

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA**



**TESIS**

**REDUCCIÓN DEL COSTO DE PERFORACIÓN DTH**  
**POR SELECCIÓN DE LA COLUMNA DE**  
**PERFORACIÓN Y CUIDADO DE ACEROS**

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

**ELABORADO POR**  
**RIVERT LLAMOCCA HINOSTROZA**

**ASESOR**

**Ing. AUGUSTO TEVES ROJAS**

**Lima-Perú**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Mario Llamocca y Martha Hinostroza, a mi esposa Luz María López ,hermanas Medali y Ángela que me apoyaron con su esfuerzo en todo momento para continuar mi desarrollo personal y profesional, y a mi hijo Leandro que ahora es mi gran motivo para continuar luchando en mi vida personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A los profesores de la Escuela de Ingenieros de Minas de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.

A la empresa STRACON GYM. PROYECTO LA ZANJA. Por permitirme realizar las pruebas para culminar la tesis. A mi esposa, mis padres, hermanas y amigos que estuvieron siempre apoyándome. A todas las personas que de manera directa o indirecta colaboraron en la realización de ésta tesis.

## INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>  |
| FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....   | 2         |
| OBJETIVOS GENERALES .....  | 3         |
| MARCO TEÓRICO.....   | 4         |
| JUSTIFICACIÓN .....  | 5         |
| HIPÓTESIS GENERAL .....  | 5         |
| METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....  | 6         |
| <b>CAPITULO I: GENERALIDADES.....</b>  | <b>9</b>  |
| 1.1 ANTECEDENTES .....   | 9         |
| 1.2 UBICACIÓN .....  | 10        |
| 1.3 ACCESOS .....  | 11        |
| <b>CAPITULO II: GEOLOGÍA.....</b>  | <b>13</b> |
| 1.4 GEOLOGÍA REGIONAL .....  | 13        |
| 2.1.1 Rocas Volcánicas Terciarias .....  | 14        |
| 2.1.2 Rocas Intrusivas Terciarias .....  | 15        |
| 2.2 GEOLOGÍA LOCAL .....   | 16        |
| <b>CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO.....</b>   | <b>18</b> |
| 3.1 ANTECEDENTES GENERALES .....   | 18        |
| 3.2 ANTECEDENTES DEL SISTEMA DE PERFORACIÓN & VOLADURA .....   | 19        |
| <b>CAPITULO IV: ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PERFORACIÓN EN<br/>LA UNIDAD MINERA LA ZANJA .....</b> | <b>21</b> |
| 4.1 MÉTODOS DE PERFORACIÓN.....  | 21        |
| 4.2 PERFORACIÓN ROTATIVA .....   | 23        |
| 4.2.1 DISEÑO DE LAS BROCAS TRICONICAS .....  | 24        |
| 4.2.1.1 CONOS .....  | 24        |
| 4.2.1.2 BIT LEG .....  | 24        |
| 4.2.1.3 RODAMIENTOS A RODILLOS .....   | 26        |
| 4.2.1.4 RODAMIENTOS A BOLAS.....   | 26        |
| 4.2.1.5 COJINETES DE FRICCIÓN .....  | 26        |
| 4.2.1.6 BOTÓN DE EMPUJE.....   | 26        |
| 4.2.1.7 TOBERA JET .....   | 26        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 4.2.1.8   | CANALES DE ENFRIAMIENTO .....                          | 29        |
| 4.2.1.9   | TUBO DE AIRE .....                                     | 29        |
| 4.2.1.10  | VÁLVULA ANTI-RETORNO.....                              | 31        |
| 4.2.1.11  | CARBURO DE TUNGSTENO .....                             | 31        |
| 4.2.2   | RENDIMIENTO DE LAS BROCAS TRICONICAS .....             | 33        |
| 4.2.2.1   | ENERGÍA .....  | 34        |
| 4.2.2.2   | VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LA BROCA .....                | 34        |
| 4.2.2.3   | PRESIÓN EJERCIDA SOBRE EL FONDO PULL DOWN .....        | 35        |
| 4.2.2.4   | REQUERIMIENTO DE AIRE Y VELOCIDAD DE BARRIDO .....     | 36        |
| 4.2.2.5   | VELOCIDAD DE PENETRACIÓN .....                         | 39        |
| 4.3   | PERFORACIÓN ROTO- PERCUTIVA .....                      | 42        |
| 4.3.1   | PERFORACIÓN ROTOPERCUTIVA <i>TOP HAMMER</i> .....      | 42        |
| 4.3.2   | PERFORACIÓN ROTOPERCUTIVA DTH.....                     | 44        |
| 4.3.3   | FUNCIONAMIENTO DEL MARTILLO DE FONDO .....             | 44        |
| 4.3.4   | SELECCIÓN DEL MARTILLO .....                           | 46        |
| 4.3.5   | COMPONENTES DE UN MARTILLO.....                        | 51        |
| 4.3.6   | PARÁMETROS DE PERFORACIÓN CON MARTILLO DTH.....        | 54        |
| 4.3.7   | BROCAS DE PERFORACIÓN PARA MARTILLOS DTH .....         | 57        |
| <b>CAPITULO V: SELECCIÓN DE LA COLUMNA DE PERFORACIÓN MEDIANTE UN COMPARATIVO DEL TDC (US\$/m).....</b> |  | <b>61</b> |
| 5.1   | COLUMNA DE PERFORACIÓN .....                           | 61        |
| 5.1.1   | AMORTIGUADOR DE IMPACTO.....                           | 62        |
| 5.1.2   | ADAPT ADORES (TOP SUB – BIT SUB) .....                 | 62        |
| 5.1.3   | BARRA DE PERFORACIÓN .....                             | 65        |
| 5.1.4   | ANILLOS GUÍAS DECK BUSHING.....                        | 66        |
| 5.2   | COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN TDC (US\$/m) .....          | 67        |
| 5.3   | SELECCIÓN ADECUADA DE LA COLUMNA DE PERFORACIÓN .....  | 69        |
| 5.3.1   | PROPUESTA “A” COLUMNA DE PERFORACIÓN DE 5” DE DIÁMETRO | 69        |
| 5.3.1.1   | TOP SUB .....  | 69        |
| 5.3.1.2   | BARRA BOX-BOX.....                                     | 70        |
| 5.3.1.3   | CENTRALIZADOR .....                                    | 71        |
| 5.3.1.4   | MARTILLO DTH.....                                      | 71        |
| 5.3.1.5   | BROCA DE PERFORACIÓN DTH.....                          | 71        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 5.3.2  | VELOCIDAD DE BARRIDO .....   | 72         |
| 5.3.3  | TDC (US\$/m) PARA UNA COLUMNA DE 5" DE DIÁMETRO .....  | 74         |
| 5.3.4  | PROPUESTA "B" COLUMNA DE PERFORACIÓN DE 5 ½" DE DIÁMETRO   |            |
| 5.3.4.1  | TOP SUB .....  | 75         |
| 5.3.4.2  | BARRA PIN-BOX.....   | 75         |
| 5.3.4.3  | BIT SUB .....  | 75         |
| 5.3.4.4  | CENTRALIZADOR .....  | 75         |
| 5.3.4.5  | MARTILLO DE FONDO .....  | 75         |
| 5.3.4.6  | BROCA DTH.....   | 75         |
| 5.4  | ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA ADECUADA COLUMNA DE PERFORACIÓN .....                                     | 78         |
| <b>CAPITULO VI: FACTORES SIGNIFICATIVOS QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE LA PERFORACIÓN DTH .....</b> |  | <b>82</b>  |
| 6.1  | ANTECEDENTES DE PERFORACIÓN .....  | 82         |
| 6.2  | ZONIFICACIÓN DE LAS PLATAFORMAS DE PERFORACIÓN PARA LA ADECUADA SELECCIÓN DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN ..... | 87         |
| 6.3  | AFILADO DE BROCAS EN EL RENDIMIENTO DE LA PERFORACIÓN .....  | 90         |
| 6.4  | REFORZAMIENTO DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN .....   | 92         |
| 6.5  | VARIACIÓN DEL TDC (US\$/m) RESPECTO AL RENDIMIENTO DE PERFORACIÓN .....                                      | 95         |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   |  | <b>100</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>  |  | <b>101</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>   |  | <b>103</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 0.1 Perforación DTH tajo SPS.....   | 04 |
| Figura 0.2 Carguío y acarreo tajo SPS .....                                      | 08 |
| Figura 0.3 Medición del diámetro del martillo DTH .....                          | 08 |
| Figura 1.1 Vista general de las instalaciones de MLZ .....                       | 11 |
| Figura 1.2 Distancia y tiempo de recorrido hacia la unidad minera La Zanja ..... | 12 |
| Figura 2.1 Franjas metalogenéticas de oro.....                                   | 14 |
| Figura 2.2 Columna estratigráfica de la zona.....                                | 16 |
| Figura 2.3 Plano de alteraciones hidrotermales SPS.....                          | 17 |
| Figura 4.1 Métodos de Perforación.....   | 22 |
| Figura 4.2 Diseño de triconos .....  | 23 |
| Figura 4.3 Conos con disposición excéntrica.....                                 | 25 |
| Figura 4.4 Pata de la broca.....   | 25 |
| Figura 4.5 Rodamiento a rodillos.....  | 27 |
| Figura 4.6 Rodamiento a bolas.....   | 27 |
| Figura 4.7 Cojinete de fricción.....   | 28 |
| Figura 4.8 Botón de empuje .....   | 28 |
| Figura 4.9 Toberas Jet.....  | 29 |
| Figura 4.10 Canales de enfriamiento .....  | 30 |
| Figura 4.11 Tubo de aire .....   | 30 |
| Figura 4.12 Válvula anti retorno .....   | 31 |
| Figura 4.13 A mayor resistencia al desgaste menor tenacidad.....                 | 33 |
| Figura 4.14 Triconos para diferentes formaciones.....                            | 34 |
| Figura 4.15 Herramientas para medir el caudal de aire.....                       | 37 |
| Figura 4.16 Entrega del aire a la broca .....                                    | 39 |
| Figura 4.17 Rango de penetración vs Fuerza de avance .....                       | 40 |
| Figura 4.18 Velocidad de penetración vs Velocidad de rotación.....               | 40 |
| Figura 4.19 Micro bit test.....  | 41 |
| Figura 4.20 Martillo top hammer .....  | 43 |
| Figura 4.21 Funcionamiento del martillo de fondo.....                            | 45 |
| Figura 4.22 Selección del equipo de perforación según el diámetro.....           | 46 |
| Figura 4.23 Martillo de fondo de 394 mm de diámetro .....                        | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.24 Requerimiento de aire del martillo .....                                    | 48 |
| Figura 4.25 Velocidad de perforación vs presión de perforación .....                    | 49 |
| Figura 4.26 Pit viper (perforadora rotativa) (track drill) Smart rock .....             | 50 |
| Figura 4.27 Martillos de fondo desde 102mm-279 mm.....                                  | 50 |
| Figura 4.28 Culata martillo Numa .....  | 51 |
| Figura 4.29 Válvula check para martillo Numa de 6”.....                                 | 51 |
| Figura 4.30 Distribuidor de aire para martillo Numa de 6” .....                         | 52 |
| Figura 4.31 Pistón para martillo Numa de 6” .....                                       | 52 |
| Figura 4.32 Driver sub para martillo Numa de 6”.....                                    | 53 |
| Figura 4.33 Case reversible para martillo Numa de 6” .....                              | 53 |
| Figura 4.34 Brocas Holco Vs brocas Sandvik.....   | 55 |
| Figura 4.35 Descripción de una broca DTH .....  | 58 |
| Figura 4.36 Broca Mitsubishi DTH-M65.....   | 58 |
| Figura 4.37 Diseño de broca DTH según el tipo de cara y el tipo de inserto.....         | 60 |
| Figura 5.0 Amortiguador de impacto de la SKF-11.....                                    | 62 |
| Figura 5.1 Top Sub 4IF Pin Box .....  | 63 |
| Figura 5.2 Top Sub acoplado al amortiguador de impacto .....                            | 64 |
| Figura 5.3 Barra de perforación box-box con flat.....                                   | 66 |
| Figura 5.4 Centralizador o anillo guía.....   | 67 |
| Figura 5.5 El impacto de la vida de la broca y la producción sobre el TDC (US\$/m)..... | 69 |
| Figura 5.6 Rotación de la barra de perforación.....                                     | 71 |
| Figura 5.7 Broca DTH 6 ¾” Mitsubishi.....   | 72 |
| Figura 5.8 Recomendaciones de una adecuada V.B .....                                    | 74 |
| Figura 5.9 Tajo SPS Zona norte vs Zona Sur.....   | 78 |
| Figura 5.10 Diagrama de flujo de la selección de la columna de perforacion .....        | 81 |
| Figura 6.1 Malla de perforación SPS zona norte .....                                    | 84 |
| Figura 6.2 Malla de perforación SPS zona sur.....                                       | 85 |
| Figura 6.3 Malla de perforación SPS zona sur.....                                       | 86 |
| Figura 6.4 Malla de perforación Triangular vs Malla cuadrada.....                       | 86 |
| Figura 6.5 Zonificación del Tajo SPS – Tajo PV.....                                     | 88 |
| Figura 6.6 Selección de la broca DTH de acuerdo al tipo de terreno.....                 | 89 |
| Figura 6.6 Taller de afilado de brocas.....   | 91 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 0.1 variables de entrada y salida .....                                 | 07 |
| Tabla 1.1 Coordenada UTM de la concesión minera.....                          | 12 |
| Tabla 3.1 Maestra de equipos de las operaciones unitarias.....                | 19 |
| Tabla 4.1 Eficiencia del aire comprimido a diferentes alturas .....           | 38 |
| Tabla 4.2 velocidad de rotación promedio utilizado en la zanja .....          | 54 |
| Tabla 5.1 características del top sub .....                                   | 69 |
| Tabla 5.2 características de la barra box-box.....                            | 69 |
| Tabla 5.3 características del centralizador .....                             | 71 |
| Tabla 5.4 corrección de los cfm del compresor .....                           | 73 |
| Tabla 5.5 resultados de la V.B con una columna de 5” .....                    | 73 |
| Tabla 5.6 TDC para una columna de 5” de diámetro.....                         | 74 |
| Tabla 5.7 cuadro comparativo entre la propuesta A vs propuesta B.....         | 77 |
| Tabla 5.8 Análisis técnico y económico de la columna de perforación .....     | 79 |
| Tabla 6.1 Plan de perforación 2014 tajo SPS.....                              | 83 |
| Tabla 6.2 Plan de perforación 2014 tajo PV .....                              | 83 |
| Tabla 6.3 Sc vs Velocidad de perforación .....                                | 87 |
| Tabla 6.4 diagrama de barras de la malla promedio .....                       | 90 |
| Tabla 6.5 Aplicación de los electrodos .....                                  | 93 |
| Tabla 6.6 Gets con revestimiento-soldadura citodur.....                       | 94 |
| Tabla 6.7 Gets con revestimiento-soldadura citodur.....                       | 94 |
| Tabla 6.8 Reducción del TDC US\$/m .....                                      | 95 |
| Tabla 6.9 Análisis técnico y económico de la reducción del TDC (US\$/m) ..... | 95 |
| Tabla 6.10 comportamiento del TDC vs velocidad de perforación .....           | 96 |
| Tabla 6.11 comportamiento del TDC vs vida útil de la broca .....              | 97 |
| Tabla 6.12 Punto de equilibrio entre V.U y V.P .....                          | 98 |

## ÍNDICE DE ECUACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 4.1 Velocidad de barrido ..... | 37 |
| Ecuación 4.2 Rango de penetración ..... | 42 |
| Ecuación 5.1 TDC .....                  | 68 |
| Ecuación 5.2 TDC .....                  | 68 |
| Ecuación 5.3 Velocidad de barrido ..... | 72 |
| Ecuación 6.1 Malla triangular .....     | 87 |
| Ecuación 6.2 Malla cuadrada .....       | 87 |

## RESUMEN

Minera La Zanja S.R.L realiza sus operaciones mineras en el Proyecto La Zanja, el cual comprende dos yacimientos de oro con contenidos de plata denominados San Pedro Sur (400K OzAu) y Pampa Verde (309K OzAu), los cuales por su proximidad a la superficie y el volumen de mineral disseminado, son trabajados mediante el método de operación de tajo abierto. La producción promedio anual a partir del año 2011 es de 100,000 OzAu y 450,000 OzAg.

De lo mencionado anteriormente la unidad minera la zanja cuenta con dos tajos, tajo Pampa Verde y tajo San Pedro Sur, cada tajo tiene diferentes características geomecánicas, presencia de agua, fisuras, macizo rocoso competente, macizo rocoso fracturado, contacto con argilico avanzado, etc. Para lo cual analizaremos dos propuestas de columna de perforación; la primera propuesta columna de perforación de 5” de diámetro y la segunda propuesta columna de perforación de 5 ½” de diámetro. La segunda propuesta se trabajó hasta fines del 2012 ya que los resultados técnico-económicos fueron favorables para la columna de perforación de 5” de diámetro, obteniéndose un menor TDC (US\$/m) con respecto a la segunda propuesta.

Como se sabe ya se eligió la columna adecuada de perforación para reducir el TDC (US\$/m). Ahora lo que se busca es zonificar el macizo rocoso, seleccionar el diseño de malla para mineral y desmonte con lo cual buscaremos reducir los metros perforados por proyecto, maximizar la vida útil de los aceros y reducir el TDC. La zonificación del macizo rocoso se realizó mediante el control de velocidades de diferentes proyectos en el tajo SPS y PV.

Como conclusión a todo lo anterior, se puede decir que con la nueva columna de perforación 5” de diámetro, zonificación del macizo rocoso y el cuidado de los aceros de perforación (afilado de brocas y revestimiento de los gets), se obtuvieron resultados post Perforación y voladura favorables o similares al caso anterior, reduciendo el TDC (US\$/m) en 4.0% y los costos en aceros de perforación en 12.0% menor. Las operaciones mineras unitarias de Perforación y Voladura tienen una influencia predominante en el ciclo total de minado, porque los resultados de estas dependerá la producción y productividad y por ende los costos en US\$/t de las subsiguientes operaciones mineras unitarias.

## ABSTRACT

The mining Company called “La Zanja” S.R.L performs its mining operations in the Project “La Zanja”, which comprises of two deposits of gold with silver content called San Pedro Sur (400K Oz. Au) and Pampa Verde (309K OzAu), which due to its proximity to the Surface and volumen of disseminatedore are worked using the method of open-pit operation. The average anual production from the year 2011 is 1000,000 OzAu and 450,000 OzAg.

As started above the mining unit “La Zanja” has two open pits, pit Pampa Verde and pit San Pedro Sur, each pit has different features geo mechanical , presence of water, cracks, competent rock mass, fractured rock mass, advanced argillic contact, etc. To discuss two proposals of drill column: the first proposal is a column of drilling 5 "in diameter and the second proposal is a column of drilling of 5 ½" in diameter. The second proposal is worked until the end of 2012 as the technical and economic results were favorable for the drill column 5 "in diameter, resulting in a lower TDC (US\$/m) with respect to the second proposal.

As already known the appropriate drill column was selected to reduce the TDC (US\$/m). Now what is sought is zoning the rock mass, select the mesh design for ore

and waste which seek to reduce the meters drilled per project, maximize battery life and reduce TDC steels. The zoning of the rock mass was conducted by controlling speeds of different projects in the pit SPS and PV.

As a conclusion to all of the above, we can say that with the new drill string 5 "in diameter, solid rock zoning care and drill steel (drill sharpening and coating of gets), results were obtained post-blast favorable and similar to the previous case, reducing the TDC (US\$/m) in 4.0% and costs of drilling in steel 12.0% lower. Mining unit Drilling and Blasting operations have a predominant influence on the total mining cycle, because the results of these depend on the production and productivity and therefore costs US \$ / t of subsequent mining operations unit.

## INTRODUCCIÓN

En casi toda operación minera las operaciones unitarias de perforación y voladura son las que generan mayor eficiencia en las operaciones subsiguientes del ciclo de minado (carguío, acarreo, recuperación, etc., siendo estos los objetivos a corto plazo, mientras que el cuidado y estabilidad del talud final es el principal objetivo a largo plazo). Por tal motivo el ingeniero encargado de perforación y voladura debe reducir los costos sin descuidar los resultados post voladura, siendo esto nuestro principal objetivo.

En la operación unitaria de perforación y voladura existe una relación intrínseca entre la perforación y la voladura, ya que puede afirmarse que: ***“una adecuada perforación posibilita unos resultados adecuados post voladura, pero una deficiente perforación asegura inadecuados resultados post voladura”***. Se entiende por adecuada perforación aquella operación que se realizó con los parámetros y técnicas adecuadas siguiendo el diseño de malla generado por el ingeniero de diseño. Asimismo un resultado adecuado post voladura será aquella que cumple con el objetivo de diseño.

El presente estudio, está enmarcado en recopilar, analizar y evaluar las modificaciones propuestas por el área de Perforación y Voladura de la unidad minera La Zanja, considerando los parámetros presentes en la unidad minera, con el fin de proponer el

mejor conjunto de diseños y medidas nuevas, que demuestren su factibilidad tanto operacional, como económica.

La operación unitaria de perforación, es la primera actividad que se ejecuta en una operación minera, por consiguiente, se requiere, brindarle la importancia del caso, bajo este aspecto, la optimización de esta operación unitaria, es fundamental ya que el consumo de los gets es un costo elevado en la operación unitaria de perforación.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En toda unidad minera el ciclo de minado dependerá fundamentalmente de sus costos, razón por la cual la perforación es la de mayor importancia en el costo del ciclo de minado, por lo tanto tratar de minimizar su incidencia en el costo de producción será la principal preocupación del ingeniero a cargo del área de perforación & voladura.

Los factores que influyen en la reducción de los costos de perforación son variados, aquí mostramos los más comunes que se presentan en una operación:

- Características geo mecánicas del macizo rocoso.
- Parámetros de perforación como diseño de la malla de perforación, sea malla triangular o malla cuadrada, burden y espaciamiento, profundidad del taladro, diámetro de perforación.
- Velocidad de perforación.
- Angulo de la perforación.
- Tonelaje promedio a obtener diariamente.
- Capacidad de los equipos de carguío y acarreo.

- Aptitud y actitud del personal de perforación y voladura.
- Experiencias del operador de perforación.
- Características del índice de perforabilidad de la roca.
- Disponibilidad de los equipos de perforación.
- Disponibilidad de los equipos auxiliares para liberar plataformas de perforación.
- Tamaño de la fragmentación requerida por planta.

Como se observa las propiedades geo mecánicas del macizo rocoso es solo uno de los factores que deben ser considerados en la elección de un método de perforación, y conociendo estos diversos factores no solo seleccionaremos el método de perforación sino tendremos una amplia visión para reducir los costos e introducir nuevas técnicas de perforación

Por ende el ingeniero de Perforación y Voladura, debe introducir constantemente mejoras e innovaciones tecnológicas enfocados a la reducción de costos de la operación unitaria de perforación y voladura sin descuidar los resultados post voladura.

### **OBJETIVOS GENERALES**

El presente estudio, está enmarcado a la reducción de los costos unitarios de perforación, para ello analizaremos y evaluaremos las modificaciones propuestas por el área de Perforación y Voladura de la CIA minera La Zanja, considerando los parámetros iniciales de la unidad minera, con el fin de proponer el diseño adecuado y nuevas técnicas, que demuestren su factibilidad tanto operacional, como económica.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar adecuadamente la columna de perforación.
2. Maximizar la vida de la broca y de los aceros de perforación por zonificación.
3. Maximizar la vida de los aceros por revestimiento.



Figura 0.1- Perforación DTH tajo SPS

## MARCO TEÓRICO

En la actualidad el avance científico y tecnológico ha permitido realizar trabajos de gran magnitud en lo que es operaciones mina, tanto en lo que es perforación & voladura y en el carguío y acarreo, permitiendo así el movimiento masivo de material.

Para lograr y continuar con estos avances nosotros los responsables de esta operación buscamos reducir los costos de extracción de material \$/t por ello nos centramos en el inicio de la operación minera que es perforación & voladura. Ya que se sabe por teoría y experiencia que adecuados resultados post perforación & voladura generara un mayor rendimiento en las operaciones subsiguientes.

Como se sabe en la gran minería la perforación de taladros para voladura es muy importante ya que el rendimiento m/hr es influenciada por diferentes parámetros como capacidad de la perforadora, experiencia del operador, características del macizo rocoso, presencia de agua etc. Generando así tiempos de perforación de taladros de una a dos horas, lo que se busca es reducir estos tiempos de perforación para lo cual tenemos que seleccionar adecuadamente nuestra columna de perforación, zonificar nuestros macizos rocosos, cuidar los equipos de perforación, buscar nuevas técnicas de perforación como es el sistema PARD (Percussion Assited Rotary Drilling) ya que se sabe que aumentar la velocidad de perforación es aumentar la producción, pero sin descuidar nuestros gets. Es una combinación de los beneficios de la percusión con la perforación rotativa desarrollada por Atlas Copco. Todo esto significa que debemos de tener un control minucioso en perforación para tener resultados eficientes en voladura.

## **JUSTIFICACIÓN**

El resultado post voladura como la fragmentación, pisos adecuados paredes adecuadas son lo más importante, y es la única variable que debe ser tomada en cuenta para evaluar los cambios de los parámetros de perforación y voladura desde el punto de vista técnico – económico

## **HIPÓTESIS GENERAL**

La selección adecuada de la columna de perforación, la zonificación del macizo rocoso y el adecuado cuidado de los aceros de perforación permitirán la reducción del costo total de perforación TDC (US\$/m).

## **HIPÓTESIS ESPECÍFICO**

1. Con la selección adecuada de la columna de perforación reduciremos el costo total de perforación (US\$/m).
2. Con la zonificación de las plataformas de perforación, de acuerdo a la data estadística, permitirá seleccionar el diseño de malla de perforación para desmonte y para mineral con la cual reduciremos el costo total de perforación (US\$/m).
3. Con el adecuado cuidado de aceros, mediante el afilado de brocas y el revestimiento de aceros con soldadura reduciremos el costo total de perforación (US\$/m)

## **METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

- **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

**Método general:** análisis y comparación de la base de datos de perforación antes y después de la selección de una nueva columna de perforación para reducir el TDC US\$/m.

**Método específico:** observación y medición de la data histórica de perforación, como la velocidad de perforación, vida útil de los aceros de perforación y el TDC US\$/m.

- **DISEÑO METODOLÓGICO**

- a. **Población y muestra**

**Población:** mediana minería

**Muestra:** Empresa minera La Zanja

## b. Variables

Las variables de entrada y variables de salida, son datos tomados pre y post voladura, en la siguiente tabla se muestra los datos:

Tabla 0.1 variables de entrada y salida

| Variable | Descripción   |
|----------|---|
| Entrada  | Data histórica de: la vida útil de los aceros, características geológicas del macizo rocoso, velocidades de perforación DTH y perforación triconica, tiempos de perforación, precios de los aceros y costos de perforación. |
| Salida   | Columna de perforación, reducción de los costos de perforación.   |

## c. Unidad de Observación

Costo total de perforación (US\$/m), Vida útil de los aceros de perforación (m), velocidad de perforación (m/h).

## d. Diseño de investigación

Muestra → Observación

## e. Técnicas y Procedimientos de Recolección de Datos

Data histórica de perforación, toma de tiempos de perforación, catálogo de las perforadoras y de los aceros de perforación, presupuesto mensual de perforación.

## f. Equipos a Utilizar

Computadora, cronometro, cámara, vernier, y otros.



Figura 0.2 - carguío y acarreo tajo SPS



Figura 0.3 medición del diámetro del martillo DTH

## **CAPITULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Minera La Zanja S.R.L (Cia. De Minas Buenaventura (53.06%) y Newmont (46.94%).Las exploraciones se iniciaron en 1991.), realiza sus operaciones mineras en el Proyecto La Zanja, el cual comprende dos yacimientos de oro con contenidos de plata denominados San Pedro Sur (400K OzAu) y Pampa Verde (309K OzAu), los cuales por su proximidad a la superficie y el volumen de mineral diseminado, son trabajados mediante el método de operación de tajo abierto. La producción promedio anual a partir del año 2011 es de 100,000 OzAu y 450,000 OzAg. Los trabajos de exploración realizados en el área del proyecto, han permitido determinar la factibilidad de desarrollar dichos yacimientos, los cuales contienen un recurso minable total de 17 414 000 TM con una ley promedio de oro de 0,88 g/TM y una ley promedio de plata de 6,6 g/TM. Adicionalmente, se cuenta con un recurso de 10, 066 254 TM con una ley de 0,56 g/TM, lo que representa 183 160 onzas de oro. Las operaciones mineras unitarias como perforación & voladura, carguío y acarreo las realiza la empresa contratista STRACON GYM.

A inicios del 2013 se recopiló datos y parámetros de perforación y voladura, como malla de perforación, velocidades de perforación, factor de potencia y análisis de fragmentación post voladura. Con la finalidad de modificar los parámetros de perforación mediante la zonificación de los proyectos de perforación & voladura esto conlleva directamente al aumento de la velocidad de perforación, reducción de los metros perforados, reducción del factor de potencia y mejoras en los resultados post voladura como P-80 menor a 10", evitando las sobre roturas, pisos adecuados para el carguío. Como se conoce las operaciones mineras unitarias de Perforación y Voladura tienen una influencia predominante en el ciclo total de minado, por ello los resultados adecuados de esta operación unitaria conllevarán a una óptima producción y productividad, por ende en la reducción de los costos (US\$/t) de las subsiguientes operaciones.

## **1.2 UBICACIÓN**

El Proyecto La Zanja, está ubicado en el caserío La Zanja (también denominado La Redonda), en el distrito de Pulán, provincia de Santa Cruz de Suchabamba, a 107 Km del departamento de Cajamarca. El área del proyecto comprende las zonas altas de este distrito, a una altitud que varía entre los 2 800 y 3 811 m y la zona limítrofe con los distritos de Catache (de la misma provincia de Santa Cruz) y Calquis y Tongod (provincia de San Miguel de Pallaques). En la zona resalta la sucesión de montañas, con altitudes que fluctúan entre los 2,800 a 3,811 y pendientes que varían entre 30 – 70%, quebradas y planicies altas, con pendientes relativamente bajas como el caso de la Pampa del Bramadero fisiográficamente. El área del proyecto se ubica en los Andes Centrales, los que se caracterizan por la presencia

de altas planicies, situados a más de 3 500 m de altitud y que han recibido el nombre de Región de la Puna o Altiplano.



Figura 1.1 - Vista general de las instalaciones de MLZ  
Fuente: Área de Geología Mina CIA La Zanja

### 1.3 ACCESOS

El acceso a la zona de proyecto desde la ciudad de Lima se realiza por vía terrestre (14 horas) a través de la Carretera Panamericana Norte hasta la ciudad de Cajamarca o vía aérea (1:10 h: m) y luego continuando por la ruta de Cajamarca-Santa Cruz hasta la unidad minera La Zanja (107 Km desde la ciudad de Cajamarca hasta la unidad minera en camioneta).



