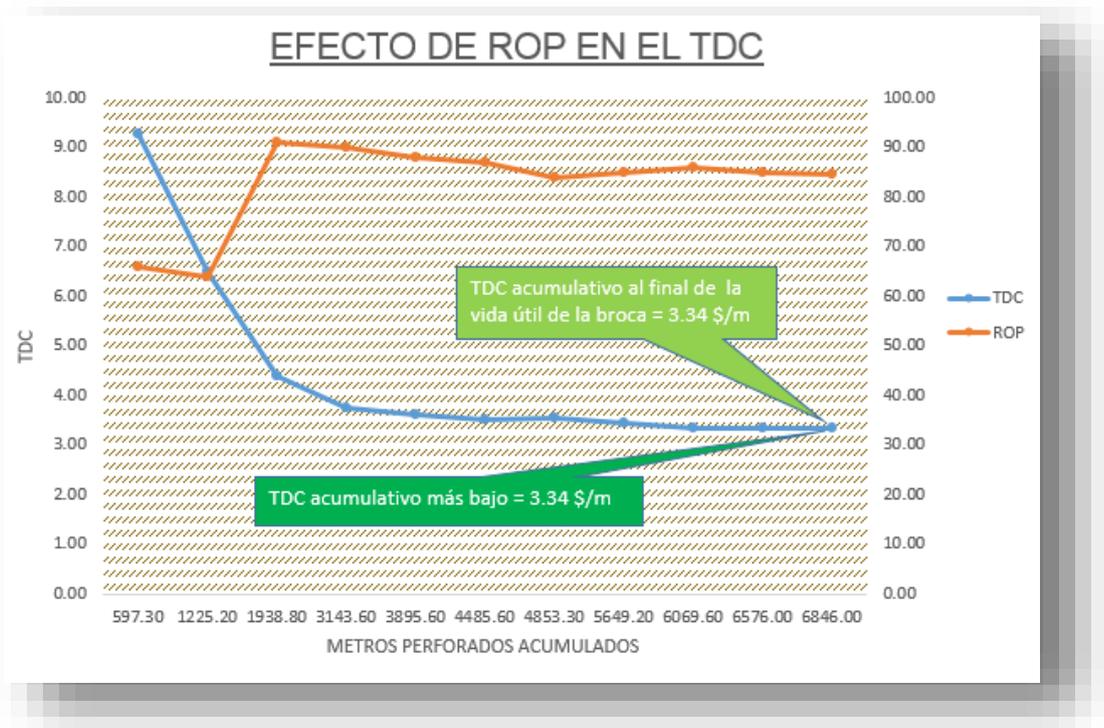
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

La broca perforó en el tajo Vanessa Nv.3760 y tajo Carola Nv.3456 en terreno de dureza R2-R4 (20-75Mpa), esta broca llegó a 6846.00 m con una velocidad ponderada de 84.64 m/h y TDC de 3.34 US\$/m, lo cual es un excelente resultado.

El modelo EX712 está dando muy buenos resultados en terreno medio a suave, se observa cómo va evolucionando el desgaste de la broca durante la perforación, el operador aplica los parámetros adecuados durante la perforación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 09.



Gráfica N° 6.11. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 09.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se aprecia en el gráfico, el aumento de la velocidad de penetración mantiene un TDC óptimo, es por ello que el descarte oportuno de la broca a un TDC

acumulativo al final de la vida de la broca es 3.34 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo con el mismo valor.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 09:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.25. Reporte de broca tricónica N° 09.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		
01/06/2012	06/06/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Incomp.
					x	x	
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
1300 -2300 PSI		90 - 100	58 - 63	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)	
10 5/8 "	6200055	##	EX712	PDB	16mm	6846.0	
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC		
83.20	595	84.64	3349	241.03	3.34		
Fotografía 01		Fotografía 02		Fotografía 03			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes					
Insertos Internos	4	Desgaste normal de insertos.					
Insertos Externos	5	Desgaste normal de insertos de calibre.					
Origen del Descarte	ER-BT	Cruzamiento de polines (cono 2).					
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste del Shirttail (desgaste igual de los 3 conos).					
Condición de Rodamiento	8	Cono 2 mas dañado.					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Posible erosión de cono 2					
Otros Desgastes	CT	Insertos internos cono 2 astillado.					
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado.					
<b>Comentario</b>							
La Broca se descarto por cruzamiento de polines ( cono 2), rotura de 01 inserto intermedio.							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 10:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Junio del 2012, en el nivel 3504\_3456 , banco de 14m, se utilizó broca modelo EX 712, con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 681 taladros en terreno Mitoso, los datos se muestran a continuación.

Tabla N° 6.26. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 10.

TÍTULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICÓNICA			PDB							
Código :PDB-SG-PDTO-017	VERSIÓN: 00	FECHA DE EMISIÓN:21/08/2012	PÁGINA 1 de 1							
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
Marca :	PDB Tools Inc.	Diámetro :	10 5/8"							
Modelo :	EX712	Nozzle :	5/8"							
Código :	A4-6200052	# Ensamblaje :	#####							
Precio :	3349 US\$									
<b>II.- Datos de Operación</b>										
Mina :	Mina Modelo				Material :	Medio a Suave				
Tajo :	Rosita				Características :	Terreno Mitoso				
Banco :	3504_3456	Perforadora :	PV-271 (24)							
Profundidad :	14 m	Compresor :	1900 cfm							
		C.H.P.:	241.03 US\$/h							
<b>III. Paraámetros de Perforación Aplicada</b>										
FECHA	TURNO	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
17-jun	A	Rosita 3504	Terreno-Mitoso	270	270.00	5.87	46.00	17.64		
17-jun	B	Rosita 3504	Terreno-Mitoso	208	478.00	4.52	46.02	12.24		
21-jun	A	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	558	1036.00	9.46	58.99	7.32		
21-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	462	1498.00	7.83	59.00	6.32		
22-jun	A	Rosita 3468	Terreno-Mitoso	459	1957.00	7.78	59.00	5.80		
22-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	486	2443.00	8.24	58.98	5.46		
23-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	638	3081.00	11.00	58.00	5.24		
23-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	463	3544.00	7.98	58.02	5.10		
24-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	314	3858.00	5.41	58.04	5.02		
24-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	409	4267.00	6.93	59.02	4.87		
25-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	217	4484.00	3.68	58.97	4.83		
25-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	316	4800.00	5.45	57.98	4.85		
26-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	372	5172.00	6.41	58.03	4.80		
26-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	407	5579.00	7.02	57.98	4.76		
27-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	279	5858.00	4.73	58.99	4.66		
28-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	428	6286.00	7.25	59.03	4.62		
28-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	436	6722.00	7.39	59.00	4.58		
29-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	395	7117.00	6.81	58.00	4.63		
29-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	464	7581.00	8.00	58.00	4.60		
30-jun	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	638	8219.00	11.19	57.02	4.63		
30-jun	B	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	367	8586.00	6.44	56.99	4.62		
01-jul	A	Rosita 3456	Terreno-Mitoso	271.9	8857.90	4.77	57.00	4.61		
FECHA	TURNO	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
17-jun	A	17,000	100	65	Normal	1	1	1	1	
17-jun	B	15,000	96	65	Normal	1	1	1	1	
21-jun	A	16,000	94	65	Normal	2	2	1	1	
21-jun	B	15,000	98	63	Normal	2	2	1	1	
22-jun	A	14,000	100	62	Normal	2	2	2	1	
22-jun	B	17,000	110	62	Normal	2	2	2	1	
23-jun	A	15,000	95	65	Normal	2	2	2	2	
23-jun	B	12,000	98	65	Normal	2	2	2	2	
24-jun	A	15,000	90	65	Normal	2	2	2	2	
24-jun	B	17,000	92	63	Normal	2	2	2	2	
25-jun	A	17,000	98	62	Normal	2	2	3	2	
25-jun	B	15,000	110	61	Normal	3	2	3	2	
26-jun	A	14,000	105	65	Normal	3	3	3	3	
26-jun	B	16,000	105	65	Normal	3	3	3	3	
27-jun	A	17,000	100	65	Normal	3	3	3	3	
28-jun	A	19,000	105	63	Normal	3	4	4	3	
28-jun	B	17,000	100	62	Normal	3	4	4	3	
29-jun	A	15,000	98	65	Normal	3	4	4	4	
29-jun	B	12,000	100	65	Normal	3	4	5	4	
30-jun	A	13,000	94	65	Normal	3	4	5	4	
30-jun	B	10,000	95	65	Normal	3	4	6	4	
01-jul	A	14,000	90	62	Normal	3	4	6	5	

