

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS DE BROCA TRICÓNICA DE
DIÁMETRO 6 3/4" EN EL TAJO NORTE DE SOCIEDAD MINERA EL
BROCAL, COLQUIJRCA 2018**

INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

DIONY CALCINA PARI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2019



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

EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS DE BROCA TRICÓNICA DE
DIÁMETRO 6 3/4” EN EL TAJO NORTE DE SOCIEDAD MINERA EL
BROCAL, COLQUIJIRCA 2018

INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

DIONY CALCINA PARI

A la Dirección de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas
de la Universidad Nacional del Altiplano como requisito para optar el título de
Ingeniero de Minas

APROBADO:

PRESIDENTE DEL JURADO :
M. Sc. Ing. Mario Serafin Cuentas Alvarado

PRIMER MIEMBRO :
D. Sc. Ing. Jorge Durant Broden

SEGUNDO MIEMBRO :
Ing. Agustín Pérez Quispe

PUNO – PERU
2019

DEDICATORIA

A mis Padres, quienes supieron dedicarme amor y brindarme comprensión en cada paso, ello me encamino a ser ciudadano con valores morales y útil para su pueblo.

A mis hermanos Yesica, Inés, Juan, Guina y Flora que me inspiran no detenerme hasta lograr mis aspiraciones profesionales.

Al amor bonito de mi vida que supo hacer de mí, una mejor persona y me inspira a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento sincero al Ingeniero Rómulo Mucho que con unas palabras y su ejemplo me dio una visión de la vida.

Un agradecimiento a la Ingeniero Nora Mamani Arana, que siempre estuvo ahí para alentarme a no desistir de mis objetivos.

Un agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano y a la Facultad de Ingeniería de Minas, institución a la que debo todo lo que soy.

Al Grupo Aruntani, a través de AYOR S.A.C, que me dio la oportunidad de realizar este estudio. Al Ingeniero Edwin Rosas y Alvaro Begazo que me guiaron durante mi permanencia en la empresa.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE GENERAL.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
PRIMERA PARTE.....	1
1.2 REPORTE DE ACTIVIDAD PROFESIONAL.....	1
SEGUNDA PARTE.....	5
2.1 EL PROBLEMA EN ESTUDIO.....	5
2.1.1 Problema general.....	6
2.1.2 Problemas específicos.....	6
2.2 OBJETIVOS INSTITUCIONALES DEL CENTRO DE TRABAJO.....	6
2.2.1 Objetivo del área de perforación.....	7
2.2.2 Objetivo general de la evaluación.....	7
2.2.2.1 Objetivos específicos.....	7
2.3 MÉTODOS PARA LA SOLUCIÓN DE LOS OBJETIVOS.....	8
2.3.1 Bases teóricas.....	8
2.3.1.1 Perforación rotativa.....	8
2.3.1.2 Perforación rotativa con trícono.....	8
2.3.1.3 Equipo de perforación DML Atlas Copco.....	9
2.3.1.4 Especificaciones técnicas de la DML.....	10
2.3.1.5 Sarta de perforación.....	10

2.3.1.6	Hilos de acoplamiento	11
2.3.1.7	Broca tricónica	14
2.3.1.8	Elementos de la broca tricónica	16
2.3.1.9	Principales características de los triconos.....	18
2.3.1.10	Código IADC.....	19
2.3.1.11	Evaluación del desgaste de triconos	21
2.3.1.12	Parámetros de perforación rotativa	24
2.3.1.13	Velocidad de perforación.....	28
2.3.1.14	Mecanismo de rotura de la roca.....	29
2.3.1.15	Costo total de perforación.....	31
2.3.2	Antecedentes de estudio del problema y experiencias similares	33
2.3.3	Aspectos generales de la mina Colquijirca	36
2.3.3.1	Descripción de la mina	36
2.3.3.2	Geología.....	39
2.3.3.3	Yacimiento.....	40
2.3.3.4	Mineralización	41
2.3.3.5	Parámetros técnicos del Tajo Norte	45
2.3.3.6	Monitoreo de vibraciones y deformación del macizo rocoso	45
2.3.3.7	Descripción del método de minado del Tajo Norte	50
2.3.4	Metodología de la evaluación	59
2.3.4.1	Descripción de los equipos de perforación rotativa en el Tajo Norte.....	60
2.3.4.2	Descripción de los aceros de perforación utilizados	61
2.3.4.3	Selección de brocas para la evaluación	63
2.3.4.4	Descripción básica de marcas de brocas tricónicas	64
2.4	SOLUCIONES TEÓRICAS Y PRÁCTICAS PLANTEADAS.....	76

2.4.1	Proceso de perforación en el Tajo Norte	76
2.4.2	Condiciones de perforación presente	78
2.4.3	Control empírico de la vibración en la columna de perforación.....	79
2.4.4	Clasificación de dureza de macizo rocoso.....	80
2.4.5	Zonificación del tajo según dureza de roca.....	81
2.4.6	Parámetros de perforación aplicados según dureza de roca.	83
2.4.7	Brocas tricónicas evaluadas	84
2.4.8	Recolección de datos	84
2.4.9	Estructura del costo de perforación aplicado	85
2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	87
2.5.1	Vida útil de brocas tricónicas evaluadas.....	88
2.5.2	Costo parcial de perforación de las brocas tricónicas.....	89
2.5.3	Velocidad de perforación efectiva de las brocas tricónicas.....	90
2.5.4	Velocidad de perforación ajustado	91
2.5.5	Relación de los resultados con el TDC.....	92
2.5.5.1	Relación de la velocidad de perforación y el costo total de perforación.....	93
2.5.5.2	Evaluación de la relación de la vida útil de brocas y el TDC.....	94
2.5.5.3	Rendimiento de las barras de perforación	95
2.6	CONCLUSIONES	97
2.7	RECOMENDACIONES.....	98
2.8	BIBLIOGRAFÍA	99
	ANEXOS	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la perforadora DML.....	10
Tabla 2. Empuje limite según el diámetro de la broca.....	24
Tabla 3. Velocidad de rotación recomendable según tipo de roca.....	26
Tabla 4. Calculo de barrido.....	27
Tabla 5. Accesibilidad a la mina Colquijirca.....	37
Tabla 6. Parámetros geotécnicos para el diseño del Tajo Norte.....	44
Tabla 7. Criterios de diseño general del tajo.....	48
Tabla 8. Resumen de producción del Tajo Norte.....	51
Tabla 9. Diseño de malla de perforación y voladura $d < 200$ m.....	54
Tabla 10. Diseño de malla de perforación y voladura $d > 200$ m.....	55
Tabla 11. Diseño de malla de perforación y voladura desmonte $d > 500$ m.....	55
Tabla 12. Diseño de malla de perforación y voladura mineral $d > 500$ m.....	55
Tabla 13. Equipos de bombeo instalados en el tajo.....	56
Tabla 14. Inventario de equipos de bombeo.....	57
Tabla 15. Condiciones de la Booster Station Nv 4204.....	58
Tabla 16. Especificaciones técnicas la perforadora DML2 y DML3.....	60
Tabla 17. Brocas tricónicas para la evaluacion.....	63
Tabla 18. Especificaciones técnicas de broca PDB 6 ¾ GX612.....	65
Tabla 19. Especificaciones técnicas de broca CENERG 63/4 CN60.....	66
Tabla 20. Especificaciones técnicas de broca ROCATAN 6 3/4 AP60.....	68
Tabla 21. Especificaciones técnicas de broca WLS 6 ¾ WLS60 (R278).....	69
Tabla 22. Especificaciones técnicas de broca WLS 6 ¾ WLS60 (P912).....	70
Tabla 23. Especificaciones técnicas de broca TRB 632.....	72
Tabla 24. Especificaciones técnicas de broca TRB 715.....	73
Tabla 25. Especificaciones técnicas de broca EPIROC 6 3/4" F67.....	74

Tabla 26. Especificaciones técnicas de broca SHAREATE 6 3/4 SA642G	76
Tabla 27. Zonificación del tajo según dureza de roca.....	82
Tabla 28. Brocas tricónicas utilizadas en la evaluación	84
Tabla 29. Costo de brocas 2017	85
Tabla 30. Costo de barras 2017.....	86
Tabla 31. Costo de equipo 2017.....	86
Tabla 32. Costo total de perforación por broca 2017	86
Tabla 33. Resumen de costos 2017 por broca	87
Tabla 34. Rendimiento de las brocas tricónicas.....	89
Tabla 35. Comparación del PDC de las brocas evaluadas	90
Tabla 36. Comparación de la velocidad de perforación efectiva.....	91
Tabla 37. Comparación de la velocidad de perforación ajustada	91
Tabla 38. TDC de las brocas tricónicas evaluadas.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de pull down y rotación de una perforación rotativa.....	8
Figura 2. Perforadora DML de Atlas Copco.....	9
Figura 3. Columna de perforación de un equipo de perforación DML	11
Figura 4. Plano de un hilo de acoplamiento BECO.....	12
Figura 5. Plano de hilo de acoplamiento API.	13
Figura 6. Partes de una broca tricónica.....	14
Figura 7. Partes del diseño de una broca tricónica.	15
Figura 8. Código IADC para clasificación de brocas tricónicas.....	20
Figura 9. Ejemplo de evaluación del desgaste de brocas.	22
Figura 10. Código de 8 caracteres que describe el desgaste de brocas tricónicas.	23
Figura 11. Estándar de control de desgaste de brocas según la IADC.....	23
Figura 12. Influencia del empuje en la velocidad de penetración.....	25
Figura 13. Influencia de la velocidad de rotación en la velocidad de penetración.	25
Figura 14. Pasos de rotura de la roca.....	29
Figura 15. Mecanismo de rotura de roca: Exceso de peso	31
Figura 16. Ubicación y accesibilidad de Colquijirca	38
Figura 17. Sección longitudinal SN del distrito minero de Colquijirca.	42
Figura 18. Diagrama idealizado de mineralización del Tajo Norte	43
Figura 19. Sectores geotécnicos.....	46
Figura 20. Radar geotécnico GP SSR 313.....	47
Figura 21. Reporte diario del área de geotecnia sobre la pared norte.	47
Figura 22. Rangos de alerta en tiempo real del radar.....	48
Figura 23. Sección típica – Ancho de rampa.....	49
Figura 24. Ancho de minado óptimo.....	49

Figura 25. Radio de giro de volquetes.....	50
Figura 26. Movimiento de material mina.	52
Figura 27. Distribución de la carga explosiva en un taladro.....	53
Figura 28. Distribución de pozas de bombeo del Tajo Norte.	58
Figura 29. Estación de bombeo norte – Galería 1035 – Smelter – Planta	59
Figura 30. Equipos de perforación DML2 y DML3 en el Tajo Norte.....	61
Figura 31. Marca de aceros de perforación utilizados.....	61
Figura 32. Columna de perforación de equipo DML2 y DML3	62
Figura 33. Barras de perforación STAR IRON WORK	63
Figura 34. Fotografía de las marcas de broca utilizadas en la prueba.....	64
Figura 35. Fotos de broca tricónica PDB GX612.....	65
Figura 36. Fotos de broca tricónica CENERG 6 ¾ CN60.	67
Figura 37. Fotos de broca tricónica MINCON 6 ¾ AP60.....	67
Figura 38. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (R278).....	69
Figura 39. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (P912).	70
Figura 40. Fotos de broca tricónica TRB 6/34 632.....	71
Figura 41. Fotos de broca tricónica TRB 6/34 715.....	73
Figura 42. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (R278).....	75
Figura 43. Fotos de broca tricónica SHAREATE 6/34 SA642.	75
Figura 44. Vista panorámica de los anticlinales y sinclinales del tajo.....	77
Figura 45. Fotografía del macizo rocoso de la zona tortuga.....	78
Figura 46. Perfil de la pared de talud del fondo del tajo.....	78
Figura 47. Perfil de un taladro perforado en el macizo rocoso del tajo.....	79
Figura 48. Escala de dureza del macizo rocoso del Tajo Norte	81
Figura 49. Identificación de dureza 2 en el taladro perforado	81
Figura 50. Identificación de dureza 1 y dureza 2 en el taladro.	82

Figura 51. Parámetros de perforación aplicados por zonas.	83
Figura 52. Resumen de costos año 2017.	87
Figura 53. Vida útil promedio de brocas tricónicas evaluadas.	88
Figura 54. Relación del PDC y el TDC.	92
Figura 55. Relación comparativa entre la VP y el TDC.	93
Figura 56. Comparación del TDC por año	94
Figura 57. Relación comparativa entre rendimiento de brocas y el TDC.	94
Figura 58. Rendimiento promedio de barra de perforación.	95
Figura 59. Costo por metro perforado de las barras de perforación.	96
Figura 60. Comparativo de costo y la vida útil de las barras.	96

LISTA DE ACRÓNIMOS

ABREVIATURA / SIMBOLO	DEFINICIÓN
°C	: Grados centígrados
6 ¾"	: 6.75 pulgadas
ADT	: Altura de trabajo
AGT	: Ángulo global de talud
AIR	: Ángulo interior de rampa
API	: American Petroleum Institute
ATB	: Ángulo talud de banco
BECO	: Bucyrus Erie Company,
CFM	: Pies cúbicos por minuto
cm/día	: Centímetros por día
EIA	: Estudio de impacto ambiental
FA	: Fortis Advantage (Heavy ANFO de Orica)
ft	: Pies
HP	: Caballos de fuerza
IADC	: Asociación Internacional de Contratistas de Perforación
Inch	: Pulgadas
Kg	: Kilogramo
km	: Kilometro
km/h	: Kilometro por hora
KN	: Kilo Newton
KPI	: Indicador clave de desempeño
l/s	: Litros por segundo
lb	: Libra
lb/pulg	: Libras por pulgada
lb/pulg ²	: Libras por pulgada cuadrada
Lbf	: Libra – fuerza
m	: Metro
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
m ³	: Metros cúbicos
Mine to Mill	: Mina a molino

mm	:	Milímetros
mm/s	:	Milímetros por segundo
m-p/barra	:	Metro perforado por barra
m-p/broca	:	Metros perforados por broca
m-p/h	:	Metro perforado por hora
MPa	:	Megapascales
ms	:	Milisegundos
Ø	:	Diámetro
Oz/TM	:	Onzas por tonelada métrica
PDC	:	Costo parcial de perforación
PSI	:	Libras por pulgada cuadrada
Pull down	:	Fuerza de empuje
ROP:	:	Velocidad de penetración
RPM	:	Revoluciones por minuto
SMEB	:	Sociedad Minera El Brocal
TCI	:	Insertos de carburo de tungsteno
TDC	:	Costo total de perforación
TMS	:	Toneladas métricas secas
TMS /día	:	Toneladas métricas secas por día
tn	:	Tonelada
US\$/metro	:	Dólares por metro perforado
Vb	:	Velocidad de barrido
VP	:	Velocidad de perforación

RESUMEN

El área de perforación AYOR SAC, realizó un análisis de los resultados del período 2017, concluyendo que el rendimiento de las brocas tricónicas de diámetro 6 ¾", no corresponde al tipo de roca presente en el Tajo Norte de Sociedad Minera El Brocal, por tal motivo en el 2018 se decide hacer una evaluación de brocas e implementar una oportunidad de mejora. El objetivo fue identificar la broca tricónica de diámetro 6 ¾" con el mejor rendimiento, para la perforación al menor costo en condiciones del macizo rocoso del Tajo Norte. La metodología usada fue la descripción de los tipos de brocas y determinación de sus rendimientos en indicadores como la vida útil promedio, costo parcial de perforación y costos total de perforación; para compararlos con una broca testigo y los resultados del año 2017. Así mismo se realizó una zonificación del tajo para aplicar parámetros de perforación por zonas de dureza como semiduro, medio, suave y relleno. En la evaluación se utilizó brocas tricónicas de marca Cenerg, Mincon, Epiroc, WLS, PDB, TRB y Shareate. Los resultados muestran que la broca tricónica de marca Mincon de serie AP60 de código IADC 632, tiene el mejor rendimiento con una vida útil de 2674.4 m, un costo parcial de perforación (PDC) de 0.46 US\$/m y un costo total de perforación (TDC) de 3.20 US\$/m; que perforó en zonas de dureza 28% en semiduro, 33% en media, 0% en suave y 39% en relleno. Estos resultados superan a la broca testigo de marca Shareate, que alcanzó una vida útil promedio de 2134.1 m, un PDC en 0.64 US\$/m y un TDC de 4.23 US\$/m; que perforó 13% en semiduro, 85% en media, 0% en suave y 1% en relleno. Los resultados de la marca Mincon también superan significativamente a los rendimientos del año 2017, que alcanzó una vida útil promedio de 1860 m, PDC de 0.79 US\$/m y TDC de 4.24 US\$/m. Además, se optimizó la vida útil de barras que alcanzó 68216 m en el 2018 mientras que el año 2017 alcanzó una vida útil promedio de 34344 m. Por la aplicación de las mejoras en el proceso de perforación en el 2018 el TDC fue 3.92 US\$/m mientras el TDC del 2017 fue 4.24 US\$/m.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo por la modalidad de Informe de Experiencia Profesional titulado “Evaluación de rendimientos de broca tricónica de diámetro 6 ¾” en el Tajo Norte de Sociedad Minera El Brocal, Colquijirca 2018” tiene como fin dar a conocer la evaluación de rendimientos de broca tricónica que se realizó en el área de perforación de la empresa AYOR S.A.C., en el Tajo Norte de Sociedad Minera El Brocal, ubicado en Tinyahuarco – Colquijirca, Cerro de Pasco.

En el capítulo 2.1 se hace una descripción del problema en estudio, el rendimiento de las brocas tricónicas en el año 2017 y por lo tanto se plantea hacer una evaluación del rendimiento de brocas buscando una oportunidad de mejora y optimizar los costos de perforación. En el capítulo 2.2 se resume la política de SSTMAC AYOR SAC, los objetivos del área de perforación y los objetivos propios de este informe.

En el capítulo 2.3 planteamos la metodología aplicada para la solución de la problemática. Inicialmente se describen bases teóricas involucradas en la evaluación como, la perforación rotativa, la descripción del equipo de perforación DML, aceros de perforación y la broca tricónica. Se menciona el código IADC (asociación internacional de contratistas de perforación), a partir de ello la evaluación de triconos gastados, los parámetros de perforación y el costo total de perforación. Seguido se hace un análisis general de estudios similares sobre rendimiento de brocas tricónicas en distintas partes del Perú. También se describe los aspectos generales de la mina Colquijirca como, la ubicación territorial y geográfica de la mina, su geología, características del yacimiento y mineralización, parámetros técnicos del Tajo Norte y el método de minado.

En la metodología de la evaluación se da a conocer el tipo de investigación aplicada, luego se describe a través de un check list técnico el equipo de perforación, la columna de perforación

utilizada en la prueba, la selección de las brocas, y una evaluación de las características físicas y técnicas de 7 marcas de brocas.

En el capítulo 2.4 de este informe contiene las soluciones prácticas planteadas, como el proceso de perforación, las condiciones en las que se realizó la perforación, el control empírico de las vibraciones en el columna de perforación, la clasificación de la dureza del macizo rocoso, la zonificación del tajo según la dureza de roca, los parámetros de perforación aplicados según la zonificación del tajo, las brocas tricónicas para la evaluación, la forma de recolección de datos y la estructura de costos de perforación.

Finalmente se muestran los resultados de la evaluación, la comparación con la broca testigo y los rendimientos del año 2017. La evaluación se realiza mediante el cruce de resultados numéricos mostrados en tablas y figuras agregando notas de observaciones concluyentes de la vida útil de la broca, costo parcial de perforación, costo total de perforación y su relación con los demás indicadores. Además, se adjunta un par de figuras donde se muestra la optimización de la vida útil de las barras de perforación. Adicionalmente las conclusiones nombradas, resuelven inquietudes planteadas en la problemática y los objetivos, sugiriendo recomendaciones para la mejora continua del proceso de perforación.

El trabajo realizado nos dio experiencia y conocimientos sobre los costos perforación, lo que damos a conocer a través de este informe. Actualmente la industria minera asume un nuevo enfoque de optimización integral, conocido como Mine to Mill, donde la perforación y voladura son importantes; ya que influye en los procesos siguientes, como el minado, chancado y el beneficio de minerales.

PRIMERA PARTE

1.2 REPORTE DE ACTIVIDAD PROFESIONAL

CENTRO DE TRABAJO : Tajo Norte – Sociedad Minera el Brocal – Cerro de Pasco
EMPLEADOR : AYOR S.A.C.
CARGO DESEMPEÑADO : Jefe de perforación
PERIODO : Febrero 2017 a Mayo 2019

Funciones:

- Planificar el consumo anual de aceros, materiales e insumos, así mismo el requerimiento de personal para el área de perforación.
- Coordinar con el cliente SMEB la preparación de plataformas de perforación primaria, secundaria y sondajes de más de una barra.
- Supervisar, dirigir y controlar las operaciones de perforación con equipos DM45, DML de Atlas Copco.
- Evaluar y controlar el desempeño de los aceros de perforación y brocas tricónicas de 6 3/4" y 7 7/8".
- Verificar y controlar los KPI's de perforación.

Logros:

- Estandarizar en procedimientos, las prácticas de trabajo positivas.

CENTRO DE TRABAJO : Mina Mallay – Compañía Minera Buenaventura - Lima
EMPLEADOR : JCB Contratistas AYOR S.A.C.
CARGO DESEMPEÑADO : Supervisor de mina. Taladros largos
PERIODO : Mayo 2016 - Febrero 2017

Funciones:

- Supervisar, dirigir, controlar las operaciones de perforación, voladura, limpieza y relleno del método Bench and Fill aplicando taladros largos, encargados por el área de mina.
- Supervisar y evaluar desviaciones de taladros, aprobar los taladros para realizar la voladura, evaluar el ancho de minado final, el factor de potencia y dirigir la voladura de bancos con taladros largos.
- Realizar la supervisión y el seguimiento del desarrollo de labores subterráneas como galerías, chimeneas, subniveles, rampas para la aplicación del método Bench and Fill.
- Realizar informes diarios de seguimiento de las operaciones del método Bench and Fill al jefe de perforación y voladura, jefe de mina y superintendencia de mina.
- Capacitar al personal a cargo en temas de seguridad, perforación y voladura.

Logros

- El método fue ganador como trabajo de innovación a nivel del grupo Buenaventura.

CENTRO DE TRABAJO : Cal & Cemento Sur S.A., Planta Caracoto.
EMPLEADOR : Cal & Cemento Sur S.A.
CARGO DESEMPEÑADO : Ingeniero en entrenamiento de seguridad integral.
PERIODO : Setiembre 2015 – Enero 2016

Funciones:

- Cumplir con las tareas asignadas por el área de Seguridad Integral.

- Supervisión de cantera y planta en el cumplimiento de los estándares de SSOMA aceptados por la organización.
- Asesoramiento a contratistas en seguridad y salud ocupacional
- Apoyo en el seguimiento del plan anual de seguridad y salud ocupacional.
- Evaluación y asesoramiento en la elaboración del IPERC en áreas encargadas de planta y canteras
- Inducción, capacitación y motivación en seguridad industrial y minera.

Logros

- Reconocimiento al ser parte del equipo del proceso de certificación OHSAS 18001 e ISO 14001.
- Elevar el nivel de gestión SSOMA de las contratistas.

CENTRO DE TRABAJO	:	Cal & Cemento Sur S.A. - Planta Caracoto
EMPLEADOR	:	CONTRATISTAS GENERALES KALISS
CARGO DESEMPEÑADO	:	Supervisor SSOMA
PERIODO	:	Abril 2014 – Agosto 2015

Funciones:

- Elaborar el expediente para autorización de actividades de proyectos (plan de seguridad, plan de manejo ambiental, IPERC, identificación de aspectos ambientales).
- Elaborar, dirigir, controlar y evaluar el plan anual de gestión de seguridad y salud ocupacional, realizar el seguimiento y los cambios necesarios.
- Elaborar el dossier de seguridad y medio ambiente de proyectos culminados.
- Llevar los registros de seguridad según normativa vigente: ley 29783, D.S 055-2010 EM, NTP, G-050, etc.

- Hacer los levantamientos de auditorías de ISO 14001 Y OSHAS 18001.
- Registro e informe de investigación de incidentes y accidentes, elaborar los informes mensuales.

Logros

- Implementar el sistema de seguridad y medio ambiente.
- Establecer requisitos mínimos para la certificación OSHAS 18001.

CENTRO DE TRABAJO : Proyecto Minero Las Bambas - Apurímac
 EMPLEADOR : PEVOEX S.A.C.
 CARGO DESEMPEÑADO : Supervisor de campo
 PERIODO : Mayo 2013 – Enero 2014

CENTRO DE TRABAJO : Cía. Minera San Nicolás - Cajamarca
 EMPLEADOR : Cía. Minera San Nicolás
 CARGO DESEMPEÑADO : Asistente de jefe de guardia
 PERIODO : Enero 2013 – Mayo 2014

CENTRO DE TRABAJO : Empresa Minera Aruntani S.A.C. Mina Tucari – Moquegua
 EMPLEADOR : Empresa Minera Aruntani S.A.C.
 CARGO DESEMPEÑADO : PRACTICANTE (Operaciones Mina)
 PERIODO : Enero – Mayo 2012

SEGUNDA PARTE

EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS DE BROCA TRICÓNICA DE DIÁMETRO 6 ¾” EN EL TAJO NORTE DE SOCIEDAD MINERA EL BROCAL, COLQUIJIRCA 2018

2.1 EL PROBLEMA EN ESTUDIO

En enero del 2017 y mayo 2019 la empresa AYOR S.A.C., subsidiaria de MUR WY SAC; ganadora de la licitación de contrato: CONTRATO DE OBRA Y SERVICIOS N° 2016-001-LS-MI, se hace cargo del “Servicio de explotación de mina que incluye actividades de perforación, carguío, acarreo, descarga, mantenimiento de vías y riego anti polvo” en el Tajo Norte de Sociedad Minera El Brocal, ubicado en Colquijirca – Cerro de Pasco, es decir, la empresa se encargó de todo el proceso de minado en el Tajo Norte, menos de voladura y servicios auxiliares que se encargaba la empresa ORICA y ECOSAR respectivamente.

Durante el análisis de las actividades de perforación del año 2017 se identificó un problema; el rendimiento de las brocas tricónicas no correspondía a un desempeño óptimo, para el tipo de roca presente en el Tajo Norte, la vida útil de las brocas tricónicas de diámetro 6 ¾” fue de 1860 m-p/broca, la velocidad de perforación fue de 73.10 m-p/h, el costo parcial de perforación (PDC) fue de 0.79 US\$/m y el costo total de perforación (TDC) fue 4.24 US\$/m. Además, la vida útil promedio de las barras de perforación fue de 34344 m-p/barra a un costo de 0.12 US\$/m.

Teniendo los datos del párrafo anterior, se tomó la decisión de realizar una evaluación de rendimientos de broca tricónica de diámetro 6 ¾” de marcas y tipos que hay en el mercado; con el objetivo de identificar un tipo de broca de mejor rendimiento para la perforación en condiciones del macizo rocoso del Tajo Norte y reducir el costo de perforación. La evaluación de rendimientos de broca, debe consistir en determinar la vida útil promedio y la velocidad de perforación efectiva, el costo parcial de perforación (PDC) y el costo total de perforación (TDC).

Después de plantear el problema y decidir la evaluación, nos genera la siguiente interrogante:

¿Qué broca tricónica tiene el mejor rendimiento para reducir el costo total de perforación en el Tajo Norte de la Sociedad Minera El Brocal (SMEB)?

PALABRAS CLAVE: Perforación rotativa, vida útil de la broca, velocidad de perforación, costo parcial de perforación, costo total de perforación.

2.1.1 Problema general

¿Qué broca tricónica de diámetro 6 $\frac{3}{4}$, tiene el mejor rendimiento para la perforación al menor costo en el Tajo Norte de SMEB?

2.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuánto es la vida útil promedio de los tipos de brocas tricónicas de diámetro 6 $\frac{3}{4}$ en el Tajo Norte de SMEB?
- b) ¿Cuánto es el costo por metro perforado de las brocas tricónicas de diámetro 6 $\frac{3}{4}$ " en el Tajo Norte de SMEB?
- c) ¿Cuál es la relación del PDC y TDC en la perforación del Tajo Norte de SMEB?

2.2 OBJETIVOS INSTITUCIONALES DEL CENTRO DE TRABAJO

En la Política Integrada de Seguridad y Salud Ocupacional, Medio Ambiente y Calidad de AYOR SAC, en el compromiso 1 y 6 se menciona lo siguiente:

- Realizar nuestras operaciones bajo la filosofía del “trabajo bien hecho”, lo que implica proporcionar condiciones de trabajo seguras y saludables para la prevención de daños y deterioro de la salud relacionado con el trabajo, medio

ambiente y calidad de los procesos; y sus oportunidades, apoyando así a nuestra dirección estratégica en el cumplimiento de los objetivos y metas.

- Alcanzar la satisfacción de nuestros clientes a través de la realización exitosa de nuestros servicios y la retroalimentación para la mejora continua de nuestros procesos.

2.2.1 Objetivo del área de perforación

Somos el área operativa que genera valor a nuestra empresa, realizando un servicio exitoso de perforación a nuestros clientes. Nos guiamos por lo siguiente:

- Cumplimiento de los objetivos y metas encargados por la superintendencia de mina.
- Optimizar las operaciones de perforación en sus distintos procesos, siempre orientado a la mejora continua.

2.2.2 Objetivo general de la evaluación

Identificar la broca tricónica de diámetro 6 3/4" con el mejor rendimiento para la perforación al menor costo en Tajo Norte de SMEB.

2.2.2.1 Objetivos específicos

- a) Determinar la vida útil promedio de los tipos de brocas tricónicas de diámetro 6 3/4" en el Tajo Norte de SMEB.
- b) Estimar el costo por metro perforado de las brocas tricónicas de diámetro 6 3/4" en el Tajo Norte de SMEB.
- c) Comparar la relación del PDC y TDC en la perforación del Tajo Norte de SMEB.

2.3 MÉTODOS PARA LA SOLUCIÓN DE LOS OBJETIVOS

2.3.1 Bases teóricas

2.3.1.1 Perforación rotativa

El principio utilizado por este sistema de perforación consiste en aplicar una gran fuerza de empuje que es transmitida a la columna de barras haciendo rotar una broca tricónica que va al fondo del taladro (Ortiz, 2000). (Fig. 1).

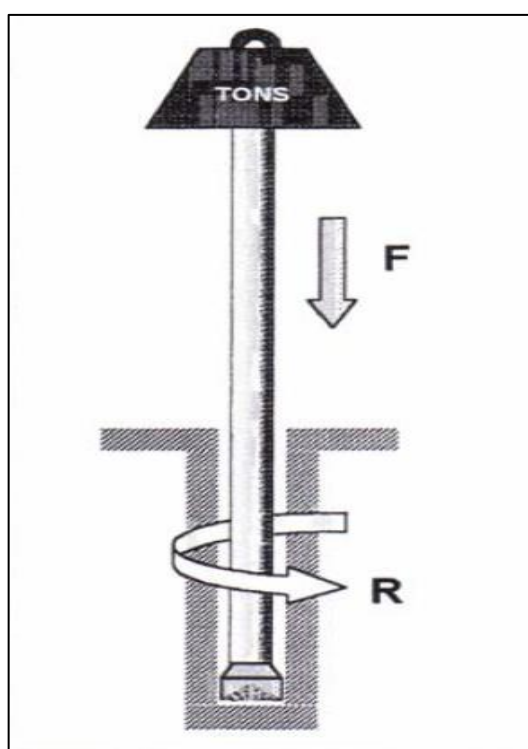


Figura 1. Esquema de pull down y rotación de una perforación rotativa.