Figura 1.2- Distancia y tiempo de recorrido hacia la unidad minera La Zanja  
Fuente: Área de Geología Mina CIA La Zanja

Tabla 1.1-Coordenada UTM de la concesión minera

| N° | Concesión     | Vértice | Coordenadas UTM |              |
|----|---------------|---------|-----------------|--------------|
|    |               |         | Este            | Norte        |
| 1  | LA ZANJA 106  | 1       | 733 000,00      | 9 247 000,00 |
|    |               | 2       | 733 000,00      | 9 246 000,00 |
|    |               | 3       | 732 000,00      | 9 246 000,00 |
|    |               | 4       | 732 000,00      | 9 247 000,00 |
| 2  | LA ZANJA 109  | 1       | 732 000,00      | 9 246 000,00 |
|    |               | 2       | 732 000,00      | 9 245 000,00 |
|    |               | 3       | 731 000,00      | 9 245 000,00 |
|    |               | 4       | 731 000,00      | 9 246 000,00 |
| 3  | LA ZANJA N° 2 | 1       | 731 639,77      | 9 245 974,27 |
|    |               | 2       | 730 666,52      | 9 244 227,65 |
|    |               | 3       | 726 299,98      | 9 246 660,77 |
|    |               | 4       | 727 273,22      | 9 248 407,39 |
| 4  | LA ZANJA N° 5 | 1       | 736 979,56      | 9 245 287,77 |
|    |               | 2       | 736 006,32      | 9 243 541,15 |
|    |               | 3       | 731 639,77      | 9 245 974,27 |
|    |               | 4       | 732 613,02      | 9 247 720,89 |

## **CAPITULO II: GEOLOGÍA**

### **1.4 GEOLOGÍA REGIONAL**

Minera La Zanja está ubicada en los Andes occidentales en el Norte del Perú, a 50 km aproximadamente, al Noroeste de la mina Yanacocha. Comprende una extensa zona de alteración hidrotermal relacionada principalmente a yacimientos epitermales de alta sulfuración. Se encuentra en la Franja Metalogenética XXI: Epitermales de Au y Ag del Mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas. Junto a otras unidades mineras como Yanacocha y Cerro Corona (Figura 2.1).

La región está marcada por una gran distribución de depósitos volcánicos de composición ácida de edad Cenozoica. El proyecto está localizado en la faja volcánica Cretácea-Terciaria de los Andes en el Norte del Perú, que se extienden en dirección NW-SE, y que regionalmente corresponderían al Grupo Calipuy, que en esta parte del país han sido subdivididos en formaciones llama, porculla y huambos.

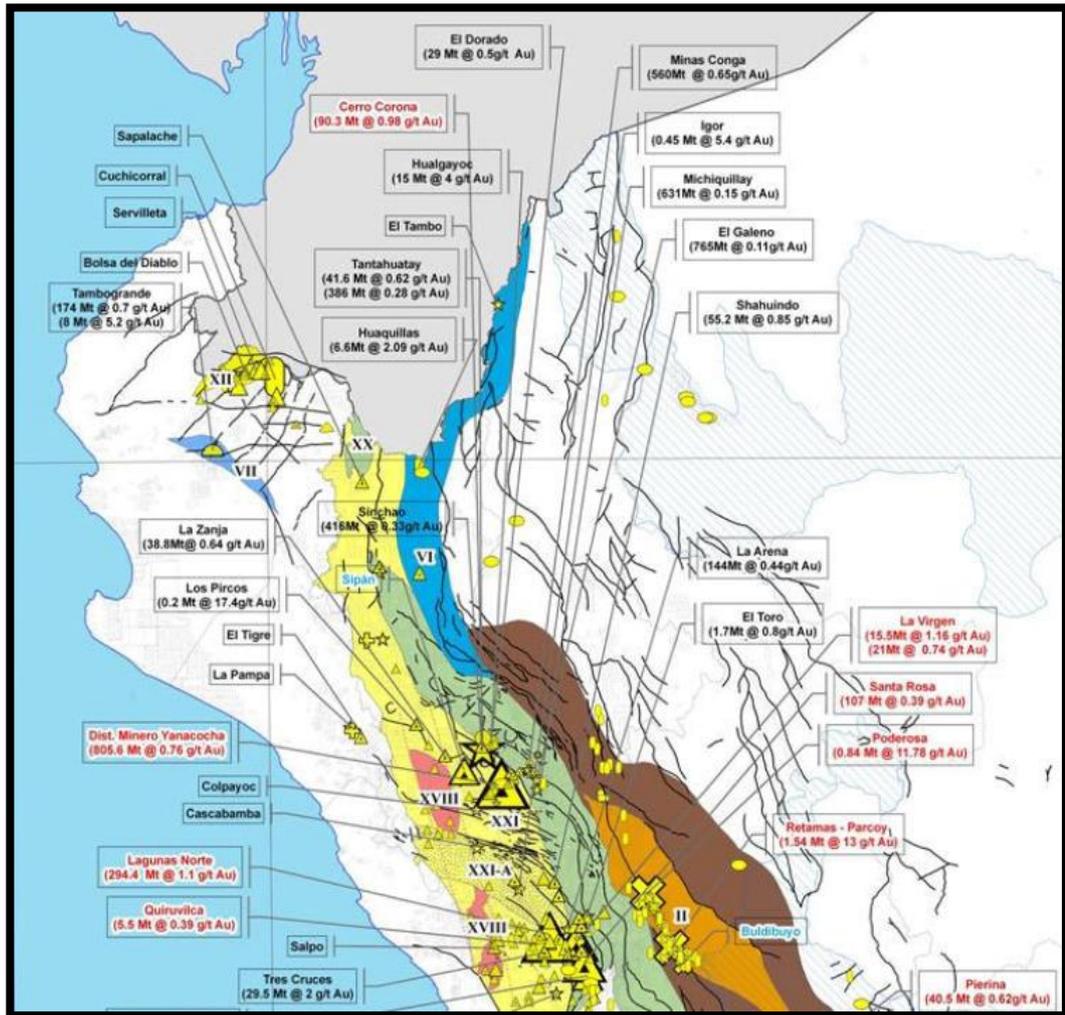


Figura 2.1-franjas metalogenéticas de oro  
Fuente: Área de Geología Mina CIA La Zanja

La región está influenciada por el tectonismo andino, correspondiente a la subprovincia tectónica de la fase Quechua II, la cual se manifiesta por suaves plegamientos y estructuras regionales de dirección NW. En el distrito se tiene la siguiente columna estratigráfica (Figura 2.2):

### 2.1.1 Rocas Volcánicas Terciarias

- a. **Formación Llama:** Descansa discordantemente sobre el basamento de sedimentos y volcanoclásticos cretácicos. Litológicamente está

representada por una gruesa secuencia de piroclásticos andesíticos-dacíticos con intercalaciones de tufos dacíticas a riolíticas. En los márgenes de la depresión de San Pedro afloran una vasta secuencia de tufos de líticos y cristales que representa una fase de este vulcanismo. Esta formación es la que alberga el yacimiento de oro diseminado, relacionado a la alteración Argílica Avanzada.

- b. Formación Porculla:** Está conformada por una secuencia de tufos y lavas andesíticas con intercalaciones de horizontes dacíticos-andesíticos. Además existen cuerpos sub volcánicos asociados con un evento volcánico - magmático contemporáneo a los depósitos piroclásticos.
- c. Volcánicos Huambos:** Sobre yace discordantemente sobre los volcánicos anteriores y sedimentos cretácicos. Litológicamente está conformado por tufos y brechas de composición ácida: dacitas y riodacitas. La distribución de los piroclásticos está controlada por la cercanía de centros eruptivos volcánicos.

### 2.1.2 Rocas Intrusivas Terciarias

El intrusivo de San Miguel representa el mayor cuerpo plutónico de la zona, su mejor exposición se presenta en los alrededores del pueblo de San Miguel. Su composición varía de granodiorita a micro diorita.

Stock sub-volcánicos y domos andesíticos a riodacíticos se han emplazado en diferentes eventos, los cuales preceden y suceden al evento hidrotermal.

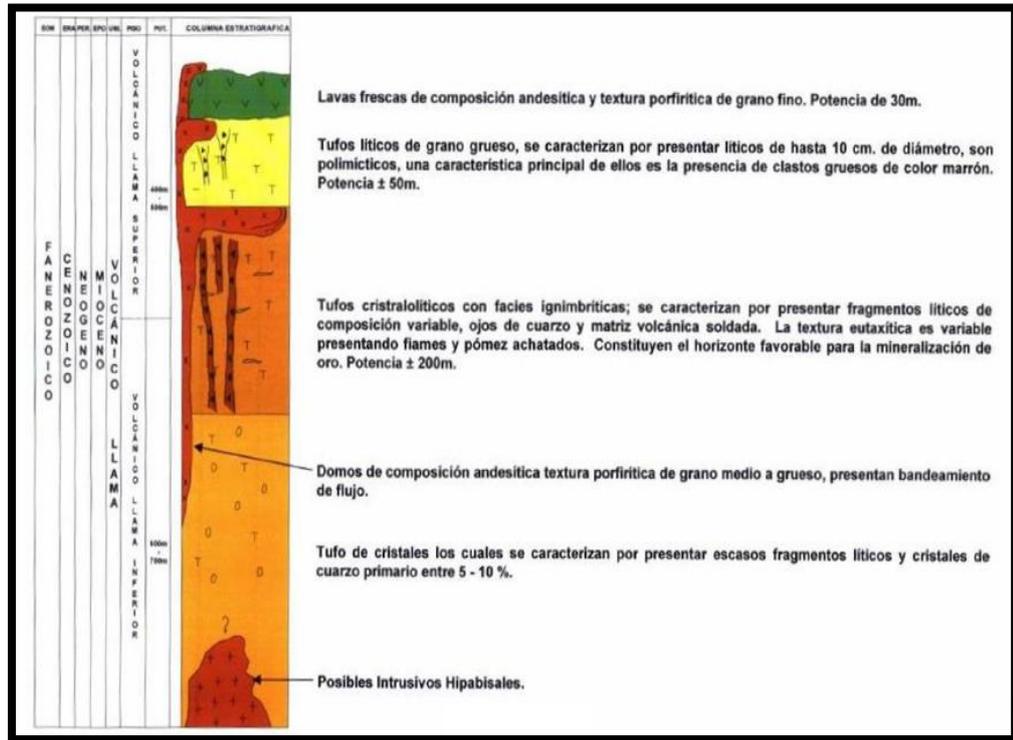


Figura 2.2- columna estratigráfica de la zona  
Fuente: Área de Geología Mina CIA La Zanja

## 2.2 GEOLOGÍA LOCAL

El depósito de San Pedro Sur se encuentra desarrollado localmente en la Formación Llama, identificada estratigráficamente en la base tufo de cristales, sobre yaciendo tufos cristalolíticos con zonas de ignimbríticas y hacia el tope de la secuencia una colada andesítica porfírica.

Esta secuencia ha sido afectada por los sistemas de fallamiento NW, NE y por último un sistema EW. Se ha evidencia alimentadores o estructuras principales como brechas hidrotermales con lineamiento N 60-80° W, un ejemplo es la brecha “Mariela” (Actualmente esta brecha ya es visible en campo). La mineralización aurífera está dada en goethita, limonita, hematita y jarosita. Se observa en la zona sur del yacimiento estructuras verticales de turmalina (variedad “schorlo”).

Actualmente las alteraciones están intercaladas entre la Silicificación y la Argilización Avanzada, estas secuencias siguen el control estructural predominante (NW), donde la oxidación está relacionada a la alteración Argílica Avanzada y los sulfuros a la Silicificación. En los bordes del tajo se observa lavas andesíticas indicando que ésta es el tope del yacimiento (Figura 2.3).

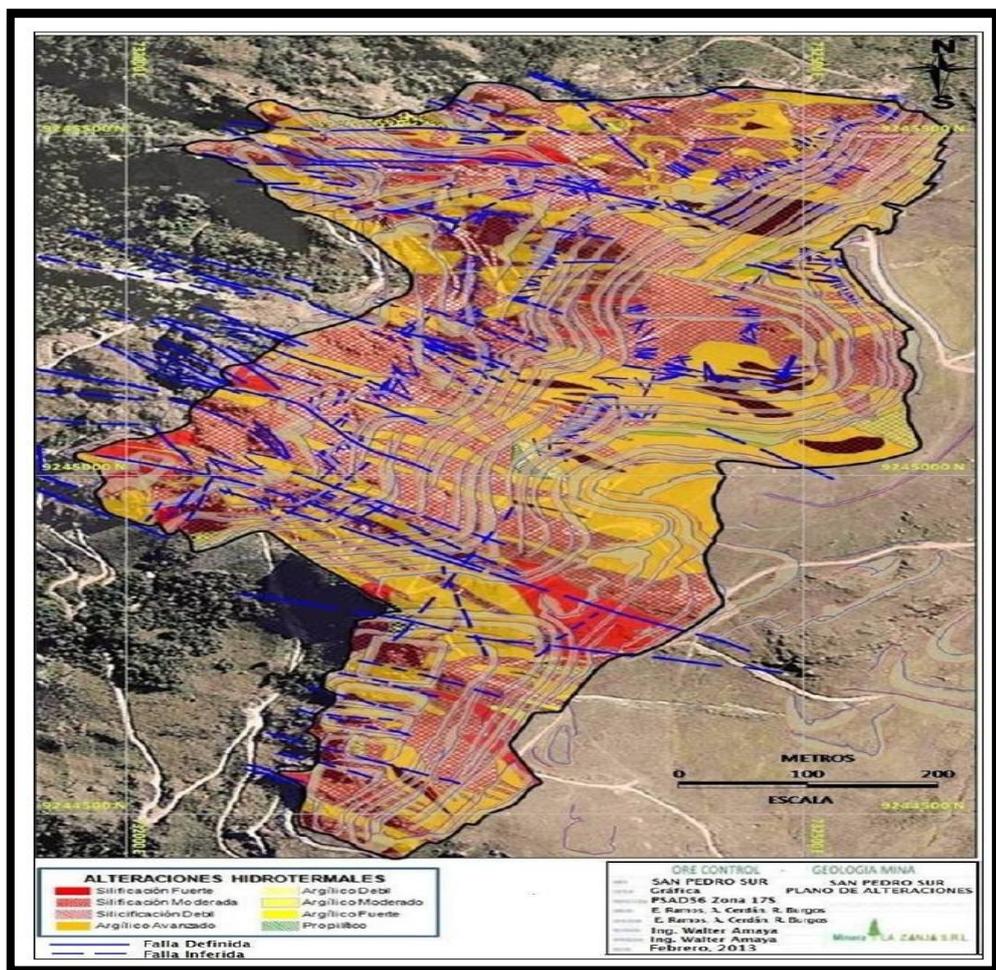


Figura 2.3- plano de alteraciones hidrotermales SPS  
Fuente: Área de Geología Mina CIA La Zanja

## **CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO**

### **3.1 ANTECEDENTES GENERALES**

La unidad minera La Zanja utiliza el método de explotación a tajo abierto (Open Pit), con bancos de 12 metros de altura de diseño y ángulos de talud promedio de 65°, pendiente máxima de las rampas 10%, ancho de berma 6.4 m, las rampas principales de acceso son de 13.5 metros de ancho y de stripping ratio 0.94; esto depende de las distintas características geomecánicas y geotecnias del macizo rocoso. El proceso productivo del Área Mina está definido por las siguientes operaciones, y el cuadro de maestra de equipos para estas operaciones:

- Pre- Minado Pampa Verde
- Perforación & Voladura
- Carguío & Acarreo
- Servicios Auxiliares.

- Control de Producción
- Drenaje Mina

Tabla N° 3.1- “Maestra de equipos de las operaciones unitarias”

| Eqp. Group                 | Equipment | Description                | Model           |
|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------------|
| CA-Cisterna de Agua        | CA-00007  | Mercedes Benz Actros 4143K | Actros 4143K_CA |
| CC-Cisterna de Combustible | CC-00001  | Mercedes Benz Actros 4143K | Actros 4143K_CC |
| CE-Camion Explosivos       | CE-80002  | Volkswagen                 | 31-310          |
| CG-Camion Grua             | CG-80003  | Volvo FH12                 | FH12_CG         |
| CL-Camion Lubricador       | CL-00005  | Scania P420B               | P420B_CL        |
| CV-Camion Volquete         | CV-00148  | Scania P460CB              | P460CB_CV       |
| EX-Excavadora sobre Orugas | EX-80029  | Caterpillar 320D           | 320D            |
| GE-Grupo Electrogenero     | GE-80005  | SDMO J200                  | J200            |
| MO-Motoniveladora          | MO-80005  | Caterpillar 140K           | 140K            |
| MS-Motosoldadora           | MS-00002  | Lincoln VANTAGE 500        | VANTAGE 500     |
| PE-Perforadora             | PE-00005  | Atlas Copco                | DM45            |
| PE-Perforadora             | PE-00006  | Terex SKF-11               | SKF-11          |
| PE-Perforadora             | PE-00011  | Sandvik D245S              | D245S           |
| RE-Retroexcavadora         | RE-80014  | Caterpillar 416E           | 416E            |
| RO-Rodillo                 | RO-80001  | Caterpillar CS533E         | CS533E          |
| TI-Torre de Iluminacion    | TI-00026  | Magnum MTL-4060            | MTL-4060        |
| TO-Tractor sobre Orugas    | TO-80018  | Caterpillar D6T            | D6T             |
| TR-Tractor sobre Ruedas    | TR-00004  | Caterpillar 824H           | 824H            |

### 3.2 ANTECEDENTES DEL SISTEMA DE PERFORACIÓN & VOLADURA

La operación unitaria de Perforación & Voladura es realizada por la empresa contratista STRACON GYM. Estos realizan el diseño de malla de perforación de pre corte, perforación de producción, perforación secundaria, diseño de carga de taladros de pre cortes, producción y secundarios, secuencia de salida e iniciación de estos.

Los taladros de producción de diámetro 6 ¾” y altura 6 metros se realizan con una perforadora DM-45 en San Pedro Sur y una SKF-11 en Pampa Verde, estas cuentan con una columna de perforación de 5 ½” de diámetro y 30 pies de longitud, cuenta con un martillo de fondo DTH de 6”. Los taladros de pre corte son de 5” y se realiza con una Pantera 1500 TOP HAMMER.

Se utiliza ANFO/ANFO Pesado y emulsión gasificada como agente explosivo, detonadores pirotécnicos unidireccionales con tiempos de 17 ms entre taladros y 800 ms de fondo, los tiempos entre filas utilizados es de 42 y 65 ms para voladuras de producción y detonadores electrónicos para proyectos con alta ley o voladura controlada.

## **CAPITULO IV: ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PERFORACIÓN EN LA UNIDAD MINERA LA ZANJA**

### **4.1 MÉTODOS DE PERFORACIÓN**

Es importante destacar que las perforadoras rotativas pueden perforar con dos métodos. La mayoría de las unidades opera como perforadoras puramente rotativas, con brocas tricónicas. El otro método utilizado con las perforadoras rotativas es la perforación DTH. Se usan compresores de alta presión para impulsar el aire comprimido hasta el martillo DTH.

La diferencia principal entre la perforación rotativa y otros métodos es la ausencia de percusión. En la mayoría de las aplicaciones rotativas, se usa brocas tricónicas. Este tipo de brocas tritura y astilla la roca. Esto se logra transmitiendo fuerza descendente, conocida como fuerza de avance (Pulldown), a la broca mientras giran los tres conos sobre sus ejes, incrustando los carburos de tungsteno en la roca. El giro es provisto por una caja de cambios (llamada unidad de rotación) impulsada por un motor que mueve la torre de arriba hacia abajo por medio de un sistema de

avance. Esto puede ser con cables, cadenas, mecanismos de cremallera o piñón, impulsados por cilindros hidráulicos, motores hidráulicos o motores eléctricos.

La fuerza de avance es generada por una unidad de potencia diésel hidráulica. La fuerza de avance es la suma del peso, del bit tricónico, de las barras de perforación, la unidad de rotación y la fuerza transmitida por el sistema de avance.

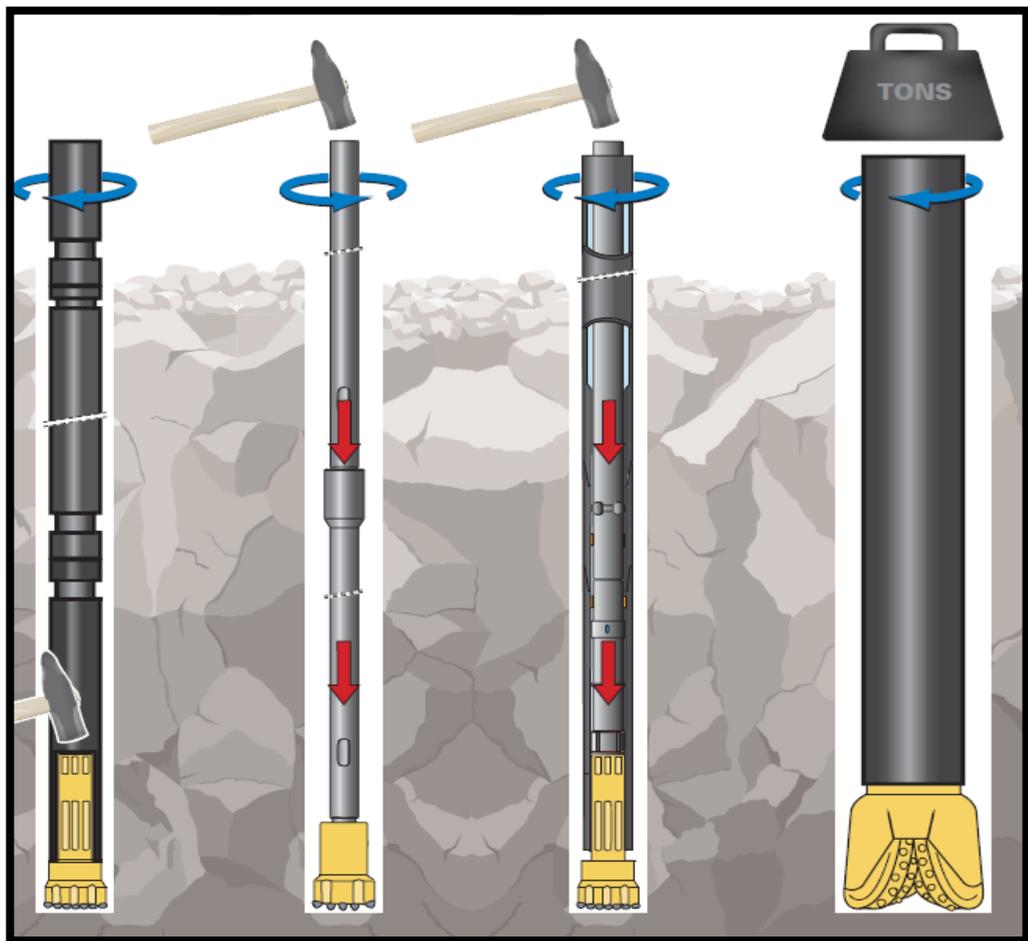


Figura 4.1- Métodos de Perforación  
Perforación: DTH Graf (1), Top Hammer Graf (2y3), Rotativo Graf (4)  
Fuente: Mining & Construction Atlas copco

## 4.2 PERFORACIÓN ROTATIVA

La perforación rotativa se introdujo como mejora tecnológica en el año 1909 por su inventor Howard R. Hugues, la nueva herramienta consistía en conos giratorios con dientes cortantes que rodaban en el fondo del taladro y creaban una acción de escopleado o traslapeo, esta nueva herramienta de conos permitió a las perforadoras rotativas exceder lejos los mejores rendimientos alcanzados en formaciones duras, en esos tiempos aún no se pensaba aplicar el nuevo método a la perforación de minería, solo fueron usadas en exploración geofísica, pozos de agua y por supuesto el petróleo.

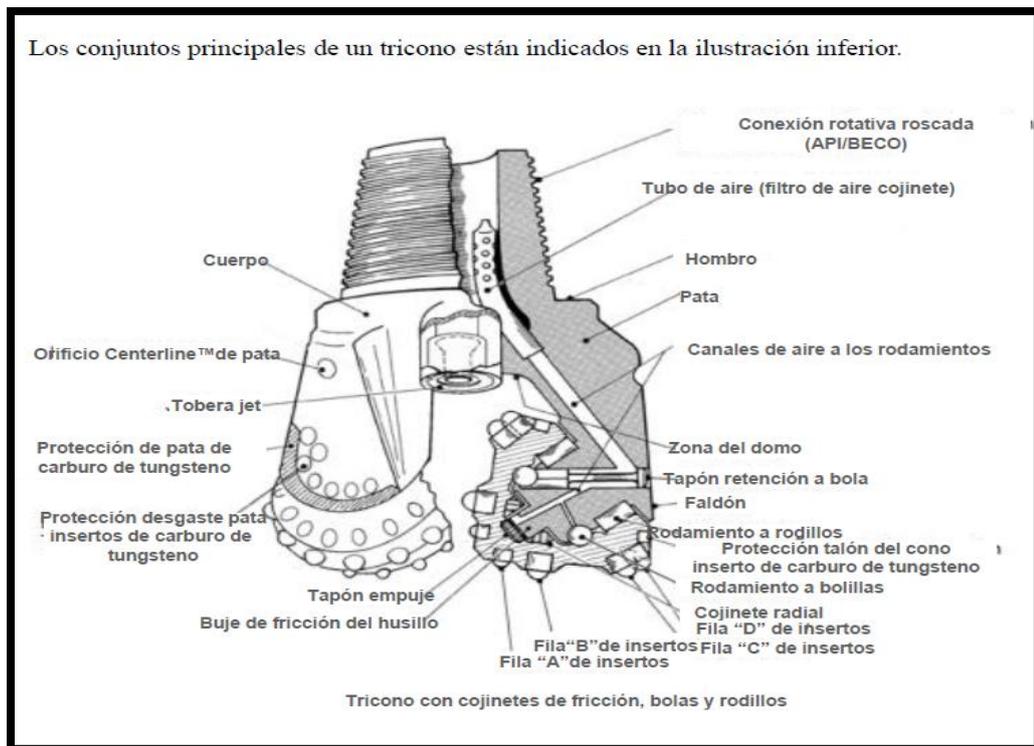


Figura 4.2- Diseño de triconos  
Fuente Mining & construion Smith

## **4.2.1 DISEÑO DE LAS BROCAS TRICONICAS**

En el diseño de triconos el factor de control es el espacio disponible debido a que las dimensiones están limitadas por el diámetro del taladro que debe ejecutarse. La carga o el pulldown sobre la roca es absorbida por los rodamientos de bolas, de rodillos o cojinetes de fricción ubicadas cerca a la base del cono. Por tal razón los diseñadores deben considerar la proporción de las diferentes partes tales como:

### **4.2.1.1 CONOS**

Los conos tienen insertos de carburo de tungsteno colocados a presión los cuales cortan la roca. El cono está diseñado para rodar, las superficies de los cojinetes están mecanizadas en el diámetro interior o calibre del mismo. Estas superficies copian el diámetro exterior del cojinete de la pata. Los conos están montados sobre un eje de rodamientos o cojinetes los que a su vez forman parte de las patas o faldones de los triconos, esta construcción integral provee la superficie y resistencia para soportar las cargas que la actual técnica de diseños y exigencias de perforación imponen sobre el tricono. Figura 4.3

### **4.2.1.2 BIT LEG**

La pata del tricono tiene una pista maquinada que copia el cojinete del cono. Posee además toberas u orificios de circulación central que regulan el volumen y la presión de los fluidos circulantes. En un cojinete enfriado por aire existen canales de enfriamiento mecanizados en la pista. Figura 4.4

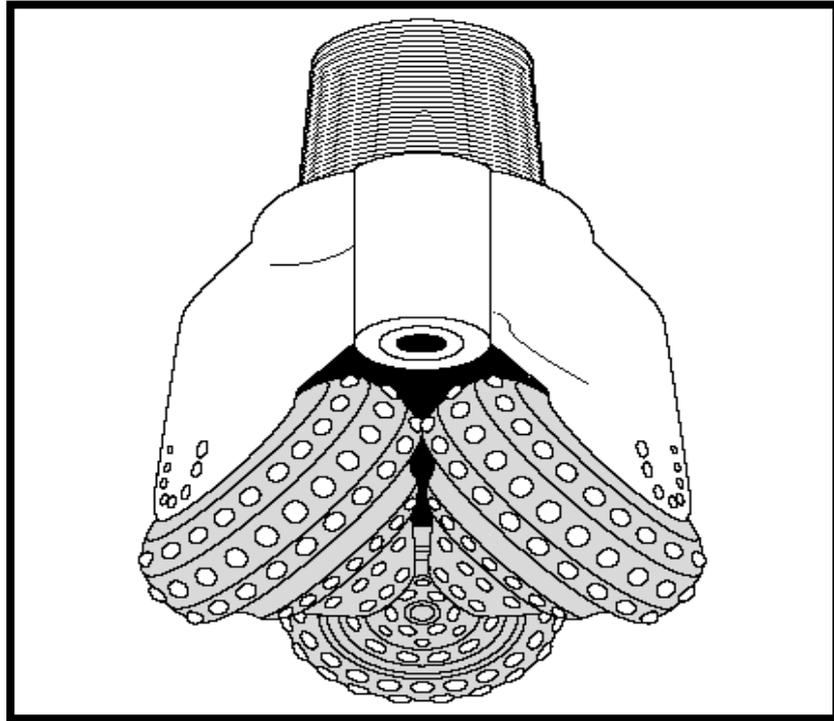


Figura 4.3- Conos con disposición excéntrica  
Fuente Mining & construcción Smith

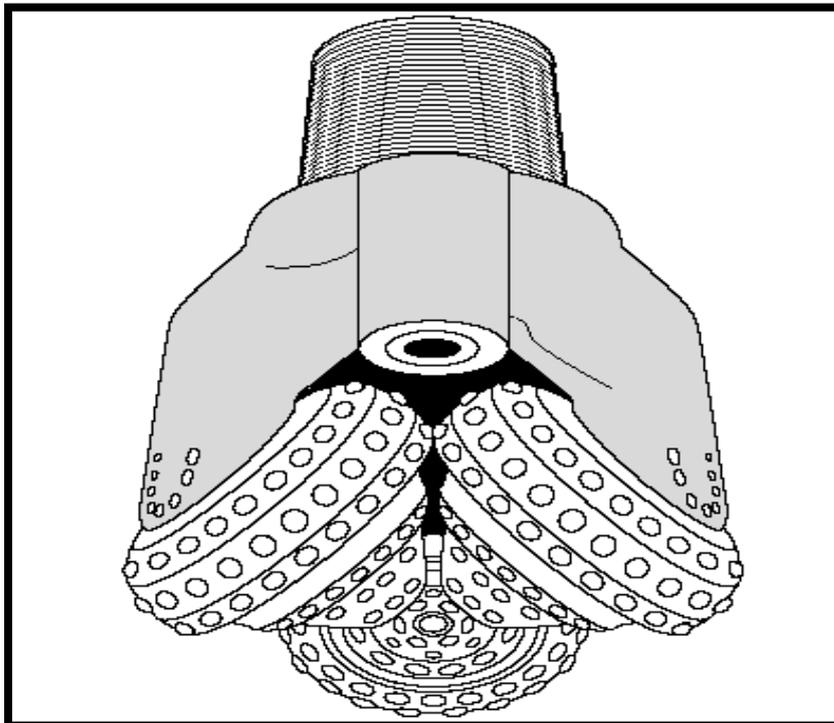


Figura 4.4- Pata de la broca  
Fuente Mining & construcción Smith

#### **4.2.1.3 RODAMIENTOS A RODILLOS**

Los rodamientos a rodillos están diseñados para soportar la mayor porción de las fuerzas radiales. Figura 4.5

#### **4.2.1.4 RODAMIENTOS A BOLAS**

La función primaria de diseño del rodamiento a bolas del tricono es para retener (o trabar) el cono en la pista de la pata. Figura 4.6