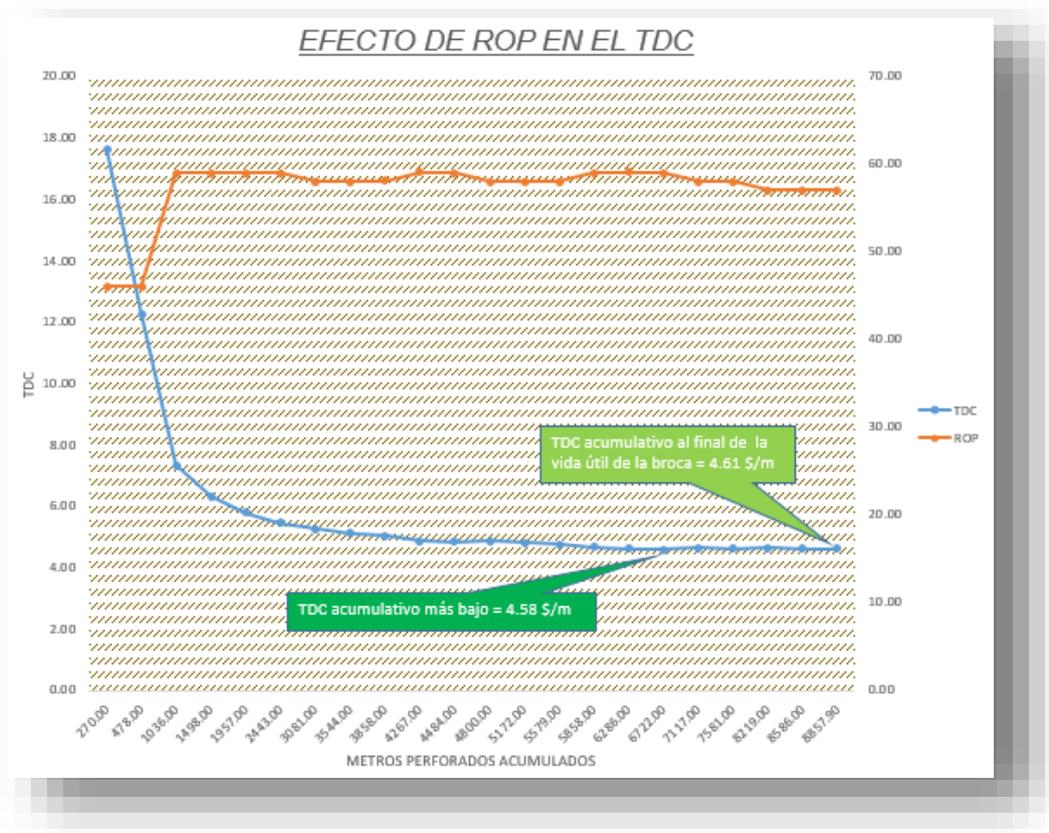
Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Observaciones:**

Esta broca llegó a 8857.90 m con una velocidad ponderada de 57.00 m/h y TDC de 4.61 US\$/m, los resultados son muy buenos a pesar del terreno mitoso.

La velocidad de penetración se ve afectada debido al terreno mitoso, y la inestabilidad del taladro para el armado durante la perforación.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 10.



Gráfica N° 6.12. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 10.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

Como se evidencia en el gráfico, la curva del descarte oportuno de la broca nos refleja que esta broca se está descartando en un buen punto sin afectar la operación.

El TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.61 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo de 4.58 US\$/m. Además cabe indicar que el TDC óptimo para poder descartar la broca sería en el TDC acumulativo más bajo de 4.58 US\$/m.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 10:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.27. Reporte de broca tricónica N° 10.

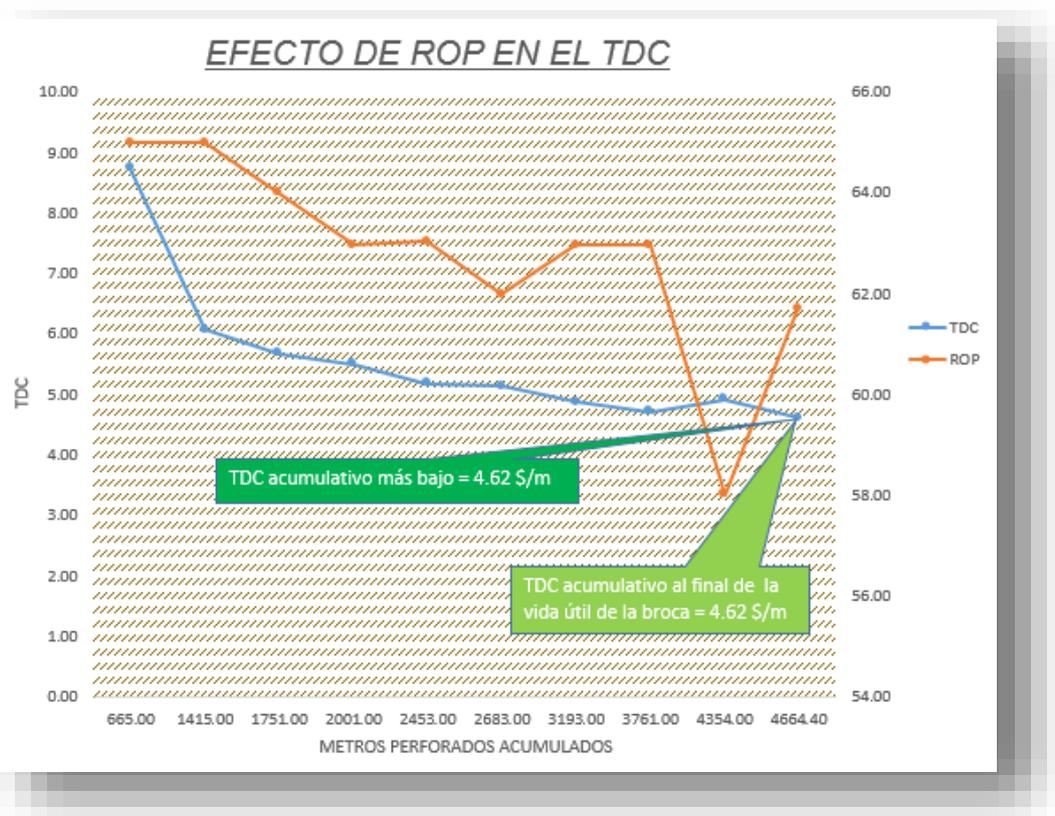
Titulo: Reporte de Broca Tricónica Descartada						
<u>Tipo de Terreno</u>						
			Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía		x		x
16/06/2012	01/07/2012	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú	Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
				x		x
<u>Parámetros de Perforación</u>						
Pulldown	R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
200 -2000 PSI	90 - 110	60 - 65	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>						
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf. (m)
10 5/8 "	6200052	##	EX712	PDB	16mm	8857.90
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC	
154.16	681	57.0	3349	241.03	4.61	
<u>Fotografía 01</u>			<u>Fotografía 02</u>			
						
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>						
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes				
Insertos Internos	3	Desgaste normal de insertos.				
Insertos Externos	4	Desgaste normal de insertos de calibre.				
Origen del Descarte	ER	Cruzamiento de polines y posibles erosión de conos (2 y 3).				
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste normal de insertos internos y externos.				
Condición de Rodamiento	6					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	Cruzamiento de polines de cilindros y posibl erosión.				
Otros Desgastes	BT	Rotura de insertos de calibre, cono 1 trabado.				
Condiciones de los Faldones	M	Desgaste moderado del faldon.				
Comentario						
EL descarte se realizó por cruzamiento de polines y rotura de insertos de calibre (2 y 3) por desgaste.						

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.



Durante la perforación se está trabajó con Pulldown que varía de 500 psi a 1500 psi y RPM de 95 - 110. Debido al terreno mitoso se ve afectada la velocidad de penetración durante la perforación, trabajando con pulldwon de 500-1500 psi.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 11.



Gráfica N° 6.13. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 11.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Interpretación:

Como se evidencia en el gráfico, el último tramo de la corrida de la broca, la velocidad de penetración se ve afectada debido al terreno mitoso, esta broca se está descartando en un buen punto sin afectar la operación.

El TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 4.62 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo cuyo valor es el mismo.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 11:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.29. Reporte de broca tricónica N° 11.

Titulo: Reporte de Broca Tricónica Descartada							
<u>Tipo de Terreno</u>							
				Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía			x		x
01/01/2013	07/01/2013	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú		Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
					x		x
<u>Parámetros de Perforación</u>							
Pulldown		R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
500 -1500 PSI		95 - 110	70 - 80	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>							
Diámetro		Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)
10 5/8 "		A4 - 61109	##	EX532	PDB	19mm	4664.40
Horas Perf.		Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.		TDC
74.24		424	61.71	3349	241.03		4.62
<u>Fotografía 01</u>				<u>Fotografía 02</u>			
							
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>							
Componentes de la Broca		Código Estadístico	Explicación de los Desgastes				
Insertos Internos		4	Desgaste normal y pérdida de insertos en la nariz.				
Insertos Externos		4	Desgaste normal .				
Origen del Descarte		LT-CR	Rotura de insertos en narices cono (2 y 3) y posible cruzamiento de polines.				
Ubicación del O. Descarte		ALL	Cruzamiento de polines y posible erosión de cono (2 cono).				
Condición de Rodamiento		8					
Ubicación de Falla Rodamientos		ER	posible erosión de rodamientos por conos flojos.				
Otros Desgastes		BT	Rotura de insertos en la nariz.				
Condiciones de los Faldones		M	Desgaste de shirrtail.				
Comentario							
La broca presenta "rotura de insertos en la nariz", conos flojos y posible cruzamiento de polines: - Posible erosión del cono, material deleznable terreno mitoso.							

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### BROCA TRICÓNICA N° 12:

Esta perforación programada se realizó en el mes de Enero del 2013, en el nivel 3792 en el tajo Concepción, banco de 11.5 m, se utilizó broca modelo EX 722, con una correcta aplicación de parámetros de perforación se perforaron 101 taladros en terreno Duro, la data se muestra a continuación.

Tabla N° 6.30. Datos y resultados de ROP y TDC de broca tricónica N° 12.

TITULO: FORMATO DE CONTROL DIARIO DE BROCA TRICONICA										
Código :PDB-SG-PDTO-017		VERSIÓN: 00		FECHA DE EMISIÓN:05/04/2013		PÁGINA 1 de 1				
<b>I.- Datos de las Broca</b>										
<i>Marca :</i> PDB Tools Inc.			<i>Diámetro :</i> 10 5/8"							
<i>Modelo :</i> EX722			<i>Nozzle :</i> 5/8"							
<i>Código :</i> A4-6202127			<i># Ensamblaje :</i> #####							
<i>Precio :</i> 3549 US\$										
<b>II.- Datos de Operación</b>										
<i>Mina :</i> Mina Modelo			<i>Material :</i> Duro							
<i>Tajo :</i> Concepción			<i>Características :</i> Sulfuros con Pirita y Chalcopirita.							
<i>Banco :</i> 3792			<i>Perforadora :</i> PV-271 (24)							
<i>Profundidad :</i> 11.5 m			<i>Compresor :</i> 1900 cfm							
			<i>C.H.P.:</i> 241.03 US\$/h							
<b>III. PARAMETROS DE PERFORACIÓN APLICADA</b>										
FECHA	TURNO	MINA	TERRENO	MTS PERF	MTS ACUM	HRS	ROP(m/h)	TDC (US\$/m)		
11-ene	A	Concepción 3792	Sulfuros	210	210.00	4.20	50.00	21.72		
11-ene	B	Concepción 3792	Sulfuros	240	450.00	4.80	50.00	12.71		
12-ene	A	Concepción 3792	Sulfuros	230	680.00	4.69	49.04	10.13		
13-ene	B	Concepción 3792	Sulfuros	140	820.00	2.92	47.95	9.36		
13-ene	A	Concepción 3792	Sulfuros	115	935.00	2.40	47.92	8.83		
14-ene	A	Concepción 3792	Sulfuros	117.7	1052.70	2.46	47.85	8.41		
FECHA	TURNO	WOB	RPM	PSI CAB	AGUA	I. INT.	I. EXT.	ROD	FALD	OTROS
11-ene	A	60,000	85	65	normal+agua	1	1	1	1	
11-ene	B	62,000	90	60	normal+agua	2	3	3	2	
12-ene	A	65,000	85	65	normal+agua	3	4	4	3	
13-ene	B	68,000	86	60	normal+agua	4	5	5	4	
13-ene	A	66,000	85	64	normal+agua	4	6	7	5	
14-ene	A	65,000	90	64	normal+agua	5	8	8	6	

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

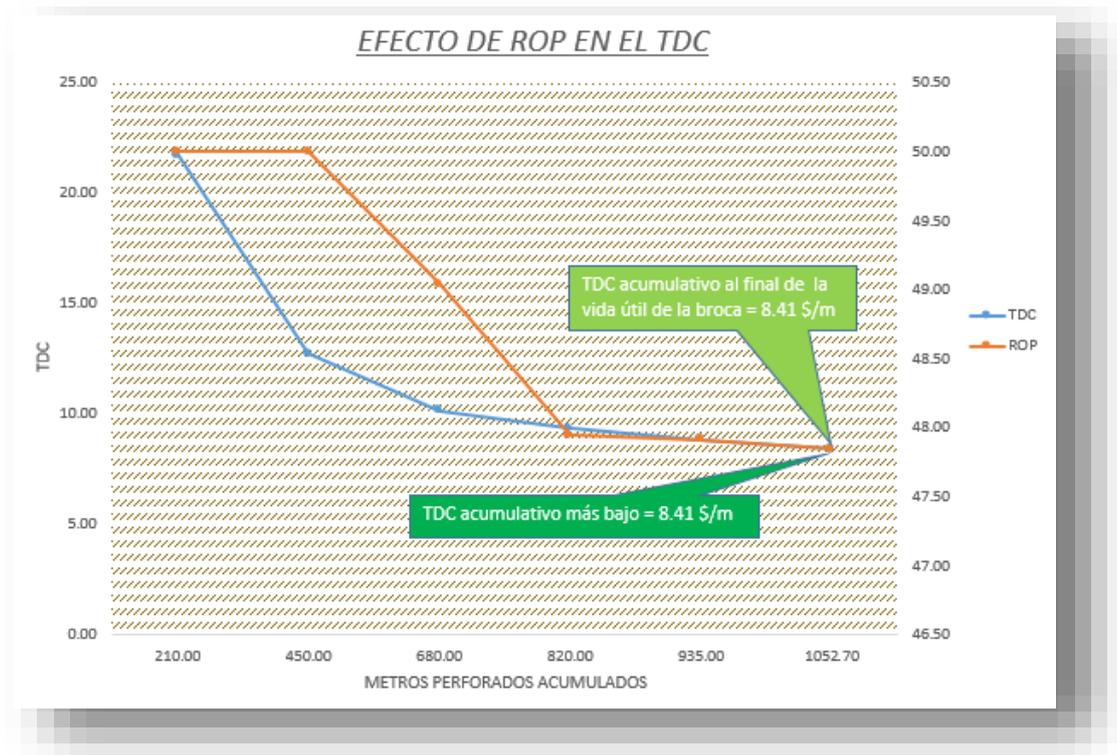
### Observaciones:

Esta broca llegó a 1052.70 m, con una velocidad ponderada de 47.85 m/h y TDC de 8.41US\$/m en terreno duro y abrasivo, dureza de roca de 180-220 Mpa.

Durante la perforación se inyecta agua al taladro para minimizar el polvo, por ende la broca sufre un desgaste prematuro en la matriz, se ven los polines cilíndricos.

El descarte se realizó por Conos flojos, se ven los polines cilíndricos por abrasión terreno duro, sulfuros con contenido de pirita y chalcopirita.

En el siguiente gráfico, se aprecia la curva para el descarte oportuno de la broca tricónica N° 12.



Gráfica N° 6.14. Efecto del ROP en el TDC de la Broca Tricónica N° 12.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### Interpretación:

Como se observa en el gráfico, la velocidad de penetración se ve afectada debido al desgaste prematuro del tricono,

El TDC acumulativo al final de la vida de la broca es 8.41 US\$/m y consideramos también un TDC acumulativo más bajo del mismo valor.