Fuente: Ortiz, 2000.

2.3.1.2 Perforación rotativa con trícono

Inicialmente fue usado en la perforación de pozos petrolíferos, pero limitado sólo a formaciones rocosas más bien blandas. En los inicios del siglo XX aparecen los primeros trépanos provistos de rodillos endentados que ruedan sobre el fondo del hoyo, ejerciendo una acción triturante sobre la roca, capaces de perforar formaciones rocosas de dureza mediana. Su diseño evoluciona rápidamente hasta la herramienta conocida con el nombre de trícono.

A principios de los años 50 esta tecnología se empieza a aplicar en los primeros equipos rotativos diseñados para realizar perforaciones de tronadura en minas a cielo abierto. Innovaciones posteriores, principalmente en lo que dice relación con el diseño de estos triconos y la calidad de los aceros utilizados en su fabricación, le dan hoy en día a este sistema una gran versatilidad. Se aplica tanto en rocas blandas como muy duras, sin restricciones en cuanto a la longitud de los tiros. Su única limitación es el diámetro de perforación, no se aplica en diámetros menores a 150 mm. (Ortiz, 2000, p. 107)

2.3.1.3 Equipo de perforación DML Atlas Copco

DML es una unidad de perforación rotativa multipase montada sobre orugas, diseñada específicamente para la perforación de taladros de producción a profundidades de 53,3 m (175 pies) con un cambio de tubería de 30 pies y 62,5 m con el opcional cambio de tubería de 35 pies (10,7 m). Varias capacidades de carrusel están disponibles tanto para la torre estándar de 30 pies (9,15 m) como para la torre opcional de 35 pies (10,7 m). La presión de alimentación genera un peso en la fuerza de los bits de hasta 60.000 lbf (267 kN). (Ficha técnica DML).



Figura 2. Perforadora DML de Atlas Copco.

Fuente. Atlas Copco 2012.

2.3.1.4 Especificaciones técnicas de la DML

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la perforadora DML

Especificaciones técnicas	Imperial	Métrico
Serie de productos	Serie DM	Serie DM
Método de perforación	Rotativa y martillo en fondo – Multi Pass	
Diámetro del barreno	5,88 - 10,62 inch	149 - 270 mm
Empuje hidráulico	60000 lbf	267 kN
Tracción hidráulica	22000 lbf	98 kN
Peso sobre la broca	60000 lb	27200 kg
Profundidad en una pasada	27,4 ft	8,5 m
Profundidad en una pasada, opción	32,4 ft	10 m
Profundidad máxima de barreno	175 ft	53,5 m
Profundidad de barreno máxima, opción	205 ft	62,5 m
Peso estimado	87000 - 110000 lb	39,5 - 50 t

Fuente. Atlas Copco, 2012.

La Tabla 1 muestra la ficha técnica de un equipo de perforación DML Atlas Copco. En el ANEXO 7 se hace descripción minuciosa de las especificaciones técnicas.

2.3.1.5 Sarta de perforación

La sarta de perforación, también conocida como columna de perforación es la encargada de transmitir las fuerzas de empuje y rotación al tricono, además de determinar la profundidad del pozo. Por dentro de la sarta circula aire para evacuar el detritus y además enfriar la broca y agua que sirve para estabilizar las paredes del pozo. La sarta de perforación se compone de los siguientes componentes; amortiguador, adaptador, barra, adaptador de broca, broca, anillo guía (Ver Figura 3).

El largo de la sarta va aumentando cuando cada vez vamos agregando barras a nuestra sarta de perforación. Para una perforación eficiente siempre debemos tener una sarta de perforación lo más vertical posible para evitar vibraciones que provoquen fatigas de material en los componentes.

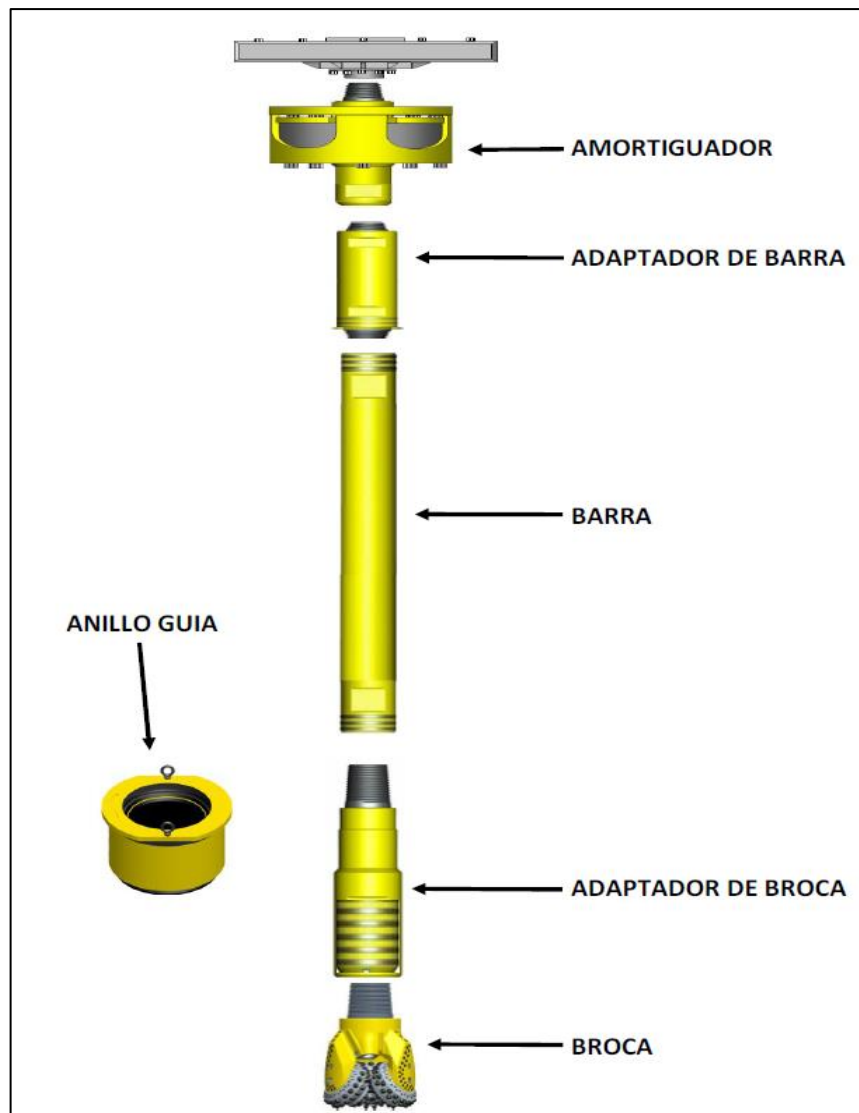


Figura 3. Columna de perforación de un equipo de perforación DML

2.3.1.6 Hilos de acoplamiento

2.3.1.6.1 Hilo BECO

Su origen y diseño se desprende del fabricante de equipos de perforación Bucyrus Erie Company, quien, junto con diseñar y construir equipos, adicionalmente confeccionó las barras de perforación para lo cual tuvo que buscar un diseño tal que cumpliera con las características que permitieran trabajar bajo condiciones mecánicas de trabajo al límite, su denominación cubre aspectos dimensionales y de diseño, sus principales características son:

- Alta resistencia mecánica para grandes esfuerzos torsionales.

- Perfil geométrico del triángulo generador de la rosca de gran altura y espesor para resistir altas cargas de fricción.
- Angulo de inclinación del cono roscado óptimo para resistir esfuerzos alternados de torsión, tracción, compresión, pandeos y flexiones.
- Angulo de inclinación del cono roscado y longitud entre roscas óptimos para un acoplamiento rápido del par torsor.
- Todas las roscas beco tienen la misma altura, distancia entre hilos y ángulo de inclinación del cono roscado hembra y macho.
- Las roscas beco se construyen en relación al diámetro de la barra de perforación que se usará.
- El espejo es la única área de sello de una conexión de barras, los hilos acoplados quedan con un juego entre sus filetes y las crestas que permiten almacenar la grasa de lubricación y evacuar residuos que se puedan adherir.
- Las roscas beco van desde beco 3 ½ hasta beco 10.

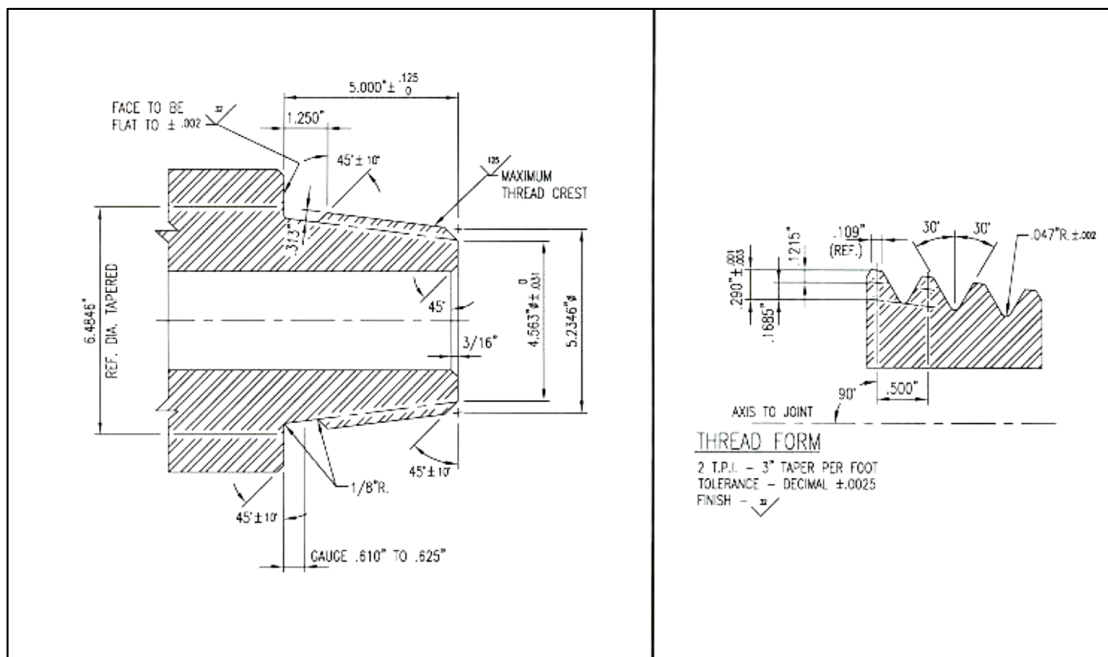


Figura 4. Plano de un hilo de acoplamiento BECO.

Fuente. Manual de perforación STRACON 2010.

2.3.1.6.2 Hilo API

Su origen y diseño corresponde al American Petroleum Institute En las primeras épocas de la perforación rotativa era muy difícil asegurar la perfecta combinación de hilos entre distintos fabricantes de barras de perforación, motivo por el cual se solicitó al A.P.I. La elaboración de una norma que incluyera marcas de identificación y características de diseño que aseguraran un alto grado de exactitud.

Sus especificaciones cubren las propiedades mecánicas de los aceros con que se construyen, detalles de fabricación, y dimensiones de barras con que serán usadas.

Sus principales características son:

- Rosca de paso fino, 4 a 5 hilos x pulgada.
- Angulo de inclinación que facilita su acoplamiento
- Denominaciones normalizadas A.P.I. que identifican sus características.
- Principales fuentes de uso, en triconos de perforación mineros y petroleros y barras de perforación petroleras. (Manual de perforación, STRACON 2010).

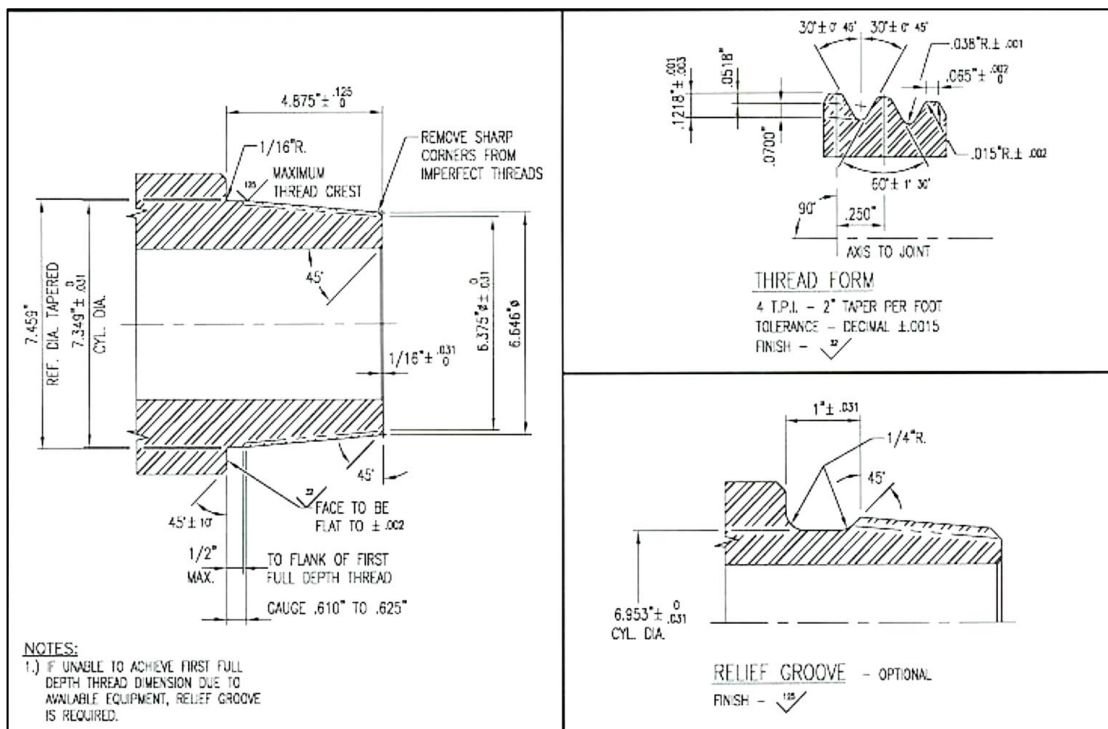


Figura 5. Plano de hilo de acoplamiento API.
 Fuente. Manual de perforación STRACON 2010.

2.3.1.7 Broca tricónica

Es la herramienta localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación que se encarga de realizar el corte al macizo rocoso, durante el proceso de perforación rotativa, por efecto de la presión axial y rotación. Está conformado por tres conos rodantes que tienen insertos de carburo de tungsteno.

Esta herramienta apareció en 1910, sin embargo, su utilización masiva se introdujo cuando se perfeccionaron los equipos de rotación en la década de los 60. Este tipo de perforación al principio se utilizó en rocas blandas o de poca resistencia, pero actualmente estos sistemas ya son competitivos en rocas duras. Con este sistema de perforación se alcanzan buenos rendimientos, del orden de 60-100 m/turno, en profundidades de hasta 200 m. Se utiliza en ingeniería civil con diámetros entre 100 y 300 mm. Sin embargo, estos límites se superan, por ejemplo, en perforaciones petrolíferas, donde en España se han superado los 4500 m de profundidad. (López, 1980, p.67)

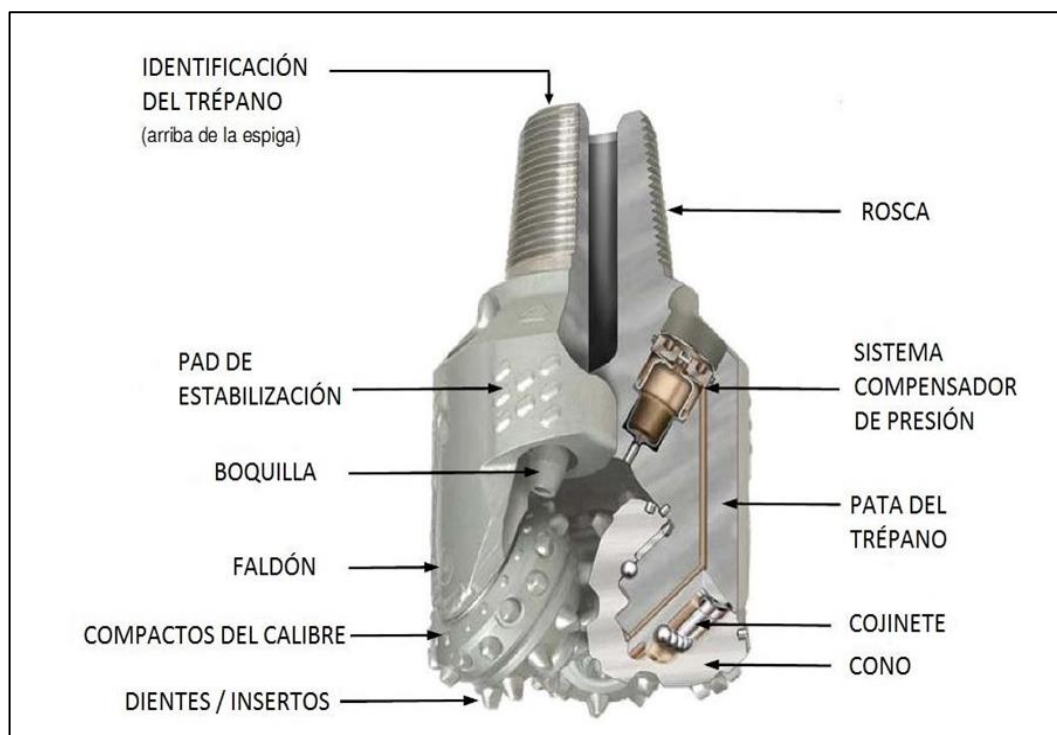


Figura 6. Partes de una broca tricónica.

Fuente: Coffman 2012

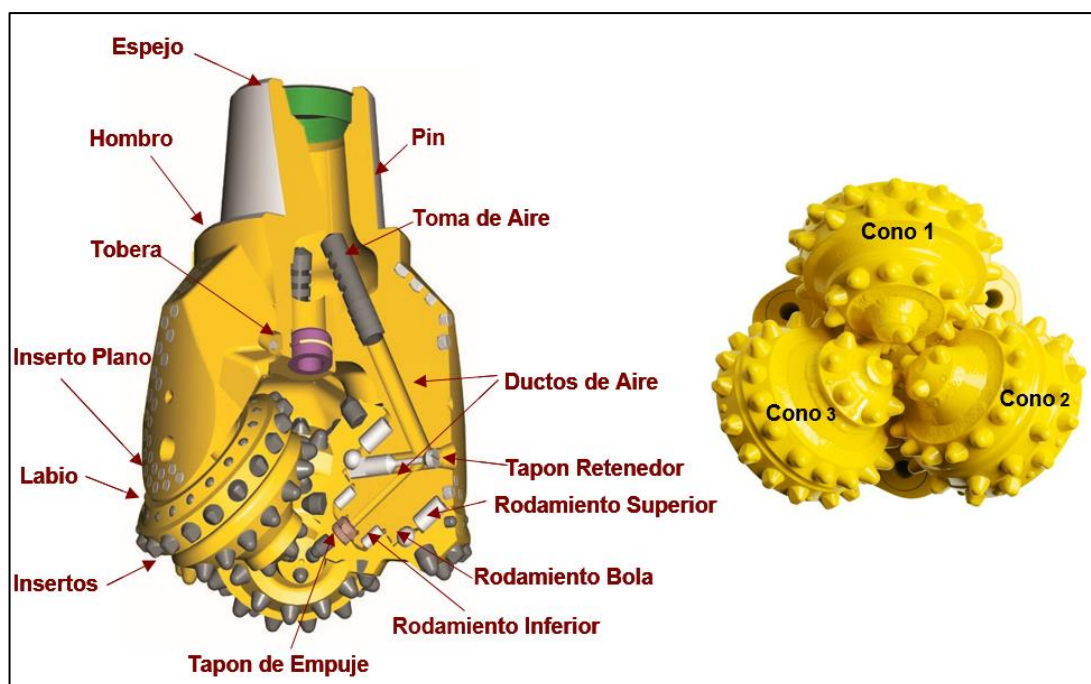


Figura 7. Partes del diseño de una broca tricónica.

Fuente: Reporte de desgaste de Atlas Copco.

El principio de perforación se basa en dos acciones combinadas, indentación y corte:

Indentación. - Los dientes o insertos penetran en la roca debido al empuje sobre la boca. Este mecanismo tritura la roca.

La fuerza de avance se produce al introducir los botones del trícono en la roca. Este empuje se transmite al varillaje mediante una cadena de accionamiento hidráulico. La magnitud del empuje no debe sobrepasar cierto umbral para evitar el agarrotamiento del trépano sobre la roca y otro tipo de fallos. La limpieza de la perforación se realiza mediante un fluido, generalmente lodo, aunque en ocasiones se usa agua o aire comprimido, que se inyecta por el interior de la columna de barras hacia el fondo del barreno. Este caudal, aparte de barrer el detritus, permite la refrigeración y lubricación de los rodamientos del trícono.

La velocidad de penetración de este sistema depende de la dureza o resistencia de la roca y de las variables de operación, que son las siguientes:

- Velocidad de rotación.
- Fuerza de empuje.
- Diámetro de la perforación.
- Velocidad y caudal del aire de barrido.
- Desgaste de los trépanos

Corte. - La roca se fragmenta debido al movimiento lateral de desgarramiento de los conos al girar sobre el fondo del barreno. Se pueden distinguir dos tipos de triconos: de dientes y de insertos de carburo de tungsteno. Los triconos de dientes tienen un costo económico menor, aproximadamente una quinta parte menos que los de insertos. Sin embargo, éstos últimos presentan claras ventajas:

- Mantienen la velocidad de penetración durante la vida útil.
- Requieren menos empuje para una determinada velocidad de penetración.
- Necesitan menos par, disminuyendo las tensiones sobre los motores de rotación.
- Reducen las vibraciones, con menos fatiga sobre la perforadora y el varillaje.
- Disminuye el desgaste sobre el estabilizador y la barra.
- Producen menos pérdidas de tiempo por cambio de bocas y menores daños en las roscas. (López, 1987).

2.3.1.8 Elementos de la broca tricónica

Los elementos de la broca tricónica son los siguientes:

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 trícono 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 trícono:

- 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 trícono

El cuerpo del trícono 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.

2.3.1.9 Principales características de los triconos

A. Estructura de corte.

a. Las formas y grados de los insertos son fabricados usando el estado de arte en de carburos de tungsteno para diferentes formaciones rocosas consideran la perforabilidad y resistencia a la compresión simple, para entregar un óptimo equilibrio entre resistencia al desgaste y tenacidad de los insertos.

b. Utilizando una simulación computacional que muestra el quiebre de la roca al fondo del taladro, los ingenieros están capacitados para diseñar el mejor espacio para los insertos asegurando una carga balanceada en cada inserto.

c. Doble fila de insertos en el calibre para mantener una mejor protección del diámetro exterior del tricono dentro del pozo. (López, 1987).

B. Cojinetes de rodillos.

Basado en el cálculo de la distribución de la carga sobre los componentes de los cojinetes, todos los cojinetes de los triconos tienen una óptima geometría y distribución de carga diseñada para maximizar la vida útil de los cojinetes.

a) Cojinetes abiertos

Tipos de cojinetes: Rodillo- Bola – Rodillo – Botón de empuje sin sello.

b) Cojinetes sellados

Tipos de cojinetes: Sello – Rodillo- Bola – Rodillo-Botón de empuje. (López, 1987).

C. Vida útil del faldón y talón.

a) Diseño convencional del talón/faldón

Esta característica del diseño con el corte diagonal del talón aumenta el área de escape y la velocidad de barrido y disminuye la remolienda de las rocas quebradas y el desgaste sobre el faldón y el labio del faldón.

b) Diseño particular del talón/faldón

Esta característica del diseño con el corte diagonal del talón aumenta el área de escape y la velocidad de barrido y disminuye la remolienda de las rocas quebradas y el desgaste sobre el faldón y el labio del faldón.

También se adiciona una mayor cantidad de soldadura de protección en la camisa sector paralelo a la columna de faldón y labio inferior del faldón. (López, 1987).

2.3.1.10 Código IADC

La asociación internacional de contratistas de perforación (IADC por sus siglas en inglés) ha desarrollado un estándar para la clasificación de brocas, que se basa en tres dígitos.

1er Dígito		2do Dígito		3er Dígito									
				Sistema de rodamiento (Balero)									
Sistema de corte		Dureza		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dientes de acero	1	Dientes de acero para formación blanda	1	Suave	T O B E R A S P A R A L O D O Y B A L E R O S	T O B E R A S	P R O T E C C I O N	B A L E R O	B A L E R O	C H U M A C E R A	C H U M A C E R A	P A R A	O T R O S
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	2	Dientes de acero para formación media	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	3	Dientes de acero para formación dura	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
Dientes de insertos	4	Dientes de inserto para formación muy blanda	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	5	Dientes de inserto para formación blanda	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	6	Dientes de inserto para formación media	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	7	Dientes de inserto para formación dura	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	8	Dientes de inserto para formación extra dura	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									

Figura 8. Código IADC para clasificación de brocas tricónicas.

Recuperado de <http://ingenieriaenpetroleo.blogspot.com/2014/09/codigo-iadc-para-barrenas-de-cortadores.html>

Ejemplo: Tipo de broca 642

1er dígito. - Sistema de corte: 6 - Dientes de insertos de carburo de tungsteno para roca media.

2do dígito. - Dureza del inserto: 4 - Inserto duro.

3er dígito. - Sistema de rodamiento: 2 – Cojinete de rodillo estándar refrigerado por aire

2.3.1.11 Evaluación del desgaste de triconos

Un trabajo importante en la utilización efectiva de los triconos lo constituye el análisis de las brocas gastadas ya que las identificaciones de las posibles causas ayudan a corregir los errores de operación y mejorar la selección del tipo de tricono. Los fallos de las brocas se producen generalmente debido a tres causas:

- Fallos de la estructura de corte.
- Fallos de los cojinetes.
- Fallos del faldón.

a. Fallos de la estructura de corte.

Causas posibles.

- Aire insuficiente para limpiar el centro del barreno.
- Elección inadecuada del tricono.
- Excesiva velocidad de rotación.

b. Fallos de los cojinetes.

Causas posibles:

- Velocidad de rotación excesiva.
- Tipo de tricono inadecuado.
- Aire insuficiente para refrigerar los cojinetes.
- Bloqueo del paso de aire.
- Empuje excesivo sobre el tricono.

c. Fallos del faldón.

Causas posibles.

- Aire insuficiente para la velocidad de penetración.
- Formaciones diaclasas y abrasivas.
- Pandeo de la barra. (López, 1987).

Formato de control de desgaste de brocas.

Se cuenta con un formato de control de desgaste de brocas. ANEXO 1. Este formato fue elaborado tomando en cuenta el código IADC para clasificación de brocas tricónicas desgastadas.

La metodología está compuesta de un código de 8 caracteres que describe el desgaste de las brocas tricónicas y la razón por los cuales se descartó. (ver la Figura 9)

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

La evaluación se hace en forma física, describiendo cada carácter y haciendo las observaciones necesarias como el ejemplo siguiente.

ESTRUCTURA CORTE				RODAMIENTO		OTROS	
I	G	D	L	B	L	O	ST
1	4	CI	AC	8	C1-C3	LT	S
I	Insertos Internos		1	1/8 Desgaste de la Estructura de Corte			
II	Insertos Externos		4	1/2 Desgaste de la Estructura de Corte			
III	Origen del Desgaste		CI	Interferencia de Conos			
IV	Condición de Rodamientos		8	Desgaste Total de los Rodamientos			
V	Ubicación Falla Rodamientos		C1-C3	Conos 1 & 3			
VI	Otro Desgaste		LT	Pérdida de Insertos			
VII	Condición de Faldones		S	S - Desgaste leve del Faldon			
VII	Comentarios		Interferencia de conos causada por el desgaste de los rodamientos y pérdida de insertos del calibre				

Figura 9. Ejemplo de evaluación del desgaste de brocas.

Fuente: Formato de control de desgaste de brocas Atlas Copco

DESCRIPCIÓN DEL DESGASTE							
ESTRUCTURA DE CORTE				RODAMIENTO		OTROS	
I	G	D	L	B	L	O	ST
FILA INTERNA	CALIBRE	CARACTER. DESGASTE	UBICACIÓN	DESGASTE RODAMIEN	UBICACIÓN	CARACTER. DESGASTE	DESGASTE FALDON

Figura 10. Código de 8 caracteres que describe el desgaste de brocas tricónicas.

Fuente: Formato de control de desgaste de brocas Atlas Copco

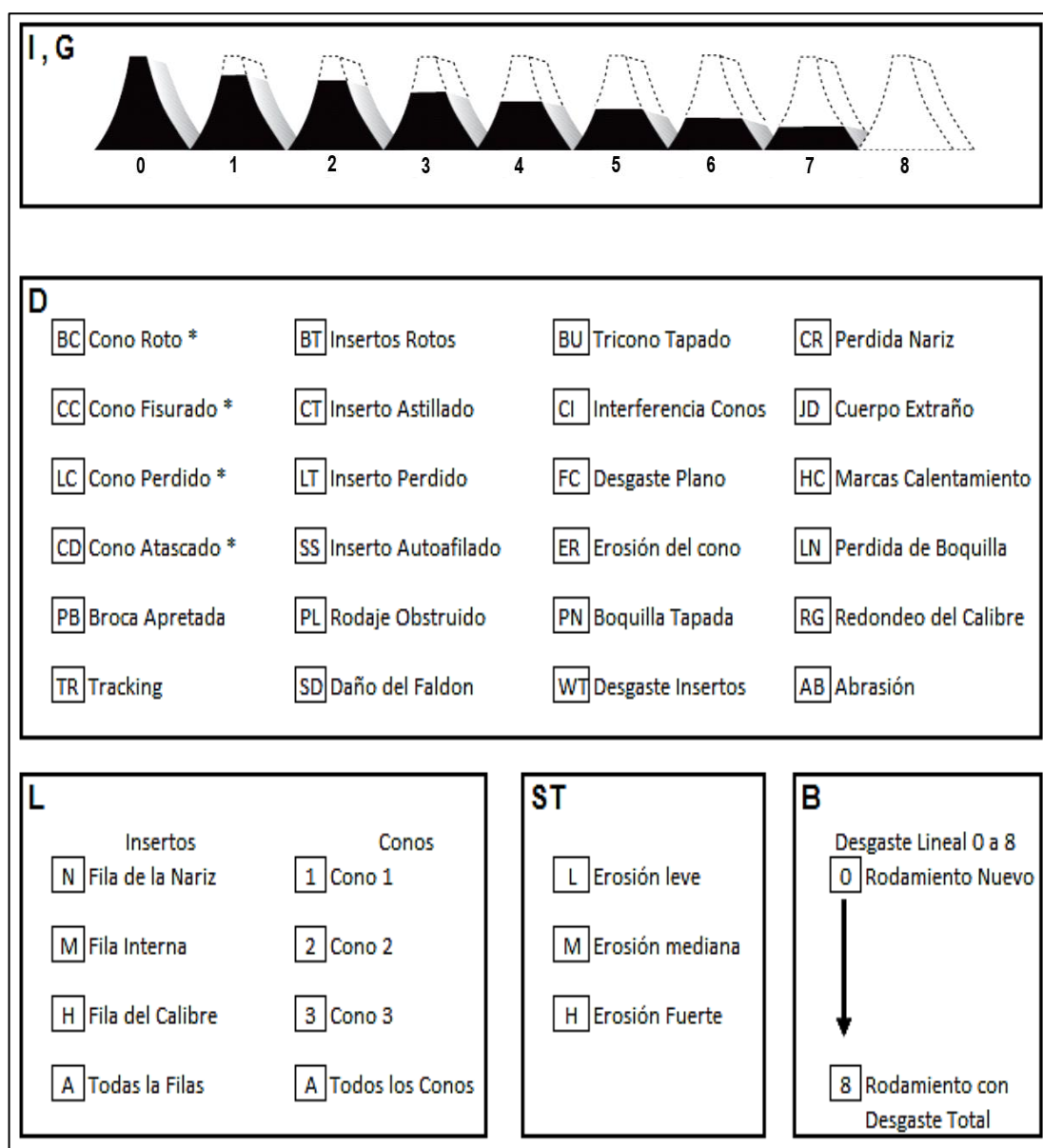


Figura 11. Estándar de control de desgaste de brocas según la IADC.