#### **4.2.1.5 COJINETES DE FRICCIÓN**

Cuando hay limitaciones de diseño por espacio o lugar, el rodamiento de rodillos interno a veces es reemplazado por un cojinete a fricción. Este cojinete interno soporta la carga radial junto con el rodamiento a rodillos exterior. Figura 4.7

#### **4.2.1.6 BOTÓN DE EMPUJE**

Los cojinetes de empuje están diseñados para soportar las cargas o fuerzas axiales. Hay dos cojinetes de empuje, uno primario y otro secundario. El primario es el botón de empuje. A medida que el botón de empuje se desgasta, el cojinete secundario ayuda a soportar la carga. Figura 4.8

#### **4.2.1.7 TOBERA JET**

Las toberas cambiables están ubicadas en el tricono a fin de regular la presión y volumen restante de aire para obtener la máxima circulación en el fondo del taladro. Figura 4.9

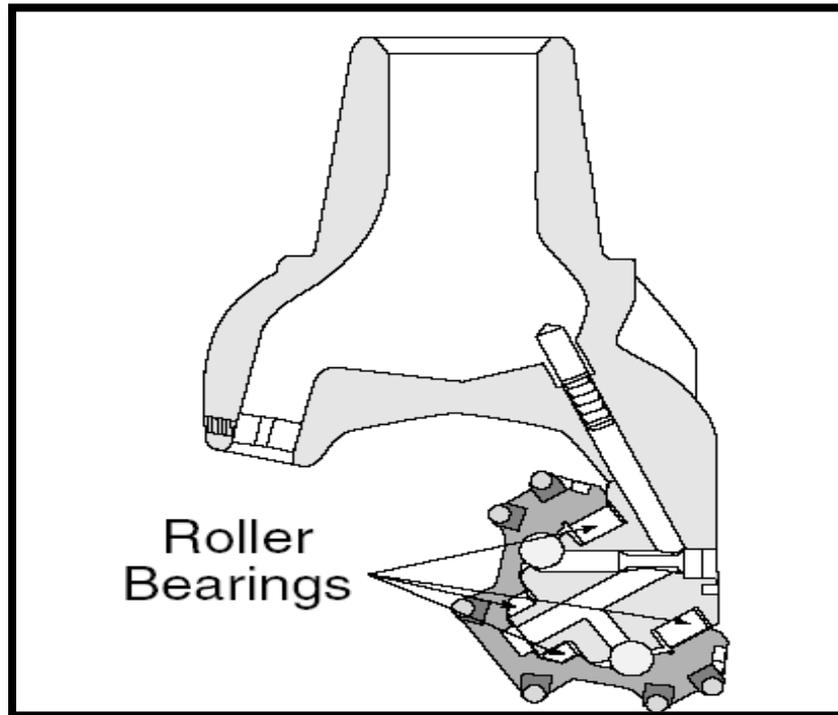


Figura 4.5 – Rodamiento a rodillos  
Fuente Mining & construccion Smith

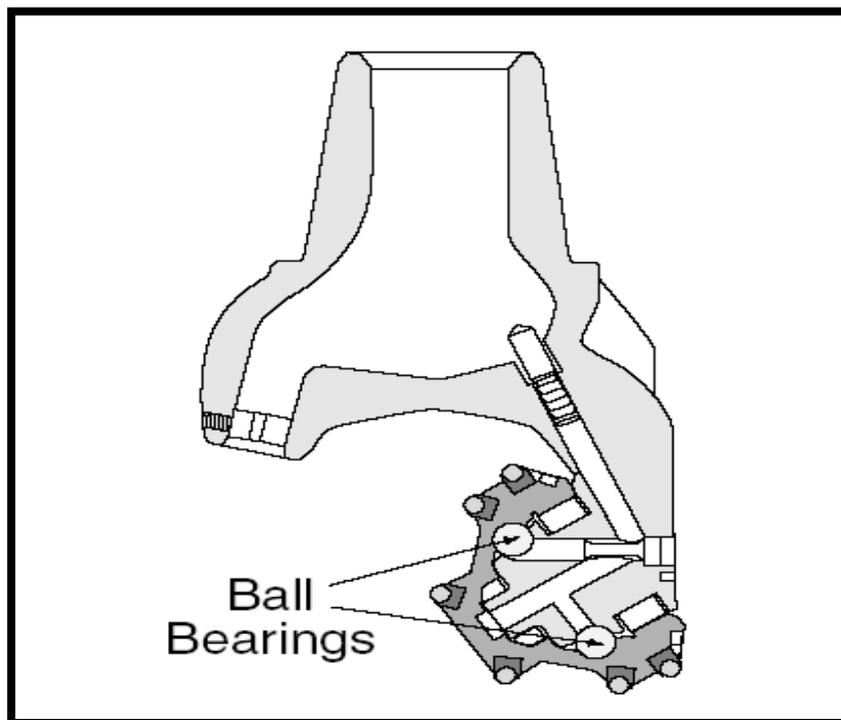


Figura 4.6 – Rodamiento a bolas  
Fuente Mining & construccion Smith

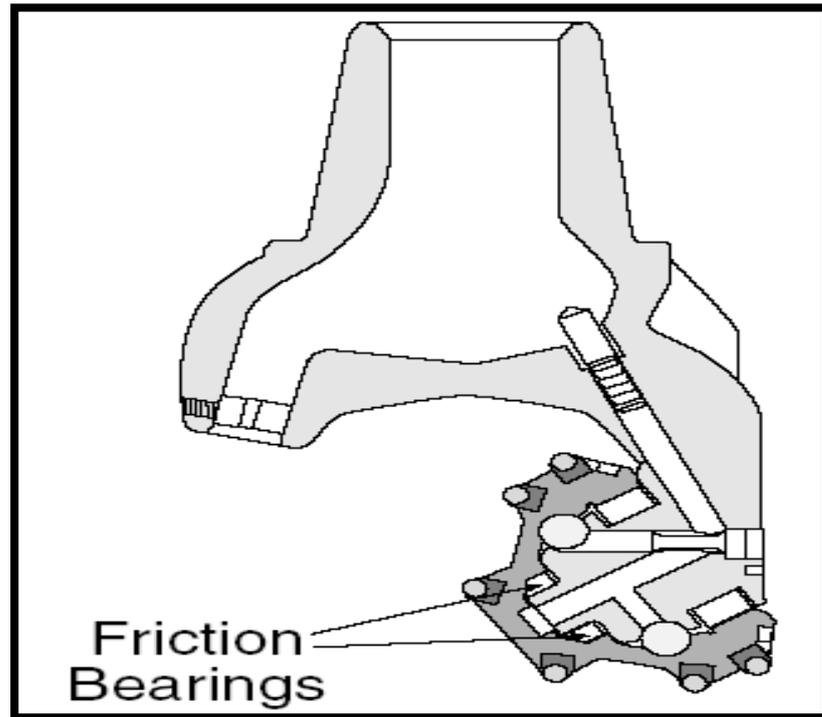


Figura 4.7 – Cojinete de fricción  
Fuente Mining & construccion Smith

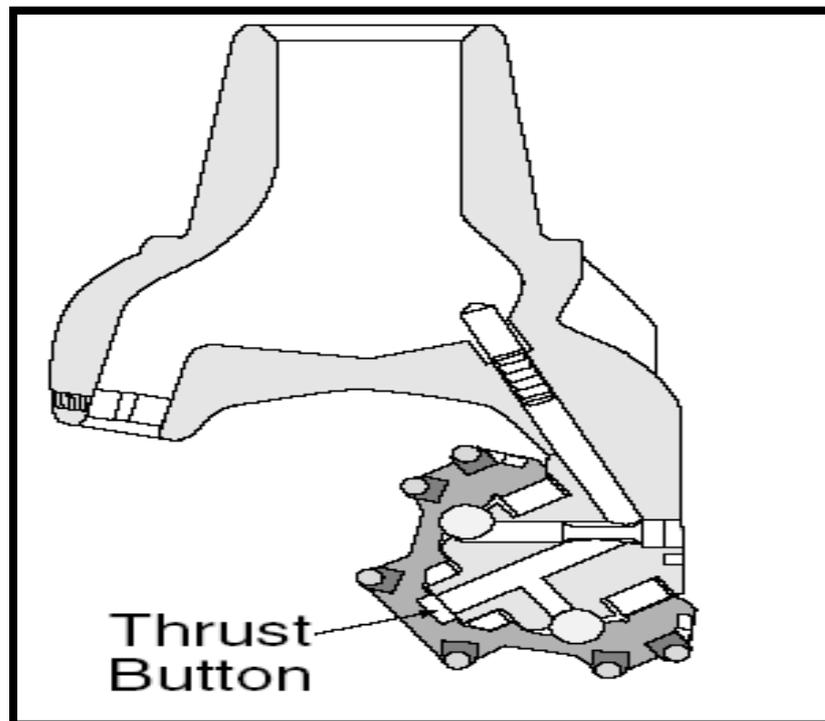


Figura 4.8 – Botón de empuje  
Fuente Mining & construccion Smith

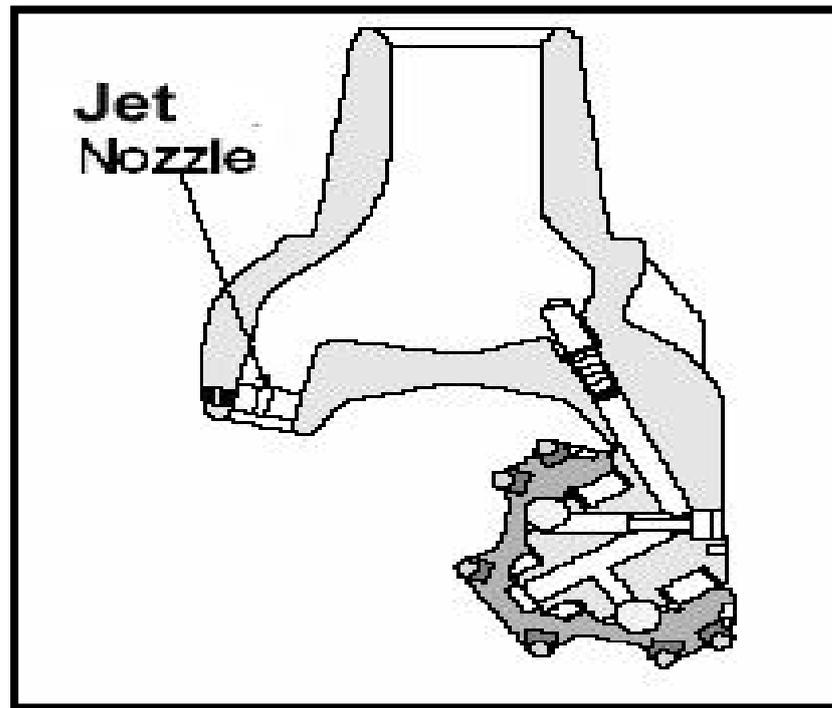


Figura 4.9– Toberas Jet  
Fuente Mining & construccion Smith

#### 4.2.1.8 CANALES DE ENFRIAMIENTO

Los canales de enfriamiento por aire están diseñados para dirigir una porción de la circulación a través de los cojinetes para su enfriamiento y para evitar que la suciedad o el polvo penetre en los cojinetes. Figura 4.10

#### 4.2.1.9 TUBO DE AIRE

El tubo de aire está diseñado para permitir que un porcentaje del aire comprimido sea dirigido a los canales de aire para el enfriamiento de los cojinetes. El tubo de aire además evita que partículas mayores entren en los canales de aire y causen restricciones de aire a los cojinetes. Figura 4.11

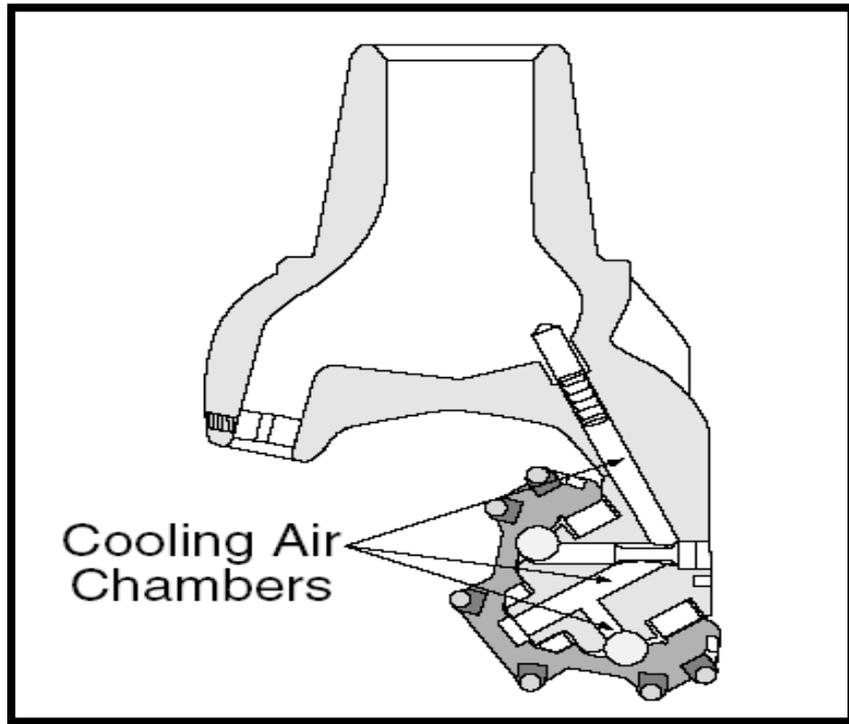


Figura 4.10 – Canales de enfriamiento  
Fuente Mining & construion Smith

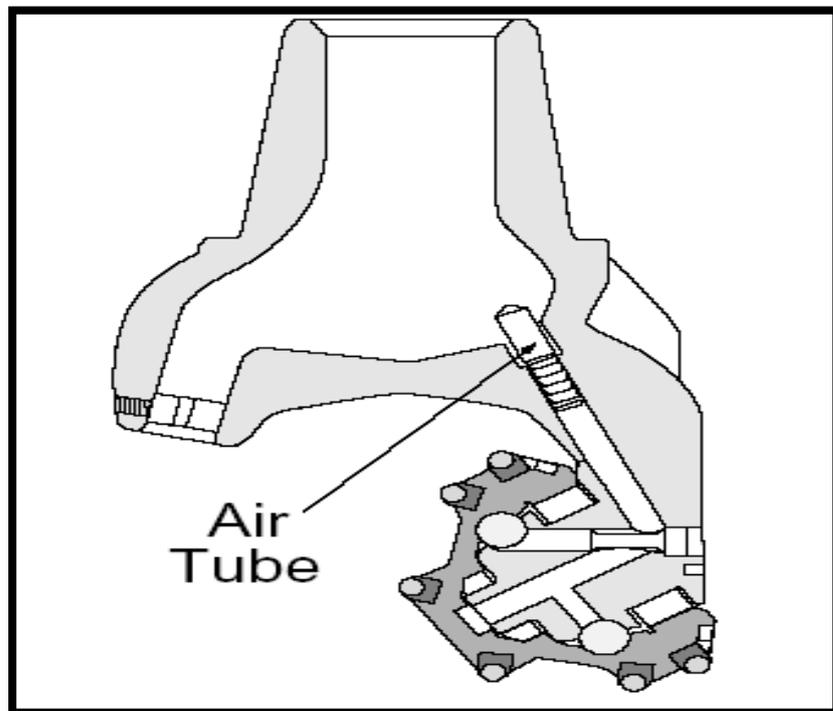


Figura 4.11 Tubo de aire  
Fuente Mining & construion Smith

#### 4.2.1.10 VÁLVULA ANTI-RETORNO

La válvula anti-retorno está diseñada para evitar que el agua del pozo penetre y tapone los orificios de aire cuando se apaga el compresor. La válvula anti-retorno puede quitarse o colocarse de acuerdo a la necesidad. Figura 4.12

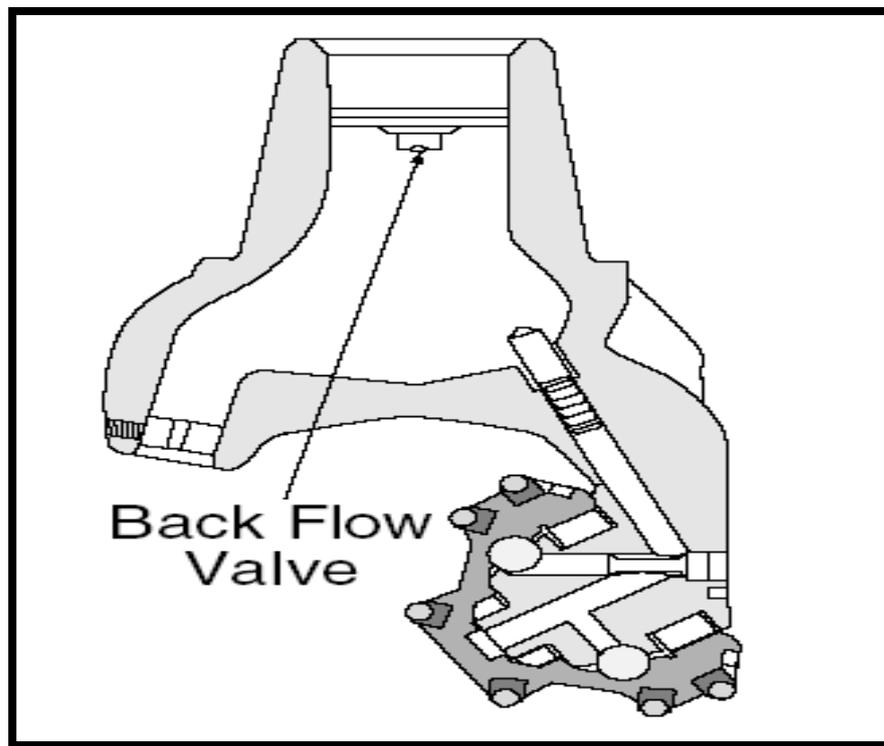


Figura 4.12 – Válvula anti retorno  
Fuente Mining & construction Smith

#### 4.2.1.11 CARBURO DE TUNGSTENO

Las brocas triconicas se fabrican en dos tipos, brocas con dientes de acero y brocas con inserto de carburo de tungsteno, para formaciones suaves medias y duras.

El carburo de tungsteno cementado utilizado en las brocas triconicas es una mezcla de carburo de tungsteno con cobalto, el tungsteno provee a los insertos la dureza y la resistencia al desgaste mientras que el cobalto provee la tenacidad.

El carburo de tungsteno se produce mediante el proceso metalúrgico del polvo, donde los ingredientes en polvo son compactados a altas presiones y temperaturas.

Propiedades de los insertos de carburo de tungsteno de la broca triconica:

- a) Alta resistencia a desgaste, con una dureza 1100-1500H( 9 en la escala de Mohs)
- b) Mayor resistencia a la compresión que el acero
- c) Alta densidad  $14500 \text{ kg/m}^3$
- d) Mayor conductividad de la temperatura que el acero
- e) Menor coeficiente de expansión termal que el acero (aproximadamente 50%)

La resistencia al desgaste (dureza) y tenacidad (resistencia a la compresión y a la tracción) son factores importantes en perforación rotativa y están influenciados por el contenido de cobalto y por el tamaño del grano de tungsteno.

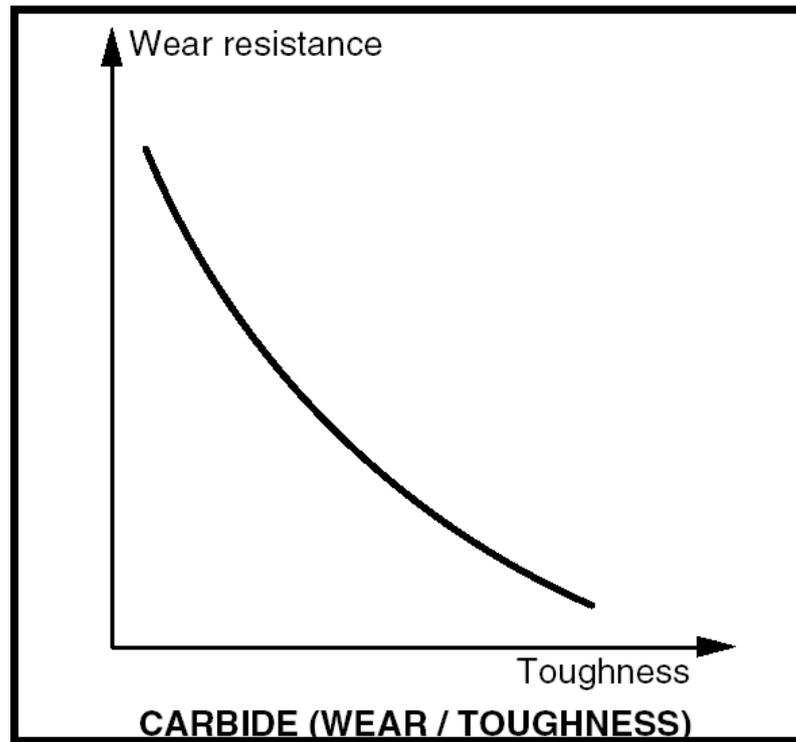


Figura 4.13- a mayor resistencia al desgaste menor tenacidad  
Fuente: Blasthole drill open pit Atlas copco / Sandvik

#### 4.2.2 RENDIMIENTO DE LAS BROCAS TRICONICAS

El rendimiento de las brocas tricónicas se ve afectado por diversos factores como resistencia compresiva del macizo rocoso o tipo de formaciones que se va perforar. Conociendo el tipo de terreno se puede seleccionar el tipo de inserto a utilizar, por ejemplo en terrenos duros se deberá utilizar insertos esféricos cortos de punta roma con pequeños espaciamientos entre sí como se muestra en la figura 4.14.

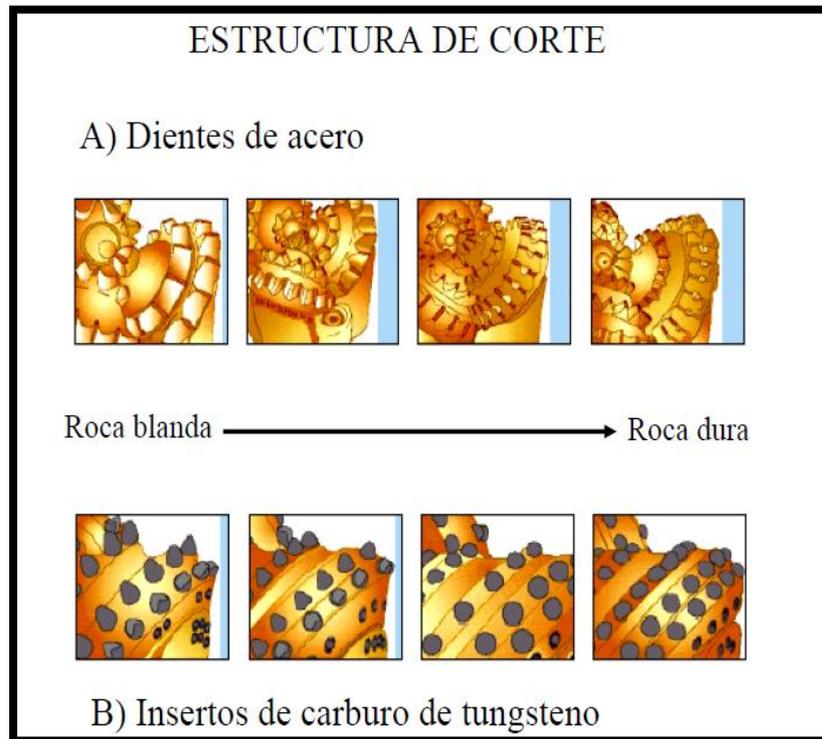


Figura 4.14 Triconos para diferentes formaciones  
Fuente: perforación triconica Sandvik Smith

La adecuada selección de la broca será fundamental para optimizar la velocidad de penetración de la roca y vida útil de las mismas y a sí mismo la reducción de los costos de perforación, para ello se tendrá en cuenta el control de los siguientes parámetros de perforación:

#### 4.2.2.1 ENERGÍA

Se considera que la medida de la eficiencia de la perforadora es la energía específica o energía consumida por unidad de volumen de roca fracturada.

#### 4.2.2.2 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LA BROCA

La velocidad de rotación dependerá del tipo de terreno que se va a perforar, puesto como bien se sabe el macizo rocoso es aleatorio no solo puede cambiar

de un taladro a otro sino que puede ser de un metro a otro y esto dependerá más que nada del tino o experiencia del operador, ya que este jugará tanto con la velocidad de rotación como con la fuerza de empuje. Se recomienda por experiencia que la velocidad de rotación varié entre 30- 100 rpm, así asegurando una adecuada velocidad de penetración y una adecuada vida útil de la broca.

#### **4.2.2.3 PRESIÓN EJERCIDA SOBRE EL FONDO PULL DOWN**

La fuerza de avance es la suma del peso de la broca, de las barras de perforación, la unidad de rotación y la fuerza transmitida por el sistema de avance. El doctor Alan Bauer recomendó para los siguientes taladros:

$\emptyset 6 \frac{3}{4}'' \rightarrow 5,500 \text{ lb/pulg}$

$\emptyset 9 \frac{7}{8}'' \rightarrow 6,500 \text{ lb/pulg}$

$\emptyset 12 \frac{1}{4}'' \rightarrow 7,200 \text{ lb/pulg}$

Como se sabe la fuerza de avance dependerá de la resistencia compresiva de la roca y el diámetro del taladro que se va a perforar. En formaciones duras se utilizara mayor presión sobre el fondo y disminuir la velocidad de rotación, hasta vencer la resistencia compresiva de la roca, caso contrario la broca estaría dando vueltas sin penetrarlas.

En formaciones suaves se utilizara menor presión sobre el fondo y se aumentara la velocidad de rotación.

#### **4.2.2.4 REQUERIMIENTO DE AIRE Y VELOCIDAD DE BARRIDO**

Para una eficiente perforación es importante un volumen suficiente de aire, que permita una adecuada velocidad de barrido (bailing velocity) para la evacuación del detritus, también para refrigerar los rodamientos de villas y rodillos. El aire circula desde el compresor al mástil por una manguera flexible, el cual se debe verificar que no se encuentre dañada o doblada en la operación, y desde este al cabezal de rotación para luego circular por el interior de la barra hasta la broca.

La medición de la presión del aire de las perforadoras nos permite conocer la eficiencia del trabajo del compresor, la presión de aire que llega a la broca y la velocidad de barrido. Por otro lado la velocidad de barrido recomendada es la siguiente:

- 5,000 – 7,000 pies por minuto para detritus ligeros y secos
- 7,000 – 9,000 pies por minuto para detritus pesados y húmedos

La velocidad de barrido determina con cuanta eficiencia se evacua el detritus a la superficie desde el fondo del taladro. Se determina por el caudal de aire suministrado por el compresor y por el espacio anular entre la barra de perforación y la pared del taladro, por otro lado se tiene que tener presente que el cambio de altura sobre el nivel del mar también genera cambios en la densidad del aire, la presión atmosférica y su temperatura ocasionando una pérdida en la eficiencia de la compresora.



Figura 4.15. Herramientas para medir el caudal de aire  
Fuente Mining & construccion Atlas Copco

Para calcular la velocidad de barrido debemos emplear el siguiente modelo matemático propuesto por el Dr. Alan Bauer, donde:

- V= velocidad de barrido (pies/minuto)
- Q= Caudal de aire suministrado por el compresor multiplicado por el factor de corrección por altura y temperatura.(CFM)
- D= Diámetro de la broca (pulgadas)
- d= Diámetro de la barra (pulgadas)

$$V = 183.35x \frac{Q}{(D^2-d^2)} \dots\dots\dots \text{Ecuación (4.1)}$$

Por otro lado, se sabe que por cada 1000 msnm el rendimiento de las compresoras baja en 10%. Como se aprecia en la siguiente gráfica.

Tabla 4.1. Eficiencia del aire comprimido a diferentes alturas

| <b><u>EFICIENCIA DEL AIRE COMPRIMIDO A DIFERENTES ALTURAS</u></b> |                                  |                                    |                                |
|---|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| <b>ALTURA PIES Y MTS.</b>   | <b>PRESION BAROMÉTRICA P.S.I</b> | <b>% DE EFICIENCIA VOLUMETRICA</b> | <b>% DE PERDIDA POR ALTURA</b> |
| 0 PIES = 0 MTS.   | 14.75                            | 100 %                              | 0 %                            |
| 1.000 PIES = 304.8 MTS.   | 14.20                            | 97 %                               | 3 %                            |
| 2.000 PIES = 609.6 MTS.   | 13.67                            | 94 %                               | 7 %                            |
| 3.000 PIES = 914.4 MTS.   | 13.16                            | 91 %                               | 10 %                           |
| 4.000 PIES = 1.219 MTS.   | 12.67                            | 87 %                               | 13 %                           |
| 5.000 PIES = 1.524 MTS.   | 12.20                            | 84 %                               | 16 %                           |
| 6.000 PIES = 1.828.8 MTS.   | 11.73                            | 81 %                               | 19 %                           |
| 7.000 PIES = 2.133.6 MTS.   | 11.30                            | 78 %                               | 22 %                           |
| 8.000 PIES = 2.438.4 MTS.   | 10.87                            | 75 %                               | 25 %                           |
| 9.000 PIES = 2.743.2 MTS.   | 10.46                            | 72 %                               | 28 %                           |
| 10.000 PIES = 3.048 MTS.  | 10.07                            | 69 %                               | 31 %                           |
| 11.000 PIES = 3.352.8 MTS.  | 9.70                             | 66 %                               | 34 %                           |
| 12.000 PIES = 3.657.6 MTS.  | 9.34                             | 63 %                               | 37 %                           |
| 13.000 PIES = 3.962.4 MTS.  | 8.98                             | 60 %                               | 40 %                           |
| 14.000 PIES = 4.267.2 MTS.  | 8.65                             | 57 %                               | 43 %                           |
| 15.000 PIES = 4.572.0 MTS.  | 8.32                             | 54 %                               | 46 %                           |
| 16.000 PIES = 4.876.8 MTS.  | 8.00                             | 51 %                               | 49 %                           |
| 17.000 PIES = 5.181.6 MTS.  | 7.69                             | 48 %                               | 52 %                           |
| 18.000 PIES = 5.486.4 MTS.  | 7.39                             | 45 %                               | 55 %                           |

Fuente Mining &amp; construion Atlas Copco

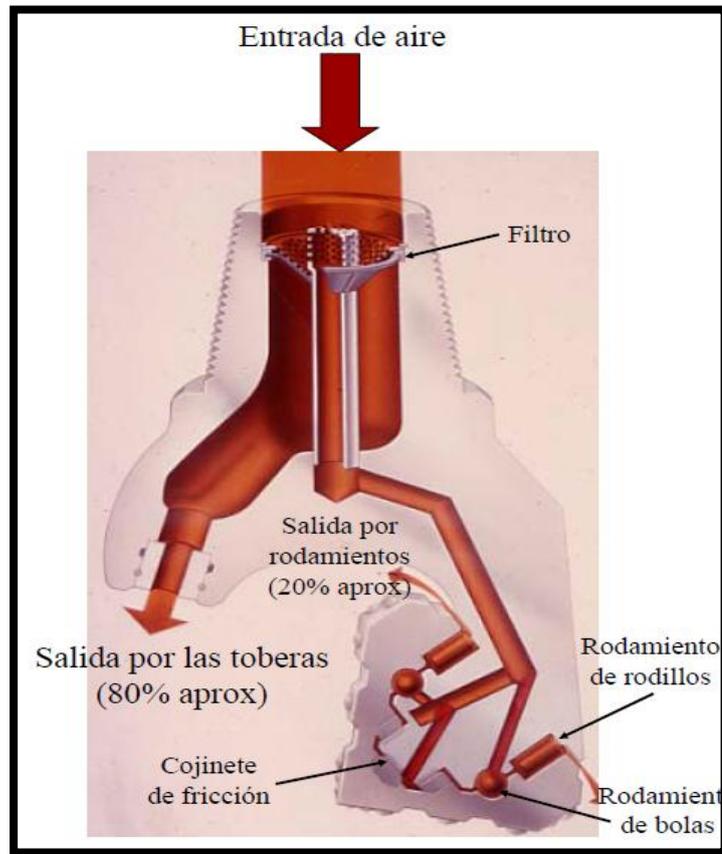


Figura 4.16 Entrega del aire a la broca  
Fuente Mining & construion Atlas Copco

#### 4.2.2.5 VELOCIDAD DE PENETRACIÓN

Hay estudios que muestran que la velocidad de penetración aumentara linealmente con el aumento de la velocidad de rotación y asimismo con la fuerza de avance entonces ¿por qué los ingenieros de perforación no solicitan el aumento de estos parámetros a los operadores? La respuesta es sencilla puesto que al aumentar estos parámetros generaremos mayor vibraciones por ende mayor desgaste del equipo de perforación y menor vida útil de las brocas; pero más importante aún es que generara un ambiente muy desagradable para el operador.