### Control de vida útil para la broca tricónica N° 12:

En el presente reporte, se presenta el detalle de los controles principales que se obtuvieron para el descarte de la broca tricónica en la actividad operativa.

Tabla N° 6.31. Reporte de broca tricónica N° 12.

Título: Reporte de Broca Tricónica Descartada						
<u>Tipo de Terreno</u>						
			Muy Duro	Medio	Fracturado	Agua Subt.
Montaje	Desmontaje	Compañía	x		x	
11/01/2013	14/01/2013	PDB Tools Inc, Sucursal del Perú	Duro	Suave	Abrasivo	Mitoso
			x		x	
<u>Parámetros de Perforación</u>						
Pulldown	R.P.M	Psi en Cabina	Inyección Agua	Obs. de Aplicaciones de Parámetros		
2400 -3200 PSI	80 - 90	60 - 65	Normal	correcta aplicación		
<u>Datos de Broca</u>						
Diámetro	Número de serie	# Ensamblaje	Modelo	Proveedor	Nozzle	Mts Perf.(m)
10 5/8 "	6202127	##	EX722	PDB	19mm	1052.70
Horas Perf.	Taladros	Vel. Ponderada	Precio	Costo Hora Perf.	TDC	
21.47	101	47.85	3349	241.03	8.41	
<u>Fotografía 01</u>			<u>Fotografía 02</u>			
						
<u>Análisis de los Desgastes en la Broca</u>						
Componentes de la Broca	Código Estadístico	Explicación de los Desgastes				
Insertos Internos	5	Desgaste normal de insertos.				
Insertos Externos	8	Desgaste normal y rotura de insertos de calibre por abrasión.				
Origen del Descarte	AB	Conos flojos, se ven los polines cilindricos y posibles erosión de conos.				
Ubicación del O. Descarte	ALL	Desgaste normal y rotura de insertos, internos y externos.				
Condición de Rodamiento	8					
Ubicación de Falla Rodamientos	ER	posible cruzamiento de polines cilindricos y posible erosión de conos.				
Otros Desgastes	CT-FC	inserto astillado de calibre, desgaste plano.				
Condiciones de los Faldones	h	Desgaste fuerte del faldon por Abrasión.				
Comentario						
El descarte se realizó por conos flojos, se ven los polines cilindricos por abrasión terreno duro sulfuros.						

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**CAPÍTULO VII:**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## **7.1. Controles estadísticos y gráficos de costos totales de perforación**

### **7.1.1. Resumen de las brocas tricónicas**

Como se muestra en la siguiente tabla, se han consolidado las 12 brocas tricónicas PDB Tools. Inc. del año 2012 – 2013, donde se evidencia los resultados de la velocidad ponderada al final de su recorrido de su estructura de corte, es decir, la vida útil y el TDC final respectivo.

Tabla N° 7.1. Resumen de todas las brocas tricónicas.

N°	CARACTERÍSTICAS DE BROCA					PARAMETROS DE PERFORACION						RESPECTO AL TRABAJO DE LA BROCA								
	PROVEEDOR	MODELO	CODIGO	DIAMETRO	NOZZLE	PULLDOWN (EN PSI)	RPM	PSI EN CABINA	PSI EN RECEIVER	INYECCIÓN AGUA	OBSERVACIÓN DE APLIC. DE PARÁMETROS	PRECIO (\$)	COSTO HORA PERF. (\$)	Terreno	Característica	MTS ACUM	HRS. PERF. TOTAL (h)	Taladros (m)	RDP Ponderado (m/h)	TDC FINAL (\$/m)
12	PDB	EX722	A4-6202127	10 5/8"	5/8"	2400-3200	80-90	60-65	75	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Duro	Sulfuros con Pirita y Chalcopyrita.	1052.70	21.47	101	47.85	8.41
4	PDB	EX722	A4-6200063	10 5/8"	5/8"	2800-3200	80-90	55	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Duro	Silice masiva, granular y azufre nativo.	4234.50	67.13	368	62.07	4.67
2	PDB	EX722	A4-6200059	10 5/8"	5/8"	2800-3200	80-90	56	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Duro	Silice masiva, granular.	4670.30	75.48	406	62.35	4.58
3	PDB	EX722	A4-06585	10 5/8"	5/8"	2800-3200	80-90	54	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Duro	Silice masiva, granular y azufre nativo.	5045.70	79.47	438	61.74	4.57
8	PDB	EX722	A4-61002	10 5/8"	5/8"	1400-2800	80-110	56	75	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Duro	Silice masiva, Granular 2	6277.40	99.53	546	74.45	3.77
5	PDB	EX712	A4-02509	10 5/8"	5/8"	1600-2600	90-100	55	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio	Silice granular 2.	4016.60	47.98	349	84.29	3.69
9	PDB	EX712	A4-6200055	10 5/8"	5/8"	1300-2300	90-100	58-63	75	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio	Silice masiva y granular 2.	6846.00	83.20	595	84.64	3.34
7	PDB	EX712	A4-6200065	10 5/8"	5/8"	500-2200	90-110	60-65	75	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio a Suave	Terreno Mitoso	6901.60	116.69	511	57.55	4.67
1	PDB	EX712	A4-03020	10 5/8"	5/8"	1200-2500	90-110	53-65	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio a suave	Silice granular, terreno mitoso.	3912.70	55.24	340	63.42	4.66
11	PDB	EX532	A4-61109	10 5/8"	5/8"	500-1500	95-110	70-80	95	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio a Suave	Terreno Mitoso	4664.40	74.24	424	61.71	4.62
10	PDB	EX712	A4-6200052	10 5/8"	5/8"	200-2000	90-110	60-65	75	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio a Suave	Terreno Mitoso	8857.90	154.16	681	57.00	4.61
6	PDB	EX532	A4-02894	10 5/8"	3/4"	800-1400	100-110	58-65	70	NORMAL	CORRECT. APL.	3349	241.03	Medio a Suave	Terreno Mitoso	8434.90	119.53	703	63.57	4.19

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### 7.1.1.1. Costo total de perforación para diferentes tipos de terrenos

En el gráfico adjunto, se muestra los costos totales de perforación (TDC) en función de los diferentes tipos de terrenos perforados, donde se puede apreciar los TDCs para terrenos duros está entre el intervalo de 4,67 US\$/m y 3.77US\$/m, para terrenos medios de 3.69US\$/m a 3.34US\$/m y para terrenos medio a suaves de 4.66US\$/m a 4.19US\$/m.

Los parámetros de perforación aplicados son correctos, lo cual, ha permitido alcanzar velocidades de penetración muy altas y los resultados del TDC para los diferentes tipos de terrenos se evidencian en comparación de los datos de TDC obtenidos anteriormente con otro modelo de broca.

Respecto al valor elevado de TDC en terreno duro (8.41US\$/m), durante la perforación se ha inyectado demasiada agua al taladro para minimizar el polvo, provocando que la broca sufra un desgaste prematuro, se considera esto como malas prácticas operativas.

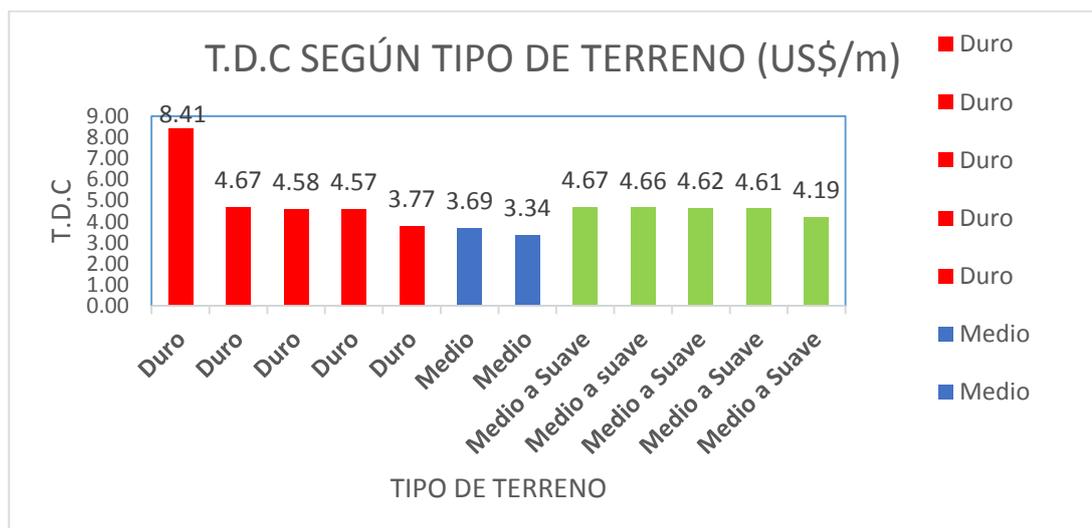


Gráfico N° 7.1. TDC de las 12 brocas en función de los diferentes tipos de terrenos.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### 7.1.2. Reducción del costo total de perforación

En la tabla adjunta, producto de la tabla N° 7.1. (Resúmenes de las brocas tricónicas), se selecciona dos brocas con el mismo modelo y los intervalos óptimos de los parámetros de perforación aplicados en terrenos con las mismas o semejantes características, para analizar y determinar la influencia del ROP en la reducción del TDC. Veamos a continuación los gráficos siguientes.