Fuente: Formato de control de desgaste de brocas Atlas Copco.

2.3.1.12 Parámetros de perforación rotativa

Son los que determinan el criterio para la selección de brocas tricónicas, que dependen de variables como equipo de perforación, tipo de roca, diámetro de los taladros, longitud de taladros. Así también los parámetros aplicados en forma óptima incrementan la vida útil de los aceros de perforación. En los siguientes ítems se calculará los parámetros que se aplicará a la broca tricónica de diámetro 6 ¾” para roca de dureza media.

a. Empuje sobre la broca.

Es la fuerza aplicada a la columna de perforación, depende de la resistencia al corte de la roca, diámetro y tipo de la broca tricónica. Influye directamente en la velocidad de perforación.

El empuje aplicado sobre la broca debe ser suficiente para sobrepasar la resistencia compresión de la roca, pero no debe ser excesivo para evitar fallos prematuros del trígono.

La capacidad de empuje de la máquina se recomienda que sea un 30% mayor que el empuje máximo de trabajo.

Tabla 2. Empuje límite según el diámetro de la broca

Diámetro de broca (pulg)	Empuje límite (lb)
5 1/8	21000
6 ¼	31000
6 ¾	37000
7 7/8	50000
9	57000
9 7/8	79000
12 ¼	121000

Fuente: (López, 1987, p.59)

La Tabla 2 explica la presión ejercida por el equipo hacia la broca, se realiza el cálculo detallado en el ANEXO 5.

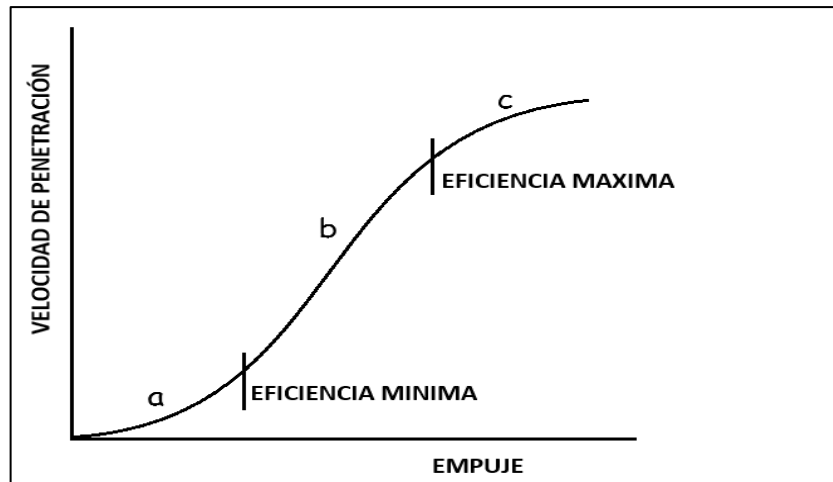


Figura 12. Influencia del empuje en la velocidad de penetración.
(López, 1987, p.58)

Se detalla el cálculo de empuje aplicado a la broca de diámetro 6 3/4" en el ANEXO 5.

b. Velocidad de rotación.

La velocidad de rotación, es la fuerza ejercida a la columna de perforación, influye en el corte de la roca. Cuando no hay un buen caudal de aire, genera remolienda de detritos.

La velocidad de rotación varía desde 60 a 120 RPM para los insertos de carburo de tungsteno, el mismo que depende del tipo de roca. En el caso del Tajo Norte se tiene tipo de roca blanda y media con un rango de 60 – 130 RPM.

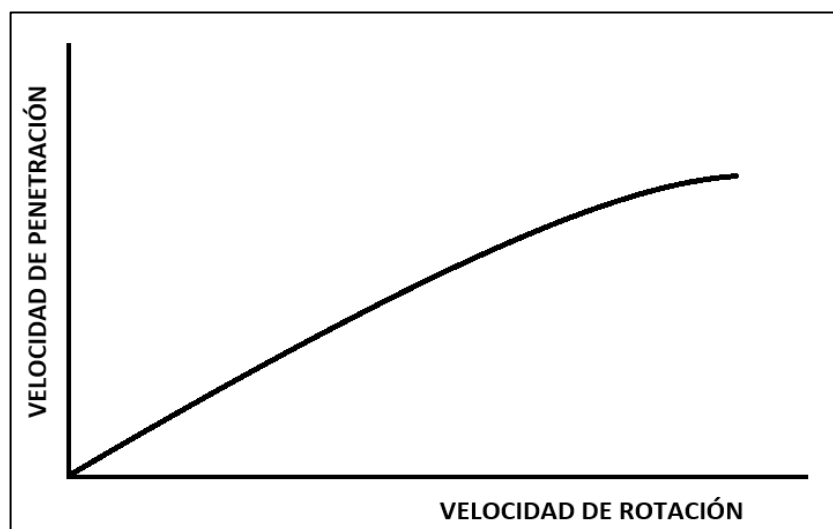


Figura 13. Influencia de la velocidad de rotación en la velocidad de penetración.
Fuente. (López, 1987, p.58)

Tabla 3. Velocidad de rotación recomendable según tipo de roca

Tipo de roca	Velocidad de rotación (r.p.m.)
Blanda	75 – 160
Media	60 – 80
Dura	35 - 70

Fuente. (López, 1987, p. 58)

c. Caudal de aire.

Cuando es necesario comprar una nueva máquina perforadora necesitamos calcular que capacidad del compresor necesitamos para nuestra faena, recordemos que los compresores pierden eficiencia sobrepasando cada vez más el nivel del mar, además las temperaturas y el estado mecánico los afectan.

Cuando la perforación se efectúa con menos aire que el necesario para limpiar con efectividad el barreno, 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 mayor par necesario para hacer girar el tricono.

d. La velocidad de barrido.

Este término se utiliza para referirse a la velocidad con la que el material perforado (detritus) es evacuado del pozo mediante el aire inyectado al pozo. Los rangos normales de velocidad de barrido para la perforación rotativa son entre 5000 y 7000 pies por minuto, al incrementar la velocidad hace que el detritus desgaste prematuramente los aceros de perforación y el usar una velocidad menor provoca remolienda en el tricono por que el aire no es capaz de evacuar el 100% del detritus, quedando partículas remanentes y produciendo desgaste y en algunos casos

atrapamiento de las barras. Los dos factores que influyen directamente en la velocidad de barrido es la capacidad del compresor y del espacio anular.

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

Debemos siempre considerar que a medida que nuestras barras de perforación se desgastan el espacio anular aumenta y nuestra velocidad de barrido es disminuida, por lo tanto, es adecuado calcular las velocidades de barrido en condiciones con barras con diámetro original y diámetro máximo de desgaste permitido de las barras de perforación. (Rojas, 2009).

CALCULO DE VELOCIDAD DE BARRIDO

Pérdida por altura: Por cada 1000 pies se debe restar 3.4% al valor nominal del compresor. (Atlas, 2012).

Pérdida por temperatura: en temperaturas de 15.6° C, cada aumento de 5,5° C se debe restar 2% al valor nominal del compresor. (Atlas, 2012).

Pérdida por estado mecánico: también debemos considerar el estado mecánico del compresor. (Atlas, 2012).

$$Vb = \frac{CFM \times 183.4}{\varnothing^2 BROCA - \varnothing^2 BARRA}$$

Tabla 4. Calculo de barrido

Item	Valores
Ø BROCA	6 3/4 pulg
Ø BARRA	5 1/2 pulg
CFM nominal	1600
Factor de corrección para 4267 msnm 4°C	0.56
Factor de corrección por condición mecánica	0.8
CFM corregido	716.8
Vb	8677 pies/minuto

Fuente. Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra que se cumple con la necesidad de la velocidad de barrido de 5000 a 7000 pies/minuto y una presión de cabina de 110 PSI.

e. La remolienda.

La remolienda es un efecto que se produce cuando el detritus no es evacuado eficientemente del taladro y se deposita en el fondo del pozo produciendo desgastes prematuros en los aceros de perforación especialmente en la broca. Cuando se produce la remolienda el detritus sale del taladro como una especie de polvillo y es porque se produce una especie de molino en el fondo del taladro.

f. Espacio anular.

Es la diferencia de espacio entre la pared del taladro y la barra, es decir la diferencia entre el trícono y las barras, Ejemplo si tenemos un trícono de 6 3/4" y barras de 5 1/2" nuestro espacio anular es de 1 1/4".

2.3.1.13 Velocidad de perforación

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:

1.- 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 trícono deseado, empuje y velocidad de rotación aconsejados, velocidad de penetración y duración estimada del trícono.

2.- Cálculo de la velocidad de penetración a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca. (López, 1987, p.61)

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

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

Donde:

VP = Velocidad de Penetración (m/h)

R_T = Recorrido del tricono (m)

H_E = Horas efectivas perforadas (h)

La velocidad de perforación es un indicador clave para realizar el control de las operaciones en el ANEXO 8 se hace el cálculo de la velocidad de perforación.

2.3.1.14 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:

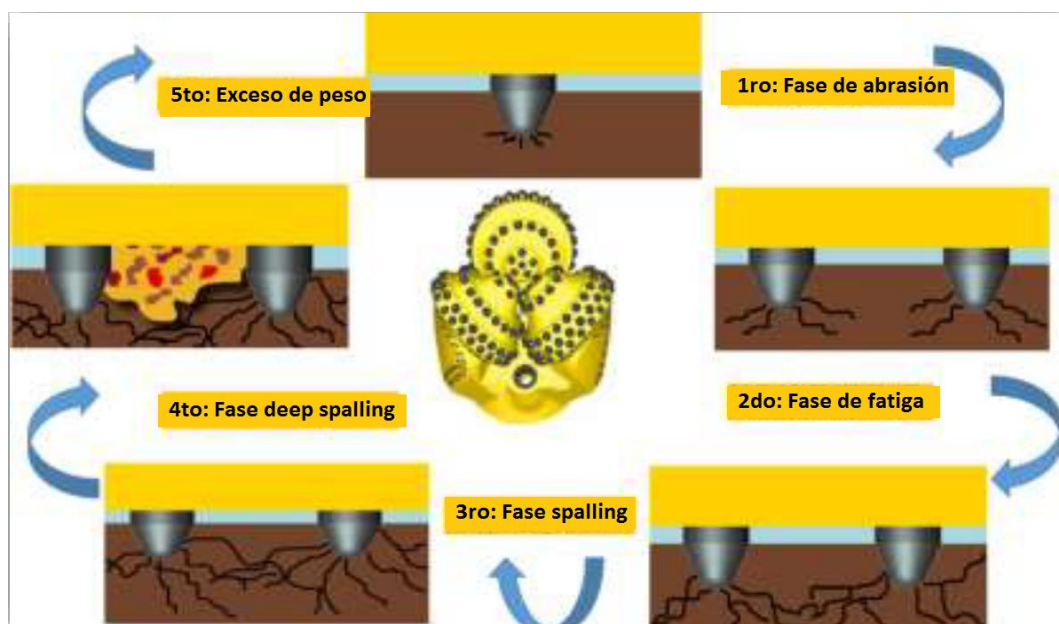


Figura 14. Pasos de rotura de la roca.

Fuente: Atlas Copco, 2012.

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 15. Mecanismo de rotura de roca: Exceso de peso
Fuente: Atlas Copco, 2012.

2.3.1.15 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, p.18):

PDC (Partial Drilling Cost = Costo Parcial de Perforación).

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:

$$PDC = \frac{\text{PRECIO DE LA BROCA}}{\text{DISTANCIA PERFORADA (PIES O METROS)}}$$

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

$$TDC = \frac{COSTO DE LA BROCA}{METROS PERFORADOS} + \frac{COSTO DE LA PERFORADORA POR HORA}{METROS PERFORADOS POR HORA}$$

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.

Nguyen Jean Paul, 1996 dio la fórmula para la determinación del costo total de perforación.

El costo total de perforación es una función de los metros perforados y de la velocidad de penetración obtenida en la perforación, es decir la velocidad de perforación y los metros perforados 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 (Pull down)
- Revoluciones por minuto de la broca tricónica (RPM)
- Análisis de desgaste de la broca tricónica
- Estudios de profundidad de corte

Para el caso del TDC de nuestro estudio se aplicó lo siguiente:

$$TDC = \frac{COSTO DE LA BROCA}{METROS PERFORADOS} + \frac{COSTO DE LA PERFORADORA POR HORA}{METROS PERFORADOS POR HORA} + \frac{COSTO DE LA BARRA}{METROS PERFORADOS}$$

En el costo de equipo se consideró el costo de personal y paradas de equipo.

2.3.2 Antecedentes de estudio del problema y experiencias similares

En todo proceso de perforación con brocas tricónicas, es importante tener una observación minuciosa del rendimiento de los aceros, esto influye directamente en el costo total de perforación. En este caso el costo de las brocas tricónicas es del 15% al 23% del Costo Total de Perforación, sin embargo, el rendimiento de brocas está influido por los parámetros de perforación aplicados en cada operación. Algunos de estos parámetros son controlables, es decir, identificándolos adecuadamente podemos optimizarlos en cada operación, de esta forma incrementar el rendimiento de las brocas tricónicas. A continuación, hacemos mención de algunas experiencias y conclusiones que llegaron algunos autores, respecto al rendimiento de brocas tricónicas en distintas minas y condiciones similares.

Sánchez (2017) en su investigación sobre el Reducción de desgaste en el uso de brocas tricónicas en la Mina Toquepala. Afirma:

Mediante el control y evaluación de los factores de: presión de aire necesario para el barrido, presión de empuje, velocidad angular, velocidad de penetración y la granulometría que influyen en el desgaste de las brocas tricónicas, se concluye que en la perforación anterior cada broca tiene una vida útil promedio de 1 603.65 metros perforados y en la perforación actual se logra una vida útil promedio de 1 711.32 metros perforados por cada broca utilizada, teniendo una diferencia de

107.68 metros perforados por cada broca, obteniendo un ahorro total de 753.76 metros perforados por las 07 brocas utilizadas, en comparación con la perforación anterior. (p.8)

En este mismo estudio llega a la conclusión siguiente:

Realizando el control de los factores que influyen en el desgaste de las brocas tricónicas se concluye que en la perforación actual los más apropiados son: Presión de aire del barrido un promedio de 50.170 lb/pulg², presión de empuje de 64 801.42 lb/pulg., velocidad angular de 74.58 RPM, velocidad de penetración un promedio de 36.28 m/h.”(Sánchez, 2017, p.8)

En este estudio el investigador nos indica que teniendo control sobre los factores de perforación: presión de aire necesario para el barrido, presión de empuje, velocidad angular, velocidad de penetración y la granulometría, se puede conseguir mayor duración de broca tricónica.

Existe un estudio sobre rendimientos de brocas tricónicas de diámetro 12 7/8” en la Unidad Minera Tintaya, perteneciente a Xtrata - Glencore, donde el investigador llega a la a los resultados: “Broca marca PDB: 4091 m (1°), Broca marca Sandvick: 3732 m (2°), Broca marca Atlas Copco: 3624 m (3°), Broca marca Varel: 2444 m (4°)” (Umasi, 2013, p.5). Así mismo el investigador hace evaluación del TDC de cada uno de las brocas evaluadas llegando a la conclusión siguiente: “Los resultados del costo total de perforación según las cuatro marcas de brocas de 12 ¼” de diámetro de mayor a menor fueron: Broca marca Varel US\$ 6,9 /m., Broca marca Sandvik US\$ 5,9/m., Broca marca Atlas Copco US\$ 5,8 /m., Broca marca PDB US\$ 4,03 /m.” (Umasi, 2013, p.140). En este estudio analizamos que la broca de la marca PDB de 12 ¼ tiene mejor desempeño con 4091 m. de recorrido y un Costo Total de Perforación de US\$ 4.03 /m.

Al respecto del costo de perforación en una mina a tajo abierto, Llaique y Sanchez (2015) en su investigación llegan 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 48000 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. (p. 118)

Los autores en su investigación hacen hincapié en que la velocidad de perforación (ROP) y el Costo Total de Perforación (TDC), son magnitudes inversamente proporcionales. Es decir, a

mayor ROP menor será el TDC. La broca elegida por un buen desempeño corresponde a la marca PBD Tools de diámetro 10 5/8”.

2.3.3 Aspectos generales de la mina Colquijirca

2.3.3.1 Descripción de la mina

Colquijirca, etimológicamente proviene del vocablo quechua; colque: plata y jirca: cerro, que en español significa “cerro de plata”.

2.3.3.1.1 Ubicación general

Distrito : Tinyahuarco – Colquijirca.

Provincia : Cerro de Pasco.

Departamento : Cerro de Pasco.

2.3.3.1.2 Clima, flora y fauna

Clima. - El área de estudio es típico de las regiones andinas, con una temperatura mínima de -3°C y 14 °C, con una precipitación promedio mensual de 115 mm y 182 mm, pudiendo llegar a 348 mm. La precipitación promedio anual es de 1037 mm. La humedad relativa es de 92.8 % y 42.4%. la velocidad de los vientos fluctúa entre 0.9 km y 10 km, mientras que el promedio es de 4.8 km/h, predomina en dirección Nor-oeste. La mina está ubicada a 4300 m.s.n.m.

Flora.- El área de la mina se encuentra en la zona de vida denominada páramo muy húmedo Subalpino Tropical (pmh-SaT). En la zona predominan 7 formaciones vegetales y ecosistemas, los cuales son: Pedregal, bofedal, césped de puna, pajonal, aguas lénticas, aguas lóxicas, roquedal. De ellas las formaciones predominantes son:

césped de puna, bofedal y pedregal. De acuerdo al EIA de los proyectos de construcción de los depósitos de relaves 6 y 7, se registraron 58 especies de plantas comprendidas en 23 familias y 44 géneros. La familia Asteráceas es la más representativa, seguida por las familias Poaceae y Fabaceae. Las especies predominantes son: Calamagrostis heterophylla, Baccharis cespitosa e Hippochaeris remophylla.

Fauna.- Se registraron un total de 44 especies de aves, siendo los más numerosos los passeriformes con 24 especies. El tajo abandonado de San Gregario constituye un hábitat para algunas aves. El fondo inundado del tajo es utilizado como sitio de descanso y anidamiento por algunas aves. Las especies de Anas flavirostris, Sicalis uropygialis y Vanellus resplendens presentan una marcada dominancia con respecto a las demás aves del lugar. Detectaron algunos peces del género Orestias en la zona de bofedales, en el río San Juan no hubo evidencia de fauna ictiológica. Entre las especies de anfibios encontrados el género Bufo (sapo común) es el que más destaca en la zona de bofedales. (Manzaneda, 2015, p.27)

2.3.3.1.3 Accesibilidad

La mina Colquijirca se encuentra a 288 km de la ciudad de Lima siguiendo el trayecto de la carretera central. Así mismo está a 10 km al oeste de la ciudad de Cerro de Pasco, tal como se muestra en la Figura 16.

Tabla 5. Accesibilidad a la mina Colquijirca

Ruta	Tramo	Carretera	Distancia km	Tiempo horas
1	Lima – La Oroya - Colquijirca	Asfaltada	288	7
2	Cerro de Pasco - Colquijirca	Asfaltada	10	0.25

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Ubicación y accesibilidad de Colquijirca

2.3.3.1.4 Propiedad

La unidad minera Colquijirca pertenece a la Sociedad Minera el Brocal que actualmente es una subsidiaria de Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. quien posee el 61% de las acciones a partir del 2018.

La mina de Colquijirca tiene 2 operaciones contiguas, Marcapunta que es una operación subterránea donde se produce cobre y Tajo Norte una operación a tajo abierto con producción de mineral polimetálico de plata, plomo y zinc. El tratamiento de mineral en la planta de beneficio de Huaracaca fue de 18970.00 TMS /día durante el año 2018. (Memoria Anual SMEB, 2018)

2.3.3.2 Geología

En las inmediaciones de la mina Colquijirca afloran rocas de los períodos Devónico hasta el Terciario. El grupo Excelsior del Devónico está expuesto en un valle anticlinal entre los cerros Condorcayán y Vista Alegre. Esta formación está compuesta por pizarras, filitas y cuarcitas que muestran un rumbo NW y un buzamiento casi vertical.

La formación Excelsior es seguida, luego de una marcada discordancia angular, por la formación Mítu del Permiano, representada en el área de Colquijirca por areniscas y lutitas rojas y conglomerados con alto contenido de fragmentos de cuarzo lechoso.

El Grupo Mítu, al oeste del Cerro Colquijirca se encuentra infrayaciendo al Grupo Pucará. Existe una leve discordancia angular entre los sedimentos molásicos del Mítu y los carbonatos del Grupo Pucará. Inmediatamente al oeste del tajo, las areniscas del Grupo Mítu, están cubiertas por el conglomerado Shuco, compuesto por pequeños fragmentos redondeados de calizas negras del grupo Pucará.

En el área del tajo aflora la formación Calera del período Terciario (Eoceno), conformada por dolomías varvadas y calizas lacustrinas en la parte superior y media; y areniscas, lutitas y tobas rojas en la parte inferior. La mineralización de los tajos se encuentra emplazada en las calizas de la parte superior y media de la formación Calera.

La formación Calera es intruida hacia el sur con el complejo volcánico Marcapunta; el cual incluye domos dacíticos, brechas y piroclastos. Su edad ha sido determinada en 11.5 más menos 0.4 millones de años y está caracterizada por presentar una fuerte alteración hidrotermal que ha afectado también las partes adyacentes de la Formación Caldera.

El área de Huachuacaja, es un valle de origen glacial y se caracteriza por su fondo amplio, suave inclinación y flancos asimétricos. Está modelado en rocas sedimentarias y volcánicas, que fueron posteriormente tapizadas por depósitos glaciales y lacustres.

Las unidades lito estratigráficas presentes son lutitas y conglomerados del Grupo Mitu, dolomías del Grupo Pucará, domos dacíticos y depósitos cuaternarios de origen glacial y lacustre. (Huambachano, 2018, p. 28).

2.3.3.3 Yacimiento

Los depósitos minerales del distrito de Colquijirca pertenecen a la familia de yacimientos relacionados a pórfidos de cobre conocida como depósitos Cordilleranos. Este tipo de depósitos, los cuales se forman en general en las partes altas de un pórfido de cobre, se caracterizan fundamentalmente por un prominente zonamiento con partes internas dominadas por cobre y zonas externas donde el zinc, el plomo y la plata son los principales elementos económicamente interesantes. En el caso particular del distrito de Colquijirca, más precisamente entre los sectores de Marcapunta Norte y Colquijirca, dicho zonamiento consta a manera general de tres zonas, las cuales

mineralógicamente consisten fundamentalmente de enargita en las partes internas, calcopirita en partes intermedias y esfalerita y galena en las partes externas.

El depósito de Colquijirca (parte sur del Tajo Norte) expone estas tres zonas. La parte más profunda del sector suroeste del Tajo Norte (antes Tajo Principal) muestra un núcleo de forma tubular esencialmente constituido por enargita además de cantidades variables de pirita y cuarzo. Este núcleo presenta una envolvente básicamente compuesta por calcopirita y cantidades variables de tenantita además de esfalerita y galena. A su vez esta envolvente está rodeada por una zona relativamente extensa, compuesta esencialmente por esfalerita y galena. Es esta última zona, la cual está desarrollada en su mayor extensión hacia el norte del distrito, la que constituye el grueso del depósito de Colquijirca (Tajo Norte) actualmente en explotación.

La mina Tajo Norte, es una operación a tajo abierto que explota minerales de contenido polimetálico, conformado principalmente por sulfuros de plata, plomo, zinc y cobre; constituido principalmente por galena, esfalerita y en menor proporción por galena argentífera, y enargita; y la ganga está constituida por pirita, baritina, hematina y siderita. La mineralización se presenta en capas paralelas a la estratificación, alternando con horizontes de calizas, margas y tufos que forman un sinclinal (Flanco Principal) y un anticlinal (Flanco Mercedes Chocayoc). (Huambachano, 2018, p. 31)

2.3.3.4 Mineralización

La mineralización de Colquijirca (Tajo Norte) se emplaza dentro de los sedimentos plegados de la Formación Calera del Terciario inferior y presenta una geometría mantiforme, “concordante” a la estratificación, emplazándose preferentemente en calizas lacustrinas de la parte superior del Miembro Medio y parte inferior del Miembro Superior. La caja techo está constituida por dolomías varvadas de Calera Superior, en tanto la caja piso lo constituyen margas del Calera Medio. En la mineralización, se puede distinguir el siguiente zoneamiento:

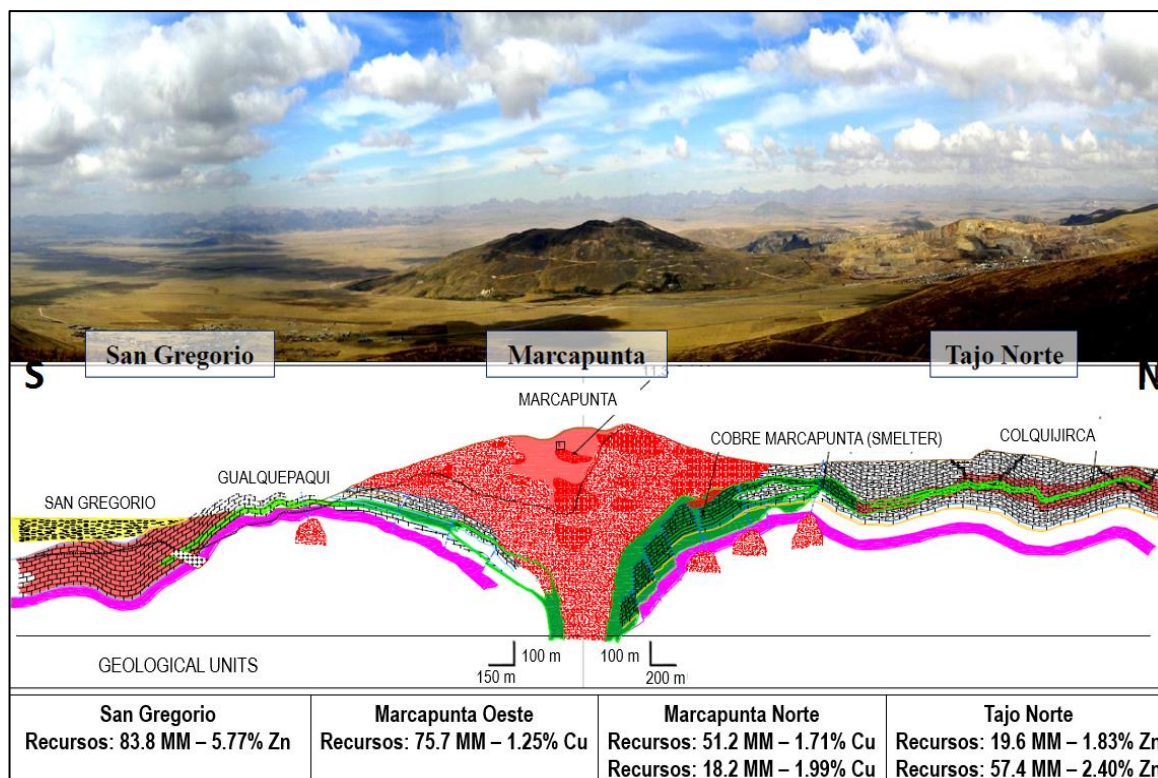


Figura 17. Sección longitudinal SN del distrito minero de Colquijirca.