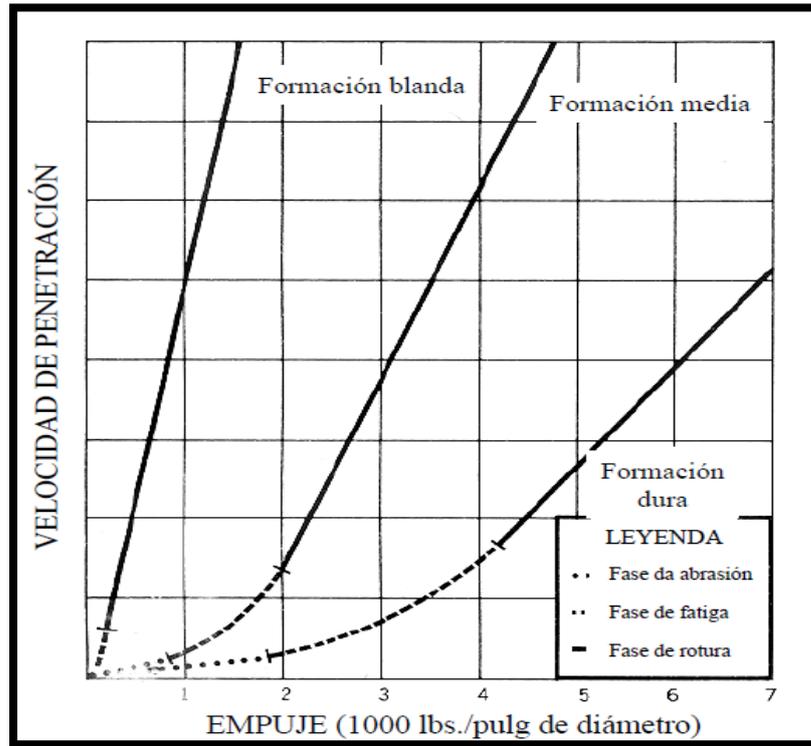


Figura 4.17 Rango de penetración vs Fuerza de avance  
Fuente Mining & construion Atlas Copco

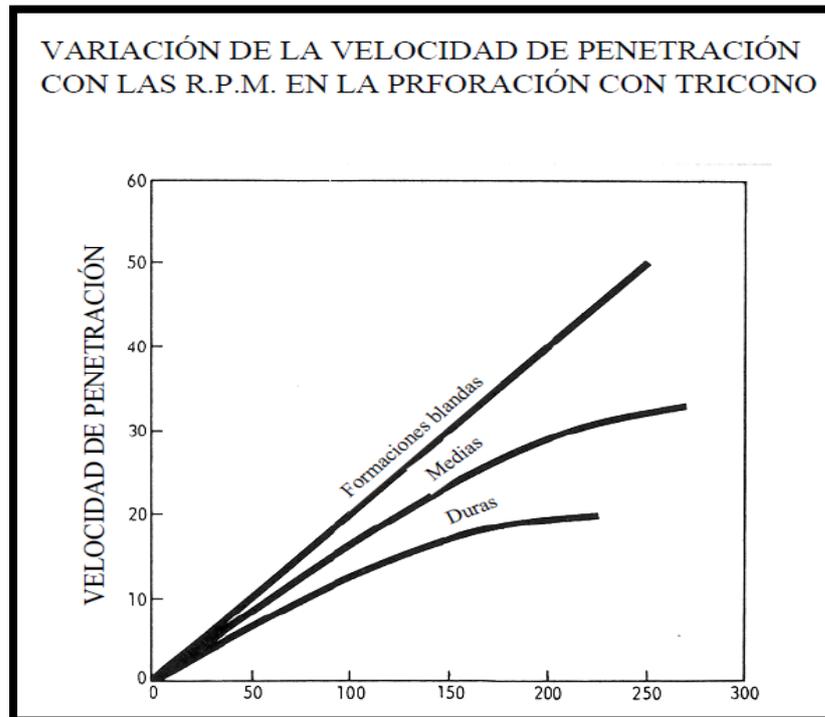


Figura 4.18 Velocidad de penetración vs Velocidad de rotación  
Fuente Mining & construion Atlas Copco

La determinación de la velocidad de penetración depende de varios factores o parámetros vistos anteriormente lo cual todo esto incluye las características geomecánicas del macizo rocoso. Existen 2 métodos clásicos para la determinación de la velocidad de penetración:

- A. Ensayo sobre muestras conocidos como “MICRO BIT” y el “IDENTER TES” se realiza estos ensayos por los fabricantes del tricono y en los resultados emitidos se muestra el tipo de tricono recomendado, fuerza de empuje y velocidad de rotación recomendada, velocidad de penetración estimada y vida útil promedio de la broca. La fiabilidad de los resultados depende de la calidad de las muestras analizadas.



Figura 4.19 Micro bit test  
Fuente Mining & construccion Atlas Copco

B. Calculo de la velocidad de penetración a partir de modelos matemáticos propuestos por diversos investigadores que parten de la resistencia compresiva de la roca, entre ellos tenemos a A. Bauer, P. Calder y R. Praillet :

$$PR = [61 - 28 \log Sc] \frac{Wx0.65}{D} x \frac{RPM}{300} \dots\dots Ecuación (4.2)$$

La velocidad de penetración propuesta por Alan Bauer donde:

- PR= Rango de penetración (pies/hora)
- Sc= Resistencia compresiva un axial en 1000 psi
- W/D=Peso por pulgadas de diámetro de la broca en 1000 lb
- RPM=Velocidad de rotación

### 4.3 PERFORACIÓN ROTO- PERCUTIVA

Este método de perforación se caracteriza por utilizar energía de choque para triturar la roca, esta energía se produce mediante impactos producidos por los golpes del pistón el cual es transmitido mediante ondas de choque hacia la broca en rotación. La perforación rotopercutiva se clasifican en dos tipos:

#### 4.3.1 PERFORACIÓN ROTOPERCUTIVA *TOP HAMMER*

Las perforadoras top hammer se le llama así debido a que el martillo de perforación trabaja en la superficie del terreno y la columna se instala entre el martillo y la broca. Una de sus ventajas es que puede perforar todo tipo de ángulos, es versátil para ingresar a plataformas de perforación sinuosas. Se utiliza para la perforación

de taladros de pequeño diámetro (1 5/8"-5 1/2) y profundidad cortas debido a que se generan desviaciones a partir de los 12 metros. Dentro de las desventajas de las perforadoras top hammer podemos mencionar:

- En la longitud de los taladros cuan más profundo sea el taladro se genera mayor desviación de los taladros y perdida de energía en la columna de perforación reduciéndose así la velocidad de perforación.
- El ruido también es otra desventaja ya que el martillo se encuentra en la superficie generando así niveles de ruidos que sobrepasen los límites permitidos.



Figura 4.20 martillo top hammer  
Fuente: Pantera 1500 perforación de pre corte y secundario en MLZ

### 4.3.2 PERFORACIÓN ROTOPERCUTIVA DTH

En este tipo de perforación el sistema percutivo trabaja en la parte inferior de la columna de perforación, los elementos que proporcionan la rotación y empuje son netamente características de la perforadora y están situados en el cabezal de rotación; su principal característica es que actúa directamente sobre la roca que se va perforar, esto hace que la velocidad de perforación sea eficiente ya que la pérdida de energía utilizada para romper la roca es mínima.

### 4.3.3 FUNCIONAMIENTO DEL MARTILLO DE FONDO

El martillo de fondo tiene forma cilíndrica y el mecanismo de percusión funciona de forma similar como se aprecia en el siguiente gráfico:

- a) **Inicio carrera ascendente:** la posición a muestra el inicio de la carrera ascendente del pistón, el aire a presión abre la válvula anti retorno situado en la parte superior del martillo y entra en el tubo central del redistribuidor de aire, de las tres oquedades solo la central se encuentra abierta de forma que el aire llega a la parte inferior del pistón a través de uno de los conductores internos del mismo y lo impulsa hacia arriba.
- b) **Inicio carrera descendente:** en la posición b el pistón se encuentra en la parte superior y ahora la oquedad inferior es la única que se encuentra abierta, así el aire llega a la parte superior del pistón a través del otro conducto y lo impulsa hacia abajo.

- c) **Barrido:** en la posición c se muestra el caso en que el martillo de fondo no está perforando, en cuyo caso la broca no se apoya sobre el terreno y tanto la broca como el pistón se encuentran en una posición más baja. En estas circunstancias el aire sale por la lumbrera superior y por el interior del pistón, se comunica con los orificios de barrido de la broca, realizando un soplado del taladro sin accionar el mecanismo de percusión del martillo, evitando así la percusión en vacío que causaría la ruptura del pistón.

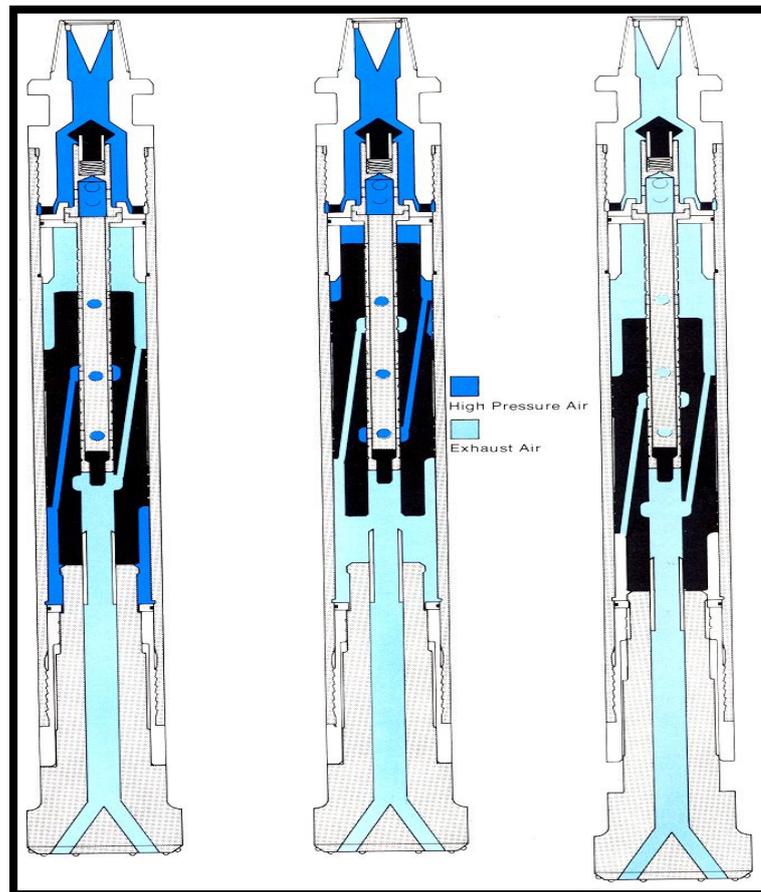


Figura 4.21 funcionamiento del martillo de fondo  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

### 4.3.4 SELECCIÓN DEL MARTILLO

La principal recomendación para la selección de un martillo de fondo son las siguientes:

- a) **Diámetro de perforación:** la primera recomendación para una perforación eficiente es que el diámetro exterior del martillo y el diámetro exterior de la broca debe existir una diferencia de diámetro ideal de 1/2" o 12.7 mm. Este espacio anular que se genera entre el taladro y el martillo de fondo es suficiente para la evacuación del a detritus.

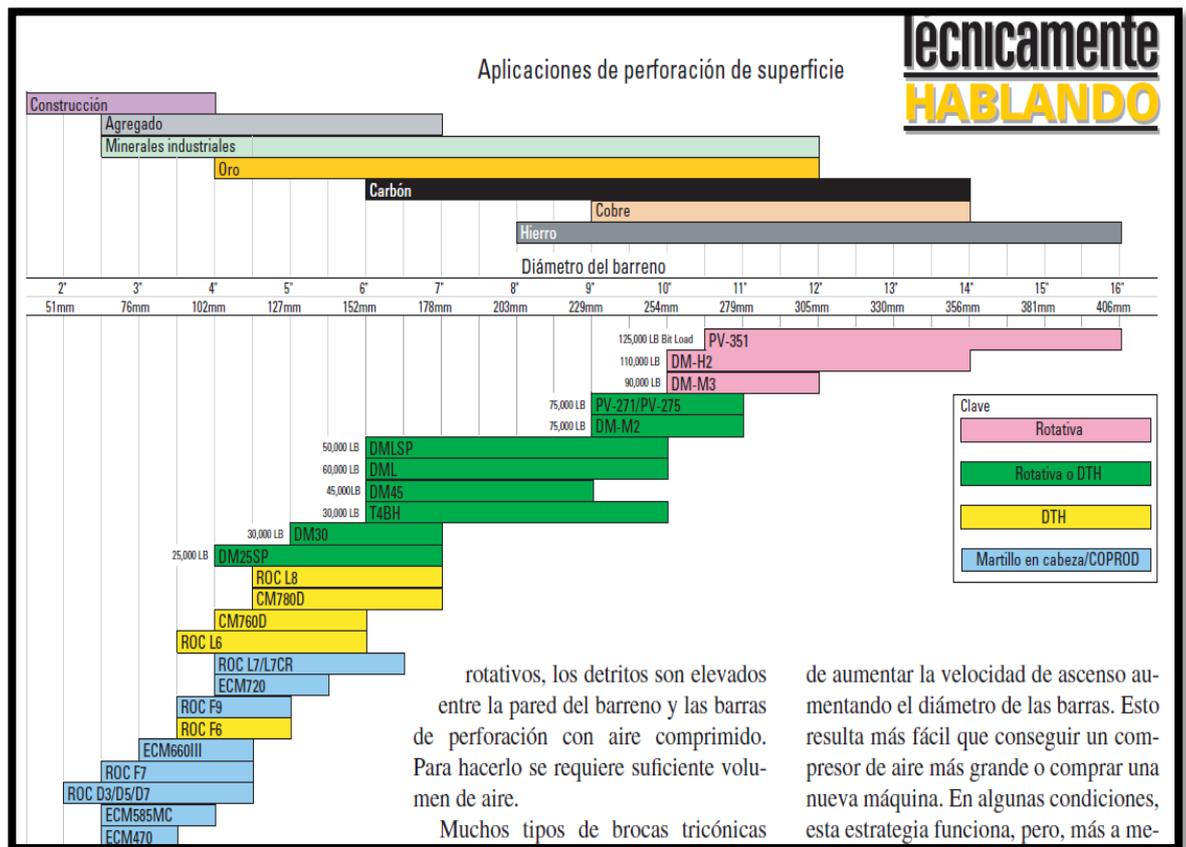


Figura 4.22 selección del equipo de perforación según el diámetro  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

Como se aprecia en la figura 4.22 en diámetros bajo 152 mm ( $< 6''$  de diámetro) se perfora mejor con martillos de perforación top hammer, por encima de ese diámetro lo común es usar perforación rotativa. Sin embargo para macizos rocosos más duros con resistencia compresiva superiores a 100 Mpa la perforación con martillo de fondo es más efectiva que con una perforación rotativa generando así una mayor velocidad de penetración por ende un TDC adecuado; claro esta si se cuenta con la suficiente volumen de aire (CFM) para el diámetro a perforar.

- b) **Requerimiento de aire:** para perforación con martillo de fondo se debe tener en cuenta el aire disponible en los compresores del equipo, en la medida que los martillos aumenten de diámetro se requiere un mayor consumo de aire pero una menor presión. Para producir una presión de aire que se traduzca directamente en energía (BPM) se requiere un cierto volumen de aire ya que el área en el cual trabajara el pistón se limita al diámetro del taladro que se va a realizar.

Se recomienda consultar el catalogo del fabricante del martillo para conocer los parámetros de uso. Como se aprecia en la figura 4.23 a mayor diámetro  $15 \frac{7}{8}''$  que se requiera perforar se necesitara mayor volumen (1200-2500 cfm) de airea por ende menor presión (100-250 psi) ya que el área de trabajo del pistón se limita al área de perforación.

**NIIMA**  
FABRICANTE DE MARTILLOS DE FONDO Y BROCAS

## Patriot® 180

### Martillo de Fondo

**CARACTERÍSTICAS**

- Supera ampliamente a los martillos de la competencia en velocidad y duración
- Diseño simplificado sin muchos componentes internos
- Su alta frecuencia de perforación ofrece menor vibración y una suave operación
- Su eficiente diseño requiere menos aire lo que significa un ahorro de combustible
- Diseñado para trabajar con una presión de hasta 13.6 BAR (200 PSI)
- Gran capacidad de perforación en elevados volúmenes de agua
- Menos piezas para facilitar el mantenimiento
- Sistema de plato y disco para eliminar el desgaste y corrosión de los canales

**CONSUMO DE AIRE**

| PSI | BAR  | LITROS/SEGUNDO | CFM  |
|-----|------|----------------|------|
| 100 | 6.8  | 566            | 1200 |
| 150 | 10.2 | 755            | 1600 |
| 200 | 13.6 | 944            | 2000 |
|     |      | 1133           | 2400 |
|     |      | 1322           | 2800 |

**ESPECIFICACIONES**

|   |         |         |
|---|---------|---------|
| Diámetro externo                          | 394 mm  | 15-1/2" |
| Diámetro interno del cilindro             | 337 mm  | 13-1/4" |
| Recorrido del pistón                      | 114 mm  | 4-1/2"  |
| Peso (el martillo solo)                   | 1134 kg | 2500 lb |
| Largo (de extremo a extremo)              | 167 cm  | 65-1/8" |
| Largo (del extremo a la cara de la broca) | 193 cm  | 75-1/8" |

Figura 4.23 martillo de fondo de 394 mm de diámetro

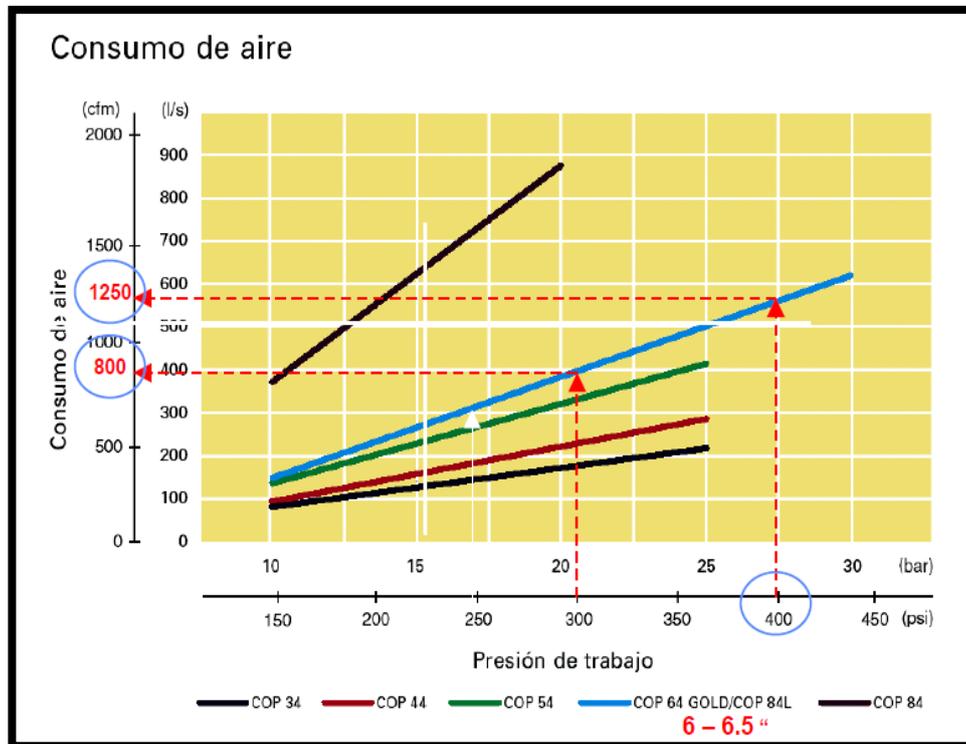


Figura 4.24 Requerimiento de aire del martillo

En la figura 4.24 y 4.25 muestra el requerimiento de aire para obtener velocidades óptimas, como se aprecia aire a alta presión 250-350 PSI con ello se consigue aumentar la energía de golpe del pistón y los BPM (golpes por minuto) como resultado se aumentaran la velocidad de penetración.

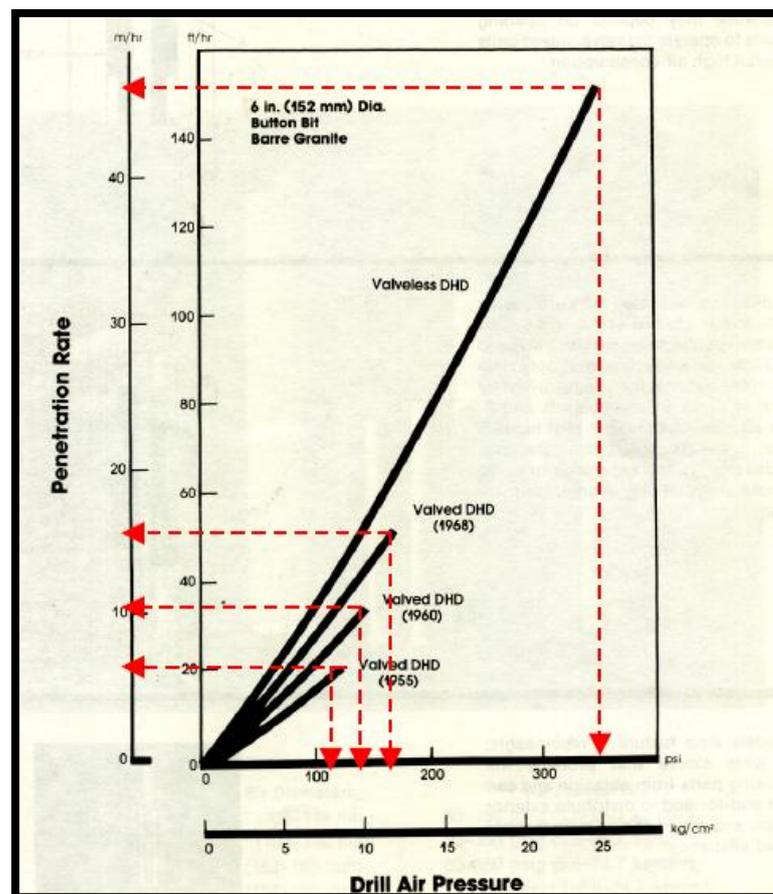


Figura 4.25 velocidad de perforación vs presión de perforación

- c) **Equipos de perforación:** las principales características de un equipo de perforación para trabajar con martillos de fondo deben ser el torque para la apropiada rotación, y su capacidad de levante. Los martillos de fondo se pueden usar en track drills o en perforadoras rotativas.



Figura 4.26 pit viper (peforadora rotativa) – (track drill) Smart rock  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco



Figura 4.27 martillos de fondo desde 102mm-279 mm  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

#### 4.3.5 COMPONENTES DE UN MARTILLO

- a) **Back head (culata):** es el accesorio que se conecta a la barra de perforación, existen diferentes tipos de hilos (rosca api y beco).



Figura 4.28 Culata martillo Numa de 6''  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

- b) **Válvula check:** sella al martillo cuando la presión de aire se corta, previene que el agua penetre el mecanismo y dañe el interior del martillo.



Figura 4.29 válvula check para martillo Numa de 6''  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

- c) **Redistribuidor de aire (feet tuve):** canaliza el aire a través del martillo DHD, para la percusión del pistón y la evacuación del detritus.



Figura 4.30 distribuidor de aire para martillo Numa de 6''  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

- d) **Pistón:** provee el poder percutivo a la broca, solido con un solo agujero su diseño depende de las condiciones del martillo.



Figura 4.31 pistón para martillo Numa de 6''  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

- e) **Driver sub (chuck):** ayuda a retener la broca y evita el desgaste del case.



Figura 4.32 driver sub para martillo Numa de 6"  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

- f) **Cilindro (pistón case):** protege los accesorios internos del martillo, la mayoría de los martillos tienen un diseño con case reversible para obtener una mayor vida útil, algunos case son diseñados con espesores gruesos para terrenos abrasivos.



Figura 4.33 case reversible para martillo Numa de 6"  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

### 4.3.6 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN CON MARTILLO DTH

a) **Velocidad Rotación:** con la velocidad de rotación se hace girar la broca para que los impactos que se producen sobre la roca sean en distintos puntos. una adecuada rotación es fundamental para prolongar el tiempo de vida del martillo y la broca, también mantiene ajustadas las uniones de la columna de perforación, se recomienda una velocidad de rotación entre 20-80 rpm que dependerá del tipo de roca, a continuación se muestra algunos métodos propuestos por los fabricantes para calcular las rpm de la broca:

Tabla 4.2 velocidad de rotación promedio utilizado en la zanja

| Motor de rotación (rpm) - Torque |         | inicio | medio | alto |
|----------------------------------|---------|--------|-------|------|
|                                  |         | 1200   | 1800  | 2100 |
| Broca 6 3/4"                     | Sandvik |        |       |      |
| stroke/min                       | 2100    |        |       |      |
| bit size mm                      | 171.5   |        |       |      |
| Nº insertos                      | 20      |        |       |      |
| button size mm                   | 16      |        |       |      |
| bit cricunference                | 539     |        |       |      |
| strokes/revo                     | 34      |        |       |      |
| RPM                              | 62      |        |       |      |
| Recomendación del fabricante     | 37      |        |       |      |

Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

En si la velocidad de rotación dependerá del tipo de roca en la que se va trabajar como condiciones del terreno, dureza, abrasividad, etc. por consiguiente también dependerá del tino del operador que es adquirido con la experiencia, según el cuadro 4.3 las RPM se encuentran entre 30 y 80 rpm para una broca de 6 3/4".a

continuación se muestra las recomendaciones para una adecuada velocidad de rotación:

- **Rotación demasiado lento:** cuando la velocidad de rotación es muy lenta los botones tienden a enterrarse desgastándose o desprendiéndose los botones periféricos.
- **Rotación demasiado rápida:** al aumentar la velocidad de rotación no necesariamente se incrementa el rango de penetración, esto desgasta los insertos de carburo de tungsteno.



Figura 4.34 brocas Holco Vs brocas Sandvik  
Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

b) **Peso sobre la broca:** solo se requiere el peso suficiente para mantener la broca ajustada al fondo del taladro de 300 a 500 libras X pulgada de diámetro de broca, se incrementa solo para eliminar saltos dentro del taladro. Perforar con insuficiente peso también es perjudicial puede ocasionar problemas como:

- Desprendimientos de los insertos.
- Ruptura del pistón.
- Fallas en las partes internas del martillo.

Ejemplo con un martillo DTH de 6" de diámetro y brocas de 6 3/4" (caso la Zanja)

$$500 \times 6.750 = 3375 \text{ libras}$$

Teóricamente para convertir libras a psi tenemos la siguiente indicación de los fabricantes de los equipos perforadores:

En equipos con torres de 9.14 metros 100psi equivalen a 1400 libras (esto es en fuerza de empuje PULL DOWN), y 100psi equivalen a 575 libras (esto es en fuerza de retracción HOLL D BACK), pero lo más importante es que los operadores encuentren el punto neutro de cada equipo ya que estos pueden ser similares, pero siempre hay una pequeña variación.

Nota:

- El trabajar con excesivo peso (mucho PULLDOWN) no nos ayuda a obtener mayor velocidad de penetración,(lo que genera esta operación inapropiada es mayor arrastre de las herramientas y posterior falla de las mismas)
- De igual manera trabajar con poco peso (BROCA colgada), el operar de esta forma ocasiona unos rebotes y por lo tanto la energía no es descargada en los botones de la broca para así disiparse en la roca ,(el operar con broca colgada por periodos prolongados y reiterativos nos trae como consecuencia la falla inevitable del martillo y la broca)

**c) Inyección de agua:** ayuda a formar el collarín del taladro estabilizando las rocas sueltas alrededor, también permite estabilizar las paredes del taladro sobre todo en terrenos fracturados; Ayuda a reducir el polvo emanado al medio.

**d) Lubricación:** la lubricación de los accesorios internos del martillo es primordial para obtener una máxima vida útil del martillo, a continuación mencionamos algunas recomendaciones:

- Se debe usar solo aceite de perforación con la viscosidad adecuada como: aroc 150, torcula 150, rock drill lube 100, almo 320.
- El operador siempre debe ver una película de aceite en las estrías de la broca y en el interior de la barra al realizar el cambio.
- El consumo de aceite es de 1/6 de litro por hora por cada 100 CFM de aire que circula por el martillo, al inyectar agua se recomienda el doble de aceite.
- Los martillos de 6" que se usan en la zanja consumen aproximadamente 2.1 litros por hora.