Tabla N° 7.2. Selección de dos brocas de diferentes tipos de terrenos.

BROCAS	MODELO	PULLDOWN (EN PSI)	RPM	PSI EN CABINA	Terreno	ROP Ponderada m/h	TDC Final USS/m
12	EX722	2400-3200	80-90	60-65	Duro	47.85	8.41
4	EX722	2800-3200	80-90	55	Duro	62.07	4.67
2	EX722	2800-3200	80-90	56	Duro	62.35	4.58
3	EX722	2800-3200	80-90	54	Duro	61.74	4.57
8	EX722	1400-2800	80-110	56	Duro	74.45	3.77
5	EX712	1600-2600	90-100	55	Medio	84.29	3.69
9	EX712	1300-2300	90-100	58-63	Medio	84.64	3.34
7	EX712	500-2200	90-110	60-65	Medio a Suave	57.55	4.67
1	EX712	1200-2500	90-110	53-65	Medio a suave	63.42	4.66
11	EX532	500-1500	95-110	70-80	Medio a Suave	61.71	4.62
10	EX712	200-2000	90-110	60-65	Medio a Suave	57.00	4.61
6	EX532	800-1400	100-110	58-65	Medio a Suave	63.57	4.19

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

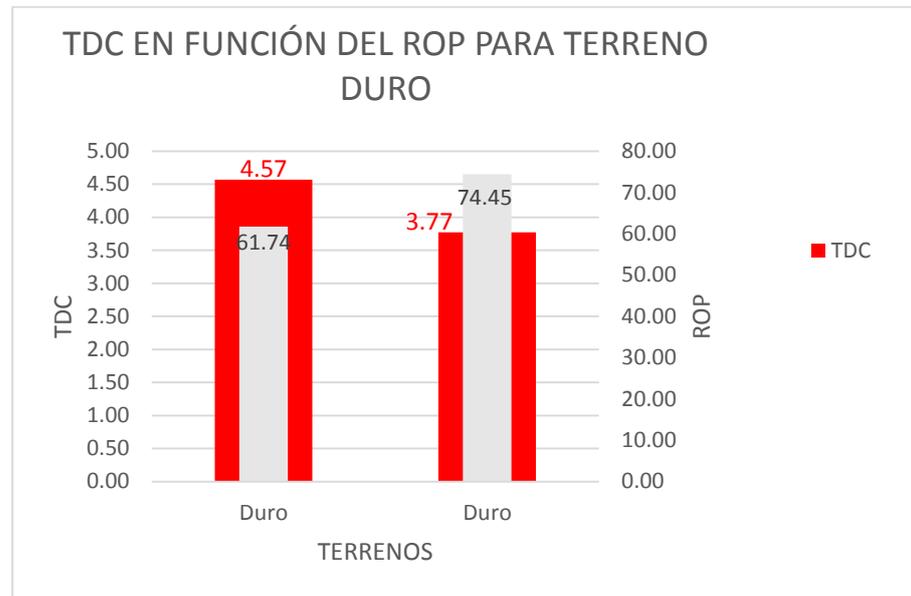


Gráfico N° 7.2. Comparación de la influencia del ROP en la reducción del TDC de las Brocas 3 y 8 de mismo modelo.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

### **Interpretación:**

En la gráfica N° 7.2. (Comparación de la influencia del ROP en la reducción del TDC de las Brocas 3 y 8 de mismo modelo). Se muestra la relación entre los costos totales de perforación (US\$/m) y la velocidad de penetración (m/h). Se afirma que, para terreno de clasificación DURO, el TDC se reduce muy ligeramente (de 4.57 US\$/m a 3.77 US\$/m), cuando el ROP logra incrementarse de manera óptima (de 61.74 m/h a 74.45 m/h), lográndose una optimización de 17.5 % en terrenos duros.

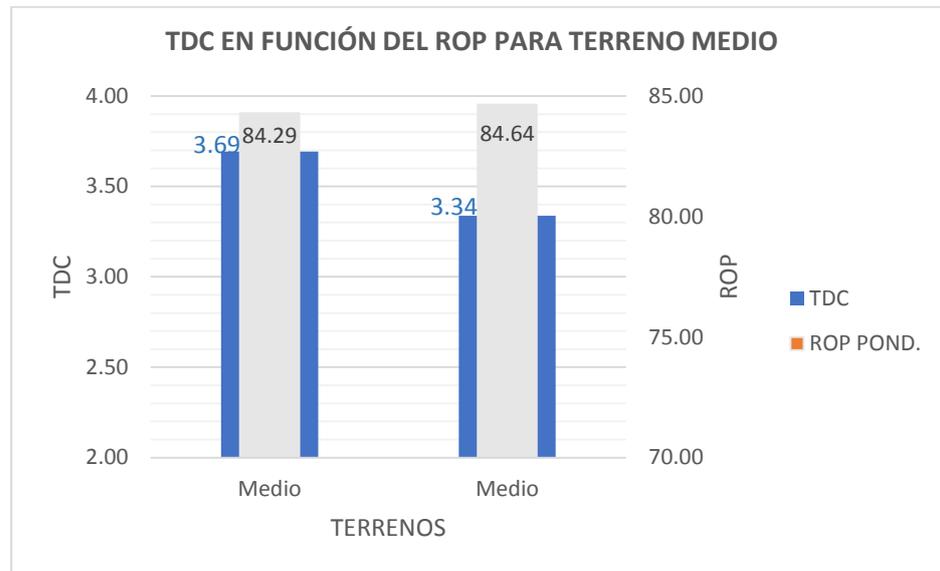
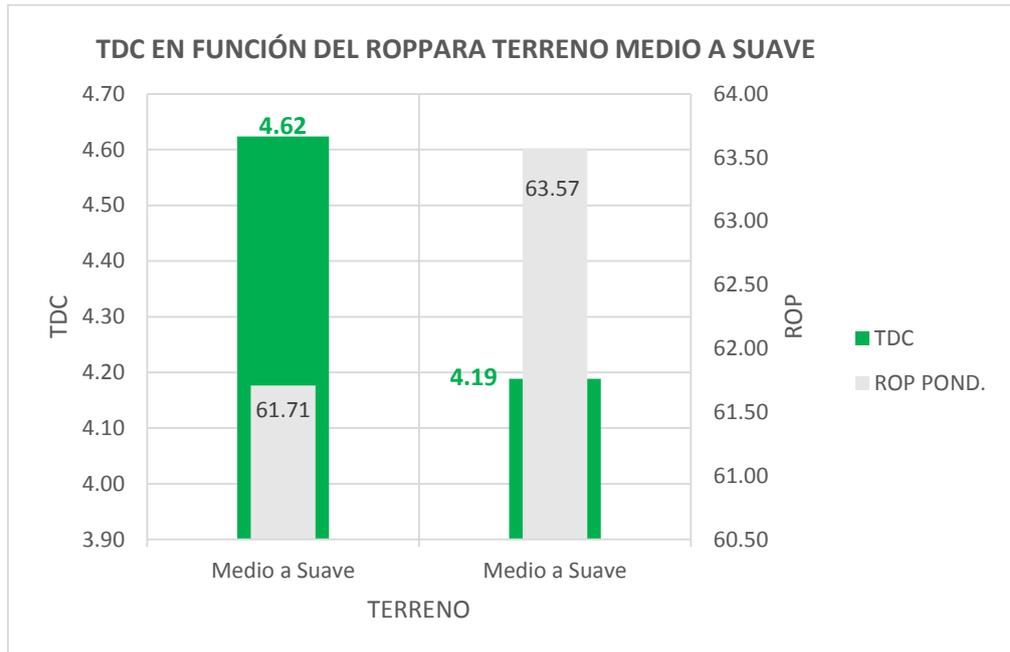


Gráfico N° 7.3. Comparación de la influencia del ROP en el TDC de las Brocas 5 y 9 de mismo modelo.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

En el gráfico N° 7.3. (Comparación de la influencia del ROP en la reducción del TDC de las Brocas 5 y 9 de mismo modelo). Se muestra la relación entre los costos totales de perforación (US\$/m) y la velocidad de penetración (m/h). Se afirma que, para terreno de clasificación MEDIO, el TDC se reduce (de 3.69 US\$/m a 3.34 US\$/m), pese a que el ROP no logra incrementarse de manera significativa o abismal (de 84.29 m/h a 84.64 m/h), lográndose una optimización de 9.5 %.