Fuente: Área de Geología de Sociedad Minera El Brocal.

a) **Tipo I:** (Núcleo de Cobre: Cu + Au + Ag ± Bi): Esta mineralización está emplazada casi siempre en horizontes completamente silicificados (chert negro) y expresan el núcleo del vector mineralizador, puede dividirse en:

b) **Tipo I A:** Es la parte más interna de este núcleo y consiste esencialmente de enargita – pirita; las cuales ocurren a manera de relleno de fracturas, relleno de cavidades y como matriz en las partes de brechas de chert, menos comunes son las disseminaciones.

c) **Tipo I B:** Es la parte más externa del núcleo de cobre constituido principalmente por calcopirita y pirita. Estos ocurren a manera de venillas y como reemplazamientos masivos. Este tipo de mineralización alberga importantes valores de plata y bismuto en cantidades regulares.

d) **Tipo II:** (Zona de Transición: Cu + Ag + Bi + Zn + Pb): Es la Zona intermedia, constituyéndose así en una zona compleja debido a la variedad de especies mineralógicas y a los intercrecimientos que estos presentan. La mena está constituida por calcopirita, esfalerita y galena,

acompañados de caolín, dickita, baritina y en menor proporción pirita y hematita. La ocurrencia de estos minerales se da como relleno de fracturas u oquedades y como reemplazamientos masivos.

e) **Tipo III:** (Zona de Metales Base: Zn + Pb ± Ag): Es el halo más externo de mineralización y por su volumen, el de mayor importancia económica. Se encuentra emplazada en rocas dolomíticas y en menor proporción en niveles de chert negro. Su mineralogía está constituida por esfalerita y galena como minerales de mena, los cuales ocurren como relleno de fracturas, cavidades, diseminaciones y reemplazamientos masivos, constituyendo zonas de “roca sulfurosa”. La ganga está representada por pirita, especularita, magnetita, caolín, baritina, siderita, ankerita - dolomita y fluorita menos común; todos ellos ocurren como relleno de fracturas y cavidades. (Huambachano, 2018, p. 33)

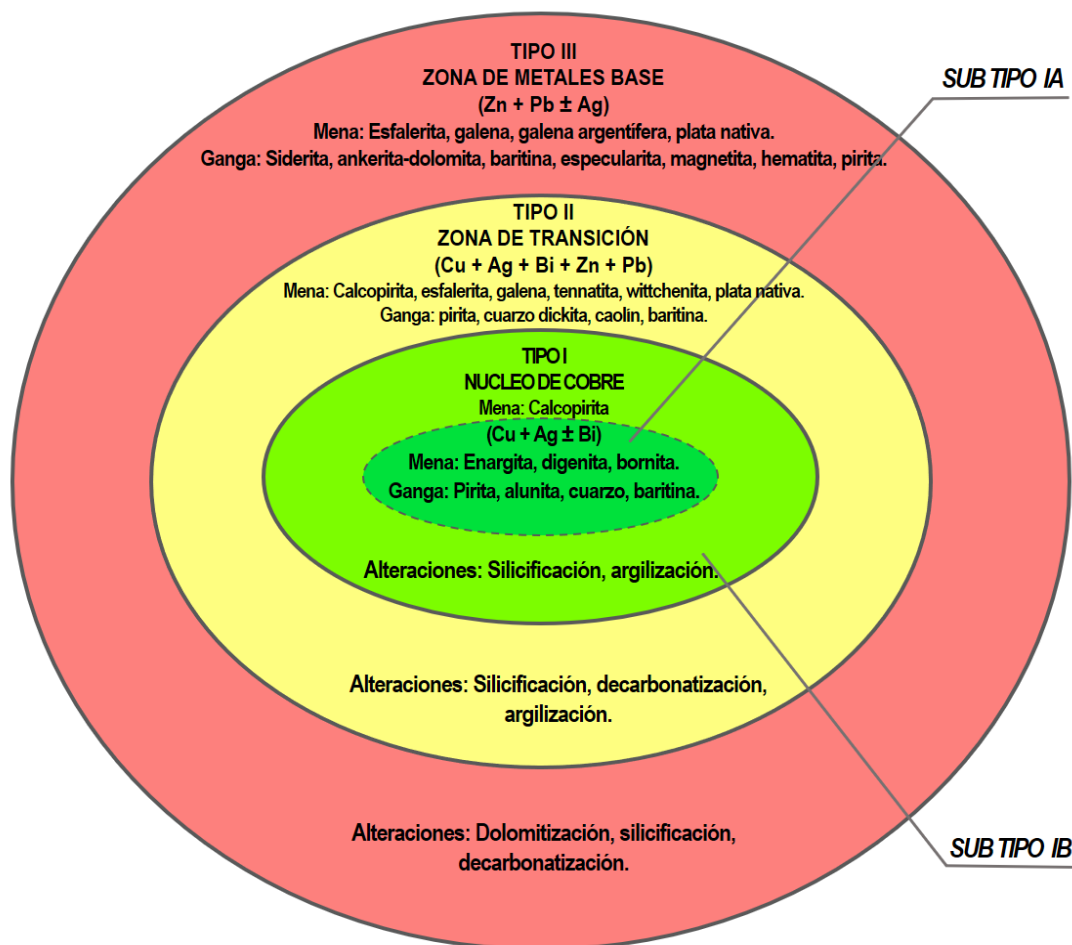


Figura 18. Diagrama idealizado de mineralización del Tajo Norte
Fuente: Área de Geología de Sociedad Minera El Brocal

Tabla 6. Parámetros geotécnicos para el diseño del Tajo Norte

Nº Sector	Sector	AIR (°)	ATB (°)	AGT (°)
1	N(9)	38	65	35.4
2	NE(8)	42	60	39.7
3	E(7)	41	55	39
4	SE(6)	43	60	37.1
5	S(5)	31	60	29.3
6	SE(7)	37	60	34.6
7	SW(5)	25	40	22.9
8	W(4)	25	40	25
9	W(3)	27	40	27
10	NW(2)	27	55	27
11	N(1)	35	55	35
12	NW(1)	30	50	28.4
13	W(2)	28	55	26.5
14	W(3)	35	55	32.8
15	SW(4)	39	55	36.4
16	SW(2)	28	45	26.5
17	SE(8)	35	55	32.8
18	S(6)	31	55	29.3
25	E(8)	35	55	32.8
26	SW(1)	30	50	28.4
27	NE(8)	42	60	39.1
Zona de Expansión				
19	I - A	37	53	35.3
19	I - B	27	53	26
20	VI	30	53	30
21	II	32	53	30.7
22	VI	28	53	28
23	III	32	53	32
24	IV	42	53	42

Fuente: Área de Geología de Sociedad Minera El Brocal

NOTA: Son los distintos parámetros de inclinación que tendrán los taludes divididos por sectores como se muestra en la Figura 19.

2.3.3.5 Parámetros técnicos del Tajo Norte

Los parámetros geotécnicos utilizados para la optimización y diseño del tajo fueron diferenciados en 27 sectores geotécnicos de acuerdo al estudio “Estabilidad de Taludes Tajo Norte – Smelter – Marcapunta” desarrollado por DCR Ingenieros SRL. Este estudio fue realizado en el año 2016, el cual tiene por objetivo evaluar el comportamiento o condiciones de estabilidad de la masa rocosa involucrada en el Tajo Norte – Smelter – Marcapunta, con el fin de definir en primera aproximación los ángulos de sus taludes, previa determinación de los parámetros requeridos, apoyando así al planeamiento y diseño del minado. (Huambachano, 2018, p.35)

La altura de bancos considerada es de 6 m. Los taludes de los Sectores NW, W y SW del área del actual Tajo Norte y de los Sectores W y E del área La Llave, son propensos a sufrir deslizamientos a través de estratos débiles conformados principalmente por arcilitas, limoarcilitas y tobas, los cuales buzan a favor del talud. En la Figura 19 se mostrará los sectores geotécnicos, descritos en la tabla de parámetros geotécnicos, Tabla 6. (Huambachano, 2018, p.35)

Dado que la presencia del agua subterránea crea condiciones desfavorables para la estabilidad de los taludes, se implementó un sistema de drenajes para impedir la infiltración.

2.3.3.6 Monitoreo de vibraciones y deformación del macizo rocoso

Se ha observado, que hay una correlación directa entre el nivel de las vibraciones del terreno causadas por las voladuras y los desplazamientos de la masa rocosa de los taludes inestables. Para ello, la empresa GEOBLAST se encarga de tener una base de datos de diseño de malla, diseño de voladura y monitoreo de vibraciones.

El monitoreo de vibraciones tiene como base de no sobrepasar velocidades pico de Partículas de 25 mm/s, para ello se dosifica la carga explosiva según los datos históricos del monitoreo.

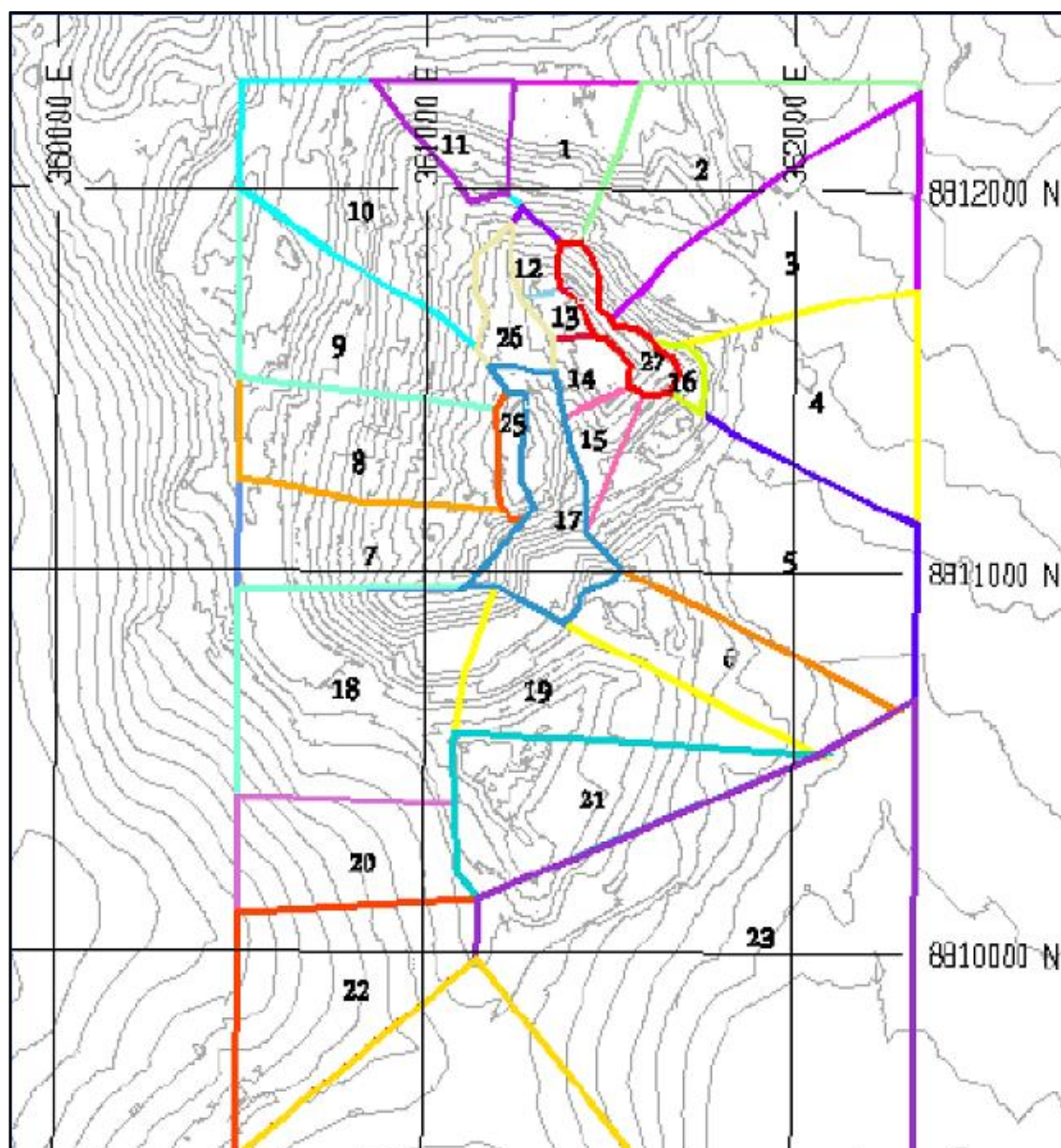


Figura 19. Sectores geotécnicos

Fuente: Área de Geología de Sociedad Minera El Brocal

El Tajo Norte cuenta con un radar geotécnico que escanea la pared norte en tiempo real, el cual brinda información sobre las deformaciones del macizo rocoso.

El área de geotecnia se encarga del control y seguimiento a la estabilidad de las paredes de talud y en el caso de la pared norte se tiene los siguientes rangos de alerta temprana ante posibles desplazamientos, como se muestra en la Figura 22. Los parámetros mostrados, nos indican que en alerta verde podemos realizar nuestras labores normalmente, sin embargo, en alerta amarilla y roja

debemos evacuar del área donde hay movimiento de pared. Estos controles de ingeniería ayudan a prevenir los accidentes por derrumbes y ayudan a controlar la deformación del macizo rocoso durante una voladura.



Figura 20. Radar geotécnico GP SSR 313.



Figura 21. Reporte diario del área de geotecnia sobre la pared norte.

Fuente: Área de Geotecnia El Brocal.

> 10.0 cm/día	ALERTA ROJA
10.0 - 5.0 cm/día	ALERTA AMARILLA
< 5.0 cm/día	ALERTA VERDE

Figura 22. Rangos de alerta en tiempo real del radar

Fuente: Área de Geotecnia de El Brocal.

2.3.3.7 Criterios de diseño general del Tajo Norte

Las rampas y vías de acarreo están diseñadas para camiones de 22 m³ de capacidad con una gradiente máxima de 10% y un ancho de vía de 12 m, con un radio de giro interno de 9 m. Aunque el ancho mínimo de rampa llega a los 10 m, SMEB decidió continuar con rampas de 12 m para estandarizar el ancho de las nuevas vías con las vías antiguas (25 m). El ancho operativo mínimo fue definido de acuerdo a las dimensiones de los equipos más grandes de la operación, es este caso el camión de 22 m³ en doble vía y la excavadora CAT 374 de 5 m³ de capacidad. En la siguiente Tabla 7 se muestra los criterios de diseño general para las vías y accesos. (Huambachano, 2018, p.36)

Tabla 7. Criterios de diseño general del tajo

Criterio	Unidad	Valor
Altura de Banco	m	6
Ancho de Minado Mínimo	m	25
Ancho de Rampa	m	25/12
Gradiente en Rampa (máx)	%	10
Radio interno de giro	m	9
Ángulo talud de banco (ATB)	°	Variable
Ángulo inter rampa (AIR)	°	Variable
Ángulo global de talud (AGT)	°	Variable

Fuente: Área de Ingeniería y Planeamiento de Sociedad Minera El Brocal

En la tabla 7 se muestran todos los criterios de diseño que se aplican en el Tajo Norte, la altura de banco se logra con una sobre perforación de 0.50 m y se tiene un estricto control de mantener las paredes según diseño de planeamiento. Para lograr una pared final a diseño se optó por perfilar la pared con una excavadora CAT 336 con martillo hidráulico.

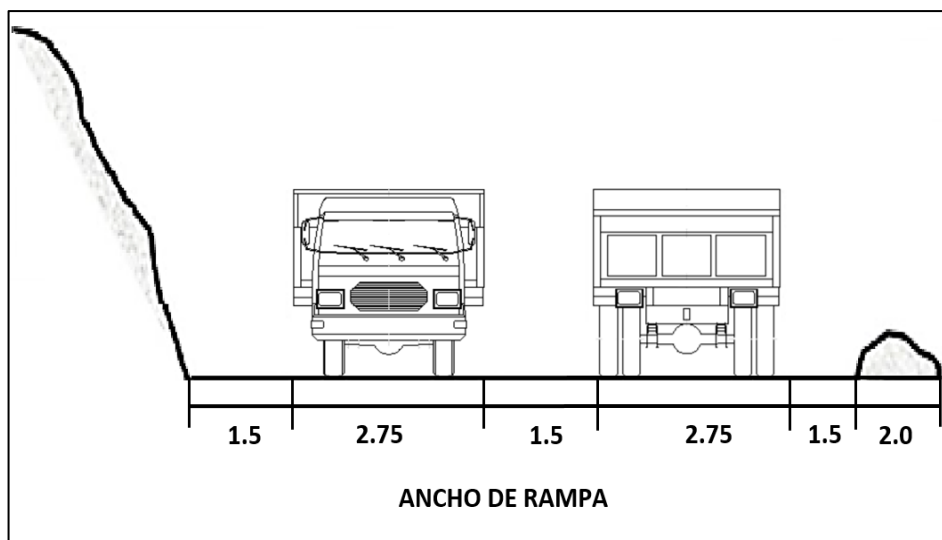


Figura 23. Sección típica – Ancho de rampa

Fuente: Área de Ingeniería y Planeamiento de Sociedad Minera El Brocal.

La Figura 23 nos muestra el ancho de rampa, en el cual se puede visualizar el tránsito de los volquetes en ambos sentidos, teniéndose un mínimo de 1.5 m de espacio entre carriles, además de tener una berma de 2 m de ancho y una altura de 1.5 m.

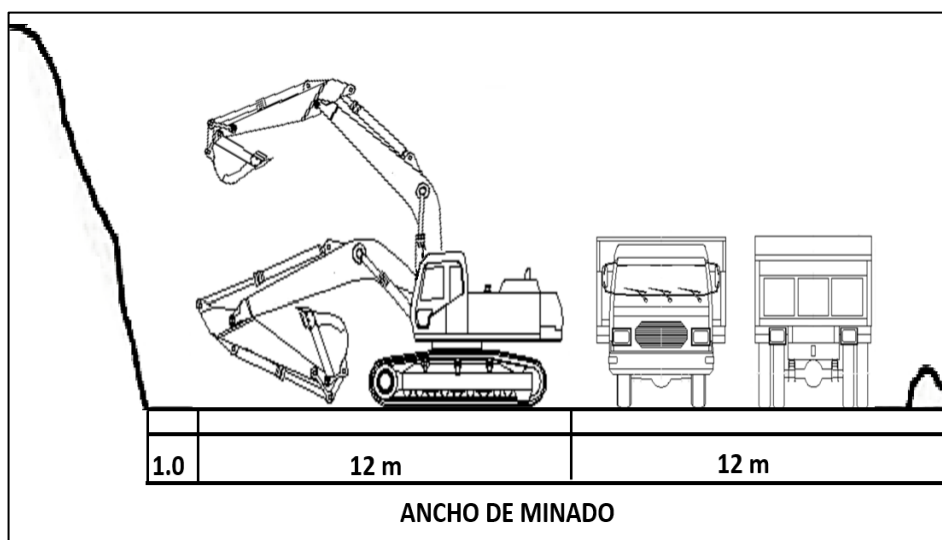


Figura 24. Ancho de minado óptimo

Fuente: Área de Ingeniería y Planeamiento de Sociedad Minera El Brocal

La Figura 24 nos muestra el ancho de minado de las excavadoras, en donde se puede visualizar el minado que realiza, dejando 1 m hacia el talud por factores de seguridad.

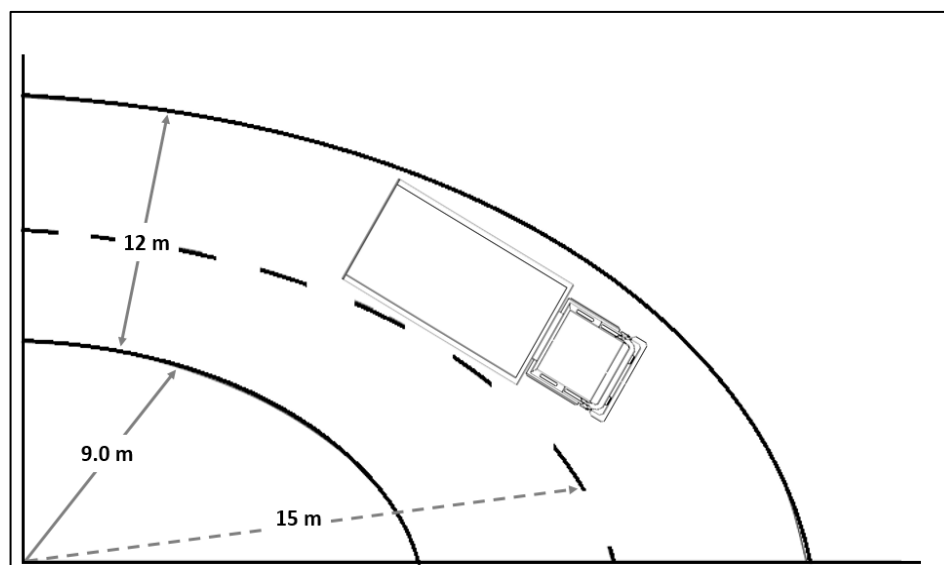


Figura 25. Radio de giro de volquetes.

Fuente: Área de Ingeniería y Planeamiento de Sociedad Minera El Brocal.

La Figura 25 nos muestra el radio de giro de los volquetes, los cuales tiene un radio de giro interno de 9 m y un radio de giro externo de 15 m, además del ancho de rampa que es de 12 m. Se tiene en consideración estos radios debido al tránsito de los volquetes en las subidas y bajadas dentro del tajo. (Huambachano, 2018, p.38)

2.3.3.8 Descripción del método de minado del Tajo Norte

La producción de la mina se realiza por el método de minado a tajo abierto, cuya producción en el año 2016 fue de 20'914,874 TMS de material desmonte y 2'625,098 TMS de mineral y un S/R de 7.97; en el año 2017 se ejecutó 21'626,892 TMS de desmonte y 3'403,154 TMS de mineral. En el año 2018 la producción fue 14'112,275 TMS de desmonte y 4'159,034 TMS de mineral.

El plan de minado 2018 tuvo varios cambios que se fueron dando en el transcurso del año por las siguientes razones:

- A inicio de año se realizó una reingeniería en el plan de minado del Budget aprovechando la oportunidad de mover la misma cantidad de mineral que en el plan inicial, moviendo menos desmonte.
- Deslizamientos en la pared norte, zona donde se presentan las principales fases de minado para 2018 y 2019.
- Restricciones en las áreas de minado por no contar con permisos y aprobaciones ambientales.

La continuidad de las operaciones de minado en la pared norte para el abastecimiento de mineral fue soportada por un plan de emergencia que fue presentado a la autoridad y que tuvo sus pilares en los siguientes puntos:

- Monitoreo constante en la pared norte con el radar.
- Perforaciones horizontales y verticales para despresurizar la pared norte y bajar el nivel freático.
- Estudio Geotécnico Pared Norte – Fase 9. (Memoria Anual, 2018, p.20)

Tabla 8. Resumen de producción del Tajo Norte

ITEM	UNIDAD	2018	2017	2016
Mineral	TMS	4159034	3403154	2625098
Zn	%	2.27	2.66	3.00
Pb	%	1.11	1.08	0.86
Ag	Oz/TM	1.08	1.4	0.96
RELACION DESMONTE/ MINERAL				
MATERIAL	UNIDAD	2018	2017	2016
Desmonte	TMS	14112275	21626892	20914874
Mineral	TMS	4159034	3403154	2625098
Ratio de desbroce		3.39	6.35	7.97

Fuente. Memoria anual SMEB 2018

En la Tabla 8, se visualiza claramente que la producción de mineral esta es ascenso permanente. Sin embargo, el minado de desmonte en el 2018 se redujo drásticamente, la causa fue el deslizamiento de la pared norte del tajo.

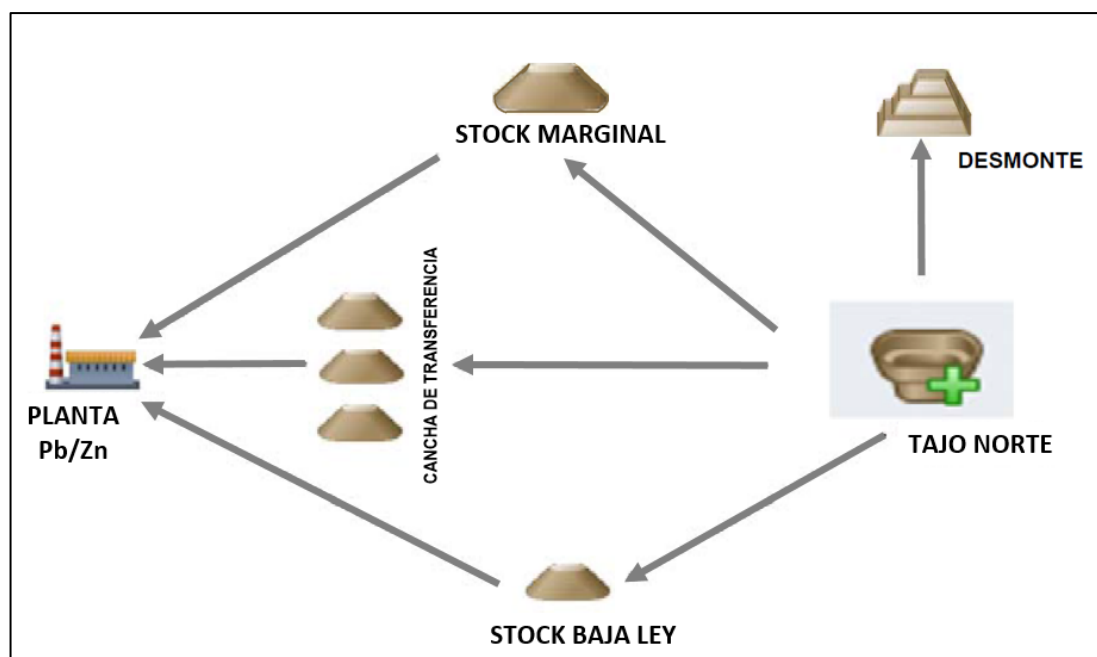


Figura 26. Movimiento de material mina.

Fuente: Área de Operaciones Mina Tajo de Sociedad Minera El Brocal.

En la Figura 26 se muestra la distribución que se realiza con el mineral y el desmonte. Se conforman las canchas de transferencia en las cuales se realiza el blending del mineral para poder tener una buena ley promedio. El mineral marginal se almacena como stock, y el desmonte se lleva al botadero Condorcayán para su descarga. (Huambachano, 2018, p.42)

2.3.3.9 Perforación

Este proceso se lleva a cabo con dos perforadoras rotativas; DML Atlas Copco. Las perforadoras rotativas realizan taladros en bancos de 6 m de altura, una sobre perforación de 0.5 m, con brocas de diámetro de 6 ¾ pulgada y la malla de perforación está diseñada en función de la dureza del macizo rocoso y la distancia que se tiene al centro poblado de Colquijirca. Adicionalmente se realiza la perforación de taladros de doble barra para muestreo, esto se realiza en antiguos botaderos antes de su remoción. La desviación máxima permitida en la perforación de taladros es de 0.20 m del punto marcado por topografía.

2.3.3.10 Voladura

Para la realización de esta actividad se cuenta con todos los accesorios para la voladura y un Camión Fabrica – ORICA. En la voladura primaria se utiliza como la siguiente distribución de carga por taladro, donde se utiliza como carga de columna emulsión gasificada, FA (Fortis Advantage) 100 o 70, en donde FA100 es 100% de emulsión y FA70 la cual contiene 70% de emulsión y 30% de ANFO. (Huambachano, 2018, p.44)

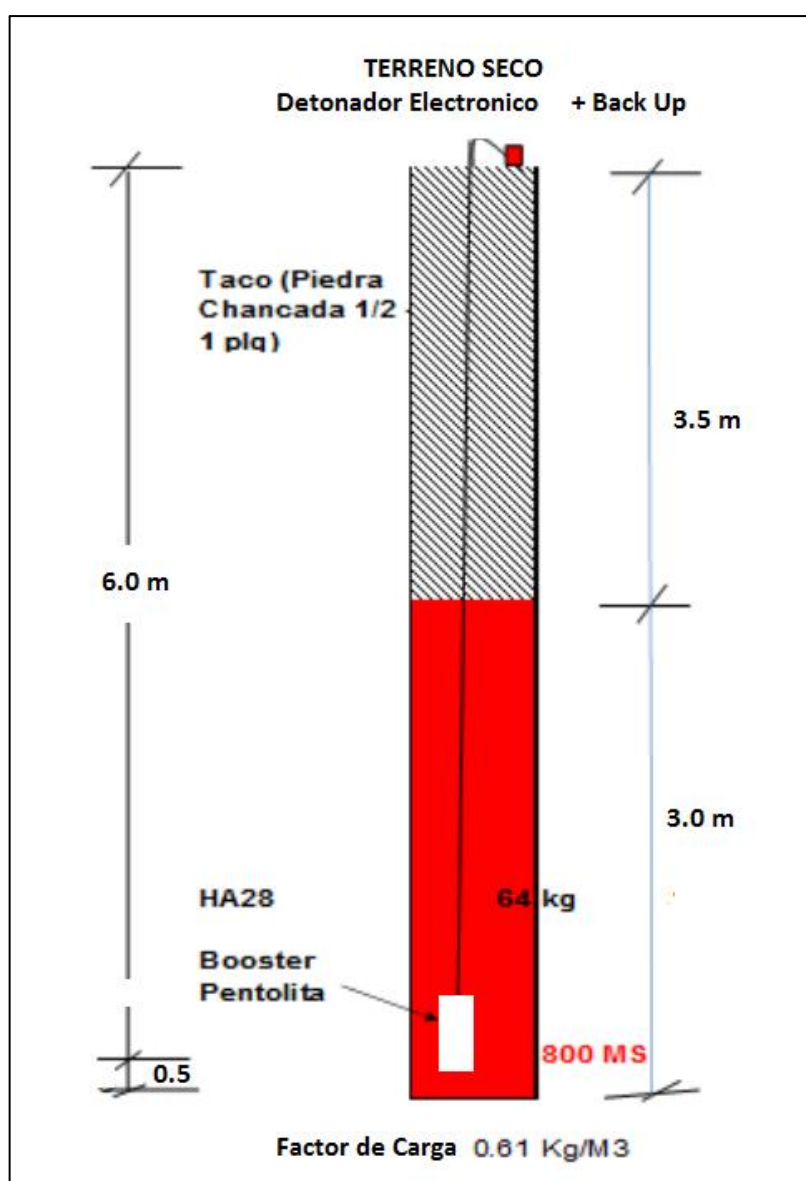


Figura 27. Distribución de la carga explosiva en un taladro.
Fuente: Parámetros de perforación y voladura El Brocal.

Se trabaja con detonadores electrónicos para voladuras cuyo radio de influencia afecte a la población (menor a 500 m) y detonadores pirotécnicos cuyos radios de influencia no afecte a la población (mayor a 500 m), los accesorios que se utilizan son los siguientes:

- Booster de 1 libra
- Detonador de 800 ms
- Retardo de superficie 17, 25, 42, 70 y 100 ms.
- Detonador electrónico
- Sistema de Iniciación (750 m)

La mezcla explosiva que se utiliza es el FA (Fortis Advantage), el tipo de explosivo depende de la dureza de la roca, tipo de material y estándar de El Brocal. Se utilizan cámaras de aire (Taponex) para los taladros amortiguados y/o para taladros de producción que tengan baja carga de explosivo. Se utilizan retenedores de energía (gorro chino), cuando se aplican decks. Todos los taladros (afecte o no afecte a la población) se tapan con piedra de chancada con una granulometría de 0.5 – 1 pulgada. (Huambachano, 2018, p.45)

Para distancias menores a 200 m:

Tabla 9. Diseño de malla de perforación y voladura $d < 200$ m

Dureza	Mala (BxE)	Carga Operante (Kg)
0.25 - 5 MPa	3.9x4.5	68
5 - 50 MPa	3.9x4.5	77
50 - mayor a 100 Mpa	3.9x4.5	77

Fuente: Parámetros de perforación y voladura El Brocal.

En zonas cercanas a la población con roca dura, la malla de perforación se reduce a 3.5 m de burden y 4.2 m de espaciamiento

Para distancias mayores a 200 m

Tabla 10. Diseño de malla de perforación y voladura $d > 200$ m

Dureza	Mala (BxE)	Carga Operante (Kg)
0.25 - 5 MPa	5.3x6.1	72
5 - 50 MPa	4.8x5.5	84
50 - mayor a 100 Mpa	4.8x5.5	84

Fuente: Parámetros de perforación y voladura El Brocal

Para distancias mayores a 500 m (desmante)

Tabla 11. Diseño de malla de perforación y voladura desmante $d > 500$ m

Dureza	Mala (BxE)	Carga Operante (Kg)
0.25 - 5 MPa	5.3x6.1	71
5 - 50 MPa	4.8x5.5	84
50 - mayor a 100 Mpa	4.8x5.5	87

Fuente: Parámetros de perforación y voladura El Brocal

Para distancias mayores a 500 m (mineral)

Tabla 12. Diseño de malla de perforación y voladura mineral $d > 500$ m

Dureza	Mala (BxE)	Carga Operante (Kg)
0.25 - 5 MPa	5.3x6.1	93
5 - 50 MPa	4.8x5.5	99
50 - mayor a 100 Mpa	4.8x5.5	108

Fuente: Parámetros de perforación y voladura El Brocal

2.3.3.11 Carguío

El carguío se realiza mediante la empresa contratista AYOR S.A.C., el cual se realiza con 3 excavadoras CAT 374, las cuales tienen una capacidad aproximada de 4.6 m³, 1 excavadora CAT

390F la cual tiene una capacidad aproximada de 7.5 m³, 2 excavadoras CAT 365 la cual tiene una capacidad aproximada de 4.6 m³, 1 excavadora CAT 336 la cual tiene una capacidad aproximada de 2.4 m³.