#### **4.3.7 BROCAS DE PERFORACIÓN PARA MARTILLOS DTH**

Las brocas DTH transmiten la energía de percusión y rotación a la roca, guían el aire para un adecuado barrido para la evacuación del detritus, se puede reacondicionar con el afilado de insertos para una vida útil óptima

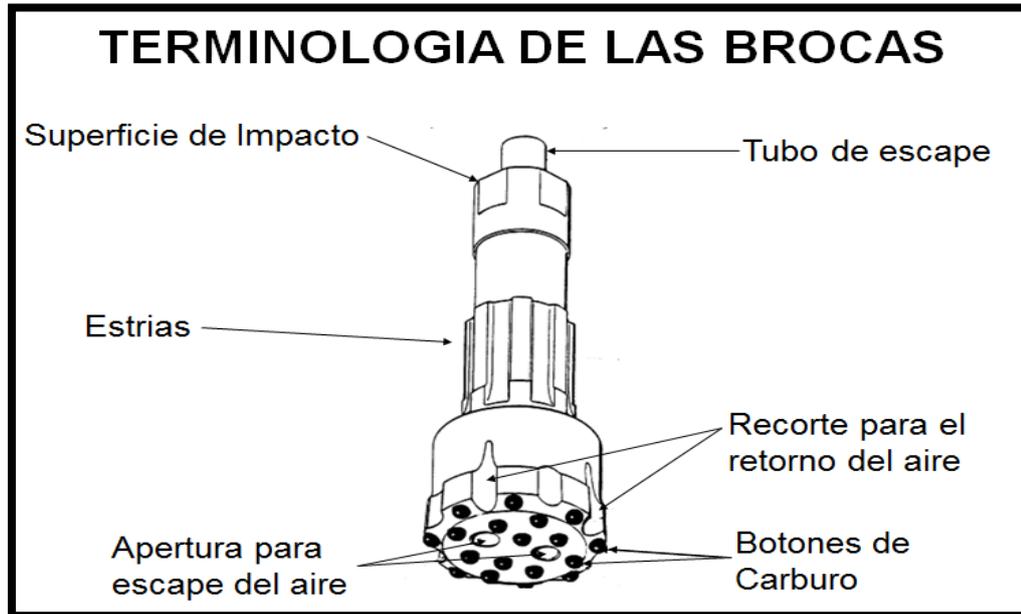


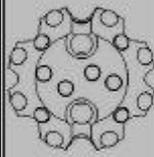
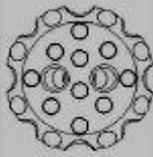
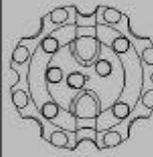
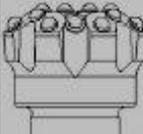
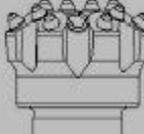
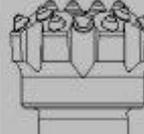
Figura 4.35 descripción de una broca DTH  
Fuente: Perforación DTH Atlas Copco



Figura 4.36 broca Mitsubishi DTH-M65  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

Los diseños geométricos de las brocas son de alta importancia para la eficiencia de la perforación, es así que se requiere un especialista que tome datos de campo para que realice el diseño exacto para nuestro macizo rocoso ya que es aleatorio e influyente en el rendimiento y la velocidad de perforación, por ello existen 3 diseños básicos para una adecuada selección, pero en si existen varios diseños con respecto a la distribución de los insertos:

- **Broca con cara cóncava:** ideal para todo tipo de perforaciones, su vacío frontal permite guiar la dirección del taladro, ideal para macizos rocosos suaves y semiduras.
- **Broca con cara plana:** ideal para perforaciones en zonas semiduras a duras, tiene más insertos en su frente lo que permite romper con mayor eficiencia el macizo rocoso.
- **Broca con cara convexa:** permite una mayor velocidad de perforación, su geometría da mayor resistencia a los insertos, es adecuado para zonas duras y abrasivas.

| HEAD DESIGNS   |   |   | INSERT TYPES   |   |  |
|--|---|---|--|---|--|
| <p><b>CONVEX</b></p>   | <p><b>FLAT FACE</b></p>   | <p><b>CONCAVE</b></p>   | <p><b>DOMED INSERTS</b></p>   | <p><b>BALLISTIC INSERTS</b></p>   | <p><b>SEMI-BALLISTIC INSERTS</b></p>   |
| <p>STRONG DESIGN FOR ALL CONDITIONS ESPECIALLY HARD ABRASIVE ROCKS.<br/><br/>GOOD BALANCE OF FAST DRILLING AND LONG</p>  | <p>ALTERNATIVE DESIGN FOR ALL ROCK CONDITIONS ESPECIALLY FRACTURED AND FISSURED ROCKS AND CHANGING FORMATIONS</p>   | <p>ALTERNATIVE DESIGN FOR ALL ROCK CONDITIONS PARTICULARLY DEEP HOLE DRILLING CAN IMPROVE HOLE ALIGNMENT AS A RESULT OF THE INVERTED PILOT</p>  | <p>STRONG RUGGED SHAPE FOR HIGH PERFORMANCE AND GOOD SERVICE LIFE IN ALL CONDITIONS PARTICULARLY SUITABLE FOR VERY HARD ABRASIVE ROCKS AND DEEP HOLE DRILLING</p>                                | <p>SUITABLE FOR SOFT/MEDIUM COMPACT LOW ABRASIVE ROCKS PRODUCING LARGE CUTTINGS. NOT SUITABLE FOR BADLY FRACTURED ROCKS.</p>  | <p>SUITABLE FOR ALL SOFT/MEDIUM ROCK CONDITIONS INCLUDING FRACTURED AND FISSURED ROCKS.</p>  |

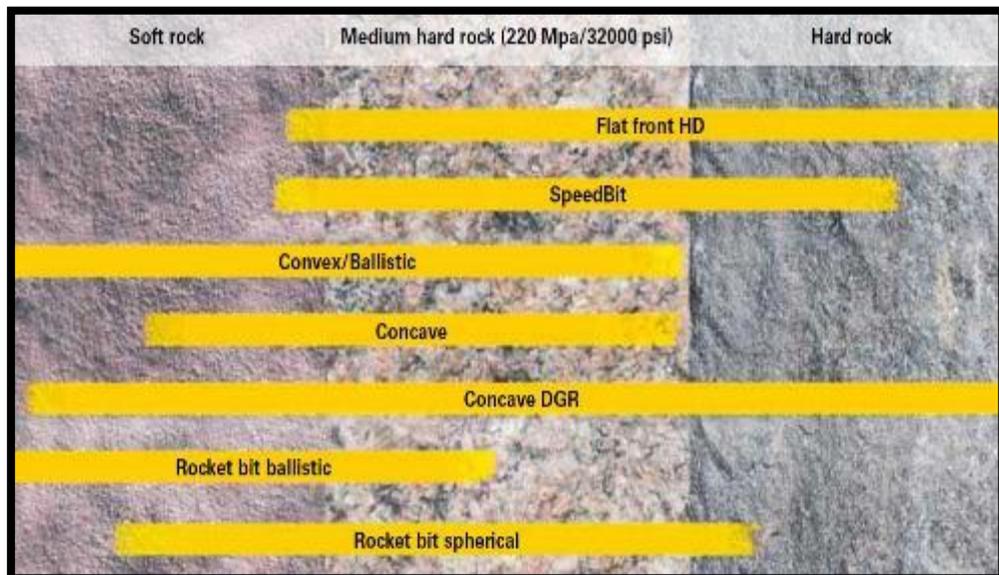


Figura 4.37 diseño de broca DTH según el tipo de cara y el tipo de inserto  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

## **CAPITULO V: SELECCIÓN DE LA COLUMNA DE PERFORACIÓN MEDIANTE UN COMPARATIVO DEL TDC (US\$/m)**

La selección adecuada de la columna de perforación permitirá reducir el TDC (US\$/m), por lo cual el ingeniero encargo debe hacer seguimiento a cualquier tipo de cambio en los parámetros de perforación. A continuación se detallara la columna más recomendada.

### **5.1 COLUMNA DE PERFORACIÓN**

En perforación rotativa-DTH, la elección cuidadosa de los aceros de perforación es vital para lograr taladros precisos sin desviación, optima fragmentación del macizo rocoso y eficiencia operacional, los cuales afectaran directamente en el costo total de perforación (TDC). La columna de perforación adecuada incluye un amortiguador de impacto dual, tanto para martillo de fondo y perforación triconica, conectado al cabezal de rotación, barras de perforación, centralizador rotativo, estabilizador, adaptadores y finalmente la broca triconica, si la perforación se va a realizar a percusión martillo de fondo y broca DTH a continuación lo detallaremos:

### 5.1.1 AMORTIGUADOR DE IMPACTO

Su trabajo consiste esencialmente en absorber parte de la energía liberada en la perforación que no ha sido utilizada en romper la roca, un buen diseño de este accesorio es aquel que tiene incorporado una gran masa amortiguadora de impactos que absorba golpes y vibraciones no deseadas que provocan daños a los equipos. Los beneficios de utilizar en la columna de perforación rotativa un amortiguador son: mejor control del torque, velocidad de penetración más elevada, mayor vida útil del mástil y del cabezal de rotación, mayor vida útil de la broca triconica.



Figura 5.0 amortiguador de impacto de la SKF-11  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### 5.1.2 ADAPTADORES (TOP SUB – BIT SUB)

La columna de perforación continúa con los adaptadores superiores también conocidos como Top Sub, su función principal es de acoplar elementos con

diferentes uniones de rosca como hilos API - BECO o acoplar elementos de diferentes diámetros; estos accesorios de desgaste impiden daños en los hilos del spindler del cabezal de rotación.

En la parte inferior de la columna de perforación se ubican los adaptadores de elemento de corte y barra, su fusión es similar a los adaptadores superiores. Este adaptador es el elemento de la columna que se encuentra expuesto a las más severas condiciones de desgaste por abrasión y erosión por ello se recomienda la aplicación del hard facing. A continuación los tipos de adaptadores más utilizados:

- Adaptadores de spindler y/o amortiguador a barra (cuidado de hilos)
- Adaptadores de la herramienta de corte a barra (utilizar el hard facing)
- Adaptadores de barra a barra (acoplar barras para mayor profundidad del taladro)

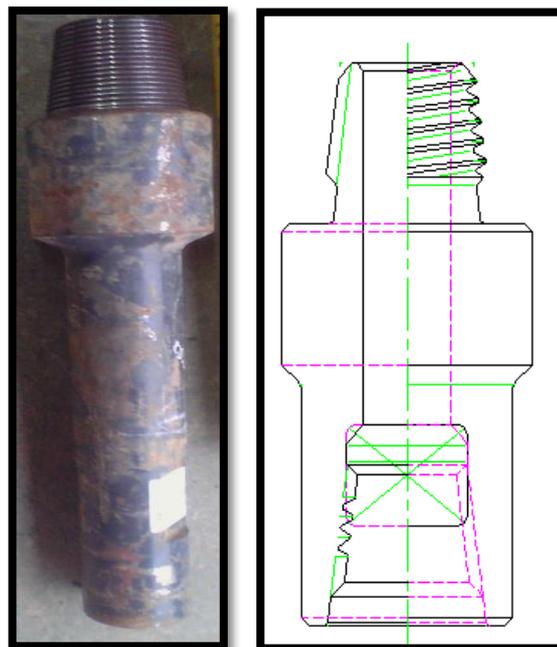


Figura 5.1 Top Sub 4IF Pin Box  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

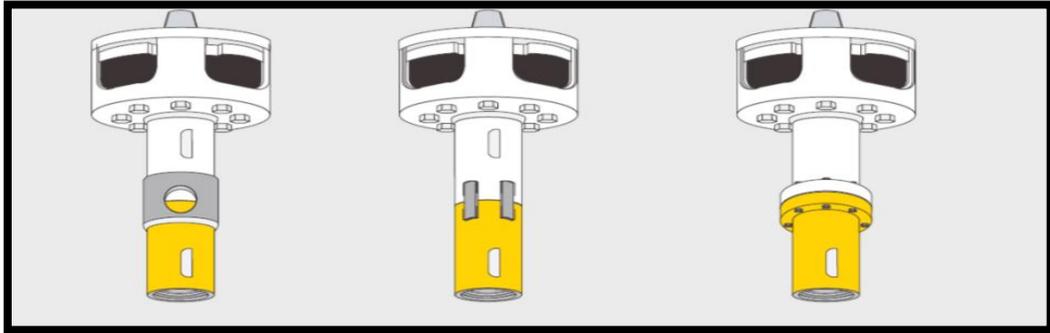


Figura 5.2 Top Sub acoplado al amortiguador de impacto  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

En la figura 5.2 se observa 3 métodos de acoplar el top sub, el primero es sujeción por soldadura, el segundo el método de la brida o chapas de aceros soldadas, el tercero es el método de sujeción con acoplamiento cuadrado.

Si bien es cierto el método más usado para acoplar el Top Sub hacia el cabezal de rotación o en el caso que utilicemos absolvedor de impacto hacia este es utilizar chapas de aceros soldadas, para evitar el desenrosque a la hora de desacoplar brocas martillos o cambiar el sistema de perforación a tricono. Los adaptadores así como los otros componentes son fabricados de aceros de alta resistencia, razón por la cual se debe evitar aplicar soldadura para fijarlos, un calentamiento excesivo en las zonas de unión provoca una alteración en su estructura metalográfica y su resistencia mecánica. Para ellos se debe tener en cuenta los siguientes aspectos básicos:

- Realizar un adecuado torque o ajuste de la barra y el Top sub, se recomienda realizar algunos taladros antes de proceder a realizar la soldadura.
- Precalear la zona de unión a temperaturas entre 250° - 300° C.

- Una vez aplicada la soldadura proteger las zonas soldadas con mantas térmicas para evitar el enfriamiento violento por las corrientes de aire.
- Las planchas de seguridad soldadas pueden ser de dos hasta cuatro distribuidas simétricamente y de las mismas dimensiones

### **5.1.3 BARRA DE PERFORACIÓN**

La barra de perforación es el elemento de conexión mecánica entre la perforadora y la herramienta de corte (broca triconica o DTH). Las longitudes, los diámetros, los hilos y sus diseños obedecen exclusivamente al tipo de maquina en que serán usadas y el terreno en el cual entraran en contacto, la duración de las barras está directamente relacionada con el espesor de la pared, con la capacidad de empuje del equipo de perforación, también se recomienda la utilización del hard facing para el recubrimiento de las puntas de la barra que entra en contacto con el terreno para evitar la abrasión y así asegurar la vida útil apropiada de la barra . A continuación se detalla las siguientes funciones de la barra de perforación:

- Transmitir la fuerza de empuje hacia la herramienta de corte.
- Transmitir la rotación desde el cabezal hasta el elemento de corte.
- Transmitir los fluidos aire y/o aceite para enfriar y lubricar la herramienta de corte.
- Transmitir agua para armar adecuadamente el taladro.
- Transmitir el aire para la evacuación del detritus.



Figura 5.3 barra de perforación box-box con flat  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

#### 5.1.4 ANILLOS GUÍAS DECK BUSHING

La importancia de este accesorio de perforación parece no ser de vital importancia, sin embargo en cuestión de los costos de perforación y voladura repercuten adecuadamente ya que te asegura una vida útil adecuada para la barra de perforación evitando el pandeo y desviación de los taladros con ello asegurando una voladura adecuada para una fragmentación óptima. Como mencionamos anteriormente el centralizador asegura la concentricidad de la columna de perforación cabezal de rotación, amortiguadores, barras y adaptadores.

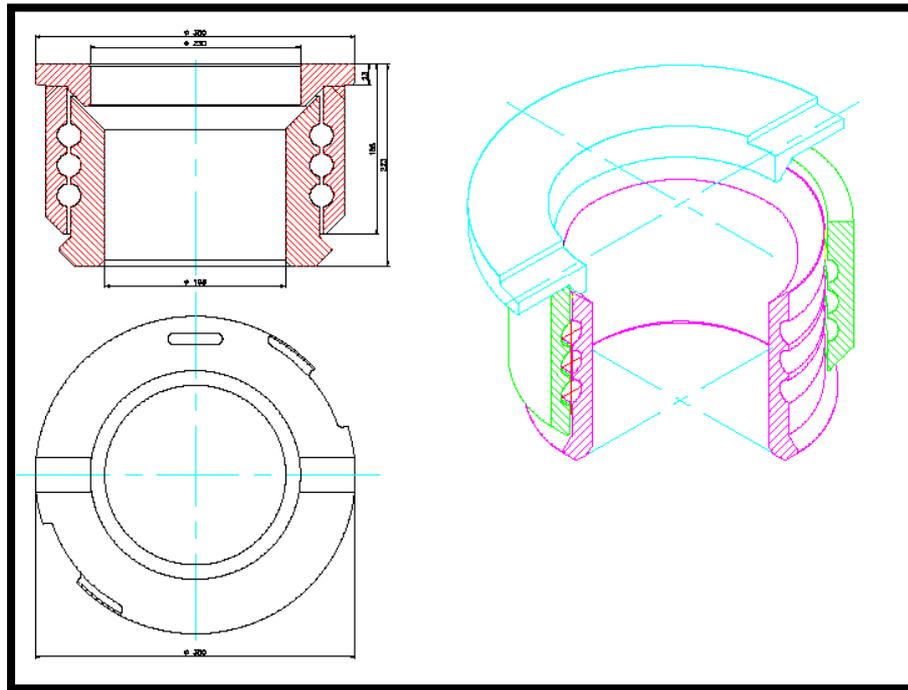


Figura 5.4 centralizador o anillo guía  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

## 5.2 COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN TDC (US\$/m)

Como se sabe toda unidad minera tiene diferentes formas de calcular su TDC (US\$/m), pero todos coinciden o involucran a las características del macizo rocoso como influyente directo en el valor del TDC ya que la velocidad de perforación y la vida útil de los aceros de perforación son sensibles a los cambios de las características del macizo rocoso.

También se conoce que en perforación triconica el elemento de corte es uno de los accesorios que eleva más el costo de perforación caso contrario en perforación con martillo de fondo se involucra el rendimiento del martillo siendo este aceros el que repercute más en el TDC. A continuación se muestran los modelos matemáticos del TDC para perforación triconica y DTH:

a. Modelo matemático para el TDC (US\$/m) para perforación triconica:

$$\text{TDC (US\$/m)} = \frac{\$ \text{ P.U Broca}}{\text{V.U.B (mts)}} + \frac{\$ \text{ Costo O\&O (\$/hrs)}}{\text{V.P (m/h)}}$$

Ecuación 5.1

b. Modelo matemático para el TDC (US\$/m) para perforación DTH:

$$\text{TDC (US\$/m)} = \frac{\$ \text{ P.U Broca}}{\text{V.U.B (mts)}} + \frac{\$ \text{ P.U Martillo}}{\text{V.U.M (mts)}} + \frac{\$ \text{ Costo O\&O (\$/hrs)}}{\text{V.P (m/h)}}$$

Ecuación 5.2

Dónde:

- TDC (US\$/m) : Total Drilling Cost (US\$/m)
- P.U Broca: Precio unitario de la Broca (US\$).
- P.U. Martillo: Precio unitario del Martillo (US\$).
- V.U.B : Vida útil de la Broca (mts)
- V.U.M :Vida útil del Martillo (mts)
- Costo O&O: Costo de Adquisición & Operación (\$/hr).

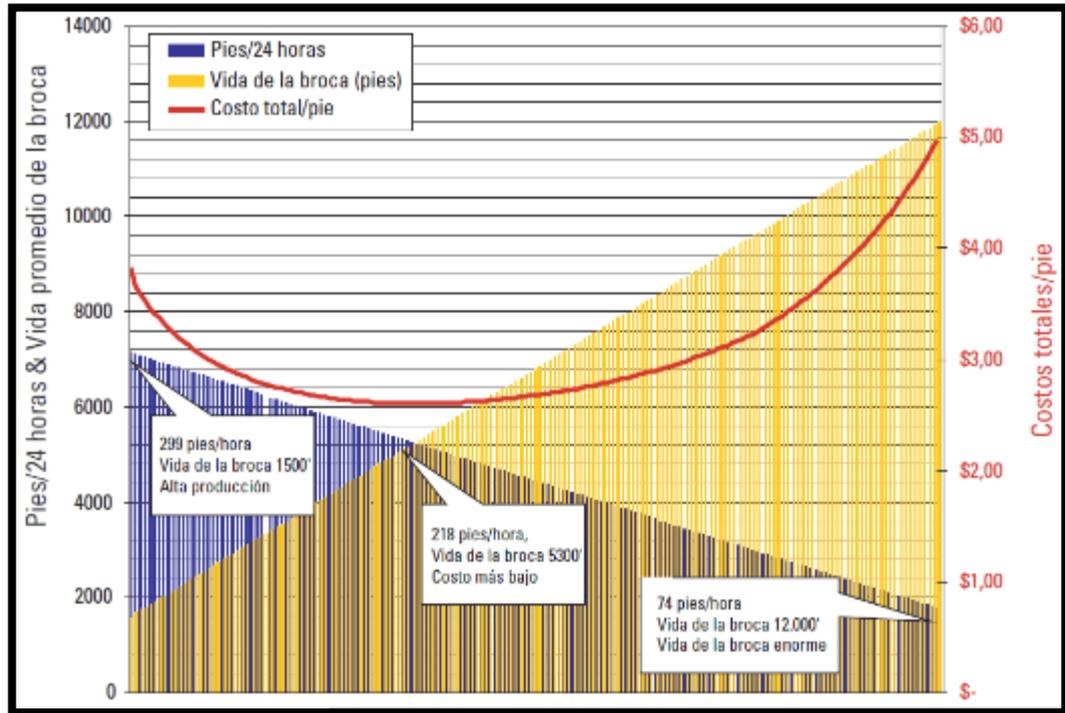


Figura 5.5 el impacto de la vida de la broca y la producción sobre el TDC (US\$/m)  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

### 5.3 SELECCIÓN ADECUADA DE LA COLUMNA DE PERFORACIÓN

#### 5.3.1 PROPUESTA “A” COLUMNA DE PERFORACIÓN DE 5” DE DIÁMETRO

La propuesta A consiste en una columna de perforación de 5” de diámetro que a continuación se describe (columna de perforación actual):

##### 5.3.1.1 TOP SUB

Una de sus características es que su longitud es de 24” para evitar el uso del absolvedor de impacto, el lado Pin que va conectado al cabezal de rotación es hilo pin API regular 4IF debido al tipo de hilo que requiere el splinder del cabezal de rotación. El lado que está conectado a la barra de perforación es hilo API de 3 ½”.

Tabla 5.1 características del top sub

|                | Tipo |        | Diámetro (") | Largo      | Espesor     |
|----------------|------|--------|--------------|------------|-------------|
| Pin            | Api  | 4 IF   |              |            |             |
| <b>Top Sub</b> | -    |        | <b>5</b>     | <b>24"</b> | <b>3/4"</b> |
| Pin            | Api  | 3 1/2" |              |            |             |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

### 5.3.1.2 BARRA BOX-BOX

La barra de perforación box-box es de 5" de diámetro hilo api de 3 1/2" y de 30 pies de longitud, se elige el modelo box –box con flat para realizar la respectiva rotación teniendo como indicador el desgaste o metraje alcanzado por la barra de 12,000 metros, para luego llegar a una vida útil de 20,000 a 24,000 metros, claro está dependiendo del tipo de roca que se va a perforar.

Tabla 5.2 características de la barra box-box

| BARRA 1        | Tipo |       | Diámetro (") | Largo      | Espesor    |
|----------------|------|-------|--------------|------------|------------|
| Box            | API  | 3 1/2 |              |            |            |
| <b>BARRA 1</b> | -    |       | <b>5</b>     | <b>30"</b> | <b>3/4</b> |
| Box            | API  | 3 1/2 |              |            |            |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

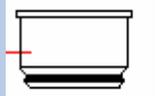


Figura 5.6 rotación de la barra de perforación  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### 5.3.1.3 CENTRALIZADOR

5" de diámetro relleno con soldadura a los 20,000 metros.

Tabla 5.3 características del centralizador

|   | Tipo      | Diámetro (") | Espesor        |
|---|-----------|--------------|----------------|
|  | Deck Bush | 5"           | 10" diam. Mesa |
|   |           |              |                |

Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### 5.3.1.4 MARTILLO DTH

Martillo Sandvick de 6" de diámetro de case reversible para mayor vida útil, diseñado para operar con presiones de 150 a 350 PSI para lograr 1950 golpes por minuto.

### 5.3.1.5 BROCA DE PERFORACIÓN DTH

La broca es de 6 3/4" de diámetro el diseño de la matriz es de cara convexa con insertos mixtos domos y semi-balísticos ideal para terrenos duros y abrasivos como

es en el caso de pampa verde, el tipo de insertos es mixto debido a los contactos existentes con material argilico. Para una mayor vida útil se recomienda dar 4 a 5 afiladas dependiendo del terreno.



Figura 5.7 Broca DTH 6 ¾” Mitsubishi  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### 5.3.2 VELOCIDAD DE BARRIDO

Del capítulo IV se toma el modelo matemático propuesto por el Doctor Alan B. realizando sus respectivas correcciones por altura y temperatura.

$$Q = \pi x V (D^2 - d^2) \frac{1}{4x144} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3 de la V.B}$$

Tabla 5.4 corrección de los cfm del compresor

| ALTITUD<br>PIES | ALTITUD<br>METROS | FACTOR DE<br>CORRECCIÓN |
|-----------------|-------------------|-------------------------|
| 4000            | 1200              | .86                     |
| 5000            | 1500              | .82                     |
| 6000            | 1800              | .79                     |
| 7000            | 2100              | .76                     |
| 8000            | 2400              | .73                     |
| 9000            | 2700              | .70                     |
| 10000           | 3000              | .68                     |
| 11000           | 3400              | .65                     |
| 12000           | 3700              | .63                     |
| 13000           | 4000              | .60                     |
| 14000           | 4300              | .58                     |

Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

Tabla 5.5 resultados de la V.B con una columna de 5"

| Velocidad de Barrido | Tipo  | CFM    |
|----------------------|-------|--------|
| δ nm                 | 1.225 | 1070.0 |
| δ 3500msnm           | 0.854 | 745.9  |
| φBroca/Barra         | 6.75  | 5.0    |
| VB (FPM)             | 6,651 |        |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

| RECOMENDACIONES PARA TENER<br>UNA BUENA VELOCIDAD DE BARRIDO    |
|---|
| 5,000 - 7,000 pies por minuto<br>para material ligero y seco.   |
| 7,000 - 9,000 pies por minuto<br>para material pesado y húmedo. |

Figura 5.8 recomendaciones de una adecuada V.B  
Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

De la ecuación de la velocidad de barrido (ecuación 5.0) y realizando las correcciones adecuadas de altura y temperatura (tabla 5.5 y 5.6) Para una columna de 5" de diámetro se obtiene una velocidad de barrido de 6,651 pies/minuto, como se aprecia en la figura 5.8 esta velocidad de barrido es recomendable para detritus ligeros y en terrenos secos recomendable para el tajo pampa verde.

### 5.3.3 TDC (US\$/m) PARA UNA COLUMNA DE 5" DE DIÁMETRO

De la ecuación 7.2 modelo matemático para el cálculo del TDC (US\$/m) para perforación con martillo de fondo se obtiene la siguiente tabla:

- Costo de operación & adquisición = 179.34 \$/h
- Velocidad de perforación promedio =36.94 m/h

Tabla 5.6 TDC para una columna de 5" de diámetro

| ACERO                | P.U (US\$)  | CANTIDAD | V.U (mtrs) |
|----------------------|-------------|----------|------------|
| BROCA                | 1200        | 1        | 1,500      |
| MARTILLO             | 7000        | 1        | 8,653      |
| BARRA                | 3000        | 1        | 20,269     |
| GUIADOR              | 1000        | 1        | 25,410     |
| TOP SUB              | 1500        | 1        | 49,306     |
| <b>TDC ( US\$/m)</b> | <b>6.68</b> |          |            |

Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### **5.3.4 PROPUESTA “B” COLUMNA DE PERFORACIÓN DE 5 ½” DE DIÁMETRO**

La propuesta B consiste en una columna de perforación de d 5 ½” de diámetro (esta columna de perforación se utilizó hasta fines de marzo del 2013):

#### **5.3.4.1 TOP SUB**

Su longitud es de 24” para evitar el uso del absolvedor de impacto, el lado Pin que va conectado al cabezal de rotación es hilo pin API regular 4IF debido al tipo de hilo que requiere el splinder del cabezal de rotación. El lado que está conectado a la barra de perforación es hilo BECO de 3 ½”.

#### **5.3.4.2 BARRA PIN-BOX**

La barra de perforación box-box es de 5 1/2” de diámetro hilo BECO de 3 ½” y de 30 pies de longitud.

#### **5.3.4.3 BIT SUB**

El tipo de hilo es PIN-BOX, el lado pin es hilo BECO y el lado box es hilo tipo API para acoplar el martillo DTH.

#### **5.3.4.4 CENTRALIZADOR**

Centralizador de 5 ½” de diámetro para direccionar el taladro y evitar las desviaciones.

#### **5.3.4.5 MARTILLO DE FONDO**

Martillo de fondo de 6” de diámetro similar a la propuesta A.

#### **5.3.4.6 BROCA DTH**

Broca DTH de 6 ¾” de diámetro cara convexa e insertos mixtos, similar a la propuesta A.

Donde las características se muestran en la siguiente tabla 5.7 tan bien se muestra la velocidad de barrido y el TDC (US\$/m) para la columna de perforación de 5 1/2".