Gráfica N° 7.4. Comparación de la influencia del ROP en el TDC de las Brocas 6 y 11 de mismo modelo.

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

**Interpretación:**

En el gráfico N° 7.4 (Comparación de la influencia del ROP en la reducción del TDC de las Brocas 6 y 11 de mismo modelo). Se muestra la relación entre los costos totales de perforación (US\$/m) y la velocidad de penetración (m/h). Se afirma que, para terreno de clasificación MEDIO a SUAVE, el TDC se reduce (de 4.62 US\$/m a 4.19 US\$/m) cuando el ROP logra incrementarse de manera óptima y significativa (de 61.71 m/h a 63.57 m/h), lográndose una optimización de 9.3 %.

**7.2. Mejoras de productividad (12 brocas PDB Tools. Inc.)**

En la tabla adjunta, como resultado de la tabla N° 7.1., resumen de las brocas tricónicas, se muestra los incrementos significativos de la velocidad de penetración en su recorrido de estructura de corte para los diferentes tipos de terrenos, los

resultados muestran que hay mayor cantidad de metros y taladros perforados a medida que se reduce el TDC.

De este estudio de investigación, concluimos para una mejora de optimación en la operación unitaria que utilizando las perforadoras Pit Viper 271 en un estado óptimo y con nuevas tecnologías de brocas de diámetro 10 5/8" Marca PDB Tools. Inc. más resistente para diferentes tipos de terrenos se logra incrementos significativos de la velocidad de penetración, especialmente en terrenos duros con alta resistencia a la comprensión de la roca.

Tabla N° 7.3. Mejoras en la productividad de perforación.

BROCAS	TERRENO	TDC FINAL	RDP PONDERADA	MTS ACUM	TALADROS
12	Duro	8.41	47.85	1052.70	101
4	Duro	4.67	62.07	4234.50	368
2	Duro	4.58	62.35	4670.30	406
3	Duro	4.57	61.74	5045.70	438
8	Duro	3.77	74.45	6277.40	546
5	Medio	3.69	84.29	4016.60	349
9	Medio	3.34	84.64	6846.00	595
7	Medio a Suave	4.67	57.55	6901.60	511
1	Medio a suave	4.66	63.42	3912.70	340
11	Medio a Suave	4.62	61.71	4664.40	424
10	Medio a Suave	4.61	57.00	8857.90	681
6	Medio a Suave	4.19	63.57	8434.90	703

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

Alcanzando mejoras como:

- ✓ Mayor cantidad de taladros y metros perforados.
- ✓ Reducción del número de equipos de perforación utilizados para perforar los metros planificados.
- ✓ Reducción del costo operativo de los equipos de perforación.
- ✓ Reducción del costo total de perforación.

### 7.3. Comparación del TDC obtenido en la investigación y TDC histórico

Los datos obtenidos en la presente investigación dieron como resultado una reducción del TDC de 21.42 % en terrenos Duros y 19.45 % en terrenos Medio, respecto a los datos histórico, como se aprecia en la tablas siguientes.

Tabla N° 7.4. Promedios de TDC (Año 2006 Vs 2012 -2013)

TIPO DE TERRENO	TDC PROMEDIO 2006 (US\$/m)	TDC PROMEDIO 2012 -2013 (US\$/m)	PORCENTAJE DE OPTIMIZACIÓN (%)
Muy Duro	11.48	–	–
Duro	5.60	4.40	21.42
Medio	4.37	3.52	19.45
Medio a Suave	–	4.55	–
Suave	3.41	–	–

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

En base a lo planificado en área de perforación se ha planificado 40 000 m al mes, y de acuerdo a esto realizamos cálculos de ahorros mensual y anual, para estimar el porcentaje de ahorro anual.

Tabla N° 7.5. Ahorro mensual y anual del TDC promedio año 2006 vs 2012 – 2013.

COSTO DE PERFORACIÓN (US\$)								
Tipo de terreno	TDC 2006			TDC 2012 - 2013			Ahorro mensual	Ahorro anual
	TDC Promedio (US\$/m)	Perforación Planificado mensual (m)	Costo de Perforación (US\$)	TDC promedio (US\$/m)	Perforación Planificado mensual (m)	Costo de Perforación (US\$)	US\$	US\$
Muy duro	11.48	–	459 200	–	–	–	–	–
Duro	5.60	40 000	224 000	4.40	40 000	176 000	48 000	576 000
Medio	4.37	40 000	174 800	3.52	40 000	140 800	34 000	408 000
Medio a Suave	–	–	–	4.55	–	–	–	–
Suave	3.41	–	136 400	–	–	–	–	–

Fuente: Elaboración del equipo de investigación.

Se evidencia el ahorro anual de US\$ 576 000 en terreno duro y US\$ 408 000 en terreno medio, logrando un total de ahorro anual en ambos tipos de terrenos el monto de US\$ 984 000.

**CAPÍTULO VIII:**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## 8.1. Conclusiones

Después de culminar la investigación, se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Los factores que intervienen en el Costo Total de Perforación (TDC) son: precio de la broca (US\$), metros perforados (m), costo horario de la perforadora (US\$) y la velocidad de penetración (m/h); según los resultados obtenidos en el estudio, de los cuatro factores que intervienen en la determinación del TDC, el factor de mayor incidencia es el ROP (velocidad de penetración), porque tanto el TDC y ROP son magnitudes inversamente proporcionales. Además de los resultados de la investigación se obtuvieron porcentajes significativos de reducción del TDC en comparación de los valores históricos del TDC.
- ✓ Las brocas seleccionadas para el estudio realizado, corresponde a la marca PDB Tools. Inc., modelos EX 722, EX 712 y EX 532, todas ellas con diámetros de 10 5/8". Esta selección se realizó al evaluar su alta tecnología de diseño, para ser sometida a las exigentes condiciones de los diferentes tipos de rocas que presenta la mina, estas brocas son ideales para perforación rotativa ya que ofrecen tasas de penetración más rápida, mayor vida útil, buena protección contra el desgaste, los cuales, son beneficios necesarios en el proceso de optimización de la producción en Mina Modelo.
- ✓ Para optimizar la operación unitaria, es necesario observar todo el sistema de perforación rotativa como un conjunto, es decir, realizar las mediciones de los factores que intervienen en la fórmula del TDC y llevar un control de los parámetros de perforación, los cuales conllevan a la determinación y reducción del TDC. Esto significa, que según estimaciones, por determinados periodos y cantidades de taladros, podemos obtener un ahorro mensual estimado de 48 000 US\$ para terrenos duros y 34 000 US\$ para terrenos medios, trabajando 40 000 metros perforados al mes según lo planificado en la Mina Modelo.

## 8.2. Recomendaciones

- ✓ Las brocas tricónicas están diseñadas para trabajar sin agua, la refrigeración y limpieza se realiza con ayuda del aire comprimido. La inyección de agua solo se recomienda cuando se realiza la perforación y para eliminar el polvo, cuando inyectamos un exceso de agua, los detritos se unen unos con otros haciéndolos más pesados y más difíciles de evacuar hacia la superficie.
- ✓ La presencia de agua subterránea en el taladro disminuye notablemente la vida útil de las brocas, se debe de mantener la velocidad de barrido alta y usar válvula de contraflujo en las brocas.
- ✓ Se recomienda mantener la velocidad de salida del detrito por arriba de los 1000 fpm, esta velocidad evitará la remolienda y erosión de las herramientas de perforación. Siempre debe hacer circular el aire antes de rotar la broca en el fondo.
- ✓ Mantener unos buenos registros de brocas utilizadas para facilitar un cálculo preciso de los costos totales de perforación y así evitar los errores en los cálculos.

**REFERENCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

## BIBLIOGRAFIA:

Afrev Stech. (January-March, 2012). *An International Journal of Science and Technology. Bahir Dar.* (Vol. 1). Ethiopia. Pág. 174-190. Recuperado de [http://afrevjo.net/journals/stech/Vol\\_1\\_\(1\)\\_art\\_12\\_AnyadiegwuCIC.pdf](http://afrevjo.net/journals/stech/Vol_1_(1)_art_12_AnyadiegwuCIC.pdf)

Atlas Copco. (2012). *Blasthole Drilling in Open Pit Mining.* (Third edition). Recuperado el 9 de enero de 2015, de [http://www.atlascopco.com/blastholedrillsus/media/blasthole\\_reference\\_book/](http://www.atlascopco.com/blastholedrillsus/media/blasthole_reference_book/).

Baker Hughes. (2001). *Manual de Pruebas de Aire y Peso.* Chile: Baker Hughes Chile Ltda.

Clarence Zink. (2005). *Optimizing drilling productivity and bit life with "depth of cut" studies, Drilling and Blasting.* Conferencia presentada en San Antonio, Texas.

Córdova Baldeón, Isaac. (2010). *Estadística Aplicada a la Investigación: Cuadros y Gráficos – Módulos de autoaprendizaje.* (Vol. 2). Lima – Perú. Editorial San Marcos.

Departamento de Geotecnia e Hidrogeología - Minera Yanacocha. (2006). *Ingeniería y desarrollo: Yanacocha Final Pit Slope Design.* Cajamarca – Perú. Departamento de Geotecnia e Hidrogeología - Minera Yanacocha.

Estudios Mineros del Perú S.A.C. *Manual de Minería.* Lima - Perú. Editorial Estudios Mineros del Perú S.A.C.

Fernández de López, Martha. (2003). *Glosario de términos minero energéticos y ambientales de la legislación peruana.* Lima - Perú. Editorial de la Sociedad Nacional Minería Petróleo y Energía.

Grupo Geotecnia – Minera Yanacocha. (2007). *Memo-40-07 - Reporte Actualizado de las Propiedades de Resistencia de los Materiales de los Tajos La Quinoa y Yanacocha.* Cajamarca – Perú. Grupo Geotecnia – Minera Yanacocha.

Halliday David, et al. (2006). *Fundamentos de Física.* (Sexta edición – Vol. 1). México. Editorial Cecsca.

Ingeniería de Perforación y Voladura – Minera Yanacocha. (2007). *Memo-57-07 - Diseños 10 5/8" en Yanacocha, La Quinoa y Chaquicocha*. Cajamarca – Perú. Ingeniería de Perforación y Voladura - Minera Yanacocha.

Karlinski, J. Rusinski, E. Lewandowski, T. (2008). *New generation automated drilling machine for tunnelling and underground mining work. Automation in Construction*. Poland. Recuperado el 28 de marzo de 2015, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/31232/2/30381-189766-1-PB.html>.

López Jimeno, E. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. España. Instituto Tecnológico Geominero.

López Jimeno, E y C, et al. (2006). *Manual de Sondeos. Tecnología de Perforación*. (Vol. 1). Madrid - España. Instituto Tecnológico Geominero.

Moffitt, S.R. Pearce, D.E., Ivie, C.R., Reed Tool Co. (1992). *New roller cone bits with unique nozzle designs reduce drilling costs*. IADC/SPE Drilling Conference.

Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero*. Bogotá - Colombia. Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia.

Ministerio de Energía y Minas. (2010). *Reglamento de seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería (D.S.-N° 055-2010-EM)*. Perú. Editado por: Instituto de Seguridad Minera (ISEM).

Ortiz Uribe, Frida, et al. (2004). *Metodología de la investigación. El proceso y sus técnicas*. México. Editorial Limusa.

Prabhakaran Centelan. (2008). Diseño de las barrenos. Artículo traducido y publicado en *Oilfield Review*, 2011, 23( no.2).

Rivera Mantilla, Hugo. (2011). *Geología General*. (Tercera Edición). Lima – Perú. Grupo Editorial Megabyte.

Rivera Pacheco, Jorge. (2009). *Percusión asistida en la perforación rotativa en minería a tajo abierto*. Conferencia presentada en Convención 31 de Perumin. Perú. Recuperado

el 20 de octubre de 2014, de <http://www.convencionminera.com/perumin31/images/perumin/mencion-honrosa/tt-355.pdf>.

Sánchez Zorrilla, Manuel. (2006). *Guía para elaborar tesis*. Cajamarca - Perú. Editado por Universidad Nacional de Cajamarca.

Sandvik Mining and Construcción. (2006). *Brocas tricónicas en la minería de superficie, manual del usuario*. Recuperado el 9 de febrero de 2015, de <https://es.scribd.com/doc/168493669/Manual-tricono-espanol>.

Thuro, K. (2003). *Plinninger, hard rock túnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability, eth swiss institute of technology zurich, switzerland*. Suiza. Recuperado el 12 de Noviembre de 2014, de [http://www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2003\\_isrm\\_excavation.pdf](http://www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2003_isrm_excavation.pdf).

# **ANEXOS**

Anexo N° 1. Datos técnicos de la perforadora

<b>Datos técnicos de la PV 271.</b>		
<b>Método de perforación</b>	<b>Rotativa y DTH - Single pass</b>	
Diámetro del barreno	6 3/4 in - 10 5/8 in	171 mm - 270 mm
Pulldown hidráulico	70 000 lbf	311 Kn
Peso sobre la broca	75 000 lb	34 000 kg
Pullback hidráulico	35 000 lbf	156 kN
Profundidad single pass	55 ft	16,8 m
Máxima profundidad de barreno	105 ft	32 m
Velocidad de avance	127 ft/min	0,6 m/s
Cabeza rotativa, torque	8 700 lbf	ft 11,8 kNm
Peso estimado	185 000 lb	84 000 kg
<b>Dimensiones con torre arriba.</b>		
Longitud	41 ft 3 in	12,6 m
Altura	87 ft	26,5 m
Ancho	18 ft 4 in	5,6 m
<b>Dimensiones con torre abajo.</b>		
Longitud	83 ft 7 in	25,5 m
Height	22 ft 1 in	6,7 m
<b>Motor (Tier II).</b>		
Caterpillar	C27	800HP / 597 kW @ 1800RPM (LP 1900)
Cummins	QSK19	755HP / 563 kW @ 1800RPM (LP 1900)
Caterpillar	C32	950HP / 708 kW @ 1800RPM (LP 2600)
Caterpillar	C27	800HP / 597 kW @ 2100RPM (HP 1450)
Cummins	QSK19	755HP / 563 kW @ 2100RPM (HP 1450)
Weg motor	6808	700HP / 521 kW @ 50 o 60Hz
Weg motor	6811	900HP / 671 kW @ 50 o 60Hz
<b>Especificación de los tubos de perforación.</b>		
Diámetro de tubo	Diámetros de broca	Rosca
6 1/4" (159 mm)	6 3/4" – 9"	4" BECO
7" (178 mm)	9" – 9 7/8"	4 1/2" BECO
7 5/8" (194 mm)	9 7/8" – 10 5/8"	5 1/4" BECO
8" (203 mm)	9 7/8" – 10 5/8"	5 1/4" BECO
8 5/8" (219 mm)	10 5/8"	6" BECO
<b>Perforación DTH de alta presión.</b>		
Martillo DTH de hasta 8" y brocas de 9" de diámetro máximo.		

Fuente: Brochure PV 271, Atlas Copco, Tercera Edición, 2012.

Anexo N° 2. Características de la Broca modelo EX712.

## 10 5/8" (270mm) EX712

Assy : 970015  
IADC : 7-1-2



### PRODUCT SPECIFICATIONS

Type:	Tri-cone	Bit Connection:	6 5/8" Reg. API
Bearing Type:	Air Circulation	Circulation Type:	Jet Nozzle
Configuration:	Roller-Ball-Roller	Head Type:	Full Armor
Cutting Structure:	TCI	Hardfacing:	Standard
Gage Rows:	Conical	Armor:	Round (TCI)
Inner Rows:	Bullit	Head Feature:	Fluid Dynamic Profile
Nose Rows:	Conical	Reaming:	None
Surf Rows:	Round	Bit Weight:	174 lbs / 79 kg

### RECOMMENDED OPERATING PARAMETERS

Rotary Speed: 50 – 90 rpm  
Weight on Bit: 30,000 – 85,000 lbs.