2.3.3.12 Acarreo

El acarreo del mineral también lo realiza la empresa contratista AYOR S.A.C., se cuenta con volquetes Mercedes Benz Actros, los cuales tienen una capacidad de aproximadamente de 30 tn. Actualmente se cuenta con una flota de 67 volquetes. La producción por guardia es entre 1500 a 1800 viajes, teniéndose un movimiento de tierras de 50 a 60 mil toneladas (mineral y desmonte).

2.3.3.13 Sistema de bombeo de aguas acidas

Actualmente en el tajo, se encuentran instalados los siguientes equipos de bombeo.

Tabla 13. Equipos de bombeo instalados en el tajo

Sector	Poza	Tipo de Bomba	Marca	Modelo	Caudal (l/s)	Línea de Descarga
Tajo Norte	Lado Norte	Electrobomba 3	FLYGT	2400 MT	90	Tajo Norte - Tajo Sur
	Lado Sur	Electrobomba 6	FLYGT	2400 MT	90	Tajo Norte - Tajo Sur
Tajo Norte	Lado Norte	Electrobomba 1	WAIR	HAZLETON	80	Planta de Agua Ácida
	Lado Sur	Electrobomba 1	WAIR	HAZLETON	100	Planta de Agua Ácida
Metropolitano	Lado Norte	Electrobomba	GRINDEX	MIDI	30	Tajo Sur

Fuente: Área de Hidrogeología de Sociedad Minera El Brocal

Según el área de mantenimiento de SMEB, se cuentan con los siguientes equipos de bombeo para el tajo descritos en la Tabla 14.

Tabla 14. Inventario de equipos de bombeo

Item	Marca	Cantidad	Potencia	Caudal (l/s)	ADT (m)	Ubicación
1	Hazleton	1	200 HP	80	200	Poza Sur
2	Hazleton	1	201 HP	80	200	Poza Sur
3	Hazleton	1	202 HP	80	200	Almacén
4	Hazleton	1	203 HP	80	200	Mtto Lima
5	Hazleton	1	204 HP	80	200	Mtto Lima
6	Surumi	1	150 HP	150	150	Mtto Taller
7	Surumi	1	87 HP	150	150	Nivel 312
8	Mágnun L	1	88 HP	320	37	Mtto Taller
9	Mágnun H	1	89 HP	60	100	Almacén
10	Mágnun H	1	90 HP	60	100	Almacén
11	Grindex - Maxi H	1	50 HP	40	80	Almacén
12	Grindex - Maxi H	1	50 HP	40	80	MttoTaller
13	Grindex - Maxi N	1	50 HP	100	50	Poza Norte

Fuente: Área de Hidrogeología de Sociedad Minera El Brocal

El área de hidrogeología se encarga de mantener un nivel de napa freática que permita realizar las operaciones de minado con normalidad. Todos los caudales de agua se bombean a una poza principal Booster Station con capacidad de 5000 m³, desde el cual se bombea hacia la planta de tratamiento de aguas acidas.

Condición de bombeo de la Booster Station Nv. 4204

A continuación, se detalla las condiciones de la poza de bombeo Booster Station, que se encarga de realizar el bombeo de aguas hacia la planta de tratamiento de aguas ácidas ubicado en Smelter.

Trabaja con un PH de 5.7 a 6, con una cantidad de sólidos del 10% y teniendo en consideración una altura de trabajo desde 4204 msnm. La Booster Station tiene una capacidad aproximada de 5000 m³.

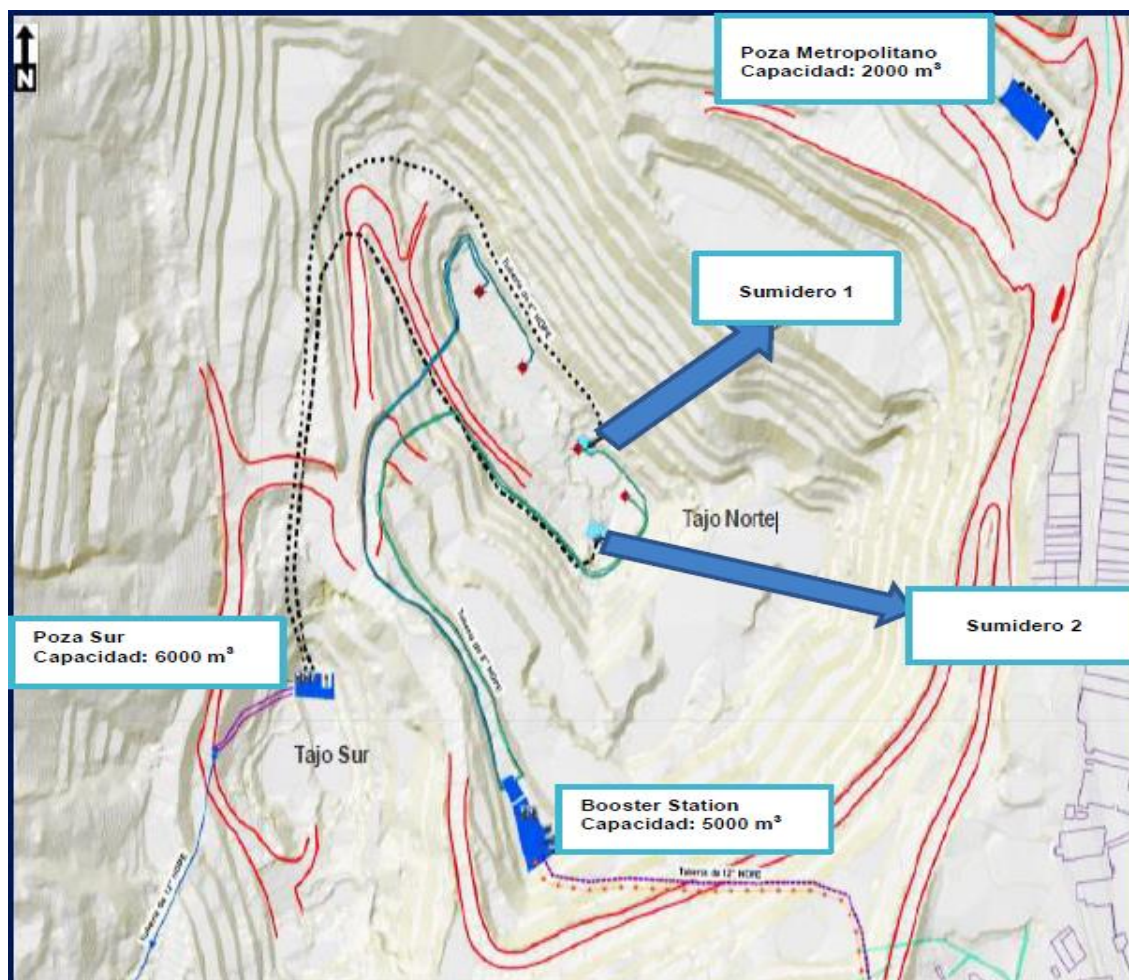


Figura 28. Distribución de pozas de bombeo del Tajo Norte.
 Fuente: Área de Hidrogeología de Sociedad Minera El Brocal.

Tabla 15. Condiciones de la Booster Station Nv 4204

Parámetros	Unidad	Medida
Caudal	l/s	260
Altura	m	143
Longitud	m	3261
Diámetro	Pulg.	12
Profundidad	m	2.5
Temperatura	°C	13

Fuente: Área de Hidrogeología de Sociedad Minera El Brocal

En la Tabla 15, se muestra las condiciones de la poza principal (Booster Station) donde se acumula el exceso de agua que interfiere con el minado.

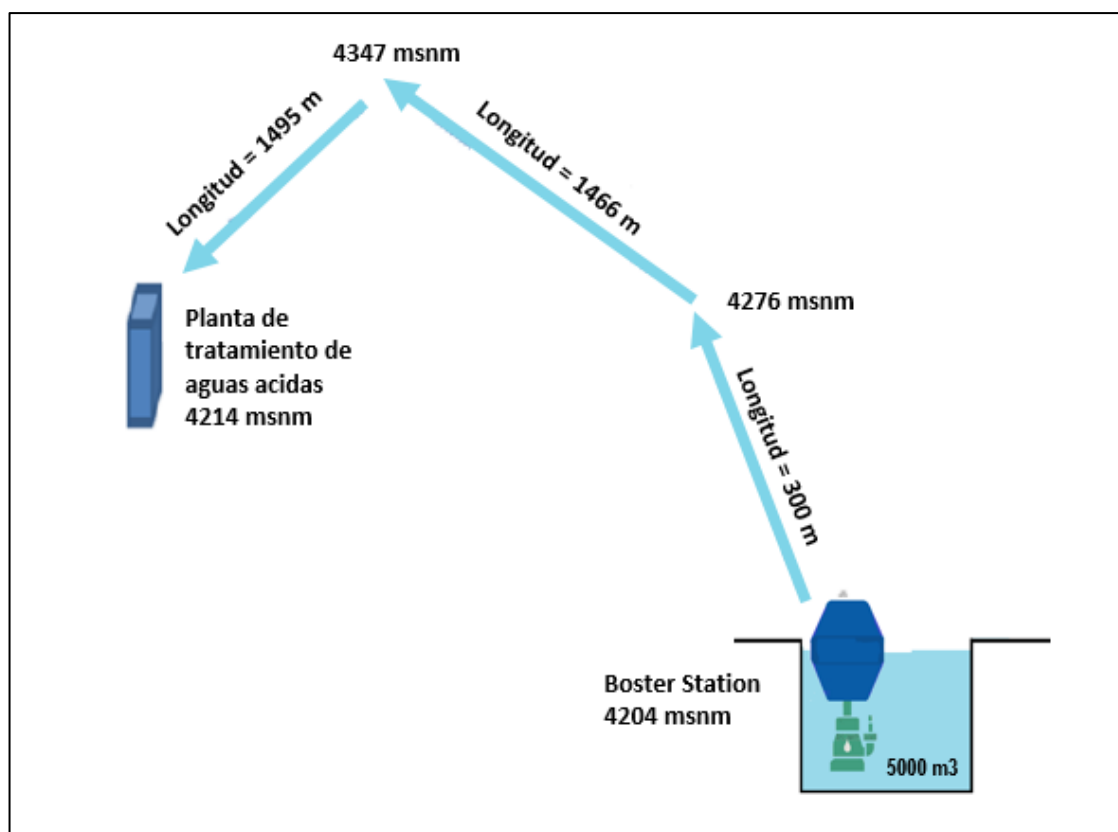


Figura 29. Estación de bombeo norte – Galería 1035 – Smelter – Planta
Fuente: Área de Hidrogeología de Sociedad Minera El Brocal

2.3.4 Metodología de la evaluación

De acuerdo a la naturaleza del trabajo y las características del estudio, se planteó hacer una evaluación de tipo descriptivo – comparativo, ya que su objetivo es describir los eventos y comparar los resultados.

Se realizó una descripción de las características de broca tricónica de diámetro 6 ¾” que se adquirió en el mercado peruano. Se identificó por marca y se clasificó el tipo de broca de acuerdo al estándar IADC. Una vez identificados y clasificados las brocas se instalaron en los equipos de perforación DML, haciendo un seguimiento continuo de su desempeño según la zonificación del tajo. El recojo de datos se realiza en campo a través de formatos de perforación preestablecidos (ANEXO 9), luego se digitaliza y realiza la evaluación de los rendimientos por marca y por tipo de broca. Teniendo en cuenta las zonas de perforación.

La evaluación consiste en el análisis sistemático de la vida útil por broca, su velocidad de perforación, el costo parcial de perforación por broca y el costo total de perforación por marca y tipo de broca. Los resultados son comparados con el desempeño de la broca testigo de marca Shareate y los rendimientos del año 2017. Las brocas utilizadas son de las marcas Cenerg, Mincon, Epiroc, WLS, PDB, TRB, y el tipo de broca IADC considerado es para dureza de roca media 6XX.

2.3.4.1 Descripción de los equipos de perforación rotativa en el Tajo Norte

Se cuenta con 2 equipos de perforación de la serie DML de Atlas Copco. En el área de operaciones se tiene el Código DML 2 y DML 3. Después de realizar un check list técnico se tiene las siguientes especificaciones.

Tabla 16. Especificaciones técnicas la perforadora DML2 y DML3

Especificaciones técnicas	DML2	DML3
Método de perforación	Rotativa Multi Pass (2 Barras)	Rotativa Single Pass (1 Barra)
Diámetro de la barra	5.5 inch	140 mm.
Profundidad en una pasada	8.20 m	8.0 m
Profundidad máxima de perforación	18.0 m	8.0 m
Peso estimado	50 tn	50 tn
Año de fabricación	2008	2008
Compresor	1,600 cfm @ 110 psi	45.3 m ³ /min @ 7.6 bar
Rotación de cabezal	161 R.P.M.	161 R.P.M.
Torque de rotación	7,200 lbf-ft	9,762 Nm
Peso sobre la broca (Pull down)	4000 PSI (60000 lb)	4000 PSI (60000 lb)
Velocidad de barrido	5000 – 10000 pies/minuto	– 10000 pies/minuto

Fuente. Elaboración propia

La Tabla 16, muestra una descripción actualizada del estado físico y mecánico de los equipos de perforación, además se hace una verificación de su ficha técnica. La descripción se realizó a través de un check list técnico y pruebas de campo. Se tuvo cuidado en evaluar las condiciones del equipo que involucran los parámetros de perforación aplicados a las brocas.



Figura 30. Equipos de perforación DML2 y DML3 en el Tajo Norte

2.3.4.2 Descripción de los aceros de perforación utilizados

Los aceros de perforación, barra, top sub, bit sub, centralizador; son de la marca IRON STAR WORK, un proveedor homologado de la empresa AYOR S.A.C., tal como se muestra en la Figura 31.



Figura 31. Marca de aceros de perforación utilizados

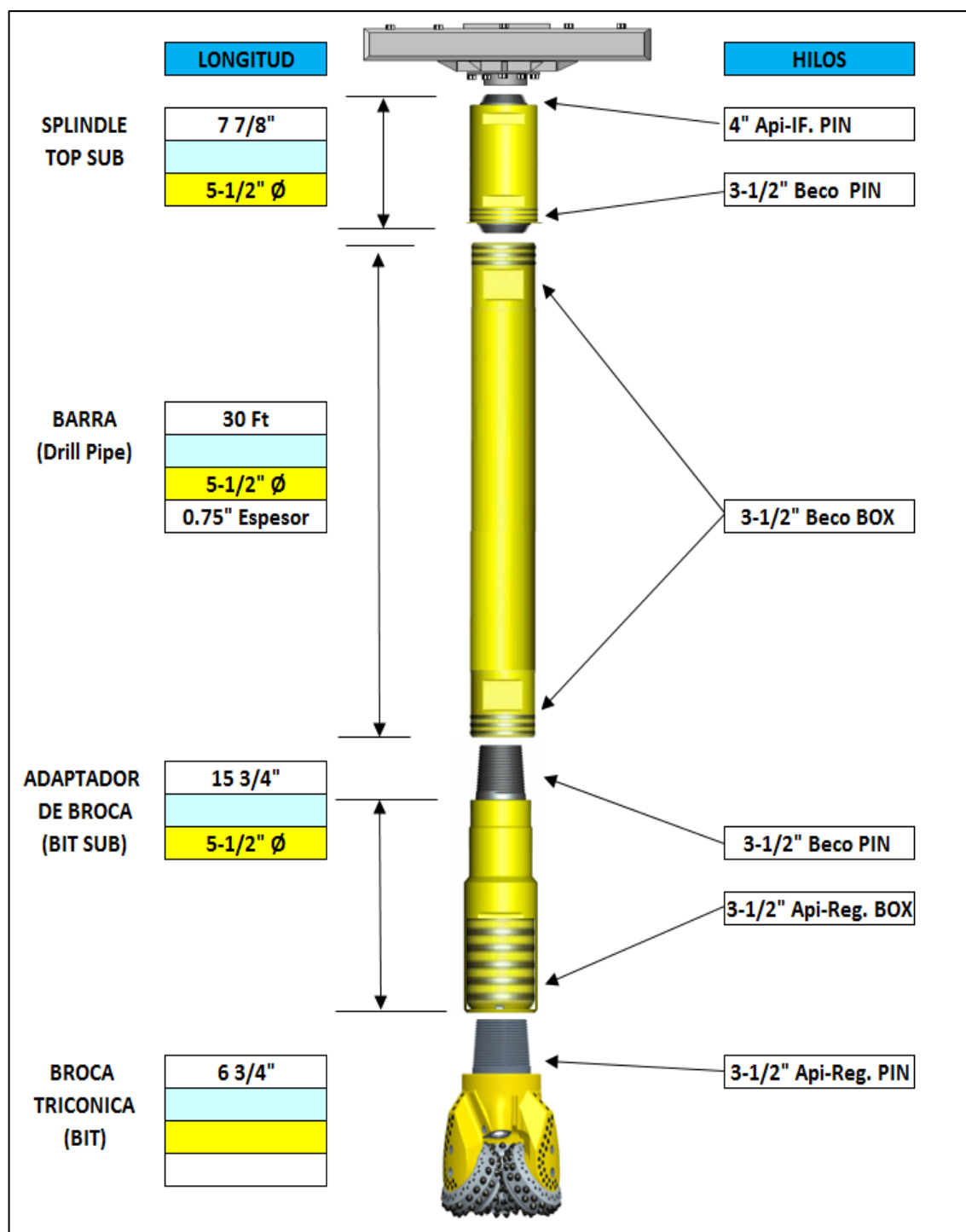


Figura 32. Columna de perforación de equipo DML2 y DML3

Fuente: Área de perforación AYOR SAC.

La Figura 32, muestra la columna de perforación utilizada en la evaluación de las brocas. En el equipo de perforación DML2 se utilizó una barra adicional de 35 pies para su carrusel, para la perforación de sondajes de doble barra (18 m de longitud). Estos sondajes se perforaban a solicitud del cliente.



Figura 33. Barras de perforación STAR IRON WORK

2.3.4.3 Selección de brocas para la evaluación

Según la información de dureza del macizo rocoso en el Tajo Norte, se dispuso la compra de brocas de distintos proveedores en el mercado nacional. Se clasificó las brocas de acuerdo al Código IADC, brocas para roca de dureza media (IADC 6XX), similares a nuestra broca testigo de marca Shareate SA642G de código IADC 642.

Tabla 17. Brocas tricónicas para la evaluación

Unid.	Marca	SERIE	IADC	Dureza	Diámetro	Toberas	Compra
10	PDB	GX612	612	MEDIO	6 3/4	14 MM	Mayo 2018
10	CENERG	CN60	632	MEDIO	6 3/4	14 MM	Mayo 2018
10	MINCON	AP60	632	MEDIO	6 3/4	16 MM	Mayo 2018
5	WLS1	R278	622	MEDIO	6 3/4	16 MM	Mayo 2018
5	WLS2	P912	622	MEDIO	6 3/4	14 MM	Mayo 2018
5	TRB1	632	632	MEDIO	6 3/4	12 MM	Mayo 2018
5	TRB2	715	715	DURO	6 3/4	12 MM	Mayo 2018
10	EPIROC	F67	642	MEDIO	6 3/4	16 MM	Diciembre 2018



Figura 34. Fotografía de las marcas de broca utilizadas en la prueba.

La compra de brocas se hizo en el mes de mayo y la broca marca Epiroc en diciembre 2018

2.3.4.4 Descripción básica de marcas de brocas tricónicas

A continuación, se muestra la descripción técnica de cada broca utilizada en la prueba, realizado con la ayuda de la ficha técnica del proveedor y la observación directa.

Broca tricónica marca PDB Tools, Inc. GX612

PDB Tools Inc., provee herramientas avanzadas de perforación y soluciones para la minería, exploraciones, construcción, perforación de pozos de agua, gas y petróleo. La broca tricónica de **6 3/4" GX612** está diseñada para la perforación en formaciones rocosas medias a duras, con una resistencia a la compresión desde 10,000 a 40,000 psi; tales como esquisto duro, caliza dura, cuarcita, pizarra, taconita y basalto. Las brocas tricónicas de PDB Tools Inc., son diseñadas y manufacturadas con tecnología de última generación. (Ficha técnica PDB Tools, Inc.)

Tabla 18. Especificaciones técnicas de broca PDB 6 3/4 GX612

Broca	PDB GX612
Diámetro	6 3/4"
IADC	612
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos
Insertos internos:	Cónicos
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje Completo
Protección de conos:	Redondeados (TCI)
Insertos de faldón:	Redondeados (TCI)
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	47 lbs / 22 kg
Válvula check antiretorno:	SÍ
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	50-90 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	20,000 a 40,000 lbs
Presión mínima de aire	-
Toberas:	16 mm
Resistencia a la compresión de la roca	10000 a 40000 PSI



Figura 35. Fotos de broca tricónica PDB GX612

Fuente. Ficha técnica de la broca

Figura 35. El diseño es aerodinámico. La broca tiene condición robusta y con grandes botones de refuerzo en el faldón y la protección del cono. A simple vista se ve más grande que las demás brocas, tiene un ligero incremento del diámetro que indica su ficha técnica.

Broca tricónica marca CENERG GLOBAL TOOLS 6 3/4" CN60

Broca tricónica de fabricación India, diseñada para trabajos de perforación en rocas media dura, con resistencia al corte entre 25000 psi y 42500 psi. Posee 2/3 del faldón reforzado por insertos esféricos. En la Figura 36 se ve a la broca liviana pero aerodinámica y con grandes botones de refuerzo en el faldón y la protección del cono.

Tabla 19. Especificaciones técnicas de broca CENERG 63/4 CN60

Broca	CENERG 6 3/4 CN60
Diámetro	6 3/4"
IADC	632
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos (79)
Insertos internos:	Cónicos (42)
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	2/3 del faldón
Protección de conos:	Esféricos
Insertos de faldón:	Esféricos 2/3 (TCI)
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	17 kg
Válvula check antiretorno:	SÍ
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	50-120 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	27,000 a 47,000 lbs
Presión mínima de aire	-
Toberas:	14 mm
Resistencia a la compresión de la roca	25000 a 42500 PSI

Fuente. Elaboración propia

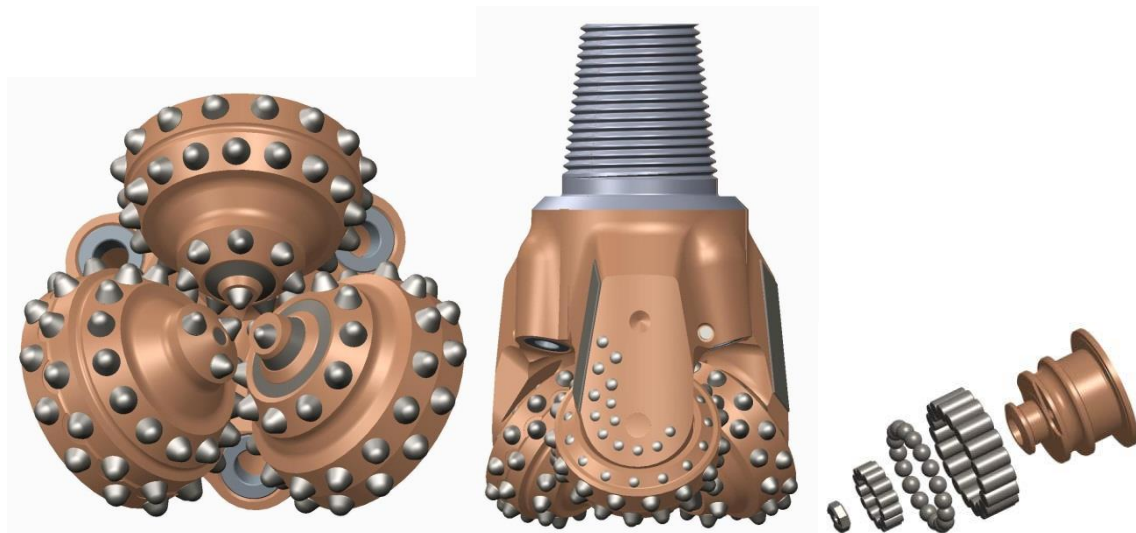


Figura 36. Fotos de broca tricónica CENERG 6 ¾ CN60.
Fuente: Ficha técnica del producto.

Broca tricónica marca MINCON ROTACAN 6 ¾" AP60

Es una broca tricónica diseñada para perforación en rocas media a duras con moderada formación abrasiva. Cuenta con una protección del 2/3 del faldón, que contienen insertos esféricos que impiden un desgaste rápido de la broca. En la Figura 37 se ve a la broca liviana, aerodinámica y con grandes botones de refuerzo en el faldón y la protección del cono.

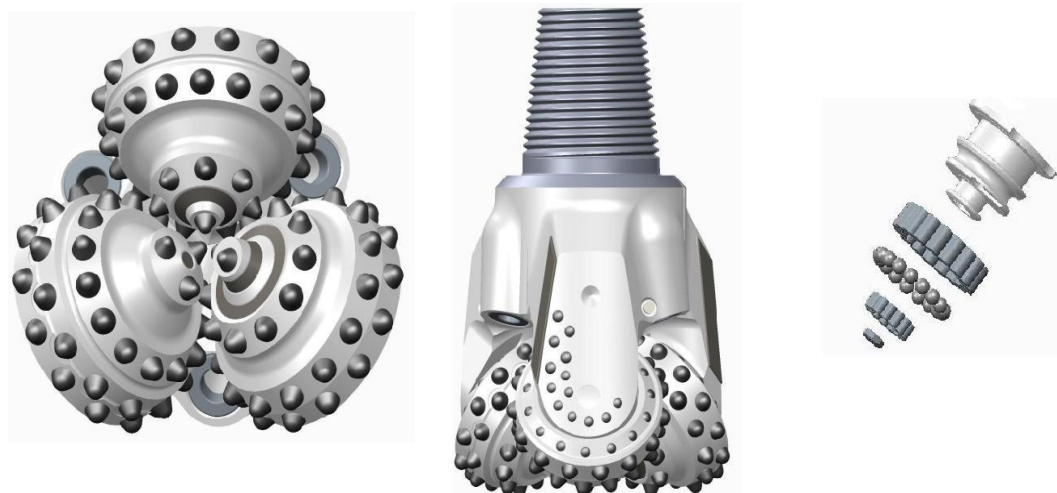


Figura 37. Fotos de broca tricónica MINCON 6 ¾ AP60.
Fuente: Ficha técnica del producto.

Tabla 20. Especificaciones técnicas de broca ROCATAN 6 3/4 AP60

Broca	ROCATAN 6 ¾ AP60
Diámetro	6 3/4
IADC	632
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos (42)
Insertos internos:	Cónicos (79)
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje completo
Protección de conos:	Esféricos
Insertos de faldón:	Esféricos 2/3 (TCI)
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	17.5 kg
Válvula check antiretorno:	SÍ
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	50-120 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	27,000 a 47,000 lbs
Presión mínima de aire	-
Toberas:	16 mm
Resistencia a la compresión de la roca	25000 a 45000 PSI

Fuente. Elaboración propia.

Broca tricónica marca WLS DRILLING PRODUCT, INC

a. WLS60 (R278) RUSO

La broca WLS60 presenta insertos tipo cónicos con un perfil durable en la fila calibradora. Este diseño proporciona una alta velocidad de penetración en terrenos que van de suave a medio duro. El rodamiento “Roller-Ball-Roller” con características de flujo de aire mejoradas maximiza la vida del trígono.

Figura 38, la broca tiene una condición robusta y es más alta que las demás brocas, sin embargo, el faldón no está bien protegido, solo tiene 4 botones de refuerzo.

Tabla 21. Especificaciones técnicas de broca WLS 6 3/4 WLS60 (R278)

Broca	6 3/4 WLS60 (R278)
Diámetro	6 3/4
IADC	622
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos (45)
Insertos internos:	Cónicos (66)
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje intermedio
Protección de conos:	Esféricos
Insertos de faldón:	Revestimiento e insertos redondeados 1/3
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	20.40 kg
Válvula check antiretorno:	NO
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	60-100 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	17,000 a 33,000 lbs
Presión mínima de aire	
Toberas:	14 mm
Resistencia a la compresión de la roca	

Fuente: Elaboración propia.

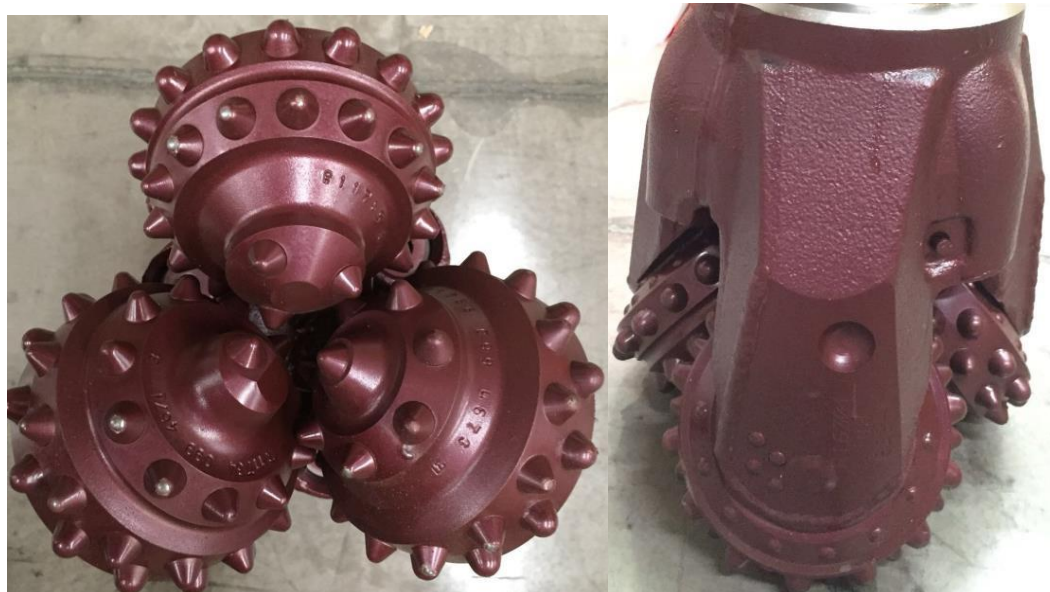


Figura 38. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (R278).