Tabla 5.7 cuadro comparativo entre la propuesta A vs propuesta B

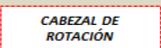
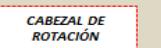
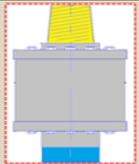
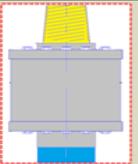
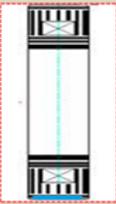
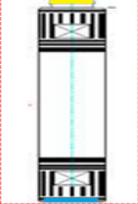
|  | PROPUESTA A                    |                        |              |       |         | PROPUESTA B                       |                        |              |        |         |  |  |
|--|--------------------------------|------------------------|--------------|-------|---------|-----------------------------------|------------------------|--------------|--------|---------|--|--|
|  | Perf. DM 45 HP(1070)<br>Serie: |                        |              |       |         | Perf. DM 45 HP (HP1070)<br>Serie: |                        |              |        |         |  |  |
|   | Marca:                         | ATLAS COPCO            |              |       |         | Marca:                            | ATLAS COPCO            |              |        |         |   |  |
|  | Modelo:                        | 4SY-2-10.0             |              |       |         | Modelo:                           | 4SY-2-10.0             |              |        |         |  |  |
|  | N/P:                           | 57799694               |              |       |         | N/P:                              | 57799694               |              |        |         |  |  |
|  | N/S:                           | -                      |              |       |         | N/S:                              | -                      |              |        |         |  |  |
|   | Marca                          | DRILLCO TOLLS DTH      |              |       |         | Marca                             | DRILLCO TOLLS DTH      |              |        |         |   |  |
|  | Numero Parte                   | ATLAS COPCO (56261217) |              |       |         | Numero Parte                      | ATLAS COPCO (56261217) |              |        |         |  |  |
|  | Pull Down                      | 45 000 LBS             |              |       |         | Pull Down                         | 45 000 LBS             |              |        |         |  |  |
|  | Pin                            | API 4IF REGULAR        |              |       |         | Pin                               | API 4IF REGULAR        |              |        |         |  |  |
|  | Box                            | API 4IF REGULAR        |              |       |         | Box                               | API 4IF REGULAR        |              |        |         |  |  |
|  | Largo                          | 14.6 IN                |              |       |         | Largo                             | 14.6 IN                |              |        |         |  |  |
|   | Pin                            | Tipo                   | Diámetro (") | Largo | Espesor | Pin                               | Tipo                   | Diámetro (") | Largo  | Espesor |   |  |
|  | Top Sub                        | Api                    | 4 IF         | 5     | 24"     | 3/4"                              | Api                    | 3 1/2"       | 5 1/2" | 24"     | 3/4"   |  |
|  | Pin                            | Api                    | 3 1/2"       |       |         | Box                               | Beco                   | 3 1/2"       |        |         |  |  |
|  | BARRA 1                        | Tipo                   | Diámetro (") | Largo | Espesor | BARRA 1                           | Tipo                   | Diámetro (") | Largo  | Espesor |  |  |
|  | Box                            | API                    | 3 1/2"       |       |         | Pin                               | Beco                   | 3 1/2"       |        |         |  |  |
|  | BARRA 1                        | -                      | 5            | 30"   | 3/4"    | BARRA 1                           | -                      | 5 1/2"       | 30"    | 3/4"    |  |  |
|  | Box                            | API                    | 3 1/2"       |       |         | Box                               | Beco                   | 3 1/2"       |        |         |  |  |
|  | Pin                            | Beco                   | 3 1/2"       |       |         | Bit Sup                           | -                      | 5 1/2"       | 12"    | 3/4"    |  |  |
|  | Box                            | Api                    | 3 1/2"       |       |         | Box                               | Api                    | 3 1/2"       |        |         |  |  |

Tabla 5.7 cuadro comparativo entre la propuesta A vs propuesta B

|   | PROPUESTA A   |              |                | PROPUESTA B  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|---|---|--------------|----------------|--|--------|----------------|---|------------|---------|-------|---------------|--------|-----|------------|---------|---|--------|---|--|------|------|--------|-------|--------|---|----------|-------|---------------|------|-----|----------|------------|---|--|---|
|   | Perf. DM 45 HP(1070)<br>Serie:  |              |                | Perf. DM 45 HP (HP1070)<br>Serie:  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|   |   |              |                | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tipo</th> <th>Diámetro (")</th> <th>Largo</th> <th>Espesor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pin</td> <td>Becco</td> <td>3 1/2"</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bit Sup</td> <td>-</td> <td>5 1/2"</td> <td>12"</td> <td>3/4"</td> </tr> <tr> <td>Box</td> <td>Api</td> <td>3 1/2"</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> |        | Tipo           | Diámetro (")  | Largo      | Espesor | Pin   | Becco         | 3 1/2" |     |            | Bit Sup | - | 5 1/2" | 12"   | 3/4"   | Box  | Api  | 3 1/2" |       |        |  |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|   | Tipo  | Diámetro (") | Largo          | Espesor  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Pin   | Becco   | 3 1/2"       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Bit Sup   | -   | 5 1/2"       | 12"            | 3/4"   |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Box   | Api   | 3 1/2"       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|    | Deck Bush   | 5"           | 10" diam. Mesa | Deck Bush  | 5 1/2" | 10" diam. Mesa |  |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|    | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Tipo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pin</td> <td>api</td> <td>3 1/2"</td> </tr> <tr> <td>Martillo</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Box</td> <td>n/a</td> <td>n/a</td> </tr> <tr> <td>Driver Sub</td> <td colspan="2">-</td> </tr> </tbody> </table>                              |              | Tipo           |  | Pin    | api            | 3 1/2"  | Martillo   |         |       | Box           | n/a    | n/a | Driver Sub | -       |   |        |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Tipo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pin</td> <td>API</td> <td>3 1/2"</td> </tr> <tr> <td>Martillo</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Box</td> <td>n/a</td> <td>n/a</td> </tr> <tr> <td>Driver Sub</td> <td colspan="2">-</td> </tr> </tbody> </table> |      | Tipo |        | Pin   | API    | 3 1/2"  | Martillo |       |               | Box  | n/a | n/a      | Driver Sub | - |  |  |
|   | Tipo  |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Pin   | api   | 3 1/2"       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Martillo  |   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Box   | n/a   | n/a          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Driver Sub  | -   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|   | Tipo  |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Pin   | API   | 3 1/2"       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Martillo  |   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Box   | n/a   | n/a          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| Driver Sub  | -   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| <b>VELOCIDAD DE BARRIDO</b><br>$Q = \pi \times V(D^2 - d^2) \frac{1}{4 \times 144}$<br>RECOMENDACIONES PARA TENER<br>UNA BUENA VELOCIDAD DE BARRIDO<br>5,000 - 7,000 pies por minuto<br>para material ligero y seco.<br>7,000 - 9,000 pies por minuto<br>para material pesado y húmedo. | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tipo</th> <th>CFM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>δ nm</td> <td>1.225</td> <td>1070.0</td> </tr> <tr> <td>δ 3500msnm</td> <td>0.854</td> <td>745.9</td> </tr> <tr> <td>φ Broca/Barra</td> <td>6.75</td> <td>5.0</td> </tr> <tr> <td>VB (FPM)</td> <td colspan="2">6,651</td> </tr> </tbody> </table> |              | Tipo           | CFM  | δ nm   | 1.225          | 1070.0  | δ 3500msnm | 0.854   | 745.9 | φ Broca/Barra | 6.75   | 5.0 | VB (FPM)   | 6,651   |   |        | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tipo</th> <th>CFM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>δ nm</td> <td>1.225</td> <td>1070.0</td> </tr> <tr> <td>δ 3500msnm</td> <td>0.854</td> <td>745.9</td> </tr> <tr> <td>φ Broca/Barra</td> <td>6.75</td> <td>5.5</td> </tr> <tr> <td>VB (FPM)</td> <td colspan="2">8,932</td> </tr> </tbody> </table> |  | Tipo | CFM  | δ nm   | 1.225 | 1070.0 | δ 3500msnm  | 0.854    | 745.9 | φ Broca/Barra | 6.75 | 5.5 | VB (FPM) | 8,932      |   |  |   |
|   | Tipo  | CFM          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| δ nm  | 1.225   | 1070.0       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| δ 3500msnm  | 0.854   | 745.9        |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| φ Broca/Barra   | 6.75  | 5.0          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| VB (FPM)  | 6,651   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
|   | Tipo  | CFM          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| δ nm  | 1.225   | 1070.0       |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| δ 3500msnm  | 0.854   | 745.9        |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| φ Broca/Barra   | 6.75  | 5.5          |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |
| VB (FPM)  | 8,932   |              |                |  |        |                |   |            |         |       |               |        |     |            |         |   |        |   |  |      |      |        |       |        |   |          |       |               |      |     |          |            |   |  |   |

Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

### 5.4 ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA ADECUADA COLUMNA DE PERFORACIÓN

Al analizar las propuestas llegamos a la conclusión que la columna de perforación adecuada para el proyecto pampa verde terreno seco (macizo rocoso competente-mineral con contactos de argilico avanzado -desmorte) es la propuesta A con una velocidad de barrido de 6,651 fpm y un TDC (US\$/m) 6.68 US\$/m a comparación de la propuesta B con una velocidad de barrido de 8,932 fpm y un TDC (US\$/m) 6.75 US\$/m esta propuesta es factible para el tajo San Pedro Sur zona norte (mineral) ya que la característica de esta zona es de macizo rocoso fracturado y con presencia de aguas dinámicas de 3 litros/minuto. Caso contrario es el tajo SPS zona sur terreno compacto y de menor presencia de agua (desmorte limpio adecuado para realizar mantenimiento de vías).

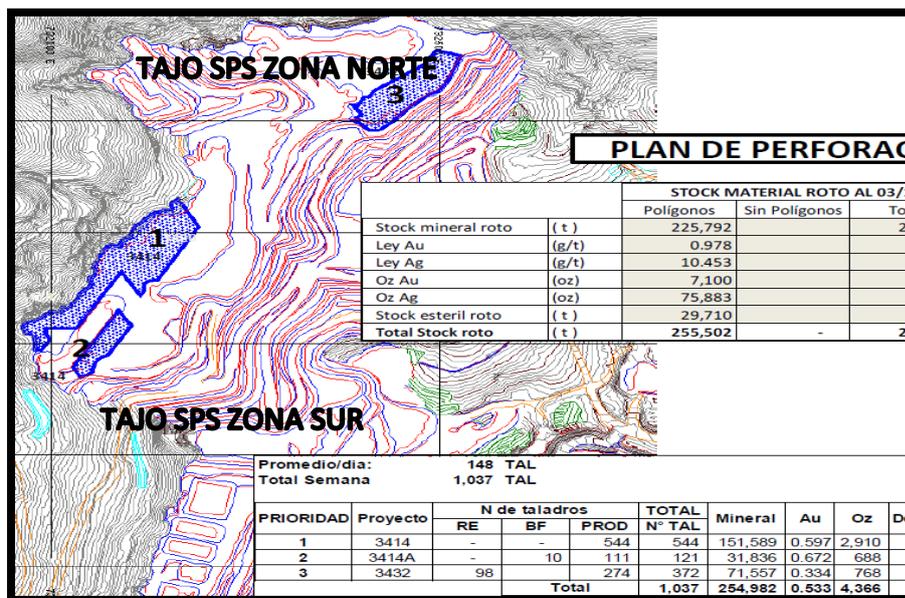


Figura 5.9 tajo SPS Zona norte vs Zona Sur  
Fuente: Planeamiento Stracon gym

Tabla 5.8 Análisis técnico y económico de la columna de perforación

|  | PROPUESTA A   | PROPUESTA B                       |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|--|---|-----------------------------------|------------|----------|-------------|-------|--------|-------------------|-------|----------|--------------------|------|-------|----------|-------|---|---|---------|------|-----|-------------|---------|--------|-------------------|--------|------------|--------------------|------|-----|--|-------|----------|----------|------------|-------|-------|---|-------|----------|-------|---|-------|-------|-------|---|--------|---------|-------|---|--------|---------|-------|---|--------|---------|-------|---|--------|------------|------|--|--|
|  | Perf. DM 45 HP(1070)<br>Serie:  | Perf. DM 45 HP (HP1070)<br>Serie: |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| <b>VELOCIDAD DE BARRIDO</b><br>$Q = \pi x V (D^2 - d^2) \frac{1}{4 x 144}$   |   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| <b>RECOMENDACIONES PARA TENER UNA BUENA VELOCIDAD DE BARRIDO</b><br>6,000 - 7,000 pies por minuto para material ligero y seco.<br>7,000 - 9,000 pies por minuto para material pesado y húmedo. |   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| <b>TDC (\$/m)</b><br>$\frac{\$ P.U \text{ Broca}}{V.U \text{ (mts)}} + \frac{\$ P.U \text{ Martillo}}{V.U \text{ (mts)}} + \frac{\$ \text{Costo O80}}{V.P \text{ (m/h)}}$                      |   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| COSTO DE O80 (\$/hrs) 179.34<br>V.P (mts/hrs) 36.94  |   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|  | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tipo</th> <th>CFM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\delta</math> nm</td> <td>1.225</td> <td>1070.0</td> </tr> <tr> <td><math>\delta</math> 3500msnm</td> <td>0.854</td> <td>745.9</td> </tr> <tr> <td><math>\phi</math> Broca/Barra</td> <td>6.75</td> <td>5.0</td> </tr> <tr> <td>VB (FPM)</td> <td colspan="2">6,651</td> </tr> </tbody> </table>   |                                   | Tipo       | CFM      | $\delta$ nm | 1.225 | 1070.0 | $\delta$ 3500msnm | 0.854 | 745.9    | $\phi$ Broca/Barra | 6.75 | 5.0   | VB (FPM) | 6,651 |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tipo</th> <th>CFM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\delta</math> nm</td> <td>1.225</td> <td>1070.0</td> </tr> <tr> <td><math>\delta</math> 3500msnm</td> <td>0.854</td> <td>745.9</td> </tr> <tr> <td><math>\phi</math> Broca/Barra</td> <td>6.75</td> <td>5.5</td> </tr> <tr> <td>VB (FPM)</td> <td colspan="2">8,932</td> </tr> </tbody> </table> |         | Tipo | CFM | $\delta$ nm | 1.225   | 1070.0 | $\delta$ 3500msnm | 0.854  | 745.9      | $\phi$ Broca/Barra | 6.75 | 5.5 | VB (FPM)   | 8,932 |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|  | Tipo  | CFM                               |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\delta$ nm  | 1.225   | 1070.0                            |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\delta$ 3500msnm  | 0.854   | 745.9                             |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\phi$ Broca/Barra   | 6.75  | 5.0                               |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| VB (FPM)   | 6,651   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|  | Tipo  | CFM                               |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\delta$ nm  | 1.225   | 1070.0                            |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\delta$ 3500msnm  | 0.854   | 745.9                             |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| $\phi$ Broca/Barra   | 6.75  | 5.5                               |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| VB (FPM)   | 8,932   |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|  | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>P.U (\$)</th> <th>CANTIDAD</th> <th>V.U (mtrs)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BROCA</td> <td>1200</td> <td>1</td> <td>1,500</td> </tr> <tr> <td>MARTILLO</td> <td>7000</td> <td>1</td> <td>8,653</td> </tr> <tr> <td>BARRA</td> <td>3000</td> <td>1</td> <td>20,269</td> </tr> <tr> <td>GUIADOR</td> <td>1000</td> <td>1</td> <td>25,410</td> </tr> <tr> <td>BIT SUB</td> <td>1500</td> <td>1</td> <td>49,306</td> </tr> <tr> <td>TDC (\$/m)</td> <td colspan="3">6.68</td> </tr> </tbody> </table> |                                   | P.U (\$)   | CANTIDAD | V.U (mtrs)  | BROCA | 1200   | 1                 | 1,500 | MARTILLO | 7000               | 1    | 8,653 | BARRA    | 3000  | 1 | 20,269  | GUIADOR | 1000 | 1   | 25,410      | BIT SUB | 1500   | 1                 | 49,306 | TDC (\$/m) | 6.68               |      |     | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>P.U (\$)</th> <th>CANTIDAD</th> <th>V.U (mtrs)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BROCA</td> <td>1,200</td> <td>1</td> <td>1,500</td> </tr> <tr> <td>MARTILLO</td> <td>7,000</td> <td>1</td> <td>8,653</td> </tr> <tr> <td>BARRA</td> <td>3,700</td> <td>1</td> <td>23,280</td> </tr> <tr> <td>GUIADOR</td> <td>1,000</td> <td>1</td> <td>25,410</td> </tr> <tr> <td>TOP SUB</td> <td>1,850</td> <td>1</td> <td>50,200</td> </tr> <tr> <td>BIT SUB</td> <td>1,000</td> <td>1</td> <td>21,000</td> </tr> <tr> <td>TDC (\$/m)</td> <td colspan="3">6.75</td> </tr> </tbody> </table> |       | P.U (\$) | CANTIDAD | V.U (mtrs) | BROCA | 1,200 | 1 | 1,500 | MARTILLO | 7,000 | 1 | 8,653 | BARRA | 3,700 | 1 | 23,280 | GUIADOR | 1,000 | 1 | 25,410 | TOP SUB | 1,850 | 1 | 50,200 | BIT SUB | 1,000 | 1 | 21,000 | TDC (\$/m) | 6.75 |  |  |
|  | P.U (\$)  | CANTIDAD                          | V.U (mtrs) |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BROCA  | 1200  | 1                                 | 1,500      |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| MARTILLO   | 7000  | 1                                 | 8,653      |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BARRA  | 3000  | 1                                 | 20,269     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| GUIADOR  | 1000  | 1                                 | 25,410     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BIT SUB  | 1500  | 1                                 | 49,306     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| TDC (\$/m)   | 6.68  |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
|  | P.U (\$)  | CANTIDAD                          | V.U (mtrs) |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BROCA  | 1,200   | 1                                 | 1,500      |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| MARTILLO   | 7,000   | 1                                 | 8,653      |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BARRA  | 3,700   | 1                                 | 23,280     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| GUIADOR  | 1,000   | 1                                 | 25,410     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| TOP SUB  | 1,850   | 1                                 | 50,200     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| BIT SUB  | 1,000   | 1                                 | 21,000     |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |
| TDC (\$/m)   | 6.75  |                                   |            |          |             |       |        |                   |       |          |                    |      |       |          |       |   |   |         |      |     |             |         |        |                   |        |            |                    |      |     |  |       |          |          |            |       |       |   |       |          |       |   |       |       |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |         |       |   |        |            |      |  |  |

Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se llega a la conclusión y recomendación de que la columna de perforación debe ser adecuadamente seleccionada por el ingeniero encargado con el objetivo siguiente:

- Reducir el desgaste y la rotura de los aceros.
- Absorber vibraciones.
- Mejorar la transmisión de energía de la unidad de rotación a la broca
- Centrar la broca en la posición adecuada del taladro
- Mayor vida útil de la broca.
- Reducir la fricción de los aceros al pasar por el centralizador del equipo de perforación.
- Estabilizar la pared del taladro para evitar la formación de cavernas.
- Mayor velocidad de penetración y costos de perforación más bajos.

- Mejorar el resultado final, óptima fragmentación del macizo rocoso.

En la siguiente figura 5.10 se observa el diagrama de flujo de la selección adecuada de la columna de perforación:

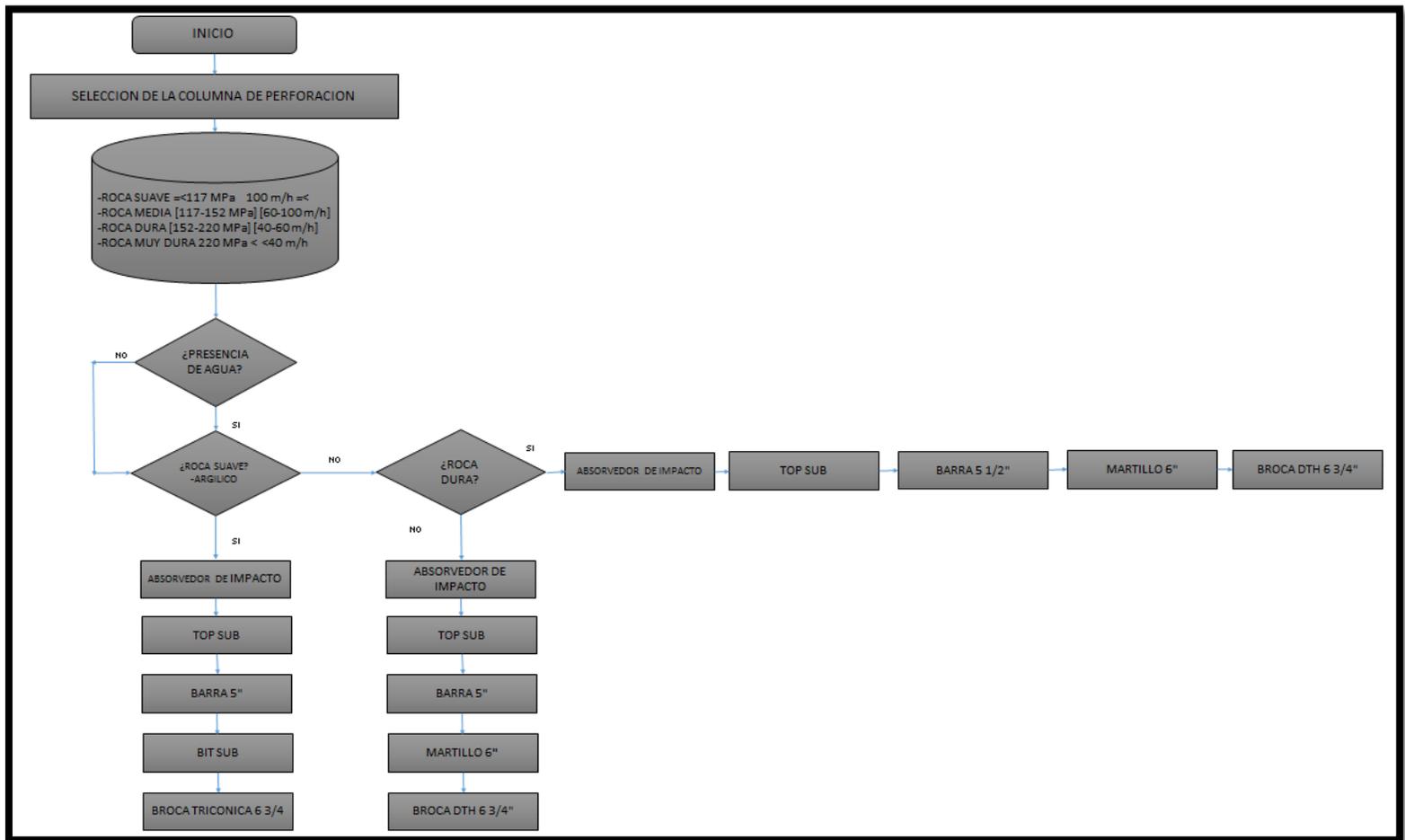


Figura 5.10 diagrama de flujo de la selección adecuada de la columna de perforación

## **CAPITULO VI: FACTORES SIGNIFICATIVOS QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE LA PERFORACIÓN DTH**

### **6.1 ANTECEDENTES DE PERFORACIÓN**

Como se sabe en el capítulo V se eligió la adecuada columna de perforación para reducir el costo unitario de perforación US\$/m ya que anteriormente a la propuesta se perforaba con la columna de perforación de 5 ½” de diámetro (hasta fines del 2012), ya en marzo del 2013 se ingresó al nuevo tajo Pampa Verde donde las condiciones del macizo rocoso eran competentes tanto como para mineral y desmonte (argilico avanzado se optó por perforación rotativa) para la nueva columna de perforación de 5” de diámetro. Actualmente se está realizando el minado del tajo Pampa verde (mineral y desmonte) y tajo SPS zona sur (desmonte para el mantenimiento de vías y para el dique mina).

Tabla 6.1 Plan de perforación 2014 tajo SPS

| SPS                            | Enero            | Febrero          | Marzo            | Abril            | Mayo             | Junio            | Julio            | Agosto | Setiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | TOTAL              |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|---------|-----------|-----------|--------------------|
| Mineral (BCM)                  | 302,098          | 267,733          | 210,789          | 242,624          | 162,899          | 133,489          | 33,640           | -      | -         | -       | -         | -         | 1,353,273          |
| Estéril (BCM)                  | 213,284          | 191,726          | 227,416          | 168,138          | 216,394          | 169,778          | 219,101          | -      | -         | -       | -         | -         | 1,405,836          |
| <b>Total (BCM)</b>             | <b>515,383</b>   | <b>459,459</b>   | <b>438,205</b>   | <b>410,762</b>   | <b>379,292</b>   | <b>303,267</b>   | <b>252,741</b>   | -      | -         | -       | -         | -         | <b>2,759,109</b>   |
| Perforación Mineral Venta (\$) | \$190,926        | \$169,207        | \$133,219        | \$153,338        | \$102,952        | \$84,365         | \$21,261         | -      | -         | -       | -         | -         | \$855,268          |
| Perforación Esteril Venta (\$) | \$134,796        | \$121,171        | \$143,727        | \$106,263        | \$136,761        | \$107,300        | \$136,472        | -      | -         | -       | -         | -         | \$888,489          |
| <b>Total Perforación (\$)</b>  | <b>\$325,722</b> | <b>\$290,378</b> | <b>\$276,945</b> | <b>\$259,602</b> | <b>\$239,713</b> | <b>\$191,665</b> | <b>\$159,732</b> | -      | -         | -       | -         | -         | <b>\$1,743,757</b> |
| Voladura Mineral Venta (\$)    | \$28,699         | \$25,435         | \$20,025         | \$23,049         | \$15,475         | \$12,681         | \$3,196          | -      | -         | -       | -         | -         | \$128,561          |
| Voladura Esteril Venta (\$)    | \$20,262         | \$18,214         | \$21,604         | \$15,973         | \$20,557         | \$16,129         | \$20,815         | -      | -         | -       | -         | -         | \$133,554          |
| <b>Total Voladura(\$)</b>      | <b>\$48,961</b>  | <b>\$43,649</b>  | <b>\$41,629</b>  | <b>\$39,022</b>  | <b>\$36,033</b>  | <b>\$28,810</b>  | <b>\$24,010</b>  | -      | -         | -       | -         | -         | <b>\$262,115</b>   |
| Perforación Mineral Costo (\$) | \$150,143        | \$133,063        | \$104,762        | \$120,584        | \$80,961         | \$66,344         | \$16,719         | -      | -         | -       | -         | -         | \$672,577          |
| Perforación Esteril Costo (\$) | \$106,002        | \$95,288         | \$113,026        | \$83,565         | \$107,548        | \$84,380         | \$108,893        | -      | -         | -       | -         | -         | \$698,701          |
| <b>Total Perforación (\$)</b>  | <b>\$256,145</b> | <b>\$228,351</b> | <b>\$217,788</b> | <b>\$204,149</b> | <b>\$188,508</b> | <b>\$150,724</b> | <b>\$125,612</b> | -      | -         | -       | -         | -         | <b>\$1,371,277</b> |
| Voladura Mineral Costo (\$)    | \$35,950         | \$31,860         | \$25,084         | \$28,872         | \$19,385         | \$15,885         | \$4,003          | -      | -         | -       | -         | -         | \$128,561          |
| Voladura Esteril Costo (\$)    | \$23,888         | \$21,473         | \$25,471         | \$18,831         | \$24,236         | \$19,015         | \$24,539         | -      | -         | -       | -         | -         | \$133,554          |
| <b>Total Voladura(\$)</b>      | <b>\$59,838</b>  | <b>\$53,334</b>  | <b>\$50,554</b>  | <b>\$47,704</b>  | <b>\$43,621</b>  | <b>\$34,900</b>  | <b>\$28,542</b>  | -      | -         | -       | -         | -         | <b>\$262,115</b>   |
| <b>Perforación Mineral</b>     | <b>302,098</b>   | <b>267,733</b>   | <b>210,789</b>   | <b>242,624</b>   | <b>162,899</b>   | <b>133,489</b>   | <b>33,640</b>    | -      | -         | -       | -         | -         | <b>1,353,273</b>   |
| Burden(m)                      | 3.6              | 3.6              | 3.6              | 3.6              | 3.6              | 3.6              | 3.6              | 3.6    | 3.6       | 3.6     | 3.6       | 3.6       | 3.6                |
| Espaciamiento(m)               | 4.6              | 4.6              | 4.6              | 4.6              | 4.6              | 4.6              | 4.6              | 4.6    | 4.6       | 4.6     | 4.6       | 4.6       | 4.6                |
| Sobreperforación(m)            | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5    | 0.5       | 0.5     | 0.5       | 0.5       | 0.5                |
| Altura de Banco(m)             | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6      | 6         | 6       | 6         | 6         | 6                  |
| N° Taladros                    | 3,040            | 2,695            | 2,121            | 2,442            | 1,639            | 1,343            | 339              | 0      | 0         | 0       | 0         | 0         | 13,620             |
| Metros Perforados              | 19,763           | 17,515           | 13,790           | 15,872           | 10,657           | 8,733            | 2,201            | 0      | 0         | 0       | 0         | 0         | 88,523             |
| <b>Perforación Desmonte</b>    | <b>213,284</b>   | <b>191,726</b>   | <b>227,416</b>   | <b>168,138</b>   | <b>216,394</b>   | <b>169,778</b>   | <b>219,101</b>   | -      | -         | -       | -         | -         | <b>1,405,836</b>   |
| Burden(m)                      | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.3    | 4.3       | 4.3     | 4.3       | 4.3       | 4.3                |
| Espaciamiento(m)               | 5.0              | 5.0              | 5.0              | 5.0              | 5.0              | 5.0              | 5.0              | 5.0    | 5.0       | 5.0     | 5.0       | 5.0       | 5.0                |
| Sobreperforación(m)            | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5              | 0.5    | 0.5       | 0.5     | 0.5       | 0.5       | 0.5                |
| Altura de Banco(m)             | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6                | 6      | 6         | 6       | 6         | 6         | 6                  |
| N° Taladros                    | 1,635            | 1,470            | 1,744            | 1,289            | 1,659            | 1,302            | 1,680            | 0      | 0         | 0       | 0         | 0         | 10,778             |
| Metros Perforados              | 10,623           | 9,554            | 11,333           | 8,379            | 10,784           | 8,461            | 10,919           | 0      | 0         | 0       | 0         | 0         | 70,058             |

Fuente: Oficina técnica Stracon gym

Tabla 6.2 Plan de perforación 2014 tajo PV

| PV  | Enero    | Febrero  | Marzo         | Abril         | Mayo           | Junio          | Julio          | Agosto         | Setiembre      | Octubre        | Noviembre      | Diciembre      | TOTAL            |
|---|----------|----------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| Mineral (BCM)                             | -        | -        | 67,590        | 53,364        | 94,840         | 129,677        | 168,539        | 247,765        | 256,669        | 255,140        | 255,418        | 234,173        | 1,763,174        |
| Estéril (BCM)                             | -        | -        | -             | 24,823        | 33,098         | 58,433         | 100,830        | 264,503        | 225,504        | 250,585        | 231,650        | 274,646        | 1,464,071        |
| <b>Total (BCM)</b>                        | -        | -        | <b>67,590</b> | <b>78,187</b> | <b>127,937</b> | <b>188,110</b> | <b>269,369</b> | <b>512,267</b> | <b>482,173</b> | <b>505,725</b> | <b>487,068</b> | <b>508,819</b> | <b>3,227,245</b> |
| Perforación Mineral Venta (\$)            | -        | -        | 32,105        | 25,348        | 45,049         | 61,597         | 80,056         | 117,688        | 121,918        | 121,191        | 121,324        | 111,232        | 837,508          |
| Perforación Esteril Venta (\$)            | -        | -        | -             | 11,791        | 15,721         | 27,756         | 47,894         | 125,639        | 107,114        | 119,028        | 110,034        | 130,457        | 695,434          |
| <b>Total Perforación Venta (BCM) (\$)</b> | -        | -        | <b>32,105</b> | <b>37,139</b> | <b>60,770</b>  | <b>89,352</b>  | <b>127,950</b> | <b>243,327</b> | <b>229,032</b> | <b>240,219</b> | <b>231,357</b> | <b>241,689</b> | <b>1,532,941</b> |
| Voladura Mineral Venta (\$)               | -        | -        | 6,421         | 5,070         | 9,010          | 12,319         | 16,011         | 23,538         | 24,384         | 24,238         | 24,265         | 22,246         | 167,502          |
| Voladura Esteril Venta (\$)               | -        | -        | -             | 2,358         | 3,144          | 5,551          | 9,579          | 25,128         | 21,423         | 23,806         | 22,007         | 26,091         | 139,087          |
| <b>Total Voladura Venta (BCM) (\$)</b>    | -        | -        | <b>6,421</b>  | <b>7,428</b>  | <b>12,154</b>  | <b>17,870</b>  | <b>25,590</b>  | <b>48,665</b>  | <b>45,806</b>  | <b>48,044</b>  | <b>46,271</b>  | <b>48,338</b>  | <b>306,588</b>   |
| Perforación Mineral Costo (\$)            | -        | -        | 33,592        | 26,522        | 47,135         | 64,450         | 83,764         | 123,139        | 127,564        | 126,804        | 126,943        | 116,384        | 876,298          |
| Perforación Esteril Costo (\$)            | -        | -        | -             | 12,337        | 16,450         | 29,041         | 50,112         | 131,458        | 112,075        | 124,541        | 115,130        | 136,499        | 727,643          |
| <b>Total Perforación Costo (BCM) (\$)</b> | -        | -        | <b>33,592</b> | <b>38,859</b> | <b>63,585</b>  | <b>93,491</b>  | <b>133,876</b> | <b>254,597</b> | <b>239,640</b> | <b>251,345</b> | <b>242,073</b> | <b>252,883</b> | <b>1,603,941</b> |
| Voladura Mineral Costo (\$)               | -        | -        | 8,043         | 6,350         | 11,286         | 15,432         | 20,056         | 29,484         | 30,544         | 30,362         | 30,395         | 27,867         | 209,818          |
| Voladura Esteril costo (\$)               | -        | -        | -             | 2,780         | 3,707          | 6,545          | 11,293         | 29,624         | 25,256         | 28,066         | 25,945         | 30,760         | 163,976          |
| <b>Total Voladura Costo (BCM) (\$)</b>    | -        | -        | <b>8,043</b>  | <b>9,131</b>  | <b>14,993</b>  | <b>21,976</b>  | <b>31,349</b>  | <b>59,108</b>  | <b>55,800</b>  | <b>58,427</b>  | <b>56,340</b>  | <b>58,627</b>  | <b>373,794</b>   |
| <b>Perforación Mineral</b>                | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>67,590</b> | <b>53,364</b> | <b>94,840</b>  | <b>129,677</b> | <b>168,539</b> | <b>247,765</b> | <b>256,669</b> | <b>255,140</b> | <b>255,418</b> | <b>234,173</b> | <b>1,763,174</b> |
| Burden(m)                                 | 3.6      | 3.6      | 3.6           | 3.6           | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6            | 3.6              |
| Espaciamiento(m)                          | 4.6      | 4.6      | 4.6           | 4.6           | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6            | 4.6              |
| Sobreperforación(m)                       | 0.5      | 0.5      | 0.5           | 0.5           | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5              |
| Altura de Banco(m)                        | 6        | 6        | 6             | 6             | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6                |
| N° Taladros                               | 0        | 0        | 680           | 537           | 955            | 1,305          | 1,696          | 2,494          | 2,583          | 2,568          | 2,571          | 2,357          | 17,745           |
| Metros Perforados                         | 0        | 0        | 4,422         | 3,491         | 6,204          | 8,483          | 11,026         | 16,208         | 16,791         | 16,691         | 16,709         | 15,319         | 115,345          |
| <b>Perforación Desmonte</b>               | -        | -        | -             | <b>24,823</b> | <b>33,098</b>  | <b>58,433</b>  | <b>100,830</b> | <b>264,503</b> | <b>225,504</b> | <b>250,585</b> | <b>231,650</b> | <b>274,646</b> | <b>1,464,071</b> |
| Burden(m)                                 | 4.3      | 4.3      | 4.3           | 4.3           | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3            | 4.3              |
| Espaciamiento(m)                          | 5.0      | 5.0      | 5.0           | 5.0           | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0            | 5.0              |
| Sobreperforación(m)                       | 0.5      | 0.5      | 0.5           | 0.5           | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5              |
| Altura de Banco(m)                        | 6        | 6        | 6             | 6             | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6              | 6                |
| N° Taladros                               | 0        | 0        | 0             | 190           | 254            | 448            | 773            | 2,028          | 1,729          | 1,921          | 1,776          | 2,108          | 11,225           |
| Metros Perforados                         | 0        | 0        | 0             | 1,237         | 1,643          | 2,912          | 5,025          | 13,181         | 11,238         | 12,487         | 11,544         | 13,687         | 72,960           |