PDB Tools Inc. provides advanced technical products and solutions for the mining, exploration, construction, water well, oil, and gas industries. The 10 5/8" EX712 blasthole bits are designed for drilling hard to very hard formations, with rock compressive strength ranging from 35,000 to 60,000 psi. Formation drilled may consist of hard shale, hard limestone, quartzite, slate, taconite, and basalt. Designed with the latest technology and manufacturing, PDB Tools rock bits are the next evolution.

Part of the *EvoX* line of products. "Join the Evolution X"

756 Port America Suite 200 • Grapevine, Texas 76051 • USA  
Tel: 214-295-6324 • Fax: 214-295-4493 • Toll Free: 866-294-3964

Anexo N° 3. Características de la Broca modelo EX722.

## 10 5/8" (270mm) EX722

Assy : 970023  
IADC : 7-2-2



**PRODUCT SPECIFICATIONS**



Type: Tri-cone Bearing Type: Air Circulation Configuration: Roller-Ball-Roller Cutting Structure: TCI Gage Rows: Conical Inner Rows: Bullit Nose Rows: Conical Surf Rows: Round	Bit Connection: 6 5/8" Reg. API Circulation Type: Jet Nozzle Head Type: Full Armor Hardfacing: Standard Armor: Round (TCI) Head Feature: Fluid Dynamic Profile Reaming: None Bit Weight: 174 lbs / 79 kg
--	---

**RECOMMENDED OPERATING PARAMETERS**

Rotary Speed: 50 – 90 rpm  
Weight on Bit: 30,000 – 85,000 lbs.

PDB Tools Inc. provides advanced technical products and solutions for the mining, exploration, construction, water well, oil, and gas industries. The 10 5/8" EX712 blasthole bits are designed for drilling hard to very hard formations, with rock compressive strength ranging from 35,000 to 60,000 psi. Formation drilled may consist of hard shale, hard limestone, quartzite, slate, taconite, and basalt. Designed with the latest technology and manufacturing, PDB Tools rock bits are the next evolution.

*Part of the EvoX line of products. "Join the Evolution X"*

756 Port America Suite 200 • Grapevine, Texas 76051 • USA  
Tel: 214-295-6324 • Fax: 214-295-4493 • Toll Free: 866-294-3964

Anexo N° 4. Características de la Broca modelo EX532.

## 10 5/8" (270mm) EX532

Assy : 970002  
IADC : 5-3-2



### PRODUCT SPECIFICATIONS

Type:	Tri-cone	Bit Connection:	6 5/8" Reg. API
Bearing Type:	Air Circulation	Circulation Type:	Jet Nozzle
Configuration:	Roller-Ball-Roller	Head Type:	Full Armor
Cutting Structure:	TCI	Hardfacing:	Standard
Gage Rows:	Wedge	Armor:	Round (TCI)
Inner Rows:	Conical	Head Feature:	Fluid Dynamic Profile
Nose Rows:	Conical	Reaming:	None
Surf Rows:	Round	Bit Weight:	174 lbs / 79 kg

### RECOMMENDED OPERATING PARAMETERS

Rotary Speed: 50 – 120 rpm  
Weight on Bit: 30,000 – 80,000 lbs.

PDB Tools Inc. provides advanced technical products and solutions for the mining, exploration, construction, water well, oil, and gas industries. The 10 5/8" EX532 blasthole bits are designed for drilling soft to medium hard formations, with rock compressive strength ranging from 10,000 to 35,000 psi. Formation drilled may consist of shale, limestone, quartzite, slate, sandstone, and granite. Designed with the latest technology and manufacturing, PDB Tools rock bits are the next evolution.

*Part of the EvoX line of products. "Join the Evolution X"*

756 Port America Suite 200 • Grapevine, Texas 76051 • USA  
Tel: 214-295-6324 • Fax: 214-295-4493 • Toll Free: 866-294-3964

Anexo N° 5. PDB Tools Inc. TDC.

## PDB Tools lowers TDC via ...

### Innovation

- Cutting Structure Designs
- Bearing Designs
- Finite Element Analysis (FEA)
- Computational Fluid Dynamics (CFD)

### Performance

- Custom Program Series (CPS)
- Controlled Drilling Parameters
- Excellent Results

### Value

- Pulldown (Weight) Testing
- Air Testing
- RPM Testing
- Monitoring of Test Bits
- Dull Bit Analysis
- Drilling Seminar
- Best Total Drilling Cost
- Best Cost per Feet (or Meter)

Fully Automated 3D models

Premium Carbide Compacts

Full Range of IADC Cutting Structure

Premium Balls and Rollers

Carbide Thrust-Buttons

Optimized Nozzle Placement

Proprietary Bearing Designs

Full Armor Shirttail

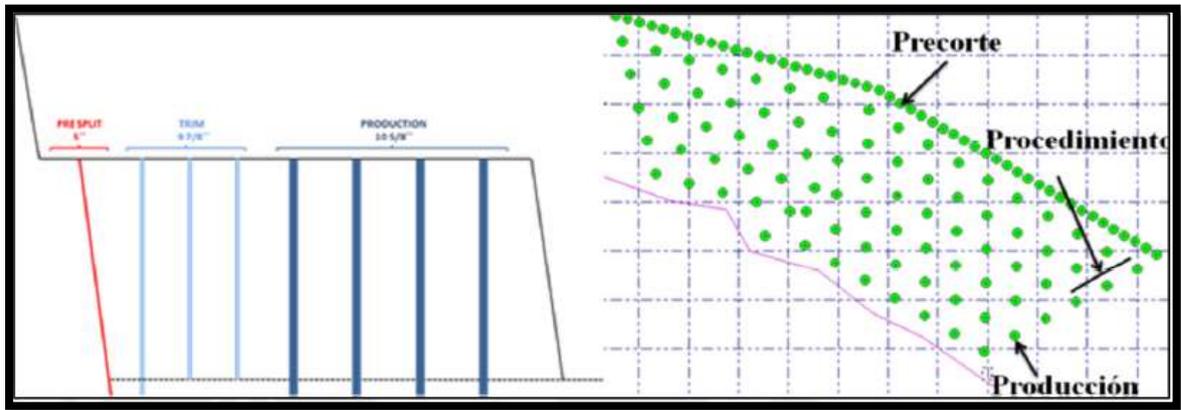
Nail Lock Nozzle

API Certified Connection

Anexo N° 6. Parámetros de Resistencia de los suelos para los Tajos Carola y Concepción.

TAJO CAROLA		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		Parámetros de Resistencia PQ Total				Parámetros de Resistencia PQ Efectivos				E(MPa)	
				Ct (KPa)		ct(*)		Ct (KPa)		ct(*)			
		Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev
Suelo	Argilico	21.52	1.4	0	-	31	3	0	-	34	3	17.82	-
	Secuencia Superior de Cravas	22.1	0.5	0	-	43	4	0	-	44	4	01.92	-
	Ferruginización	21.25	1	0	-	45	2	0	-	48	2	107.24	-
	Finos	19.48	0.8	0	-	21	3	0	-	25	3	5.36	-
	Sulfides	21.86	1.1	0	-	22	4	0	-	31	4	19.15	-
	Non Sulfides	21.26	1.9	0	-	34	4	0	-	39	4	31.41	-
TAJO CONCEPCIÓN		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		Parámetros de Resistencia PQ Total				Parámetros de Resistencia PQ Efectivos				E(MPa)	
				Ct (KPa)		ct(*)		Ct (KPa)		ct(*)			
		Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev	Promedio	Stdev
Suelo	Argilico Francésita	22.7	1.2	0	-	22	2	0	-	24	2	6.13	-
	Slice Clar 3	22.7	1.2	0	-	29	2	0	-	30	2	7.56	-
	Slice Granular 3	-	-	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-

Anexo N° 7. Tipos de taladros según propósito (Precorte, Procedimiento y Producción). Izquierda (vista de perfil), Derecha (vista de planta).



Anexo N° 8. Zonificación de malla por dureza.