Tabla 22. Especificaciones técnicas de broca WLS 6 3/4 WLS60 (P912)

BROCA	6 3/4 WLS60 (P912)
Diámetro	6 3/4
IADC	622
Tipo de Broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de Corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos (47)
Insertos internos:	Cónicos (77)
Insertos de Nariz:	Cónicos
Tipo de Protección:	Blindaje intermedio
Protección de Conos:	Insertos domo
Insertos de Faldón:	Insertos medianos
Perfil del Cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	20.40 kg
Válvula check antiretorno:	SI
Parámetros de operación	
Velocidad de Rotación:	60-100 rpm
Peso Aplicado sobre la Broca:	17,000 a 33,000 lbs
Presión mínima de aire	
Toberas:	14 mm
Resistencia a la compresión de la Roca	

Fuente: Elaboración propia.

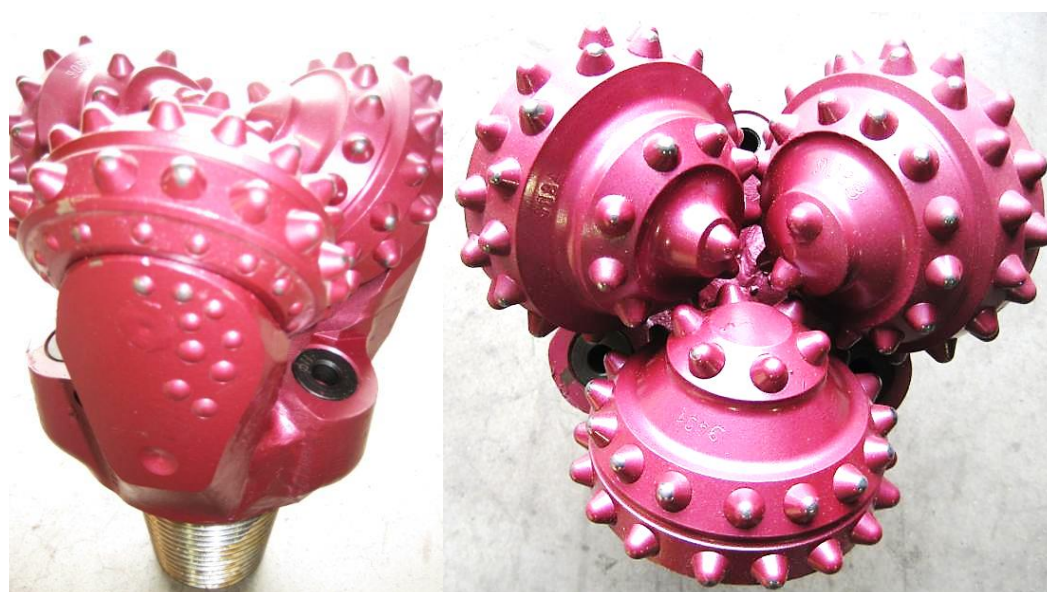


Figura 39. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (P912).

a. WLS60 (P912) HINDU

La broca WLS60 presenta insertos tipo cónicos, tiene un diseño que proporciona una alta velocidad de penetración en terrenos que van de suave a medio duro. El rodamiento “Roller-Ball-Roller” con características de flujo de aire mejoradas maximiza la vida del trígono.

En la Figura 39, se muestra un diseño aerodinámico similar a las brocas Mincon y Cenerg.

Broca tricónica marca Throop Rock Bit

Es una marca estadounidense que fabrica brocas tricónicas de diferente tipo.

Broca tricónica TRB 632

Los triconos de rodamiento abierto diseñados por Throop Rock Bit son brocas que producen resultados consistentes y de menor costo por pie perforado. Ofrecemos una amplia variedad de insertos de carburo de tungsteno con forma de cincel, cónico y esférico, cada uno diseñado de forma única para perforar en tipos específicos de formaciones rocosas. Disponible en circulación central, de chorro y reversa con modelos diseñados para uso con aire o fluido.



Figura 40. Fotos de broca tricónica TRB 6/34 632.

Tabla 23. Especificaciones técnicas de broca TRB 632

BROCA	6 ¾ TRB 632
Diámetro	6 3/4
IADC	632
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Esfera - cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos
Insertos internos:	Cinzel
Insertos de nariz:	Cinzel
Tipo de protección:	Blindaje intermedio
Protección de conos:	Planos
Insertos de faldón:	Sin protección
Perfil del cuerpo:	-
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	-
Válvula check antiretorno:	NO
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	60-100 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	--
Presión mínima de aire	-
Toberas:	10 mm
Resistencia a la compresión de la roca	-

Fuente: Elaboración propia.

Broca tricónica TRB 715

Los cojinetes de rodillos sellados de la broca están equipados con un sistema de lubricación y compensador para controlar y evitar que la grasa se filtre del cojinete. Este sistema hace que sea más fácil para la broca tricónica perforar más profundamente en la formación sin la necesidad de variar el empuje con tanta frecuencia como las brocas tricónicas de rodamiento abierto. Nuestros triconos de rodamientos sellados son una opción obvia para proyectos de perforación más profundos donde el costo a tiempo para detenerse y limpiar los detritos es inaceptable.

Tabla 24. Especificaciones técnicas de broca TRB 715

BROCA	6 3/4 TRB 715
Diámetro	6 3/4
IADC	715
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Sellados
Configuración:	Rodillo cerrado
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos
Insertos internos:	Cónicos
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje intermedio
Protección de conos:	Planos
Insertos de faldón:	1/3 esféricos
Perfil del cuerpo:	-
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Fluido sellado
Peso total:	-
Válvula check antiretorno:	NO
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	60-100 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	-
Presión mínima de aire	
Toberas:	10 mm
Resistencia a la compresión de la roca	

Fuente: Elaboración propia.



Figura 41. Fotos de broca tricónica TRB 6/34 715.

Broca tricónica marca EPIROC F67

Insertos cónicos TCI en la fila exterior e interior del cono para mejorar la durabilidad y tasas de penetración sostenidas. Diseñado para formaciones medias / duras tales como caliza dura, esquisto duro, formaciones de oro, minerales de cobre semiduro, dolomita y cuarcita. (Traducción de Ficha técnica del producto).

Tabla 25. Especificaciones técnicas de broca EPIROC 6 3/4" F67

BROCA	EPIROC 6 3/4 F67
Diámetro	6 3/4
IADC	642
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Cónicos (44)
Insertos internos:	Cónicos (84)
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje intermedio
Protección de conos:	Insertos planos TCI.
Insertos de faldón:	Reforzado con acero duro e insertos TCI redondeados.
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	17 kg
Válvula check antiretorno:	NO
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	70-120 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	4500 a 7500 lbs per inch of diameter
Presión mínima de aire	35 PSI
Toberas:	16 mm
Resistencia a la compresión de la roca	24000 a 44000 PSI

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 42, la broca tiene un perfil aerodinámico y ligero.



Figura 42. Fotos de broca tricónica WLS 6/34 WLS60 (R278).

Broca tricónica marca SHAREATE SA642G

Insertos cónicos TCI en la fila exterior e interior del cono para mejorar la durabilidad y tasas de penetración sostenidas. Diseñado para formaciones rocosas medias / duras y abrasivas con alta resistencia a la compresión tales como calizas, arenisca, esquisto y dolomita. (Traducción de Ficha técnica del producto).



Figura 43. Fotos de broca tricónica SHAREATE 6/34 SA642.

Fuente: Ficha técnica del producto.

La Figura 43 nos muestra la broca testigo que tiene un diseño robusto, aerodinámico y los faldones reforzados. Esta broca se utilizó para la comparación con las demás brocas. El tamaño de la broca es similar a la marca PDB.

Tabla 26. Especificaciones técnicas de broca SHAREATE 6 3/4 SA642G

BROCA	SHAREATE 6 3/4 SA642
Diámetro	6 3/4
IADC	642
Tipo de broca:	Tricónica
Rodamientos:	Circulación de aire
Configuración:	Cilindro-esfera-cilindro
Estructura de corte:	Carburo de tungsteno
Insertos externos:	Ovoide
Insertos internos:	Ojiva
Insertos de nariz:	Cónicos
Tipo de protección:	Blindaje intermedio
Protección de conos:	Insertos redondeados
Insertos de faldón:	(TCI) redondeados
Perfil del cuerpo:	Aerodinámico
Rosca:	3 1/2" Reg. API
Refrigeración:	Inyectores aire
Peso total:	21 kg
Válvula check antiretorno:	SI
Parámetros de operación	
Velocidad de rotación:	60-100 rpm
Peso aplicado sobre la broca:	17,000 a 33,000 lbs
Presión mínima de aire	0.2 – 0.4 MPa
Toberas:	16 mm
Resistencia a la compresión de la roca	29000 a 38000 psi

Fuente: Elaboración propia.

2.4 SOLUCIONES TEÓRICAS Y PRÁCTICAS PLANTEADAS

2.4.1 Proceso de perforación en el Tajo Norte

El proceso inicia con la entrega de plataformas para el marcado de malla de perforación con GPS Diferencial. Posteriormente el equipo DML ingresa a la malla marcada a realizar los taladros, esto de acuerdo al planeamiento de perforación y las coordinaciones con la supervisión del área de Perforación y Voladura de El Brocal.

Una vez culminado la perforación se realiza una revisión de todos los taladros de la malla marcada, en caso haya taladros derrumbados se efectúa la reperforación de los mismos. Solamente una vez que la malla este con todos los taladros armados, el área es entregada a Orica para realizar el carguío, amarrado de la malla de voladura y posterior disparo de los proyectos programados.

La formación rocosa del tajo contiene anclinales y sinclinales, compuestos por distintos estratos de calizas, marga roja, lutitas, pizarras, etc. Un taladro perforado puede encontrar varios estratos de roca y mineral con distintas durezas, así como mostramos en la Figura 47. Así mismo se encuentran zona con arcillas y agua en las plataformas de perforación.

En las fotografías siguientes (Figura 44, 45, 46, y 47) se muestra el perfil de roca que se perfora en el tajo.

El tajo tiene varias zonas de minado alejados, que se encuentran en espacios angostos, por ello se tiene que movilizar los equipos de perforación constantemente. Esto dificulta el control óptimo de las operaciones y la evaluación de los KPI. Por lo que se hizo zonificación con nombres conocidos a las fases de minado.



Figura 44. Vista panorámica de los anticlinales y sinclinales del tajo.



Figura 45. Fotografía del macizo rocoso de la zona tortuga.

Figura 44, se visualiza el anticlinal de tortuga y Chocayo.

2.4.2 Condiciones de perforación presente

- Variabilidad de dureza de roca.



Figura 46. Perfil de la pared de talud del fondo del tajo

La Figura 46, muestra los distintos estratos rocosos que atraviesa la broca en el proceso de perforación.

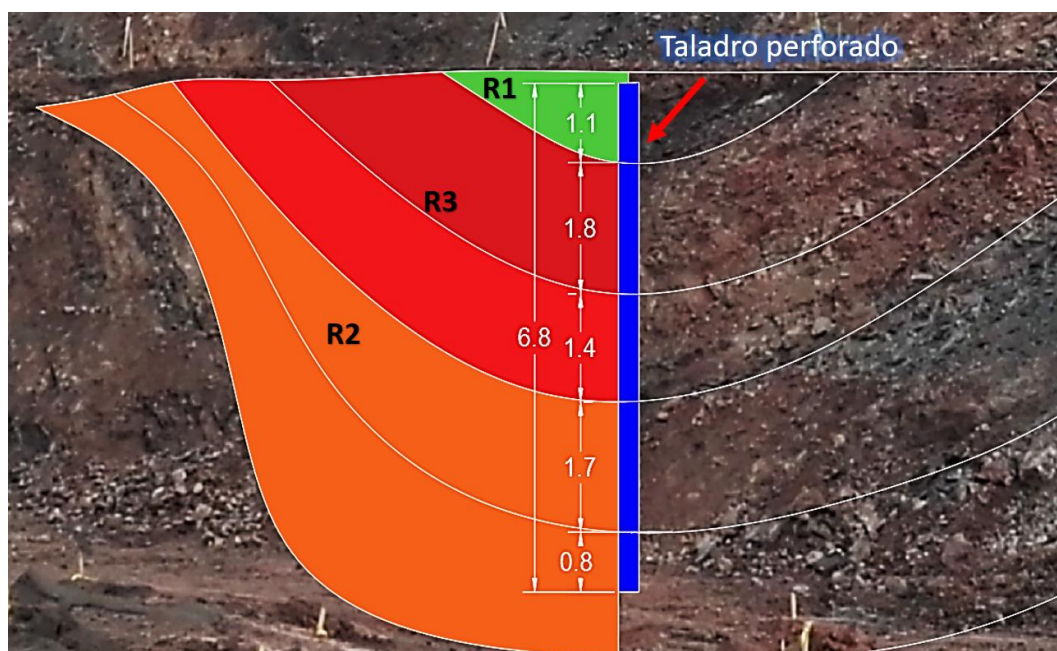


Figura 47. Perfil de un taladro perforado en el macizo rocoso del tajo.

Se evidencia en la Figura 47 que el taladro perforado atravesó diferentes tipos de dureza de roca (R1, R3, R2), además la zona de perforación del fondo del tajo contiene agua dinámica, que dificulta aplicar un parámetro de perforación uniforme.

2.4.3 Control empírico de la vibración en la columna de perforación

Una de las causas de desgaste prematuro de las brocas es la vibración en la columna de perforación, que se da por distintos motivos: parámetros de perforación mal aplicados, barra ligeramente pandeada, atascamiento del rodamiento del cono de la broca, macizo rocoso fracturado (Figura 46), etc. El control para proteger el cabezal de rotación es el amortiguador de impacto que va en el extremo superior de la columna de perforación y el control para disminuir la vibración en la broca es la bocina centralizadora (anillo guía). Es decir, si tenemos desgastado la bocina centralizadora habrá mayor vibración y por tanto menor vida útil de la broca. Para reducir la vibración en la broca se implementó dos prácticas positivas de trabajo.

a. Implementación de doble giro de la barra tipo box box:

Al perforar 6.5 m a 7 m, solo se desgasta el lado de la broca de la barra box box de 30' (9.14 m). En este caso se realizó un doble giro para tener desgaste uniforme de ambos lados. El primer giro se hizo a 20 000 metros de recorrido del box A (lado de broca), que al girar queda embonado al cabezal. El segundo giro se hizo a los 25000 metros de recorrido del box B, para que al final el box A se embone nuevamente a la broca (ver ANEXO 4).

b. Anillo guía de distinto diámetro interno.

El anillo guía mantiene centrado la columna de perforación y deja un espacio mínimo para la rotación y avance libre de la barra, esto evita una mayor vibración en la broca. Por lo tanto, siempre se debe de mantener los centralizadores en buenas condiciones. Para eso se implementó distintos diámetros:

- Bocina centralizadora para barra nueva 142 mm de diámetro interno.
- Bocina centralizadora para barra usada o de doble giro 136 mm de diámetro interno.

Estas 2 prácticas combinadas dieron estabilidad a la columna de perforación evitando una excesiva vibración, así mismo se incrementó la vida útil de las bocinas centralizadoras, la vida útil de las barras y la vida útil de las brocas.

2.4.4 Clasificación de dureza de macizo rocoso

En la Figura 48 se muestra una escala de dureza de la roca, que ha sido elaborado por el área de geotecnia SMEB. Al perforar un taladro encontramos varios estratos y con dureza variable, como se muestra en la Figura 47, por ello es difícil estandarizar los parámetros de perforación. Además, podemos encontrar arcillas, agua, y roca dura al mismo tiempo.

LITOLOGIA	DUREZA	COLOR	*DESCRIPCION	GEOTECNIA	** GEOTECNIA - VOLADURA (Heavy - Anfo)			
					PRODUC. Kg.	BUFFER Kg.	TRIM Kg.	FILAS PRODUC.
LIMO Y MARG ALT	0		Rajadura por la uña	R0 (0.25-1 MPa)	≤ 50	No cargar	No cargar	≥ 4
DOL, MAR (-)ALT	1		Desmoronamiento con un golpe de martillo o rayadura de cuchilla	R1 (1-5 MPa)	≤ 60	No cargar	No cargar	= 4
CONG, VULCN Y MARG ROJA	2		Rajado con dificultad por la cuchilla y al golpe con la punta del martillo hace una hendidura	R2 (5-25 MPa)	= 75	≤ 30	No cargar	= 2
					= 75	≤ 30	No cargar	= 3
					= 81	≤ 30	No cargar	= 4
CALZ Y DOL	3		No puede ser rayado por la cuchilla y requiere un golpe del martillo para fracturarlo	R3 (25-50 MPa)	= 81	≤ 35	≤ 30	= 2
					= 81	≤ 35	≤ 30	= 3
					= 85	≤ 35	≤ 30	= 4
CALZ DOL (FRESCA)	4		Requiere mas de dos golpes del martillo para fracturarlo	R4 (50-100 MPa)	= 85	≤ 40	≤ 35	= 2
					= 85	≤ 40	≤ 35	= 3
					= 90	≤ 45	≤ 40	= 4
INTR	5		Requiere muchos golpes del martillo para fracturarlo	R5 (> 100 MPa)	= 90	≤ 45	≤ 40	= 2
					= 90	≤ 45	≤ 40	= 3
					= 90	≤ 45	≤ 40	= 4

Figura 48. Escala de dureza del macizo rocoso del Tajo Norte

Fuente: Área de Geología El Brocal.

2.4.5 Zonificación del tajo según dureza de roca

Para realizar la zonificación, nos apoyamos en la identificación de dureza por taladro del área de geología (Figura 49 y 50) y la identificación in situ del macizo rocoso.

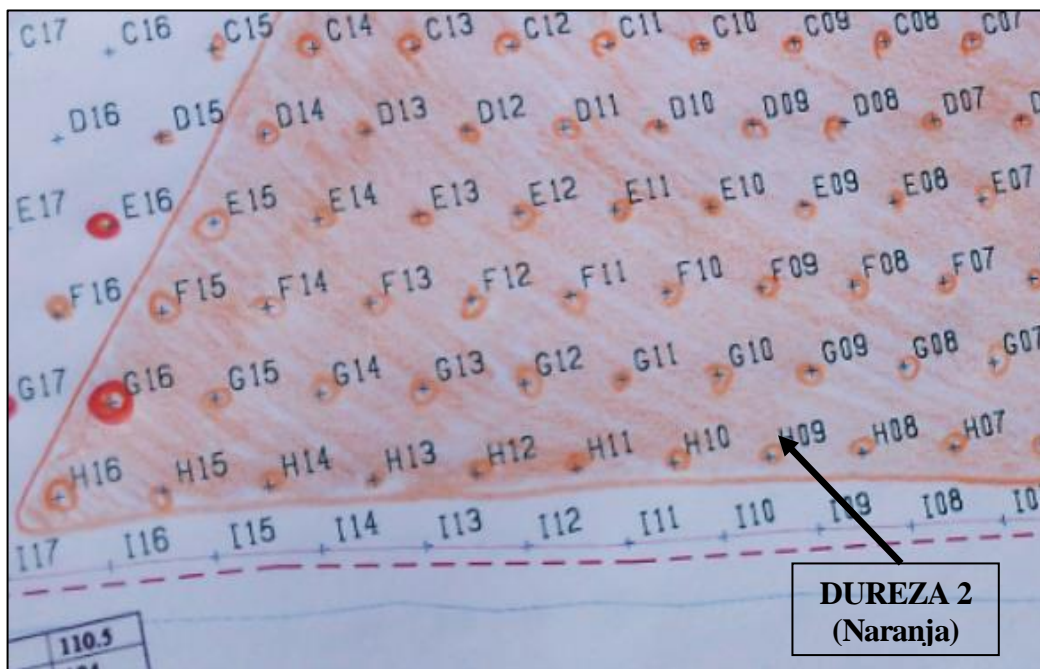


Figura 49. Identificación de dureza 2 en el taladro perforado

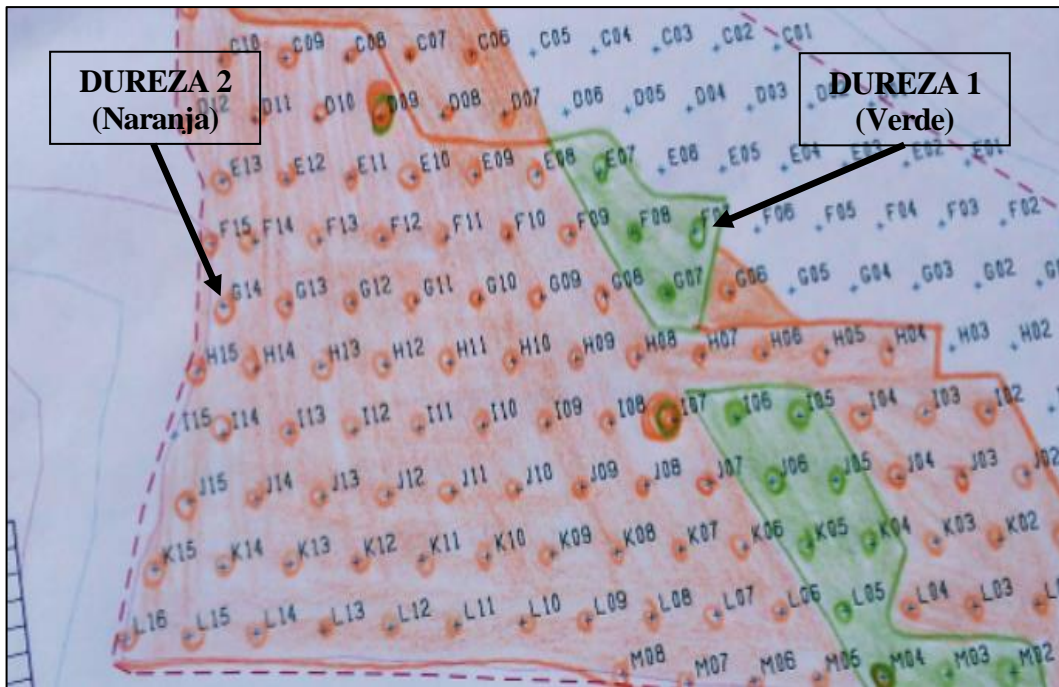


Figura 50. Identificación de dureza 1 y dureza 2 en el taladro.

Fuente. Área de geología SMEB

Teniendo la información anterior y la identificación de dureza del macizo rocoso in situ. Se estableció zonas del tajo con 4 tipos dureza de roca (semiduro, media, suave y relleno), con los cuales se determinó parámetros de perforación prácticos.

Tabla 27. Zonificación del tajo según dureza de roca

ZONAS	Dureza de roca	Geotecnia
Tortuga 1	Media	R2
Tortuga 2	Semiduro	R3, R4
Fase 9A	Media	R2
Fase 9B	Relleno	R0
Fase 10	Duro	R4
Stock Baja Ley	Relleno	R0
Buchisapo-Este	Semiduro	R3, R4
Buchisapo-W	Media	R2
Helen-E	Semiduro	R3, R4
Helen-W	Media	R2
Fondo del Tajo	Semiduro	R3, R4
Remediación	Suave	R0, R1

2.4.6 Parámetros de perforación aplicados según dureza de roca.

Se aplicó los parámetros de perforación según la siguiente información

- Información técnica de la broca tricónica.
- Zonificación del tajo.
- Dureza del macizo rocoso.

En la Figura 51, se presenta los parámetros de perforación promedios aplicados por zonas, teniendo información de dureza y experiencia del operador. Dichos parámetros se registraron en el reporte de perforación (ANEXO 9), junto a las observaciones. Para la evaluación de los rendimientos de broca tricónica, se consideró 4 tipos de dureza de roca, según la zonificación del tajo.

Semiduro: R3, R4 (rojo y lila, se hizo promedios), media: R2 (naranja), suave: R0, R1 (celeste y verde) y relleno (celeste).

La roca de dureza suave, se considera material rocoso in situ y relleno se considera material removido de botaderos y stock de mineral antiguo, que se perforan para tomar muestras.

ZONAS	Dureza de Roca	RC de ROCA (MPa)	PULL DOWN (PSI)	TORQUE (PSI)	RPM	PRESIÓN DE BARRIDO (PSI)
Tortuga 2	Semiduro	R3, R4 (25 - 70)	1000 - 1600	1000 - 1200	60 - 100	60 - 75
Fase 9A	Media	R2 (5 - 25)	1000 - 1400	1000 - 1200	80 - 100	60 - 75
Fase 9B	Relleno	R1 (1 . 5)	500 - 1200	1000	80 - 130	75
Fase 10	Duro	R4 (50 - 100)	1400 - 1800	1000 - 1400	60 - 100	60 - 75
Stock Baja Ley	Relleno	R1 (1 . 5)	500 - 1000	1000	80 - 130	75
Buchisapo-Este	Semiduro	R3, R4 (25 - 70)	1000 - 1600	1000 - 1200	60 - 100	60 - 75
Buchisapo-W	Media	R2 (5 - 25)	1000 - 1400	1000 - 1200	80 - 100	60 - 75
Helen-E	Semiduro	R3, R4 (25 - 70)	1000 - 1700	1000 - 1200	60 - 100	60 - 75
Helen-W	Media	R2 (5 - 25)	1000 - 1400	1000 - 1200	80 - 100	60 - 75
Fondo del Tajo	Semiduro	R3, R4 (25 - 70)	1000 - 1700	1000 - 1200	60 - 100	60 - 75
Remediacion	Suave	R1 (1 . 5 MPa)	500 - 1000	1000	80 - 130	75

Figura 51. Parámetros de perforación aplicados por zonas.

2.4.7 Brocas tricónicas evaluadas

Las brocas tricónicas que se utilizó en la evaluación, tuvieron características similares a nuestra broca testigo, de la marca Shareate SA642G de diámetro 6 3/4", para formación rocosa media.

Las brocas de la marca Shareate fueron corridas desde enero a mayo del 2018, generando una base de datos que se utilizó para realizar las comparaciones con las demás brocas.

Tabla 28. Brocas tricónicas utilizadas en la evaluación

Unidades	Marca	Serie	Código IADC	Fecha de evaluación
47	SHAREATE	SA642G	642	Enero – Mayo 2018
10	MINCON	AP60	632	Setiembre – Octubre 2018
10	CENERG	CN60	632	Junio – Agosto 2018
10	PDB	GX612	612	Junio – Agosto 2018
5	WLS2 (HINDU)	P912	622	Junio 2018
5	WLS1 (RUSOS)	R278	622Y	Junio – Agosto 2018
3	TRB1	632	632	Agosto 2018
3	TRB2	715	715	Noviembre 2018
10	EPIROC	F67	642	Enero – Febrero 2019

Fuente. Elaboración propia

La Tabla 28 Se muestran distintos tipos de broca de diámetro 6 3/4, diferenciados por su marca, su serie y por el código IADC. Se pone como referencia los meses en que fueron evaluadas.

2.4.8 Recolección de datos

La recolección de datos se realizó diariamente en los reportes de perforación y la oficina técnica de AYOR S.A.C. los digitalizó para tener una base de datos consolidada. No se hizo registro específico de los parámetros de perforación aplicados a cada broca, sin embargo, se consideró aplicar un rango promedio a todas las brocas por sus características similares y por las condiciones del macizo rocoso presente.

La base de datos consolidada nos sirvió para determinar la vida útil promedio de las brocas tricónicas, determinar la velocidad de perforación, estimar el costo por metro perforado y comparar la relación del PDC y TDC en la perforación del Tajo Norte de Sociedad Minera El Brocal.

2.4.9 Estructura del costo de perforación aplicado

Para obtener el costo total de perforación (TDC), se recurre a la formula siguiente:

$$TDC = PDC + \frac{COSTO DE EQUIPO POR HORA}{METROS PERFORADOS POR HORA} + \frac{COSTO DE LA BARRA}{METROS PERFORADOS}$$

El TDC resultante viene de la suma del costo parcial de perforación (PDC), costo del equipo y el costo de barra (Tabla 32)

$$PDC = \frac{PRECIO DE LA BROCA}{METROS PERFORADOS}$$

El PDC resulta de dividir el precio de la broca entre la vida útil de la broca, así mismo se hace un PDC para barras (Tabla 29 y Tabla 30).

$$COSTO DE EQUIPO = ALQUILER + MANTENIMIENTO + COMBUSTIBLE + MANO DE OBRA$$

En el costo del equipo se agrega el costo de personal, el costo de mantenimiento, costo de combustible y el costo del alquiler (Tabla 31).

Se presenta a continuación la estructura de perforación utilizada en el año 2017

Tabla 29. Costo de brocas 2017

BROCA		SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK
Precio unitario	\$	1,382	1,428	1,220	1,388	1,613
Vida de broca	m	1,982	2,271	1,694	1,884	1,405
Costo por broca (PDC)	\$/m	0.70	0.63	0.72	0.74	1.15

Tabla 30. Costo de barras 2017

BARRA, ACCESORIOS		Barra	Barra	Barra	Barra	Barra
Precio unitario	\$	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Vida de barra	m	34,344	34,344	34,344	34,344	34,344
Costo por barra	\$/m	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

Tabla 31. Costo de equipo 2017

EQUIPO		SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK
Velocidad de penetración	m/h	78	71	82	68	66
Costo de equipo por hora	\$/h	242	242	242	242	242
Mano de Obra	\$/h	50	50	50	50	50
Combustible	\$/h	50	50	50	50	50
Mantenimientos menores	\$/h	12	12	12	12	12
Alquiler	\$/h	130	130	130	130	130
Costo por equipo	\$/m	3.09	3.43	2.94	3.56	3.68

Tabla 32. Costo total de perforación por broca 2017

ITEM		SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK
Costo por broca (PDC)	\$/m	0.70	0.63	0.72	0.74	1.15
Costo por barra	\$/m	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Costo por equipo	\$/m	3.09	3.43	2.94	3.56	3.68
Costo por metro (TDC)	\$/m	3.91	4.18	3.78	4.41	4.95

Como se muestra en la Tabla 32, se tiene un resultado del rendimiento de brocas del 2017. Este costo total de perforación esta diferenciado por marca de brocas y se observa que la marca Mammoth y Shareate tuvieron rendimientos similares.

Cabe mencionar que la mayor cantidad de brocas utilizadas en el año 2017 fue de la marca Shareate, es decir su rendimiento es confiable. Por las características descritas en la Tabla 26, el rendimiento promedio, la base de datos acumulada y la experiencia de los operadores se le considero como broca testigo. Lo que se pretende con la evaluación es mejorar los resultados de la broca testigo y el rendimiento promedio del año 2017 mostrado en la Tabla 33.