Fuente: Oficina técnica Stracon gym

Como se aprecia en el los cuadros anteriores 6.1 y 6.2 la malla de perforación para el tajo SPS y PV es una malla triangular donde:

➤ Tajo San Pedro Sur Zona Norte (mineral):

- Malla promedio para mineral producción:  $E=5.0-B=4.3-SD=0.5$  ( $E=4.6-B=3.6-SD=0.5$ )
- Malla promedio para mineral buffer:  $E=3.5-B=3.0$

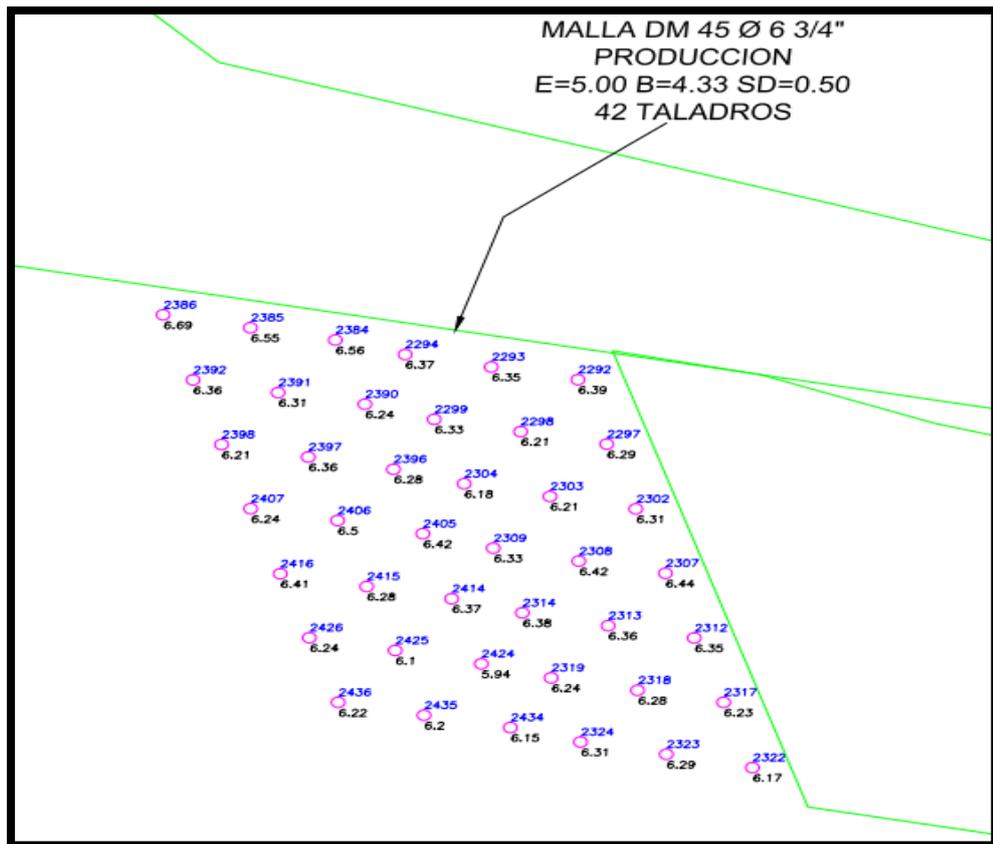


Figura 6.1 malla de perforación SPS zona norte  
 Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

➤ Tajo San Pedro Sur Zona Sur (desmante):

- Malla promedio para desmante:  $E=5.5-B=4.7-SD=0.5$  ( $E=5.0-B=4.33-SD=0.5$ )

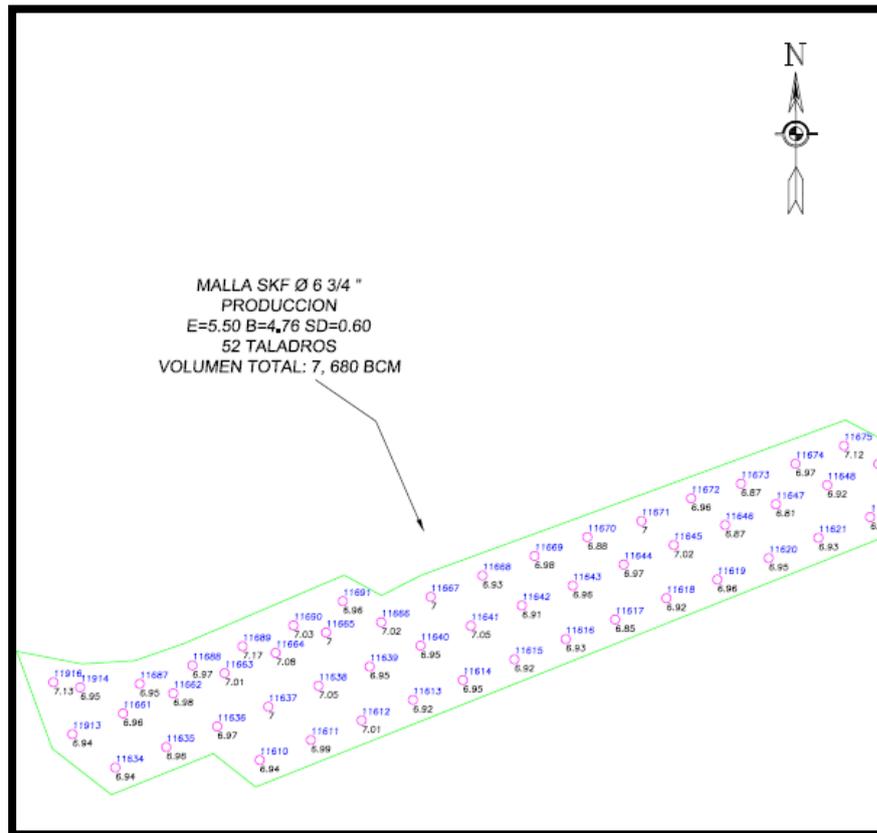


Figura 6.2 malla de perforación SPS zona sur  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

- Malla promedio para mineral buffer:  $E=3.5-B=3.0$

➤ Tajo Pampa Verde:

- Malla promedio para mineral producción:  $E=5.0-B=4.33-SD=0.5$

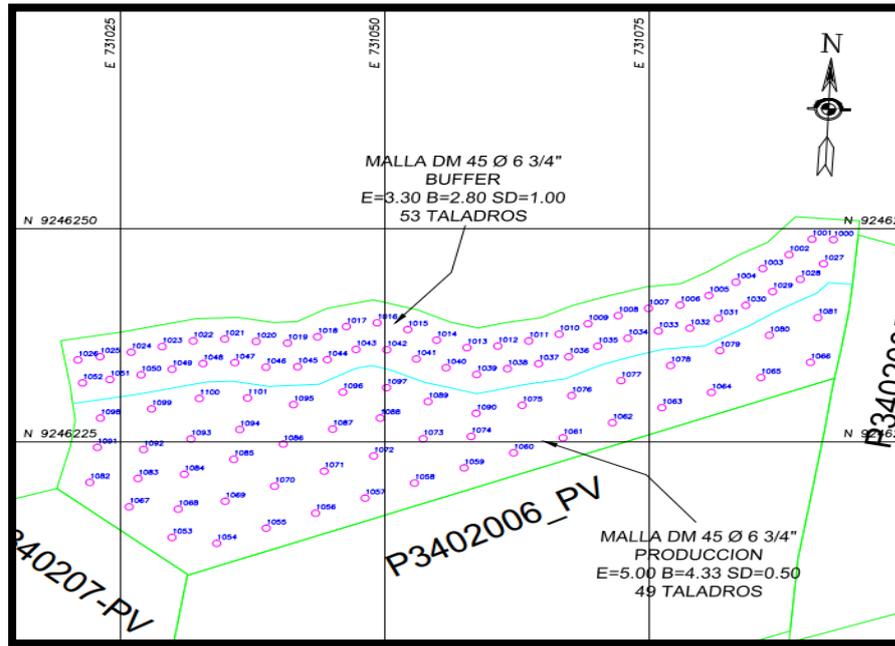


Figura 6.3 malla de perforación SPS zona sur  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

- Malla promedio para desmorte: E=5-B=5 -SD=0.5

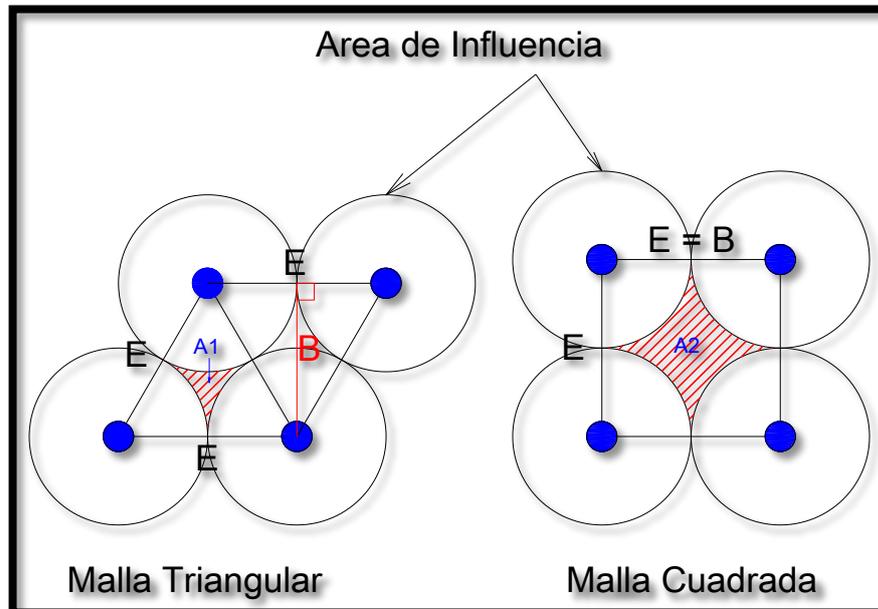


Figura 6.4 malla de perforación Triangular vs Malla cuadrada  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

De la figura 6.4 en la malla triangular equilátera se cumple lo siguiente:

$$B = \frac{\sqrt{3}}{2} E = \frac{E}{1.15} \dots\dots\dots \text{Ecuación 6.1}$$

Para la malla cuadrada se cumple:

$$E=B\dots\dots\dots \text{Ecuación 6.2}$$

## 6.2 ZONIFICACIÓN DE LAS PLATAFORMAS DE PERFORACIÓN PARA LA ADECUADA SELECCIÓN DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN

Como se explicó anteriormente la zonificación de las plataformas de perforación se realizara para maximizar la vida útil de los aceros de perforación, seleccionar adecuadamente el tipo de perforación y así maximizar la velocidad de perforación con la finalidad de reducir los costos unitarios de perforación y voladura.

Tabla 6.3 Sc vs Velocidad de perforación

|                                  |                |
|----------------------------------|----------------|
| SUAVE 17,000 PSI<                | 100< M/H       |
| MEDIO [17,000- 22,000] PSI       | [60 - 100] M/H |
| MEDIO DURO [22,000 – 32000 ] PSI | [40 - 60] M/H  |
| DURO <32,000 PSI                 | < 40 M/H       |

| FECHA | hoyo N° | ID   | banco | Hz  | leph (t) | tiempo Efectivo | velocidad efectiva (m/hour) | CLASIFICACIÓN | CODIGO | OPERADOR             | PROYECTO |
|-------|---------|------|-------|-----|----------|-----------------|-----------------------------|---------------|--------|----------------------|----------|
|       | 1       | 5165 | 3420  | 6.3 | 0.15     |                 | 42.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 2       | 4842 | 3420  | 6.2 | 0.10     |                 | 62.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 3       | 5164 | 3420  | 6.3 | 0.12     |                 | 54.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 4       | 4859 | 3420  | 6.3 | 0.10     |                 | 63.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 5       | 4843 | 3420  | 6.3 | 0.10     |                 | 63.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 6       | 4860 | 3420  | 6.3 | 0.10     |                 | 63.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 7       | 4844 | 3420  | 6.3 | 0.12     |                 | 54.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 8       | 4861 | 3420  | 6.3 | 0.15     |                 | 42.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 9       | 4845 | 3420  | 6.3 | 0.10     |                 | 63.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 10      | 4862 | 3420  | 6.4 | 0.12     |                 | 54.86                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 11      | 4846 | 3420  | 6.4 | 0.12     |                 | 54.86                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 12      | 4863 | 3420  | 6.4 | 0.20     |                 | 32.00                       | hard          | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 13      | 4847 | 3420  | 6.6 | 0.50     |                 | 13.20                       | extrahard     | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 14      | 4864 | 3420  | 6.6 | 0.13     |                 | 49.50                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 15      | 5163 | 3420  | 6.4 | 0.13     |                 | 48.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 16      | 4858 | 3420  | 6.3 | 0.10     |                 | 63.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 17      | 4875 | 3420  | 6.4 | 0.10     |                 | 64.00                       | medium        | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 18      | 4876 | 3420  | 6.5 | 0.17     |                 | 39.00                       | hard          | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 19      | 4848 | 3420  | 6.6 | 0.17     |                 | 39.60                       | hard          | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 20      | 4865 | 3420  | 6.6 | 0.15     |                 | 44.00                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 21      | 4849 | 3420  | 6.7 | 0.13     |                 | 50.25                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |
|       | 22      | 4866 | 3420  | 6.6 | 0.13     |                 | 49.50                       | medium-hard   | PE-005 | JHONNY GUEVARA NAUCA | 3420-30  |

Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

La tabla 6.3 se muestra el sistema de zonificación realizado en el 2013 mediante el control de velocidades se utilizaron dos perforadoras DM-45 en el tajo SPS y PV.

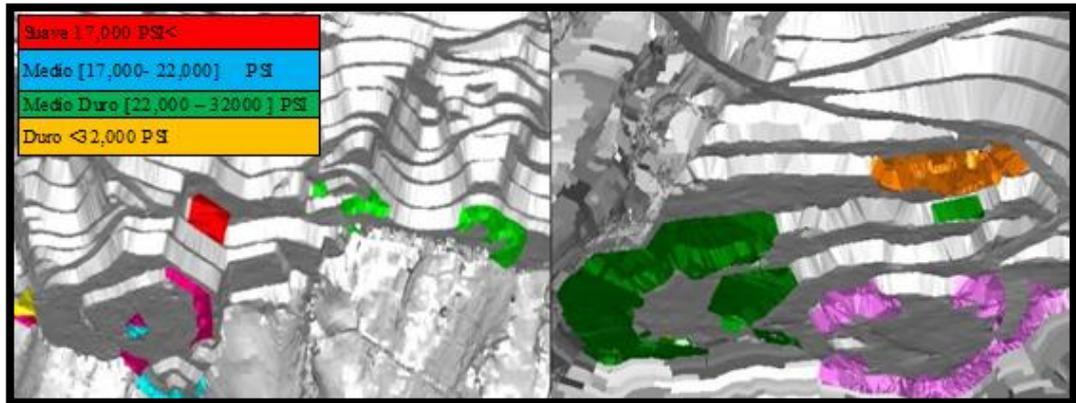


Figura 6.5 Zonificación del Tajo SPS – Tajo PV  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

Como se aprecia en la figura 6.5 se procede a zonificar el tajo SPS y PV de acuerdo a las velocidades de perforación en cada tajo.

Como se aprecia en la figura en el tajo pampa verde se aprecia 3 zonas de perforación. La más abundante es la zona media dura (zonificación verde 22,000-32,000 PSI) con una velocidad promedio de 50 m/h. en la cual se utiliza brocas DTH SANDVIK con cara convexa e inserto semi balísticos.

Continuamos con la zona dura (zonificación amarilla superior a 32,000 PSI) con una velocidad promedio de 25 m/h en la cual se utiliza brocas DTH SANDVIK con cara convexa e inserto tipo domo.

También se aprecia una tercera zona (zonificación roja de suave a medio duro menor a 20,000 PSI) con una velocidad promedio de perforación de 55 m/h a más en la cual se utiliza brocas DTH SANDVIK-MITSUBISHI con cara convexa e insertos mixtos tipo domo y semi balísticos, debido al terreno cambiante.

Caso similar se realizó en el tajo SPS la diferencia es la presencia de agua y el terreno muy fractura en SPS para ello se realiza la selección de una adecuada columna de perforación como ya se apreció en el capítulo 5.3.

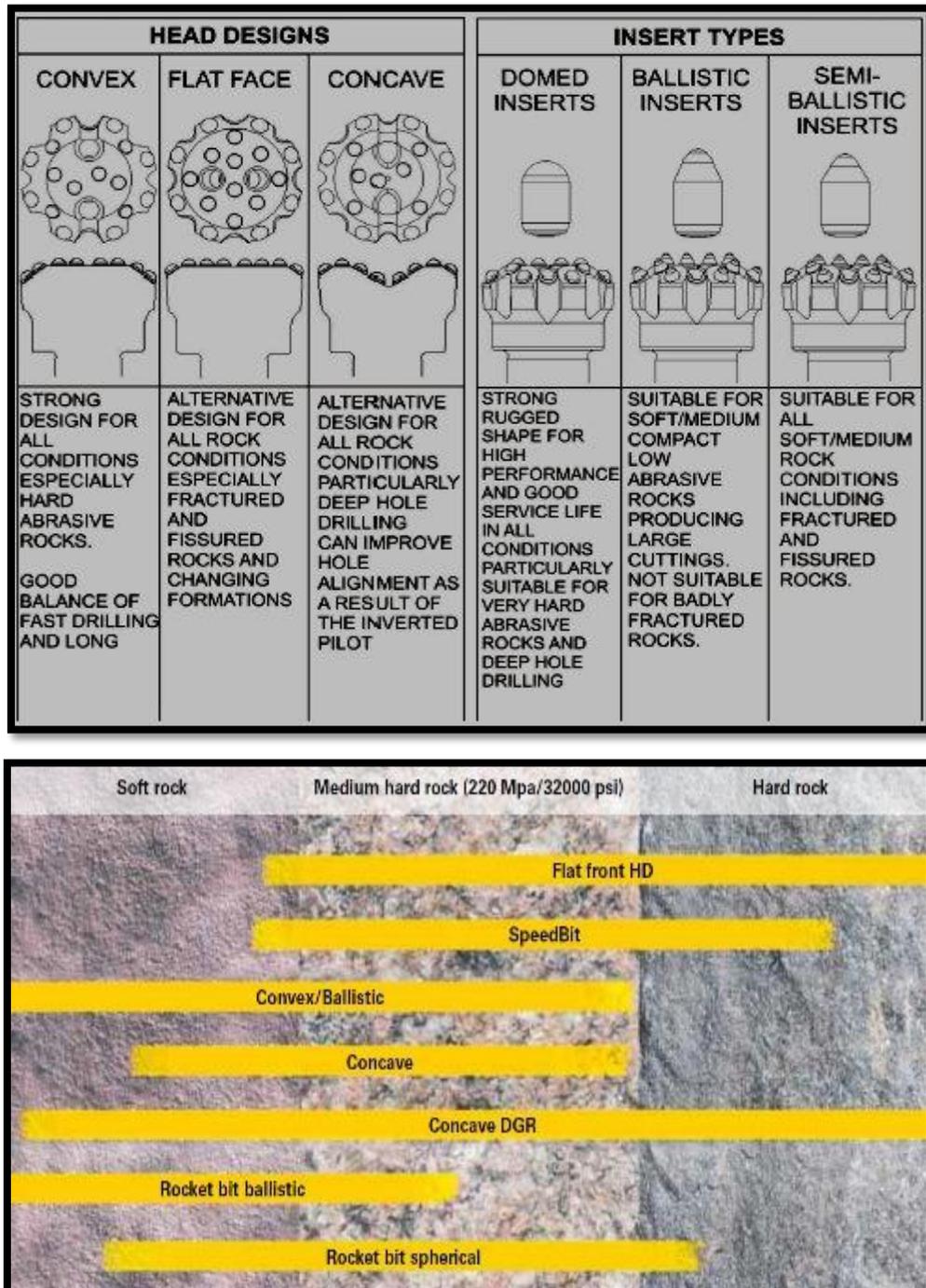
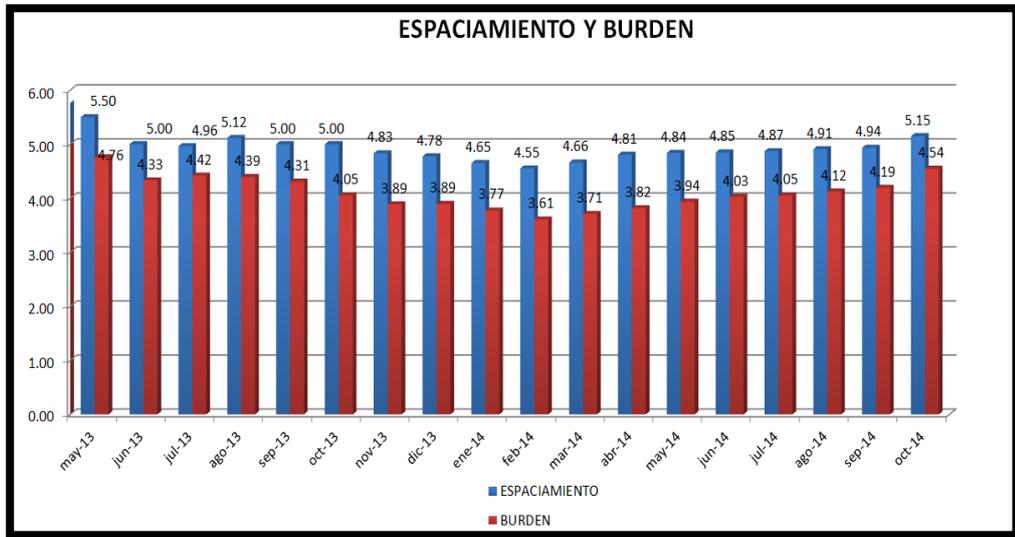


Figura 6.6 Selección de la broca DTH de acuerdo al tipo de terreno  
 Fuente: Blast hole drill open pit Atlas copco

Tabla 6.4 diagrama de barras de la malla promedio



Fuente: Perforación & Voladura Stracon gym

Del diagrama de barras (tabla 6.4) se aprecia la variación de la malla de perforación, el diseño de malla de espaciamientos superiores a 5 m es característico de zonas de material argilico avanzado ( $Sc < 17,000$  psi), para esta zona utilizaremos perforación rotativa. También es recomendable utilizar perforación con martillo pero seleccionando el tipo de broca para terreno suave a medio duro la recomendación adecuada seria broca con cara convexa con insertos balísticos.

### 6.3 AFILADO DE BROCAS EN EL RENDIMIENTO DE LA PERFORACIÓN

Como lo mencionamos anteriormente para reducir el TDC (US\$/m) se requiere un punto de equilibrio entre la velocidad de perforación y la vida útil de las brocas. Para ello se recomienda, aparte de la capacitación al personal, el afilado de los insertos de las brocas para aumentar la vida útil de la broca y maximizar la velocidad de corte de los insertos, por ende la velocidad de perforación. A continuación se muestra recomendaciones para el afilado de brocas. La máquina

puede ir desde una manual hasta una Estacionaria semi automática, de preferencia las copas deberán ser diamantadas para un mejor afilado:

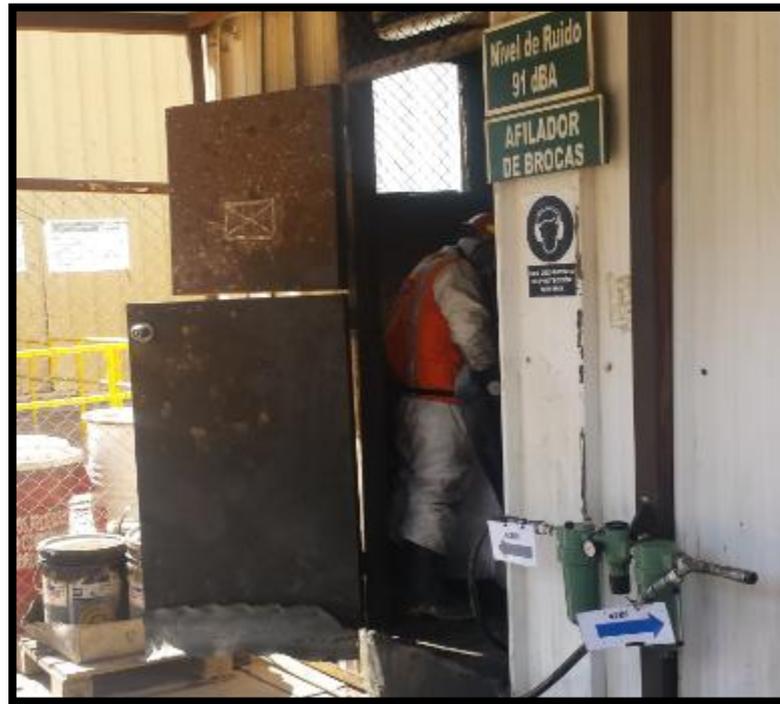


Figura 6.7 taller de afilado de brocas  
Fuente: perforación & Voladura Stracon gym

- Usar implementos de seguridad (mascara full face, respirador, guantes, etc.)
- Revisar conexiones de aire y agua.
- Instalar la broca a la altura adecuada para facilitar las maniobras del afilado.
- Trazar una línea imaginaria que divida el botón en dos mitades.
- Con presión moderada re afile cada hemisferio sin pasar por la línea divisoria.
- Para la forma final pasar suavemente por línea divisoria.

- Si es necesario rebajar el acero en torno al botón, si el botón está muy escondido se debe partir rebajando acero o matriz.
- Terminar rotando la copa en forma cilíndrica de izquierda a derecha.
- Eliminar todos los insertos quebrados

#### 6.4 REFORZAMIENTO DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN

Otra de las recomendaciones para reducir el costo total de perforación es el revestimiento de los aceros de perforación con soldadura, para así proteger estos aceros de los terrenos abrasivos que influyen en el desgaste prematuro de los gets. Con esto conseguiremos aumentar la vida útil de los aceros y reduciremos el TDC (US\$/m).

En perforación DTH es recomendable utilizar soldadura para reforzar los gets de perforación y el torno para rectificar los hilos, pero claro está siguiendo un ciclo adecuado ya que al reutilizar estos gets pueden causar pérdidas de martillos brocas o cualquier otro accesorio debido al estrés que sufren estos aceros y se produzca una ruptura (las imágenes se mostraran en los anexos).

El tipo de soldadura que se utiliza en la operación para el revestimiento de los aceros de perforación son los siguientes:

- **Citodur 1000:** Electrodo con alto contenido de carburos de cromo, el metal depositado es resistente a la abrasión severa e impacto moderado, corrosión y altas temperaturas (hasta 1000 °C). Muy usado en la industria minera, para la protección de uñas, adapters, baldes, cucharas. Tiene una dureza de 57-62 HRC

- **Exatub 71:** Es un alambre tubular para toda posición, diseñado para brindar óptimas propiedades mecánicas al trabajar con CO<sub>2</sub> o mezcla de Argón/CO<sub>2</sub> como gas protector. Tiene una resistencia a la tracción entre 593-642 Mpa.
- **Inox 29/9:** Electrodo cuyo depósito tiene una estructura austeno-ferrítica con Ferrita > 20%, insensible a la fisuración en caliente. El material depositado presenta una alta resistencia a la rotura y es muy empleado para soldar aceros de difícil soldabilidad y unir aceros disímiles. El revestimiento rútilico le permite obtener depósitos libres de poros y con buen acabado. El INOX 29/9 es resistentes al impacto, calor, corrosión y a la fricción metal - metal. Tiene una resistencia a la tracción entre 740-840 Mpa.

Tabla 6.5 Aplicación de los electrodos

| DESCRIPCIÓN  | APLICACIÓN  | CONSUMO     |
|--------------|---|-------------|
| INOX 29/9    | Se utiliza para recuperar aceros con menor desgaste, aceros que no tengan contacto con zonas abrasivas como pines y bocinas de los aceros de perforación  | 10 kg/mes   |
| EXATUB 71    | Se utiliza para rellenar los aceros que tienen mayor contacto con las zonas abrasivas, como las culatas, driver sub y el hard face de las barras, se realiza el revestimiento de 3 a 4 mm de espesor por pasada realizando hasta 4 pasadas de acuerdo al requerimiento del acero $\pm 2$ mm de variación. | 70-90kg/mes |
| CITODUR 1000 | Después de realizar el revestimiento con el EXATUB se agrega la capa de 2mm de citodur 1000, por su alto contenido de carburo de cromo, es ideal para resistir zonas de contacto abrasivos, por tal motivo se realiza el revestimiento de las culatas, driver sub y el hard face de la barra.             | 15-20kg/mes |

En la siguiente tabla 6.6 se muestran la vida útil recorrida por un acero de perforación sin revestir versus los revestidos, se aprecia que los aceros revestidos llegan una mayor vida útil.