Tabla 33. Resumen de costos 2017 por broca

Análisis	Und	SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK	PROMEDIO
Costo Broca (PDC)	\$/m	0.70	0.63	0.72	0.74	1.15	0.76
Costo por Metro (TDC)	\$/m	3.91	4.18	3.78	4.41	4.95	4.24

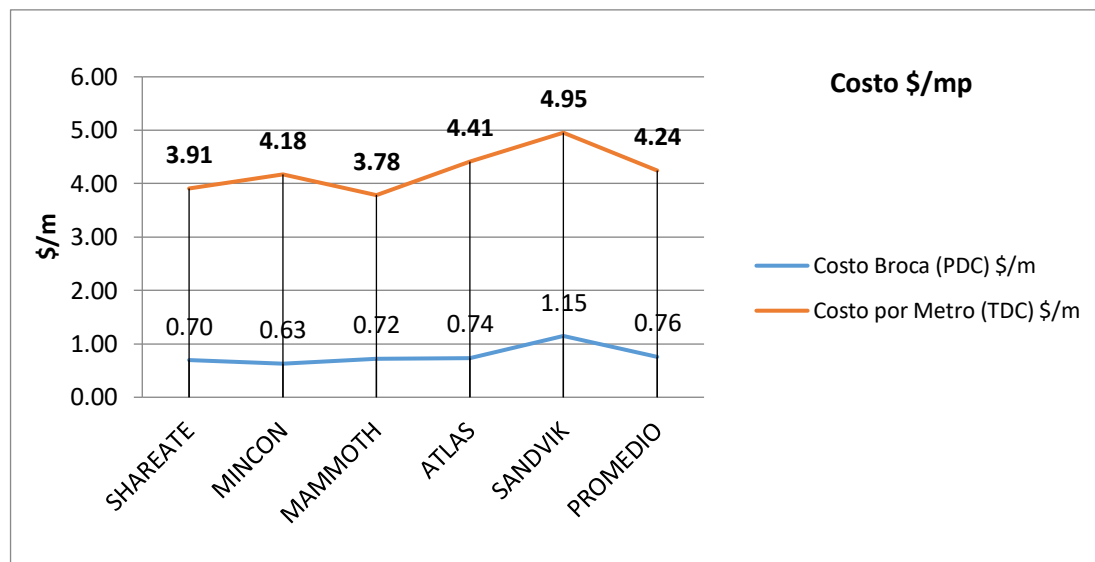


Figura 52. Resumen de costos año 2017.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la identificación de la broca tricónica de diámetro 6 3/4” con el mejor rendimiento para la perforación al menor costo en el tajo norte, se realizó la evaluación de distintas marcas de brocas. Esta evaluación se realizó desde el mes de junio hasta 2018 hasta febrero 2019, siguiendo la metodología de estudio descriptivo cuantitativo y exploratorio. Por lo tanto, los resultados son comparaciones de los rendimientos de brocas según la problemática planteada en un inicio.

Aparte se tomó los datos de perforación del mes de enero a mayo del 2018, donde se utilizó la broca de marca SHAREATE 6 3/4” SA642G, dicha broca tuvo un desempeño promedio. Estos datos se usaron para hacer las comparaciones con las demás brocas, además también nos sirvió para solicitar brocas tricónicas de características similares.

2.5.1 Vida útil de brocas tricónicas evaluadas

En la Figura 53 se muestra la vida útil promedio de las brocas tricónicas evaluadas. La medición se registró en metros perforados por broca (m-p/broca), se muestran un histograma en orden correlativo de mayor a menor vida útil.

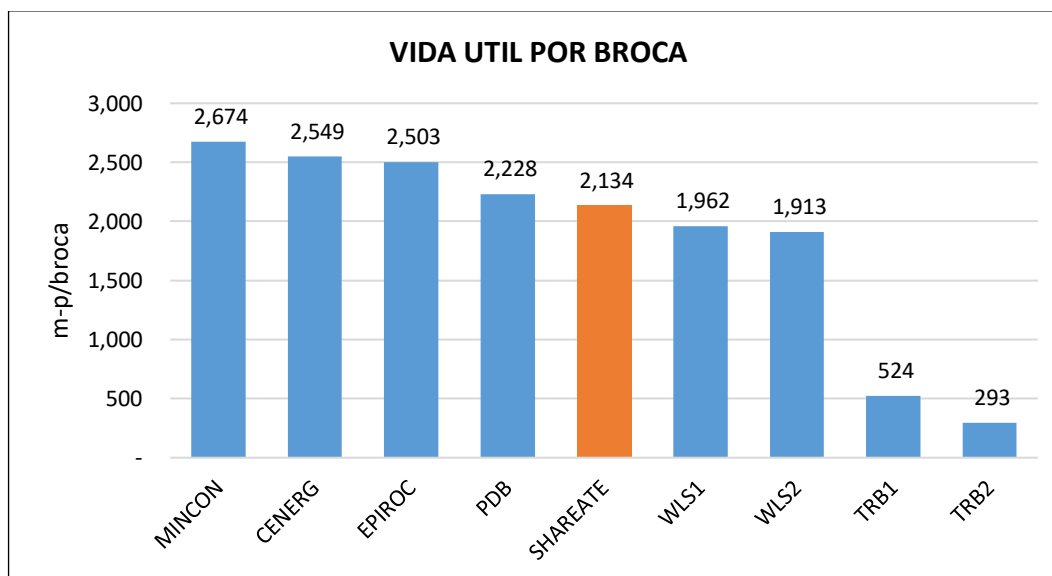


Figura 53. Vida útil promedio de brocas tricónicas evaluadas.

Observación específica 1: La broca de la marca Mincon, tiene el mejor rendimiento con una vida útil de 2674 m-p/broca, con lo cual cumplimos el primer objetivo específico. Hay una diferencia de 540 m con nuestra broca testigo y una diferencia de 814.4 m con el rendimiento promedio del año 2017.

En el caso de las brocas TRB, muestran bajo rendimiento ya que no están diseñadas para el macizo rocoso presente en el tajo, además su diseño no es el óptimo para perforación de rocas fracturadas. La broca TRB1 632 que está con 524 metros de recorrido y la broca TRB2 715 que solo tiene 293 metros de recorrido. Por lo tanto, los datos de la broca TRB2 715 se descartan por error y no se tendrá consideración para las posteriores comparaciones estadísticas.

En la Tabla 34 se muestra el resultado de la vida útil que alcanzaron las brocas evaluadas y el porcentaje de recorrido registrado según la zonificación de dureza de la roca en el tajo. En este caso se hace la observación de que la broca EPIROC tuvo un buen desempeño, a pesar de haber perforado un 66% en roca semidura, esto en relación con nuestra broca testigo que el 85% de su recorrido lo hizo en roca de dureza media.

Tabla 34. Rendimiento de las brocas tricónicas

Puesto	Brocas		Dureza de roca			Vida útil (metros)
	Marca	% Semiduro	% Medio	% Suave	% Relleno	
1°	MINCON	28%	33%	0%	39%	2,674
2°	CENERG	23%	68%	0%	10%	2,549
3°	EPIROC	66%	0%	8%	26%	2,503
4°	PDB	29%	52%	0%	18%	2,228
5°	SHAREATE	13%	85%	0%	1%	2,134
6°	WLS1	36%	47%	0%	17%	1,962
7°	WLS2	45%	53%	0%	2%	1,913
8°	TRB1	17%	57%	0%	26%	524
9°	TRB2	0%	100%	0%	0%	293

2.5.2 Costo parcial de perforación de las brocas tricónicas

Se presenta los resultados en una tabla de comparativa que esta ordenado de menor a mayor costo de parcial de perforación (PDC). En la estimación de los datos intervinieron el precio de la broca tricónica y la vida útil promedio de la broca, dando como resultado el PDC expresado en US\$/metro perforado.

Observación específica 2: Como se muestra en la Tabla 35, cumplimos con estimar el costo por metro perforado de las brocas tricónicas de diámetro 6 3/4" en el tajo norte de SMEB, que es uno de los objetivos específicos de la evaluación.

Tabla 35. Comparación del PDC de las brocas evaluadas

N°	Marca	Metros perforados	PDC (US\$/m)
1°	MINCON	2,674	0.46
2°	CENERG	2,549	0.49
3°	EPIROC	2,503	0.49
4°	PDB	2,228	0.53
5°	SHAREATE	2,134	0.64
6°	WLS1	1,962	0.69
7°	WLS2	1,913	0.70
8°	TRB1	524	2.69

El menor costo parcial de perforación corresponde a la broca de marca Mincon, con 0.46 US\$/m. Se observa una diferencia positiva con nuestra broca testigo de 0.18 US\$/m y una diferencia de 0.3 US\$/metro perforado con el PDC promedio del año 2017. Estos resultados son significativamente positivos, en relación a los KPI del año anterior.

2.5.3 Velocidad de perforación efectiva de las brocas tricónicas

En este resultado solo está considerado la perforación efectiva del taladro. No está considerado los movimientos adicionales, como el posicionamiento y traslado del equipo de perforación. La velocidad de perforación efectiva (VP), es un indicador clave para identificar el desempeño de la broca en el macizo rocoso que ha sido perforado.

Se observa en la Tabla 36 que las brocas no tienen mayor diferencia en la velocidad de perforación efectiva, salvo la marca Mincon que tiene una velocidad de 115.8 m/h. que supera en 15 metros a la broca de marca Epiroc. Este resultado podría deberse porque la broca Mincon, perforó un 28% en roca semidura, 33% en roca media y 39% en relleno, mientras que la broca Epiroc, perforó, 66% en roca semidura, 8% en suave y 26 % en relleno.

Tabla 36. Comparación de la velocidad de perforación efectiva

N°	Marca	Vida útil (m)	VP (m/h)
1°	MINCON	2674.4	115.8
2°	EPIROC	2503.4	101.8
3°	PDB	2227.7	99.6
4°	WLS1	1961.6	98.2
5°	CENERG	2548.9	97.6
6°	WLS2	1912.6	95.6
7°	SHAREATE	2134.1	95.5
8°	TRB1	524.3	91.5

2.5.4 Velocidad de perforación ajustada

En esta Tabla 37 se muestra una velocidad de perforación ajustada (VPA) donde se incluye los movimientos de posicionamiento y traslado de equipo que representan el 30% del horometro mensual. Es decir, se hace la división de los metros perforados conciliados entre el horometro utilizado por mes.

Tabla 37. Comparación de la velocidad de perforación ajustada

N°	Marca	PDC (US\$/m)	VPA (m/h)
1°	MINCON	0.46	85.80
2°	EPIROC	0.49	71.80
3°	PDB	0.53	69.61
4°	WLS1	0.69	68.20
5°	CENERG	0.49	67.64
6°	WLS2	0.70	65.58
7°	SHAREATE	0.64	65.48
8°	TRB1	2.69	61.45

En la Tabla 37 se muestra que la broca Mincon supera a todas las brocas en velocidad de perforación, sin embargo, la diferencia en las demás brocas es menor. Las zonas de perforación de cada broca fueron similares, por ello similitud en la VPA.

2.5.5 Relación de los resultados con el TDC

Tabla 38. TDC de las brocas tricónicas evaluadas.

N°	Marca	VPA	PDC	TDC
1°	MINCON	85.80	0.46	3.20
2°	EPIROC	71.80	0.49	3.77
3°	CENERG	67.64	0.49	3.96
4°	PDB	69.61	0.53	3.91
5°	SHAREATE	65.48	0.64	4.23
6°	WLS1	68.20	0.69	4.13
7°	WLS2	65.58	0.70	4.29
8°	TRB1	61.45	2.69	6.52

La Tabla 38 muestra que testigo la broca testigo tiene un Costo Total de Perforación de 4.23 US\$/m. y el TDC menor corresponde a la broca de marca Mincon con 3.20 US\$/m.

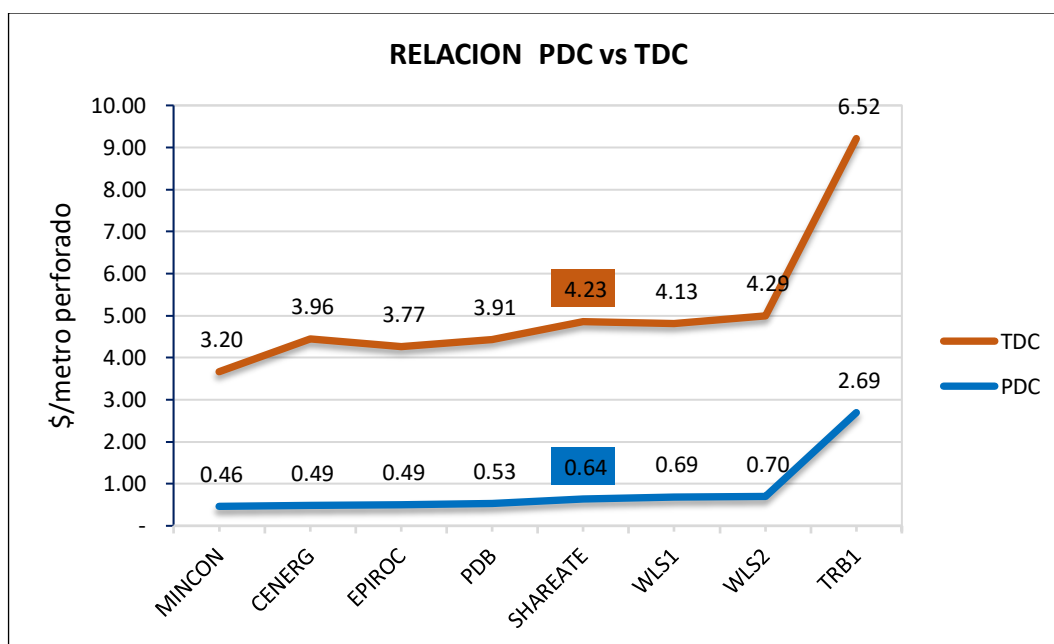


Figura 54. Relación del PDC y el TDC.

Observación específica 3: En la Figura 54 se tiene los resultados que indican que el PDC de las brocas tricónicas y el TDC proyectado, guardan una relación proporcional. Es decir que si aumenta el PDC también se incrementa el TDC. Sin embargo, la broca Mincon, tiene una proporción menor, que se diferencia de las demás brocas, esto porque su velocidad de

perforación es significativamente mayor a las demás. El TDC de Mincon es de 3.20 US\$/m, es menor al TDC de la broca testigo es 4.23US\$/m, y al TDC promedio del 2017 4.24 US\$/m.

Con este resultado de cumple el tercer objetivo específico, la de comparar la relación del PDC y TDC en la perforación del Tajo Norte de SMEB.

2.5.5.1 Relación de la velocidad de perforación y el costo total de perforación

Se visualiza en la Figura 55 que la velocidad de perforación es inversamente proporcional al TDC. Es decir, mientras la velocidad de perforación se incrementa el TDC baja. Al visualizar la comparación se observa que no hay variación significativa en la velocidad de perforación de las brocas tricónicas, salvo la VP de la broca Mincon.

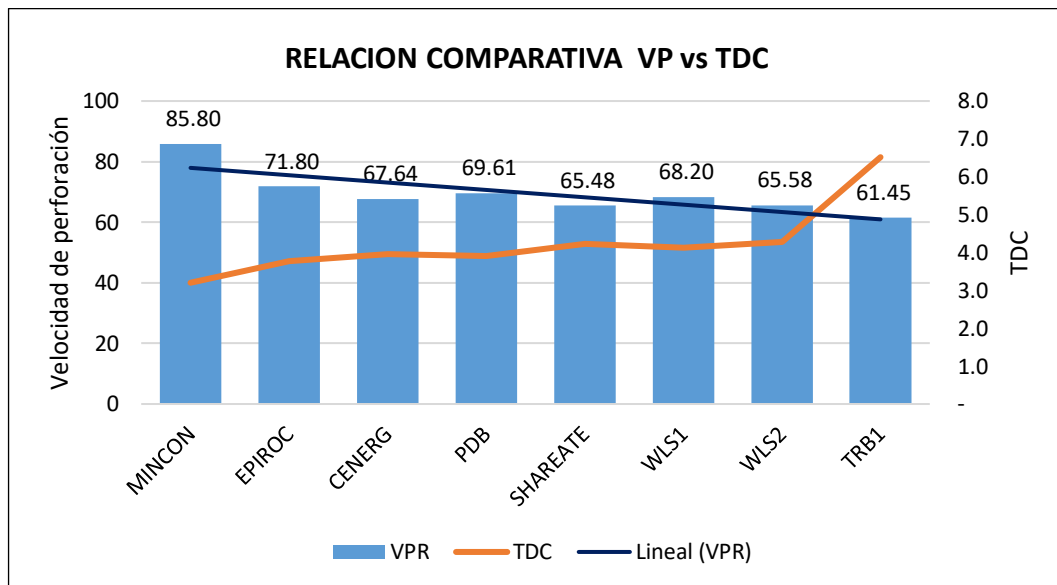


Figura 55. Relación comparativa entre la VP y el TDC.

En la Figura 56 se muestra un comparativo del TDC anual, año 2016 el TDC fue de 4.24 US\$/m, en el año 2017 fue de 4.24 US\$/m y en el año 2018 el TDC fue de 3.92 US\$/m. El 2018 se tuvo 299,905.62 metros perforados conciliados, haciendo una operación simple de multiplicación, tendríamos 95969.79 US\$ de ahorro.

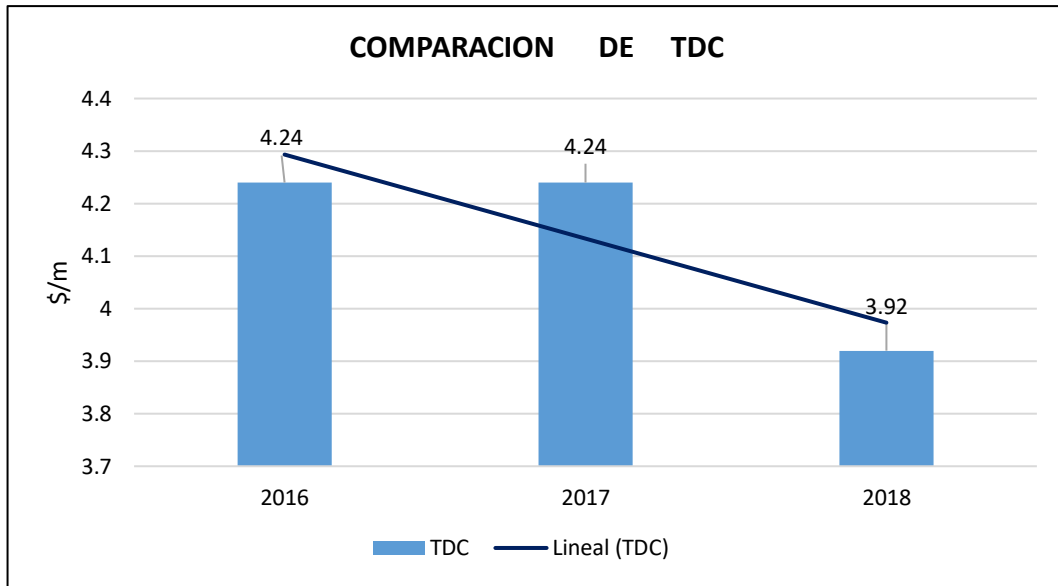


Figura 56. Comparación del TDC por año

2.5.5.2 Evaluación de la relación de la vida útil de brocas y el TDC

Se visualiza en la Figura 57 que la vida útil en metros perforados por broca es inversamente proporcional al TDC. Es decir, que el TDC baja si se incrementa los metros perforados por broca. Se observa una diferencia significativa entre la vida útil alcanzado por las brocas tricónicas evaluadas. La broca Mincon su vida útil es de 2674 m y su TDC es de 3.20 US\$/m.

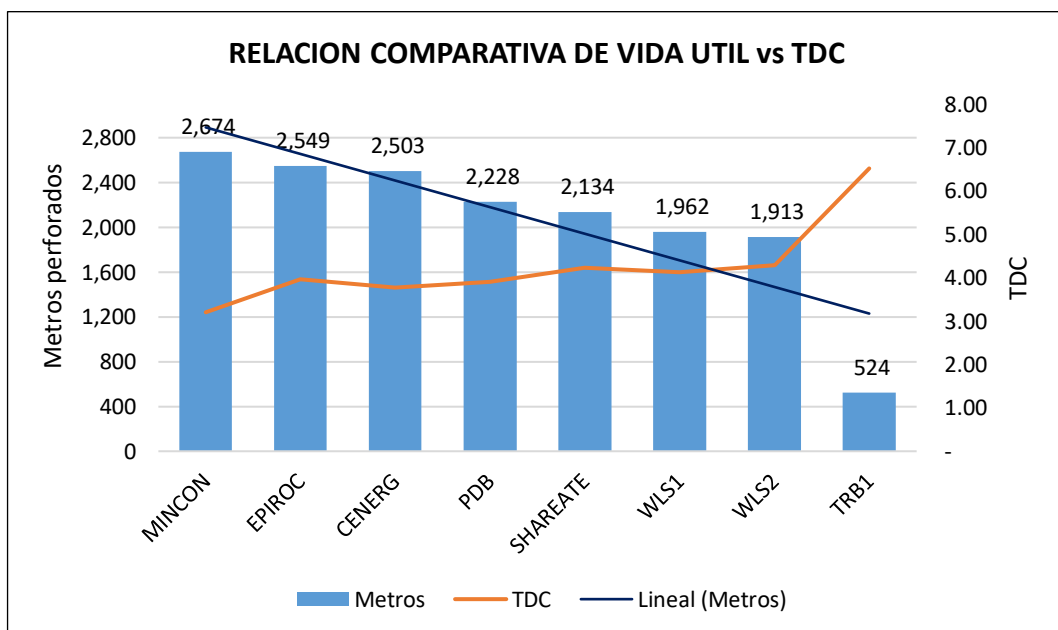


Figura 57. Relación comparativa entre rendimiento de brocas y el TDC.

2.5.5.3 Rendimiento de las barras de perforación

En la Figura 58 se muestra el rendimiento promedio de las barras de perforación. En el año 2016 fue 33591 metros, en el año 2017 fue de 34344 metros y en el año 2018 fue de 68216 metros. Esto porque se implementó una mejora operacional en el año 2018, para incrementar la vida útil de las barras con resultados positivos. Las barras BOX BOX se le hizo un doble giro como se explica en el ANEXO 4.

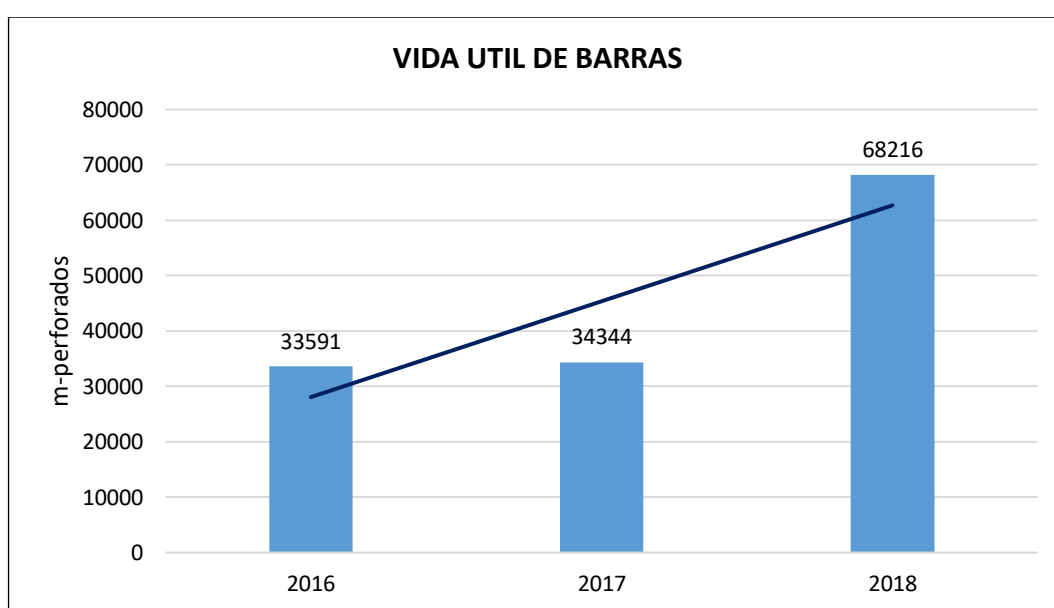


Figura 58. Rendimiento promedio de barra de perforación.

Además, se redujo el diámetro interno de la bocina del centralizador de 142 mm para barras nuevas y 136 mm para barras con doble giro. Este cambio nos brindaba una mayor estabilidad de las barras de perforación que ya tenían el 50% de recorrido. Estas mejoras implementadas incrementó la vida útil de las barras de perforación y redujo el costo de los aceros (Barra, bitsub, toptsub y bocina centralizadora), tal como se muestra en la Figura 59. En el año 2016 el costo de las barras fue de 0.12 US\$/m, en el año 2017 fue 0.12 US\$/m y el año 2018 se redujo a 0.08 US\$/m. El costo se redujo drásticamente por la mayor vida útil de las barras como se muestra en la Figura 60

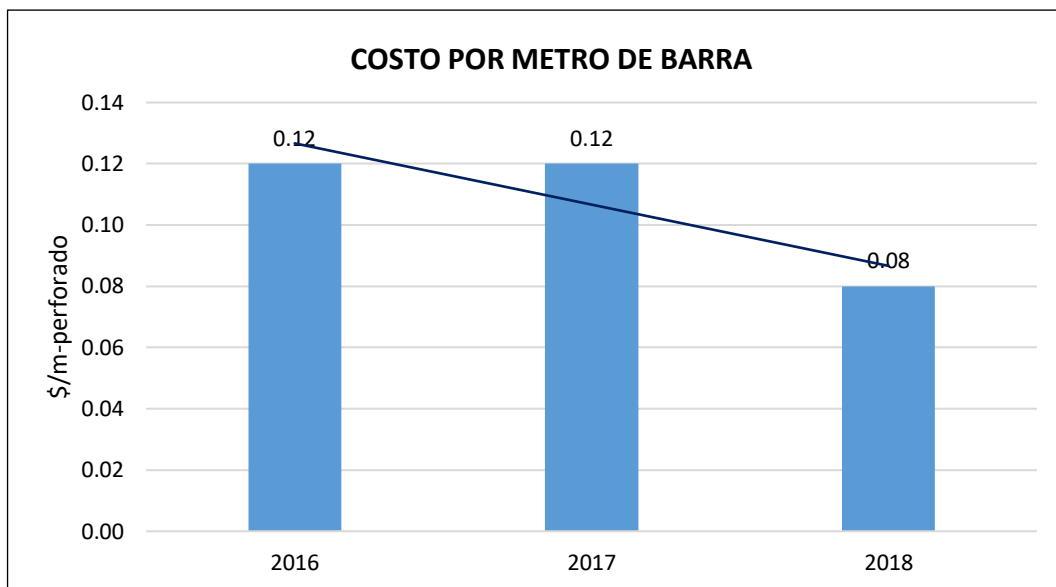


Figura 59. Costo por metro perforado de las barras de perforación.

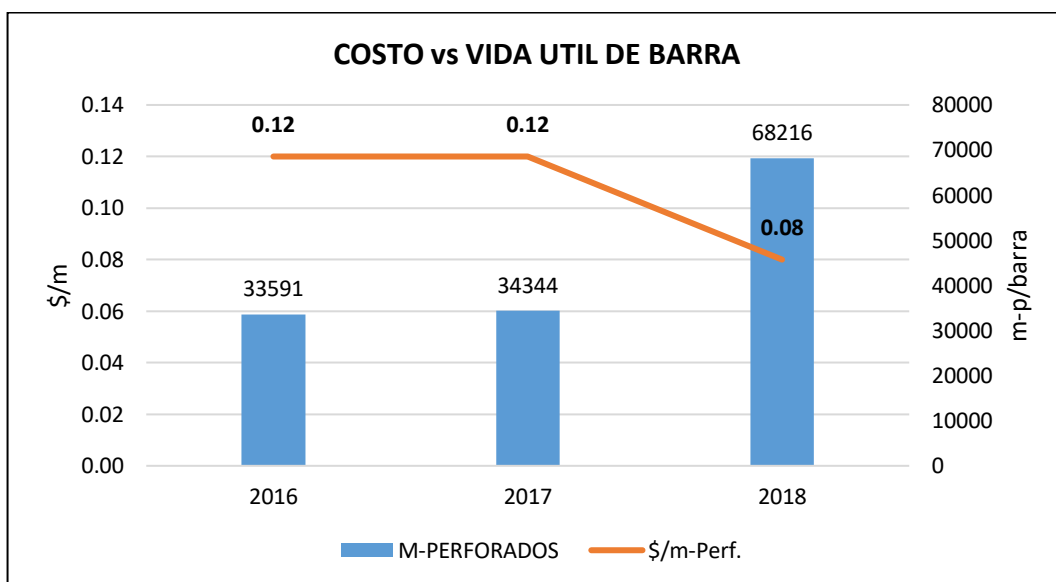


Figura 60. Comparativo de costo y la vida útil de las barras

2.6 CONCLUSIONES

- a) Se concluye que la broca tricónica de diámetro 6 ¾” con el mejor rendimiento para la perforación en el Tajo Norte, pertenece a la marca Mincon; que alcanzó una vida útil promedio de 2674.4 m, una velocidad de perforación de 85.80 m-p/h, un costo parcial de perforación (PDC) de 0.46 US\$/m y un costo total de perforación (TDC) de 3.20 US\$/ m. Las brocas de marcas Cennerg y Epiroc alcanzaron una vida útil de 2549 m y 2503 m respectivamente. Los resultados superan significativamente a la vida útil de la broca testigo y la vida útil promedio de las brocas 2017.
- b) Se concluye que el menor costo parcial de perforación (PDC) y costo total de perforación (TDC) corresponde a la broca Mincon, con 0.46 US\$/m y 3.20 US\$/m respectivamente. Las brocas Epiroc y Cennerg también tienen un menor costo del PDC y TDC en relación a la broca testigo.
- c) Se concluye que hay una relación proporcional entre el PDC y el TDC del tajo norte, sin embargo, hay una relación inversamente proporcional con la Velocidad de perforación y la Vida Útil. Por lo tanto, una mayor VP y mayor Vida Útil de las brocas tricónicas influirá directamente en la reducción del Costo Total del Perforación.

2.7 RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda optar por la broca de código IADC 632 y 642 para la perforación rotativa en el Tajo Norte de SMEB.

- b) Se recomienda seguir evaluando las brocas en función de la velocidad de perforación y vida útil.

2.8 BIBLIOGRAFÍA

- Agreda, C. (2011). *Estrategias para la Reducción de Costos en Perforación y Voladura en Minería Superficial*. UNI, Perú.
- 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/.
- Bernaola, J. (2003). *Manual de perforación y voladura*. Laboratorio de tecnología minera, Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/21848/1/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf
- Coffman, K. W. and Connors J. (1974). *Rolling Cutter Bit Developement and Aplication in the Mining Industry – USA*
- Huambachano, D. (2018). *Mejoramiento de la distribución de la flota de carguío y acarreo en tajo abierto* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Llaique, A. & Sánchez, W. (2015). *Determinación del costo total de perforación para optimizar esta operación unitaria en mina Modelo a tajo abierto, Cajamarca – Perú, 2015* (Tesis de Pregrado). Universidad privada del Norte. Cajamarca, Perú. Recuperado de <http://refi.upnorte.edu.pe/handle/11537/5284>
- López, C., lopez, E., Pernia, J. M. y Pla, F. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Edición Instituto Geológico y Minero de España; Madrid. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/317978295/MANUAL-DE-PERFORACION-LOPEZ-JIMENO-pdf>
- Manzaneda, J. (2015). *Optimización de la flota de carguío y acarreo para el incremento de producción de material de desbroce de 400k a 1000k BCM – U.E.A. El Brocal Consorcio Pasco Stracon GyM* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Peru.

- *Memoria anual de el brocal. (2018)*. Recuperado de http://www.elbrocal.pe/facipub/upload/cont/1833/files/memoria_anual_2018_el_brocal_web_vf.pdf
- Ortiz, J. (2000). *Perforación por rotación. Apuntes del curso de explotación de minas*. Recuperado de https://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/MI57E/1/material_docente/bajar?id_material=160293
- Quenaya, R.D. (2014). *Informe de experiencia profesional: Perforación y Voladura próximo a Centros Poblados Caso Sociedad Minera el Brocal* (Informe de pregrado). UNI. Lima.
- Roldan Juarez, A. (2012). *Parámetros de perforación y rendimiento de las brocas tricónicas en el Tajo abierto de la mina Tintaya y propuesta para el Tajo abierto Antapaccay, 2012* (Tesis de Pregrado). UNAMBA, Apurímac, Perú. 265pp. Recuperado de <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/265>
- Sanchez Villalta, A. (2017). *Reducción de desgaste en el uso de brocas tricónicas en la mina Toquepala* (Tesis de título profesional). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- 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>.
- STRACON GyM. (2010). *Manual de perforación El Brocal*
- Umasi, W. (2013). *Estudio de comparación entre rendimientos en brocas de 12 ¼" en yacimientos skarn a tajo abierto para selección óptima*. (Tesis de Pregrado). UNSA, Arequipa, Perú. 165pp. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3947>

ANEXOS

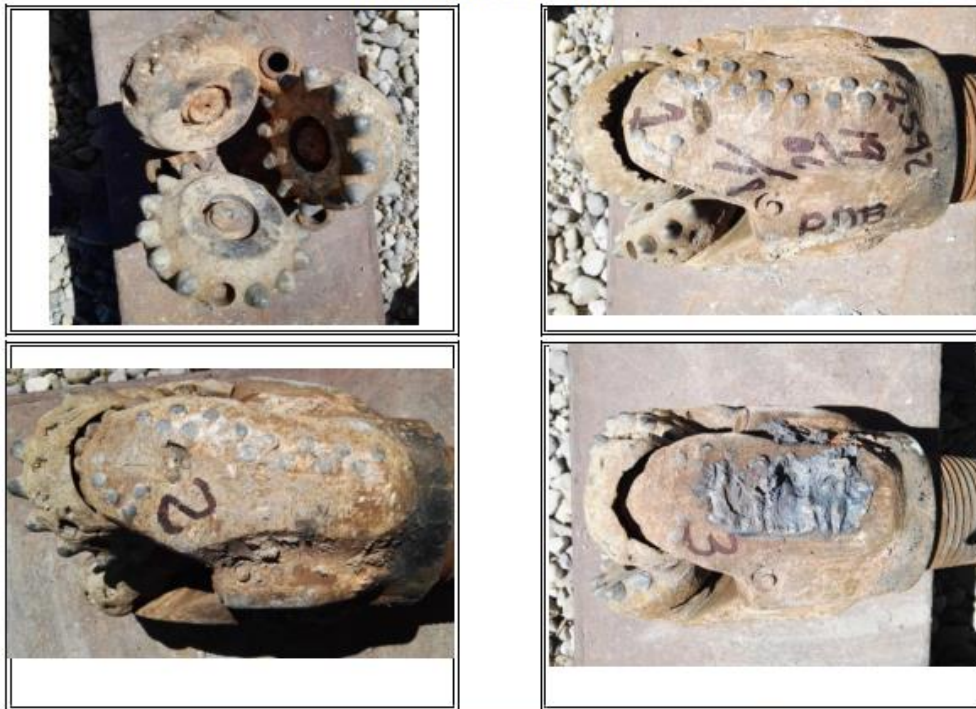
ANEXO 1: Formato interno de control de desgaste de brocas.



AYOR S.A.C.
 REPORTE BROCAS FUERA DE USO

Compañía Minera:	EL BROCAL		Tajo:	TAJO NORTE		Fecha:	1-Jun-2018			
Perforadora N°:	DML-3	Modelo:		CFM	1600	PSI	110	Condición Mecánica	Buena	
Montaje	1-Jun-2018	Desmontaje	4-Jun-2018	Banco	T. Norte		Profundidad Pozo:	7		
Número Serie:	6255665	Diametro:	6 3/4"	Modelo:	GX612		Boquilla	14 mm	Cab PSI	70
Total Metros	2592	Total Horas	25.00	Vel. Penetración:	71.00	Precio	\$ 1,250	Cost Hor. Equi	\$ 250	
Pulldown	1600	R.P.M.	120	Inyección Agua	Normal	Terreno	Suave	T.D.C.	4.00	

DESCRIPCIÓN DEL DESGASTE



ESTRUCTURA CORTE				RODAMIENTO		OTROS	
I	G	D	L	B	L	O	ST
5	8	CR	AC	8	C1-C3	ER	M

I	Insertos Internos	5	5/8 Desgaste de la Estructura de Corte
II	Insertos Externos	8	Desgaste Total de la Estructura de Corte
III	Origen del Desgaste	CR	Pérdida de Nariz
IV	Condición de Rodamientos	8	Desgaste Total de los Rodamientos
V	Ubicación Falla Rodamientos	C1-C3	Conos 1 & 3
VI	Otro Desgaste	ER	Erosión
VII	Condición de Faldones	M	M - Desgaste Moderado del Faldon

VII Comentarios
 Se observa que se perdió la nariz de los tres conos, perdida de los insertos exteriores, los insertos medios se mantiene con un ligero desgaste. Los rodamientos 1 y 3 se descolgaron, producto de la erosión de los aceros. Hubo fracturamiento de insertos de los tres conos.

ANEXO 2. Resultados de la evaluación de broca tricónica de diámetro 6 3/4”, con la velocidad de perforación efectivas. Solo se considera perforación efectiva de los taladros, sin considerar movimientos ni traslados de equipo al área de perforación.

EVALUACION DE BROCAS 2018 - 2019															
N°	Marca	Serie	IADC	Diámetro	Nozzles	Equipo	% Semiduro	% Medio	% Suave	% Relleno	Metros	Horas	VP	PDC	TDC
10	MINCON	AP60	632	6 3/4	14 MM	DML	28%	33%	0%	39%	2,874	21.1	115.8	0.46	1.98
10	CENERG	CN60	632	6 3/4	14 MM	DML	23%	68%	0%	10%	2,549	26.1	97.6	0.49	2.63
10	EPIROC	F67	642	6 3/4	14 MM	DML	66%	0%	8%	26%	2,503	22.0	101.8	0.49	2.18
10	PDB	GX612	612	6 3/4	14 MM	DML	29%	52%	0%	18%	2,228	22.4	99.6	0.63	2.64
47	SHAREATE	SA642G	642	6 3/4	14 MM	DML	13%	85%	0%	1%	2,134	22.4	95.5	0.64	2.74
5	WLS1	R278	622Y	6 3/4	14 MM	DML	36%	47%	0%	17%	1,962	18.8	98.2	0.69	2.89
5	WLS2	P912	622	6 3/4	14 MM	DML	45%	53%	0%	2%	1,913	20.0	95.6	0.70	2.78
3	TRB1	632	632	6 3/4	14 MM	DML	17%	57%	0%	26%	524	5.7	91.5	2.89	4.86
3	TRB2	715	715	6 3/4	14 MM	DML	0%	100%	0%	0%	293	2.90	101.15	4.82	6.96
											1,864	18	99.63	1	3.27

ERROR **PDC: COSTO PARCIAL DE PERFORACIÓN (\$/METRO PERFORADO)**
BROCA TESTIGO **TDC: COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN**

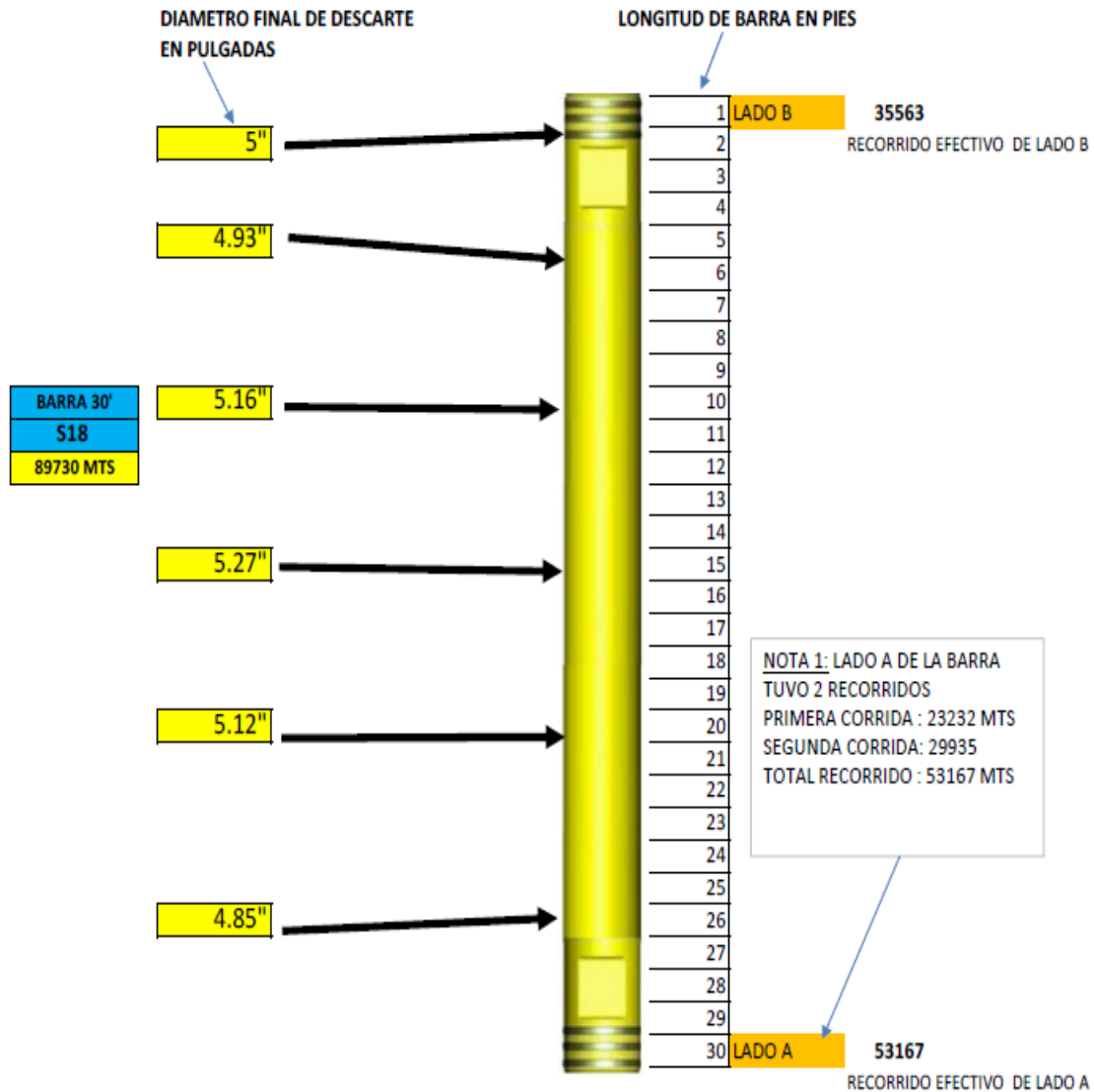
ANEXO 3. Fotografías de Evaluación de brocas y comparaciones.



ANEXO 4. Evaluación de desgaste del diámetro de barra BOX BOX 5 1/2" ϕ , con 2 giros de barra.

BARRA S18: BARRA ϕ 5.1/2" X PARED=3/4" LONG.=30' - HILO 3.1/2" BECO BOX-BOX

EQUIPO PERFORADORA DML 3



OBSERVACIONES: SE HIZO 2 GIROS DE LA BARRA

Primer recorrido con broca lado A: 23232 m., se giró el box a 5.2" de desgaste del diámetro.

Segundo recorrido con broca lado B: 35563 m., se gira el box a 5" de desgaste del diámetro.

Tercer recorrido con broca lado A: 29935 m., se descarta el box a 4.85" de desgaste del diámetro.

Recorrido total de barra: 89730 m.

CONCLUSIÓN:

Se concluye que 1/16" del diámetro de la barra se desgasta en 5000 metros de recorrido aproximadamente, esto en condiciones de roca media en el Tajo Norte de El Brocal.

ANEXO 5. Calculo de empuje de minimo y maximo para rotura de la roca

EMPUJE LIMITE TEORICO SOBRE LA BROCA DE 6 3/4" 37000 lb

CALCULO DE EMPUJE MINIMO Y MAXIMO PARA ROMPER LA ROCA

$$E_{min} = 28.5 \times RC \times D$$

$$E_{max} = E_{min} \times 2$$

CONSTANTE	RESISTENCIA COMPRESIVA DE LA ROCA (Mpa)	DIAMETRO DE BROCA (pulg)	Empuje minimo (lb)	Empuje maximo (lb)	Empuje necesario del equipo (lb)
28.5	1	6.75	192	385	
28.5	5	6.75	962	1924	2500.875
28.5	10	6.75	1924	3848	
28.5	15	6.75	2886	5771	
28.5	20	6.75	3848	7695	
28.5	25	6.75	4809	9619	12504.375
28.5	30	6.75	5771	11543	
28.5	35	6.75	6733	13466	
28.5	40	6.75	7695	15390	
28.5	45	6.75	8657	17314	
28.5	50	6.75	9619	19238	25008.75
28.5	55	6.75	10581	21161	
28.5	60	6.75	11543	23085	
28.5	65	6.75	12504	25009	
28.5	70	6.75	13466	26933	
28.5	75	6.75	14428	28856	
28.5	80	6.75	15390	30780	40014
28.5	85	6.75	16352	32704	
28.5	90	6.75	17314	34628	
28.5	95	6.75	18276	36551	
28.5	100	6.75	19238	38475	50017.5
28.5	105	6.75	20199	40399	
28.5	110	6.75	21161	42323	
28.5	115	6.75	22123	44246	
28.5	120	6.75	23085	46170	
28.5	125	6.75	24047	48094	62521.875

En el caso de la cabina del equipo DML los manómetros estan en PSI:

1000 PSI aplicados a una broca de 6 3/4" equivalen a 3500 lb. Sin embargo según sus fichas tecnicas soportan hasta 52000 lb, es decir, 1500 PSI. Asi mismo hay que considerar que la presion de cabina no es igual a la presion aplicada a la broca en el taladro, ya que hay perdidas de potencia por distintos motivos. Por lo que se aplica a la broca hasta un max de 1800 PSI en cabina.

ANEXO 6. Estructura de costos de perforacion**1. Costos unitarios promedio de las brocas en el año 2017 y 2018**

Costos de brocas año 2018

BROCA		MINCON	CENERG	EPIROC	PDB	WLS	SHAREATE	TRB
Precio unitario	\$	1,260	1,260	1,260	1,200	1,370	1,380	1,430
Vida de broca	m	2,667	2,295	2,503	2,228	1,937	2,101	439
Costo por broca	\$/m	0.47	0.55	0.50	0.54	0.71	0.66	3.26

Costos de brocas año 2017

BROCA		SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK
Precio unitario	\$	1,382	1,428	1,220	1,388	1,613
Vida de broca	m	1,982	2,271	1,694	1,884	1,405
Costo por broca (PDC)	\$/m	0.70	0.63	0.72	0.74	1.15

Se considera el costo de brocas más el traslado a la obra. Los valores son promedios de todo el consumo anual. Se visualiza que el año 2017 el costo de brocas es mayor y el 2018 hay una reducción, se debe a la mayor oferta de los proveedores. En la prueba de brocas se considera el precio con el cual fue adquirido en ese momento.

2. Costos de barras 2017

EJECUTADO 2017			
Aceros	Unid.	PRECIO	TOTAL
BARRAS	13	2300	29900
BITSUB	10	687	6870
TOPSUB	8	710	5680
CENTRALIZADOR	8	400	3200
LLAVES	1	1000	1000
			46650
<i>M-perf 2017</i>			383336.54
<i>Costo Aceros</i>			3588.46154
			0.12169463

Redondeamos 3588, 46 por tanto cada barra y sus accesorio tiene un costo de 3600 \$

3. Costo de equipo de perforacion 2017

COSTO DE EQUIPO

Velocidad de penetración	m/h	72
Costo de equipo por hora	\$/h	242
Mano de Obra	\$/h	50
Combustible	\$/h	50
Mantenimientos menores	\$/h	12
Alquiler	\$/h	130
Costo por equipo	\$/m	3.37

COSTO TOTAL DE PERFORACION (TDC)

COSTO DE PERFORACION EJECUTADO 2017

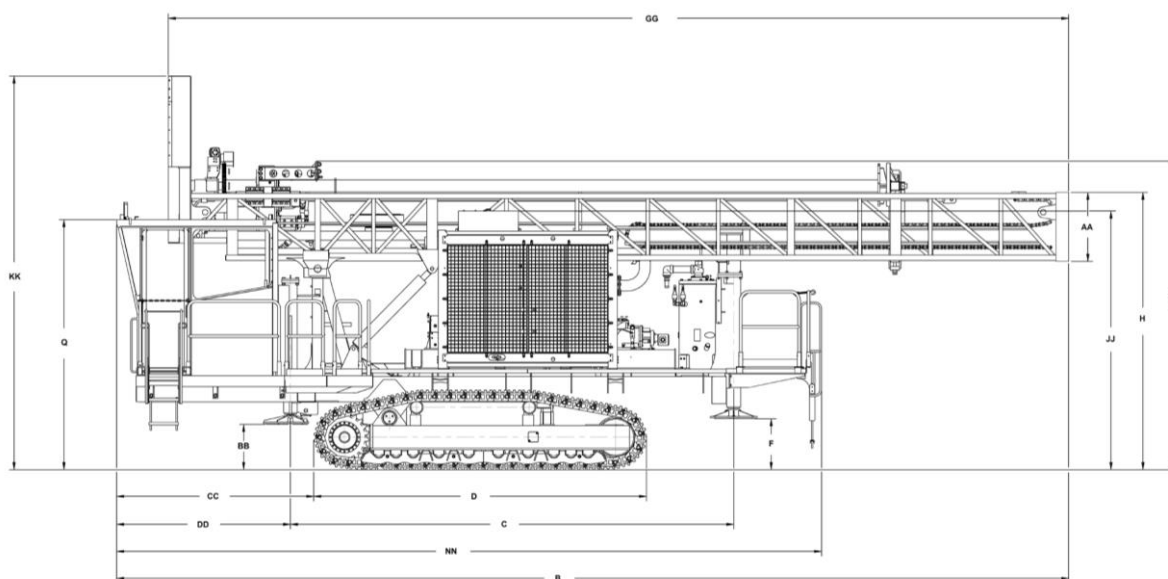
DESCRIPCION	UND	Perforadora DM	Perforadora DM	Perforadora DM	Perforadora DM	Perforadora DM	Perforadora DM
BROCA		SHAREATE	MINCON	MAMMOTH	ATLAS	SANDVIK	PROMEDIO
Precio unitario	\$	1,382	1,428	1,220	1,388	1,613	1,406
Vida de broca	m	1,982	2,271	1,694	1,884	1,405	1,860
Costo por broca (PDC)	\$/m	0.70	0.63	0.72	0.74	1.15	0.76
BARRA, ACCESORIOS		Barra de 5 1/2"	Barra de 5 1/2"	Barra de 5 1/2"	Barra de 5 1/2"	Barra de 5 1/2"	Barra de 5 1/2"
Precio unitario	\$	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Vida de barra	m	34,344	34,344	34,344	34,344	34,344	34,344
Costo por barra	\$/m	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
EQUIPO							
Velocidad de penetración	m/h	78	71	82	68	66	72
Costo de equipo por hora	\$/h	242	242	242	242	242	242
Mano de Obra	\$/h	50	50	50	50	50	50
Combustible	\$/h	50	50	50	50	50	50
Mantenimientos menores	\$/h	12	12	12	12	12	12
Alquiler	\$/h	130	130	130	130	130	130
Costo por equipo	\$/m	3.09	3.43	2.94	3.56	3.68	3.37
Costo por metro (TDC)	\$/m	3.91	4.18	3.78	4.41	4.95	4.24

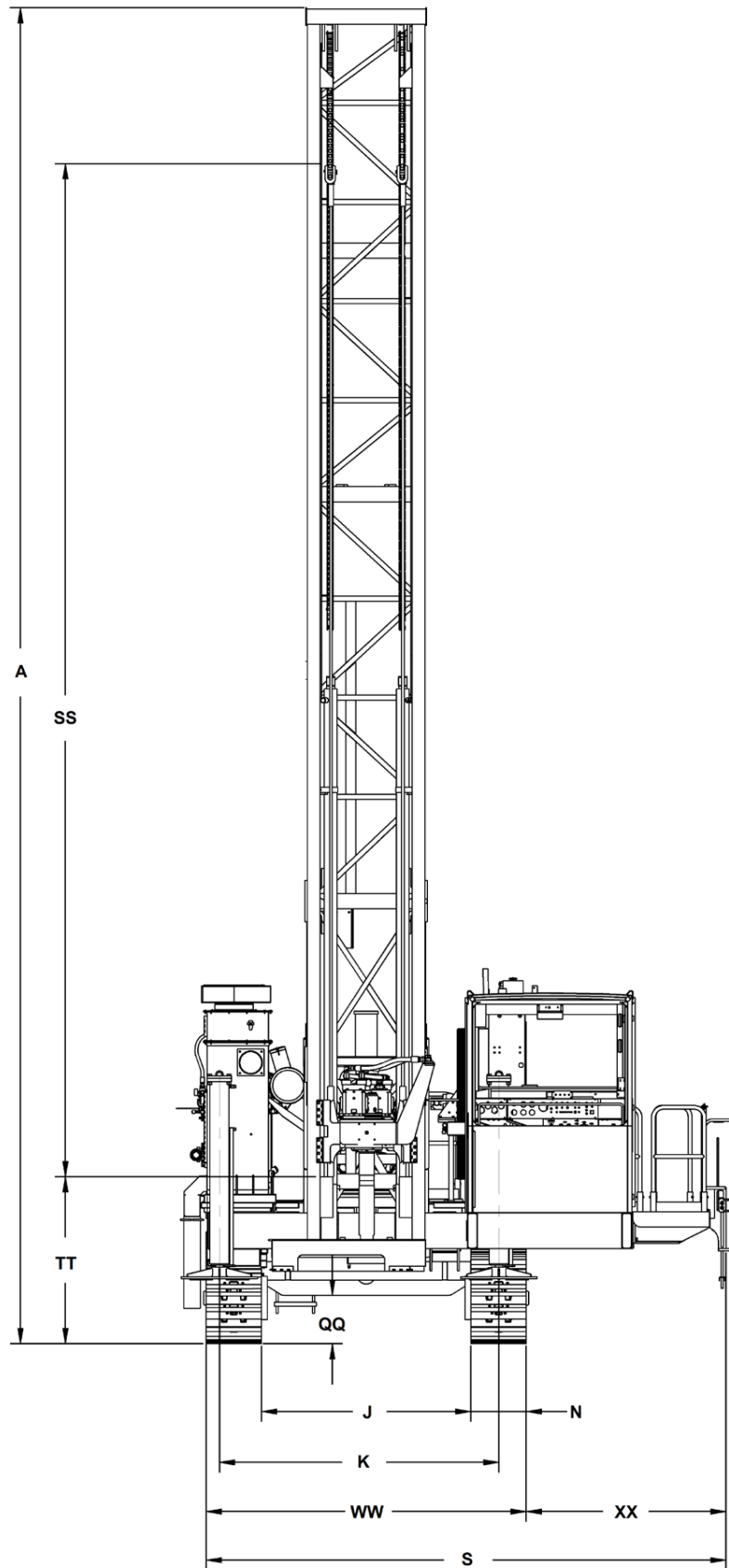
ANEXO 7. Equipo de perforacion utilizado DML atlas copco.

Podemos encontrar sus características técnicas en <https://www.epiroc.com/es-pe/products/drill-rigs/surface-blasthole-drill-rigs/dml>

Especificaciones técnicas del equipo de perforación DML

Especificaciones técnicas	Imperial	Métrico
Serie de productos	Serie DM	Serie DM
Método de perforación	Rotativa y martillo en fondo – Multi Pass	Rotativa y martillo en fondo – Multi Pass
Diámetro del barreno	5,88 - 10,62 inch	149 - 270 mm
Empuje hidráulico	60000 lbf	267 kN
Tracción hidráulica	22000 lbf	98 kN
Peso sobre la broca	60000 lb	27200 kg
Profundidad en una pasada	27,4 ft	8,5 m
Profundidad en una pasada, opción	32,4 ft	10 m
Profundidad máxima de barreno	175 ft	53,5 m
Profundidad de barreno máxima, opción	205 ft	62,5 m
Peso estimado	87000 - 110000 lb	39,5 - 50 t
Compresor	1,600 cfm @ 110 psi	45.3 m3/min @ 7.6 bar
Rotación de CABEZAL	161 R.P.M.	161 R.P.M.
Torque de rotación	7,200 lbf-ft	9,762 Nm
Altura de Torre	590 inch	14.99 m
Ancho de estructura	201 inch	5.11 m.
Largo de estructura solo chasis	387 inch	8.83 m.
Largo de estructura con torre echada	583 inch	14.99 m.
Altura con torre echada	221 inch	5.61 m.
Altura de cabina	143 inch	3.63 m.





ANEXO 8. Calculo de la velocidad de perforacion.

La velocidad de perforación es un indicador clave en el rendimiento de las brocas tricónicas

VELOCIDAD DE PERFORACION

DONDE:

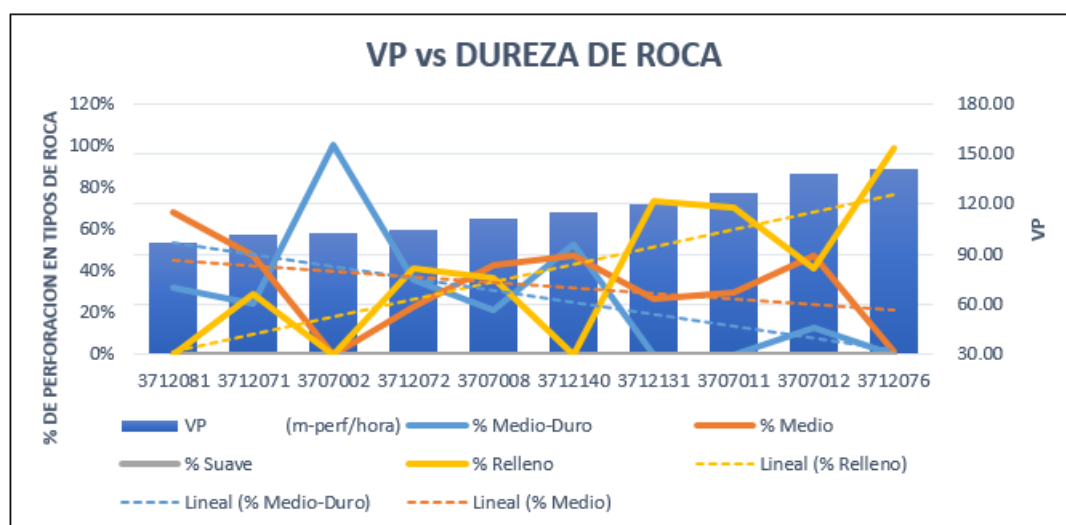
VP = Velocidad de Penetración (m/h)

RT = Recorrido del tricono (m)

HE = Horas efectivas perforadas (h)

$$VP = \frac{RT}{HE}$$

TIPO DE ROCA								
Broca	Serie	% Medio-Duro	% Medio	% Suave	% Relleno	RT (m-perf)	HE (h)	VP (m-perf/hora)
MINCON	3712081	31.67%	68.33%	0.00%	0.00%	3087	31.76	97.19
MINCON	3712071	24.33%	47.19%	0.00%	28.48%	2805	27.59	101.67
MINCON	3707002	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2669	25.98	102.72
MINCON	3712072	35.99%	22.94%	0.00%	41.07%	1709	16.42	104.08
MINCON	3707008	20.87%	42.42%	0.00%	36.71%	3529	31.65	111.53
MINCON	3712140	52.78%	47.22%	0.00%	0.00%	3258	28.32	115.03
MINCON	3712131	0.00%	26.37%	0.00%	73.63%	2721	22.69	119.89
MINCON	3707011	0.00%	29.93%	0.00%	70.07%	2800	22.14	126.48
MINCON	3707012	12.38%	46.90%	0.00%	40.72%	2546	18.43	138.14
MINCON	3712076	0.00%	1.36%	0.00%	98.69%	1621	11.47	141.24
PROMEDIO:		28%	33%	0%	39%	2,674	23.65	115.80



Observación: Como se muestra en la figura anterior, la mayor velocidad de perforación se alcanzó en relleno y la menor velocidad de perforación en roca media y semiduro.

ANEXO 9. Formato de reporte de perforacion utilizado para la recoleccion de los datos.

REPORTE DIARIO DE PERFORACIÓN

AYOR PASCO

N° MAQUINA: DM 3

OPERADOR: Luis COSME PULGAR

HORD. I: 17164.0 HORD. F: 17166.1

BROCA: 6253849

BARRA: S-15

ADAPTADOR: S-03

SUSTITUTO: REC

F-AYOR-01-01

MALLA: 6x6 - 4x4

FECHA: 04.06.2018

TURNO: MA NOCHE

N°	Banco	Proy.	N°Tal.	H. Inicio	H. Final	Total	Long./Tal	Long./Real	Dur. Material	Pull down	RPM	OBSERVACIONES
1	4168	44	A9	5 50	5 53	6.8	68		senipab	1500	130	
2		44	PP11	5 54	5 58	6.7	67		"	1800	120	
3		44	PP12	5 59	6 02	6.9	70		"	1500	130	
4		44	AM20	6 03	6 07	6.2	62		"	1500	130	
5		44	AM22	6 08	6 13	6.2	62		"	1300	140	
6		44	AM21	6 14	6 17	6.2	62		"	1500	150	
7		44	AT20	6 18	6 23	5.8	58		"	1600	120	
8		44	AT19	6 24	6 26	5.6	56		"	1600	120	
9	AT-21	44	AT22	6 27	6 33	5.6	56		"	1600	130	
10		44	A8	6 34	6 38	4.6	46		"	1500	130	
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												

DEMOIRA OPERATIVAS	DE	HASTA	TOTAL	DEMORAS MECANICAS	DE	HASTA	TOTAL
Charra y Chequeo Mag.				Falla Mecanica			
Calentamiento de Equipo				Falla Eléctrica			
Cambio de Frenos				Cambios de aceite			
Cambio de tricono				Engrase			
Cambio de tricono				Mantenimiento Preventivo			
Cambio de Barra				Otros			
Cambio de sustituto							
Parada por falta de malla							
Recibiendo Ordenes							
Traslado por violatura							
Abast. de Combustible							
Abastecimiento de agua							
Refrigerio							
Otros							
TOTAL				TOTAL			

OPERADOR

V'B* SUPERVISOR

MCF06002488