Tabla 6.6 Gets con revestimiento-soldadura citodur

| DESCRIPCION  | VIDA UTIL | Φ DIAMETRO (mm) | V.U REVESTIDO (mm) | Φ REVESTIDO (mm) | P.U \$.    |
|--------------|-----------|-----------------|--------------------|------------------|------------|
| MARTILLO DTH | 8,653     | 150             | 10,816             | -                | \$7,022.32 |
| BARRA 5/5.5" | 20,269    | 151             | 25,336             | 152              | \$4,257.14 |
| TOP SUB      | 49,306    | 151             | -                  | -                | \$618.57   |
| GUIADOR      | 25,410    | 151             | 31,763             | 153              | \$642.86   |
| DRIVER SUB   | 2,884     | 150             | 3,605              | 153              | \$582.45   |
| CULATA       | 4,327     | 150             | 5,408              | 153              | \$1,164.64 |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

Tabla 6.7 Gets con revestimiento-soldadura citodur

| DESCRIPCION  | V.U +25%V.U | US\$/m | DIFERENCIA (m) | AHORRO     |
|--------------|-------------|--------|----------------|------------|
| MARTILLO DTH | 10,816      | 0.81   | 2,163          | \$1,755.38 |
| BARRA 5/5.5" | 25,336      | 0.21   | 5,067          | \$1,064.23 |
| TOP SUB      | 61,633      | 0.01   | -              | -          |
| GUIADOR      | 31,763      | 0.03   | 6,353          | \$160.73   |
| DRIVER SUB   | 3,605       | 0.20   | 721            | \$145.59   |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

Como se aprecia en la tabla 6.6 y 6.7 la vida útil de los aceros de perforación aumentan aproximadamente en un 25% al realizar el revestimiento con soldadura, favoreciendo así la reducción de nuestro costo total de perforación (US\$/m). Como se observa en la tabla 6.8 el TDC (US\$/m) se redujo a 6.68US\$/m con una adecuada selección de la columna de perforación y a 6.48 US\$/m aumentado la vida útil de los aceros de perforación con el revestimiento y recuperación-

Tabla 6.8 Reducción del TDC US\$/m

| GETS                 | P.U (\$)    | CANTIDAD | V.U (mtrs) |
|----------------------|-------------|----------|------------|
| BROCA                | 1200        | 1        | 1,500      |
| MARTILLO             | 7000        | 1        | 10,816     |
| BARRA                | 3000        | 1        | 25,336     |
| GUIADOR              | 1000        | 1        | 31,763     |
| TOP SUB              | 1500        | 1        | 49,306     |
| <b>TDC ( US\$/m)</b> | <b>6.48</b> |          |            |

Fuente: perforación &amp; Voladura Stracon gym

Al seleccionar adecuadamente la columna de perforación (Api 5”) y aumentar la vida útil de los aceros de perforación (revestimiento y afilado de brocas) se logra reducir el TDC (US\$/m) en 4% y reducir en solo costos de aceros de perforación en 12%.

Tabla 6.9 Análisis técnico y económico de la reducción del TDC (US\$/m)

| Propuesta para una perforadora | Velocidad de Barrido (fpm) | Velocidad (m/h) | TDC (US\$/m) | Metros perf por mes | Costo por mes |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------|---------------------|---------------|
| Columna BECO 5 1/2"            | 8,932                      | 36.94           | 6.75         | 15,647              | \$ 105,620.49 |
| Columna API 5"                 | 6,651                      | 36.94           | 6.48         | 15,647              | \$ 101,395.67 |
| <b>Ahorro por mes</b>          | <b>\$ 4,224.82</b>         |                 |              |                     |               |

|                           |      |     |
|---------------------------|------|-----|
| Variación en TDC (US\$/m) | 0.27 | 4%  |
| Variación en Gets         | 0.12 | 12% |

Fuente: perforación &amp; Voladura

Stracon gym

## 6.5 VARIACIÓN DEL TDC (US\$/m) RESPECTO AL RENDIMIENTO DE PERFORACIÓN

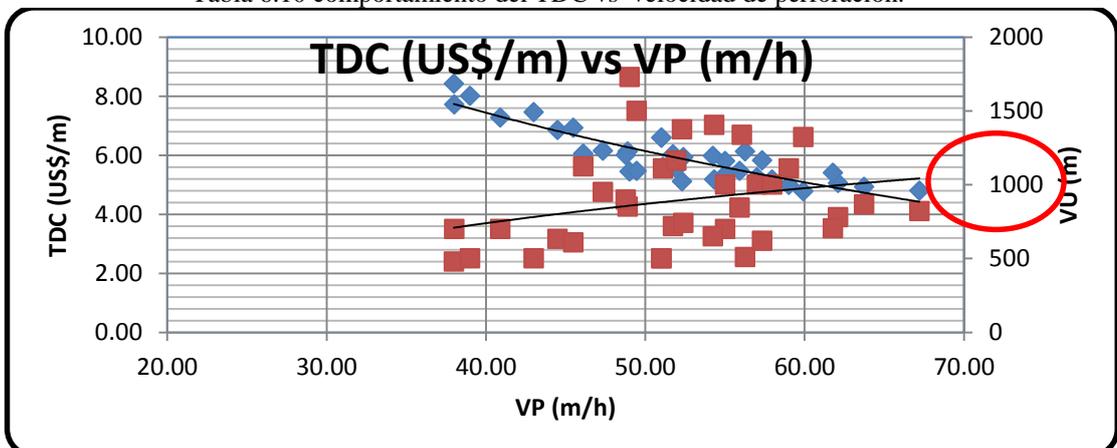
Al realizar la zonificación del macizo rocoso y seleccionar la adecuada columna de perforación, se busca una adecuada velocidad de perforación y una máxima vida

útil del acero de perforación con la finalidad de reducir el costo total de perforación TDC (US\$/m).

Se dice que aumentado la velocidad de rotación se conseguirá maximizar la velocidad de perforación, lo que en la práctica es verdad, pero reducirá la vida útil de la broca desgastando así los insertos periféricos y reduciendo el ciclo de afilado de brocas (4 a 5 afiladas). Por tal motivo el ingeniero en perforación y voladura debe percatarse que el operador de la perforadora utilice adecuadamente los parámetros de perforación, como controlar la velocidad de rotación, pull down, velocidad de barrido etc. Esto le permitirá al operador encontrar la apropiada velocidad de rotación que le permita una buena velocidad de perforación sin sacrificar la vida útil de la broca

Con todo esto lo que se busca es que una broca llegue a una vida útil adecuada sin disminuir la velocidad de perforación y viceversa, buscar una adecuada velocidad de perforación sin reducir la vida útil de la broca. En otras palabras se busca un punto de equilibrio entre la velocidad de perforación y la vida útil de la broca con la finalidad de reducir el TDC (US\$/m)

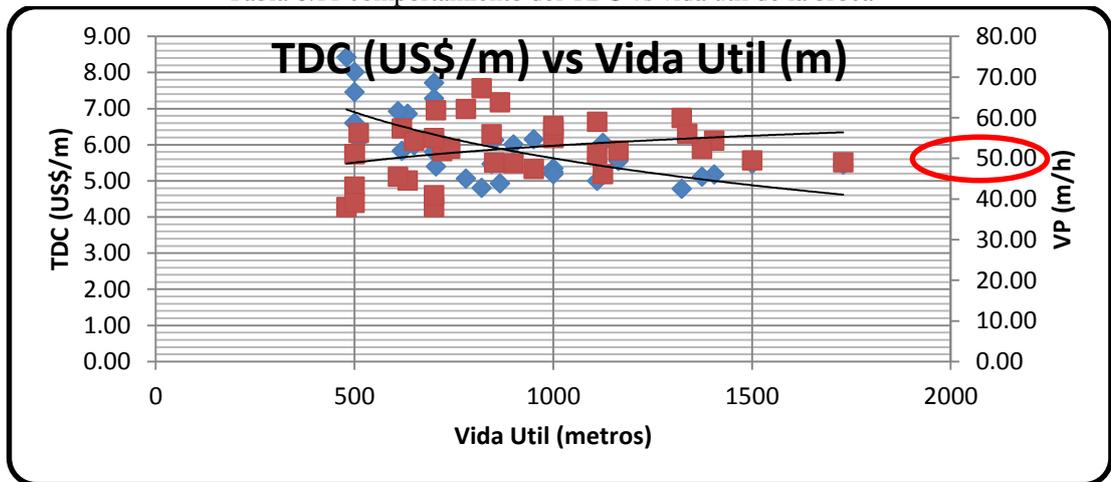
Tabla 6.10 comportamiento del TDC vs velocidad de perforación.



De la tabla 6.10 se aprecia que el TDC (US\$/m) se reduce al aumentar la velocidad de perforación pero como se mencionó anteriormente no es lo que se necesita, lo que en realidad buscamos es un equilibrio entre la vida útil y la velocidad de perforación.

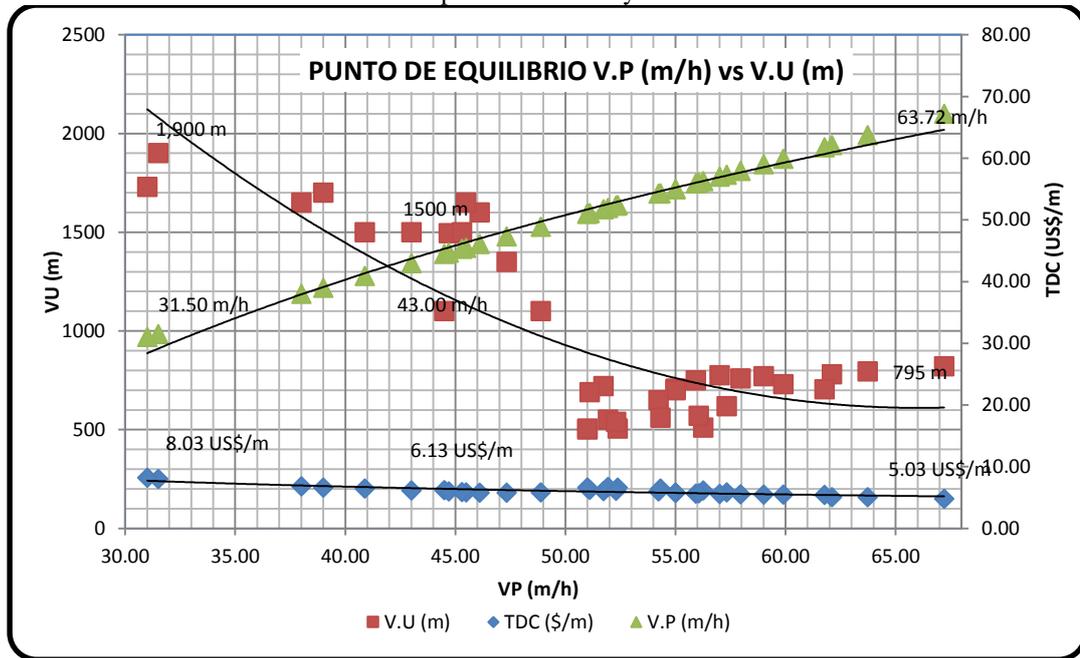
Este punto de equilibrio se lograra realizando un control para sustituir a la herramienta de corte y no dejarlo a la pericia del operador, ya que en muchas unidades mineras es el operador quien sugiere el momento de sustitución de la broca, y en muchas ocasiones es hasta que la matriz este reducida y los insertos desgastados por completo.

Tabla 6.11 comportamiento del TDC vs vida útil de la broca



De la tabla 6.10 y la tabla 6.11 se puede apreciar que el punto de equilibrio que buscamos para la velocidad de perforación y la vida útil es entre 40 m/h – 55 m/h y entre 900 m– 1500 m respectivamente, para así reducir el costo total de perforación.

Tabla 6.12 El impacto de la V.U y V.P sobre el TDC



Se aprecia en la tabla 6.12 el impacto que genera la V.U (m) y V.P (m/h) sobre el TDC, asumiendo que la data recolectada es de una broca que tiene un recorrido de 2000 m y en un proyecto de macizo rocoso uniforme manteniendo constante los parámetros de perforación en cada punto de análisis. Como se observa a inicios del recorrido, la broca tiene un alto rendimiento 63.72 m/h esto es debido a que los insertos periféricos y la matriz de la broca no se encuentran desgastadas, mientras aumenta el recorrido de la broca, se desgastan los insertos se reduce la matriz y el rendimiento es menor generando así una mayor vida útil, pero un costo total de perforación elevado (V.U= 1900 m, V.P= 31.5 m/hr, TDC= 8.03 US\$/m). Se ha visto a muchos ingenieros confundir que llevar al máximo la vida útil de la broca es rentable, pero esto es una falacia ya que en realidad genera menor rendimiento por ende mayor TDC, lo que en realidad se busca es el punto de equilibrio entre la V.U

y el rendimiento que genere un menor TDC (V.U= 1500 m, V.P=43.00 m/hr, TDC= 6.13 US\$/m).

Para tal logro se debe capacitar a los operadores con el objetivo de que ellos puedan conseguir los parámetros adecuados para los diferentes macizos rocosos que se presentan en la perforación, se debe llevar un registro o control de la vida de la broca in situ. Si se recopilan, registran correctamente las condiciones de la broca in situ y se realiza el cambio de la herramienta de corte en el momento oportuno, se lograra en un futuro una adecuada selección de la broca para los distintas condiciones del terreno que se nos presenten y por ende reducir el costo total de perforación.

## CONCLUSIONES

1. Al seleccionar adecuadamente la columna de perforación se logra reducir TDC. Para nuestro caso la propuesta A genera un menor costo en terrenos secos y competentes reduciendo así el costo de perforación de 6.75 US\$/m a 6.68 US\$/m.
2. Al zonificar las plataformas de perforación de acuerdo a la data estadística recolectada, teniendo como referencia las velocidades de perforación, permitió seleccionar adecuadamente; la malla de perforación de desmonte y de mineral, el modelo de la broca, con lo cual se redujo TDC.
3. Con el revestimiento con soldadura y el cuidado de aceros se logra aumentar la vida útil de los aceros aproximadamente en un 25%, al final se logra reducir el TDC de 6.75 US\$/m a 6.48US\$/m.
4. Se logró encontrar el punto de equilibrio (TDC US\$/m más bajo) entre la velocidad de perforación y la vida útil de una broca. El cual es nuestro TDC meta.

## **RECOMENDACIONES**

1. La principal preocupación del ingeniero a cargo es reducir el costo total de perforación y voladura que influye en el costo total del ciclo de minado.
2. El ingeniero encargado debe encontrar el punto de equilibrio de la velocidad de perforación y la vida útil con la finalidad de reducir el TDC.
3. El ingeniero de perforación y voladura debe capacitar al personal en el control de los parámetros de perforación y en la recopilación de datos confiables de las brocas in situ.
4. Se debe realizar el control del afilado de la herramienta de corte, ya que teniendo afilado los insertos tendrá un mejor rendimiento.
5. Siendo la perforación la primera actividad que se ejecuta en una operación minera, el ingeniero a cargo debe brindarle la importancia del caso, ya que los resultados por voladura dependerán de esta operación unitaria.
6. El ingeniero de perforación y voladura debe seleccionar adecuadamente el tipo de perforación y la columna de perforación a utilizar de acuerdo a las condiciones que se presenten.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. **CARLOS LOPEZ JIMENO, EMILIO LOPEZ JIMENO, PILAR GARCÍA BERMUDES**, 2003 *Manual de Perforación y Voladura de Rocas. IGME.*
2. **JOSÉ BERNAOLA ALONSO, JORGE CASTILLO GOMEZ, JUAN HERRERA HERBERT**, 2013 *Perforación y voladura de rocas en minería, departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas laboratorio de tecnologías mineras, Madrid. IGME.*
3. **ATLAS COPCO.**, *Blast Hole Drill Open Pit*, 3ra Edición.
4. **SANDVIK.**, *Mining & Construcción*, 3ra Edición.
5. **BASE DE DATOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA**, CIA MLZ.
6. **BASE DE DATOS DE COSTOS Y PRESUPUESTOS**, CIA MLZ.
7. **BASE DE DATOS DE CONTROL DE EQUIPOS** CIA MLZ.
8. Fuente: Área de Geología Mina CIA Minera la Zanja.
9. Fuente: Área de Perforación y Voladura CIA Minera la Zanja.
10. Fuente: Área de Control de equipos Minera la Zanja.

## ANEXOS

ANEXO 1: Base de datos de perforación (vida útil y rendimientos de brocas, martillos, barras y otros accesorios de perforación)

| INFORME DE PERFORACION 2013 |       |       |      |       |     |            |             |        |            | BROCAE     |         |                        |                         |  |
|-----------------------------|-------|-------|------|-------|-----|------------|-------------|--------|------------|------------|---------|------------------------|-------------------------|--|
| Fecha                       | Mes   | Turno | Tajo | Banco | PY  | Tipo       | Material    | Equipo | BROCA      | Marca      | Modelo  | Metros Iniciales Broca | Metros Perforados Broca |  |
| 03/10/2010                  | enero | DiA   | SPN  | 2080  | 8   | Produccion | medium      | SKF-11 | 120310770  | Sandvik    | M-65    | 214.5                  | 498.5                   |  |
| 27/08/2012                  | enero | Noche | SPN  | 3395  | 21  | Produccion | medium-hard | SKF-11 | 2490521208 | WLS        | Tricano | 0                      | 240.0                   |  |
| 27/08/2012                  | enero | Noche | SPN  | 3395  | 20  | Produccion | hard        | SKF-11 |            |            |         |                        |                         |  |
| 27/08/2012                  | enero | Noche | SPN  | 3395  |     | Secundario | hard        | SKF-11 |            |            |         |                        |                         |  |
| 29/03/2013                  | enero | Noche | SPN  | 2080  | 8   | Produccion | medium-hard | M-45   | 120310731  | Sandvik    | M-65    | 88.1                   | 182                     |  |
| 01/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 30  | Produccion | medium-hard | SKF-11 | 09382-11   | Mitsubishi | M-65    | 54.8                   | 201.50                  |  |
| 01/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  |       |     |            |             | DX-700 |            |            |         |                        |                         |  |
| 02/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 38  | Produccion | medium hard | SKF-11 | 09382-11   | Mitsubishi | M-65    | 255.1                  | 46.40                   |  |
| 02/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 58  | Produccion | -           | SKF-11 | 03782-14   | Mitsubishi | M-65    | 20.0                   | 188.70                  |  |
| 03/04/2013                  | abril | Noche | SPN  | 3414  | 40  | Produccion | medium-hard | M-45   | 09382-14   | Mitsubishi | M-65    | 111.3                  | 223                     |  |
| 03/04/2013                  | abril | Noche | SPN  | 3414  | 48  | Produccion | medium-hard | M-45   | 09732-12   | Mitsubishi | M-65    | 20.0                   | 85                      |  |
| 03/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 38  | Produccion | medium hard | SKF-11 | 03782-14   | Mitsubishi | M-65    | 158.7                  | 125.00                  |  |
| 03/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 58  | Reparacion | ad-hard     | M-45   | 05112-04   | Mitsubishi | M-65    |                        | 33.50                   |  |
| 03/04/2013                  | abril | DiA   | SPN  | 3420  | 50* | Reparacion | hard        | DX-700 | 11         | Sandvik    | Reback  | 535.2                  | 28.00                   |  |

ANEXO 2: Base de datos de las brocas de perforación

| MES    | Modelo de Broca | Marca de Broca | CODIGO    | V.U (m) | V.P (m/h) | Precio (€)  | TDC (\$/m) |
|--------|-----------------|----------------|-----------|---------|-----------|-------------|------------|
| ene-13 | QL 6            | Numa           | 06982-14  | 780     | 62.10     | \$ 993.47   | 5.06       |
| ene-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 08732-12  | 750     | 55.92     | \$ 1,070.00 | 5.63       |
| ene-13 | QL 6            | Puma           | 03782-14  | 720     | 51.73     | \$ 1,070.00 | 6.03       |
| ene-13 | M-65            | Mitsubishi     | 05112-04  | 820     | 67.20     | \$ 1,070.00 | 4.80       |
| ene-13 | M-65            | sandvik        | 11        | 705     | 61.77     | \$ 1,125.00 | 5.40       |
| feb-13 | QL 6            | Numa           | 11        | 510.45  | 56.26     | \$ 993.47   | 6.12       |
| feb-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 120310711 | 505     | 52.37     | \$ 1,070.00 | 6.61       |
| feb-13 | QL 6            | Puma           | 120310751 | 619.3   | 57.32     | \$ 1,070.00 | 5.83       |
| feb-13 | M-65            | sandvik        | 06982-03  | 730     | 59.90     | \$ 1,125.00 | 5.46       |
| mar-13 | QL 6            | Numa           | 202250    | 1100    | 44.49     | \$ 993.47   | 6.19       |
| mar-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 00562-11  | 1900    | 31.50     | \$ 1,070.00 | 8.03       |
| mar-13 | M-65            | Mitsubishi     | 202250    | 795     | 63.72     | \$ 1,070.00 | 5.03       |
| mar-13 | M-65            | sandvik        | 06982-16  | 1100    | 48.88     | \$ 1,125.00 | 5.83       |
| abr-13 | M-65            | Mitsubishi     | 120310785 | 1495    | 44.70     | \$ 1,070.00 | 5.97       |
| abr-13 | M-65            | sandvik        | 120310785 | 690     | 51.10     | \$ 1,125.00 | 6.23       |
| abr-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 06982-18  | 1600    | 46.10     | \$ 1,070.00 | 5.77       |
| abr-13 | QL 6            | NUMA           | 06982-01  | 1500    | 43.00     | \$ 993.47   | 6.13       |
| may-13 | M-65            | Mitsubishi     | 06982-03  | 708     | 55.00     | \$ 1,070.00 | 5.78       |
| may-13 | M-65            | sandvik        | 06982-14  | 770     | 59.00     | \$ 1,125.00 | 5.44       |
| may-13 | QL 6            | Numa           | 06982-10  | 1700    | 39.00     | \$ 993.47   | 6.61       |
| jun-13 | M-65            | Mitsubishi     | 120310785 | 700     | 55.00     | \$ 1,070.00 | 5.80       |
| jun-13 | M-65            | sandvik        | 06982-09  | 775     | 57.00     | \$ 1,125.00 | 5.58       |
| jun-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 120310785 | 1650    | 38.00     | \$ 1,070.00 | 6.83       |
| jun-13 | QL 6            | NUMA           | 120310715 | 500     | 51.00     | \$ 993.47   | 6.60       |
| jul-13 | M-65            | Mitsubishi     | 06982-09  | 650     | 54.23     | \$ 1,070.00 | 5.98       |
| jul-13 | M-65            | sandvik        | 06982-20  | 760     | 57.95     | \$ 1,125.00 | 5.54       |
| jul-13 | QL 6            | Mitsubishi     | 12        | 1500    | 40.89     | \$ 1,070.00 | 6.46       |
| jul-13 | QL 6            | NUMA           | 06982-12  | 505     | 51.00     | \$ 993.47   | 6.58       |
| ago-13 | M-65            | Mitsubishi     | 120310382 | 1650    | 45.48     | \$ 1,070.00 | 5.82       |
| ago-13 | M-65            | sandvik        | 06982-18  | 1350    | 47.33     | \$ 1,125.00 | 5.80       |
| sep-13 | M-65            | sandvik        | 120310722 | 1729.25 | 31        | \$ 1,125.00 | 8.23       |
| oct-13 | M-65            | sandvik        | 06982-15  | 550     | 51.93     | \$ 1,186.47 | 6.68       |
| oct-13 | M-65            | Mitsubishi     | 6250434   | 1500    | 45.3      | \$ 1,070.00 | 5.90       |
| nov-13 | M-65            | sandvik        | 120410145 | 560     | 54.32     | \$ 1,186.47 | 6.45       |
| nov-13 | M-65            | Mitsubishi     | 120310746 | 540     | 52.3      | \$ 850.00   | 6.07       |
| dic-13 | M-65            | Mitsubishi     | 120310748 | 570     | 56.05     | \$ 850.00   | 5.68       |

Tabla dinámica de la base de datos de perforación

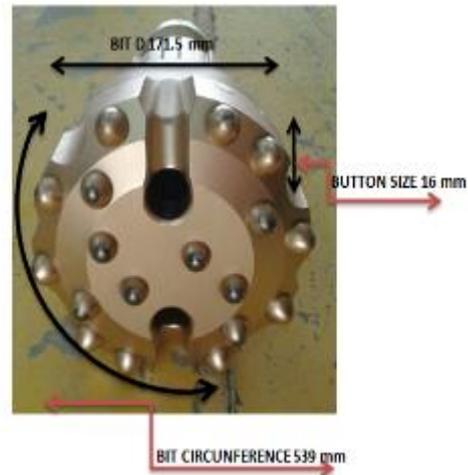
ANEXO 3: Vida útil de los aceros de perforación más 25% de revestimiento.

| BARRA DM-45     |                  |                  |  | MARTILLO SANDVIK |              |               |  |
|-----------------|------------------|------------------|--|------------------|--------------|---------------|--|
| DM-003          | 22,250.00        |                  |  | S-120066         | 7,510        |               |  |
| DM-180713       | 25,685.00        |                  |  | S-12E696         | 10,039       |               |  |
| DM-1886         | 20,781.50        |                  |  | S-12E590         | 6,037        |               |  |
| DM-230913       | 16,765.60        |                  |  | S-11M038         | 6,041        |               |  |
| DM-181113       | 20,673.30        |                  |  | S-12M076         | 6,908        |               |  |
| DM-291213       | 12,389.00        |                  |  | SKFS-120022      | 5,252        |               |  |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>19,757.40</b> | <b>24,696.75</b> |  | SKFS-12F452      | 6,332        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-RH550R       | 5,445        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-3368602      | 8,270        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-070813       | 4,589        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-170813       | 10,394       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-250813       | 12,846       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-150913       | 4,073        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-12D091       | 11,618       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-051013       | 10,349       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-12E992       | 8,143        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-231113       | 13,018       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-071213       | 11,101       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-12E009       | 8,269        |               |  |
|                 |                  |                  |  | DTH-281213       | 13,948       |               |  |
|                 |                  |                  |  | DM-3368602       | 11,533       |               |  |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>20,782.34</b> | <b>25,977.92</b> |  | <b>PROMEDIO</b>  | <b>8,653</b> | <b>10,816</b> |  |

Aumento de la vida útil de los aceros de perforación en 25% con el revestimiento con citodur

ANEXO 4: Velocidad de rotación para brocas DTH según fabricante.

| Motor de rotación [rpm] - Torque |         | inicio | medio | alto |
|----------------------------------|---------|--------|-------|------|
|                                  |         | 1200   | 1800  | 2100 |
| Broca 6 3/4"                     | Sandvik |        |       |      |
| stroke/min                       | 2100    |        |       |      |
| bit size mm                      | 171.5   |        |       |      |
| N° insertos                      | 20      |        |       |      |
| button size mm                   | 16      |        |       |      |
| bit circumference                | 539     |        |       |      |
| strokes/revo                     | 34      |        |       |      |
| RPM                              | 62      |        |       |      |
| Recomendación del fabricante     | 37      |        |       |      |



ANEXO 5: Costo total de perforación US\$/m para una columna de 5"

| PERFORADORA   | DM-45(PE-005) | Und          |
|---|---------------|--------------|
| Costo de La Peforadora                                    | 363,760       | \$           |
| Broca 6 3/4" Insertos Mixtos                              | 1,200         | \$           |
| Broca Triconica 6 3/4"                                    | 1,900         | \$           |
| Precio del Martillo de DHD 6"                             | 7,000         | \$           |
| Precio de la Barra Box-Box API 5 1/2"                     | 3,000         | \$           |
| Top Sub PIN-PIN 4 1/2" API                                | 1,000         | \$           |
| Bit Sub PIN-BOX   | 1,000         | \$           |
| Centralizador   | 1,000         | \$           |
| Absorvedor de Impacto                                     | 2,500         | \$           |
| Metros Perforados/ Broca                                  | 1,500         | m            |
| <b>Metros Perforados/ Hora</b>                            | <b>36.34</b>  | <b>m/hr</b>  |
| Presion Sobre el Fondo                                    | 45,000        | Lb           |
| RPM   | 50            | RPM          |
| Lubricacion   | 2.1           | L/hr         |
| Guardias/Dia  | 2             | gd/d         |
| Horas/Guardia   | 11            | hr           |
| Dias/Semana   | 7             | d/sem        |
| Semanas/Año   | 52            | sem          |
| Disponibilidad FISICA                                     | 0.85          | %            |
| Disponibilidad MEC  | 0.79          | %            |
| Horas Perforadas/Año                                      | 5366          | Hr/año       |
| Hora Perforadas /Mes                                      | 447           | Hr/mes       |
| Vida del equipo   | 9             | años         |
| % Interes   | 0.12          | %            |
| <b>COSTO DE ADQUISICION (DEPRECIACION)</b>                | <b>32.06</b>  | <b>\$/hr</b> |
| Int.Seg l Imp   | 11.98         | \$/hr        |
| Depreciacion  | 20.08         | \$/hr        |
| <b>COSTO DE OPERACIÓN</b>                                 | <b>214.85</b> | <b>\$/hr</b> |
| <b>1200/1920 - Get's / Consumibles - Aceros Perf (\$)</b> | <b>1.83</b>   | <b>\$/m</b>  |
| MANO DE OBRA OPERATIVA (\$)                               | 18.87         | \$/hr        |
| MANO DE OBRA MECANICA (\$)                                | 2.50          | \$/hr        |
| 1100 - Tren de Rodamiento / Llantas (\$)                  | 0.02          | \$/hr        |
| 1200/1920 - Get's / Consumibles - Aceros Perf (\$)        | 67.58         | \$/hr        |
| 1916 - Combustible (\$)                                   | 47.31         | \$/hr        |
| 1500-1600-1903-1914 Manto Preventivo / Aceites            | 8.27          | \$/hr        |
| Reparaciones Generales (\$)                               | 17.53         | \$/hr        |
| <b>COSTO DE OPERACIÓN &amp; ADQUISICION</b>               | <b>246.91</b> | <b>\$/hr</b> |
| <b>COSTO TOTAL DE PERFORACION</b>                         | <b>6.68</b>   | <b>\$/m</b>  |

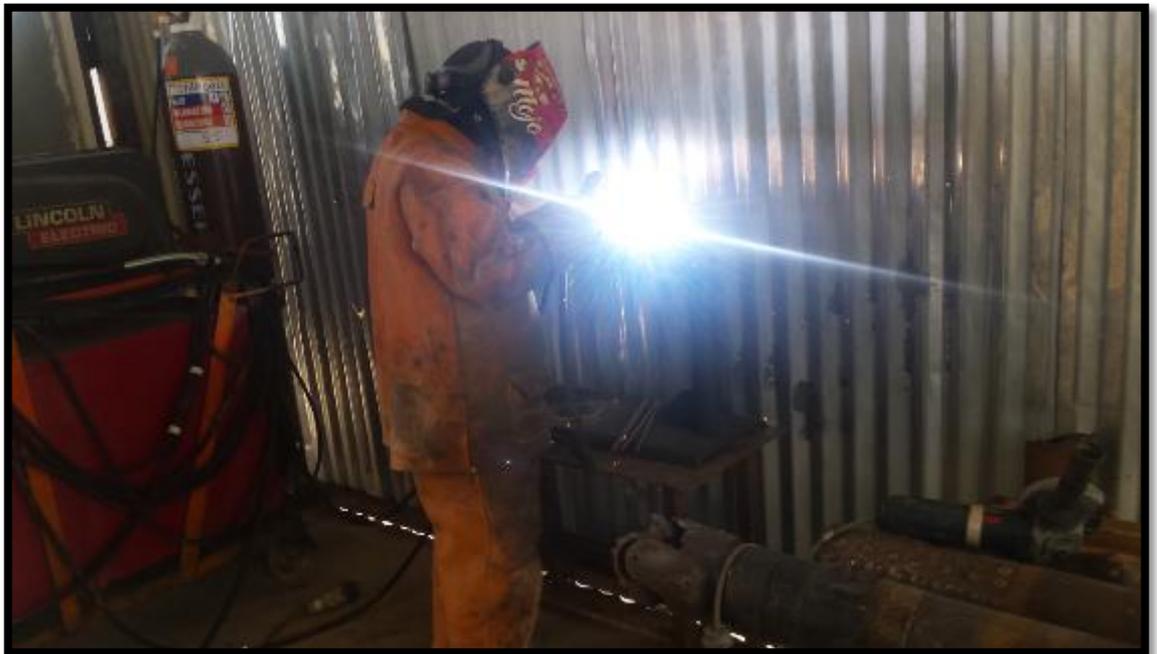
ANEXO 7: Hard Face y rectificación de hilos en la barra de perforación



ANEXO 6: Barra de perforación revestida con Exatub y Citodur



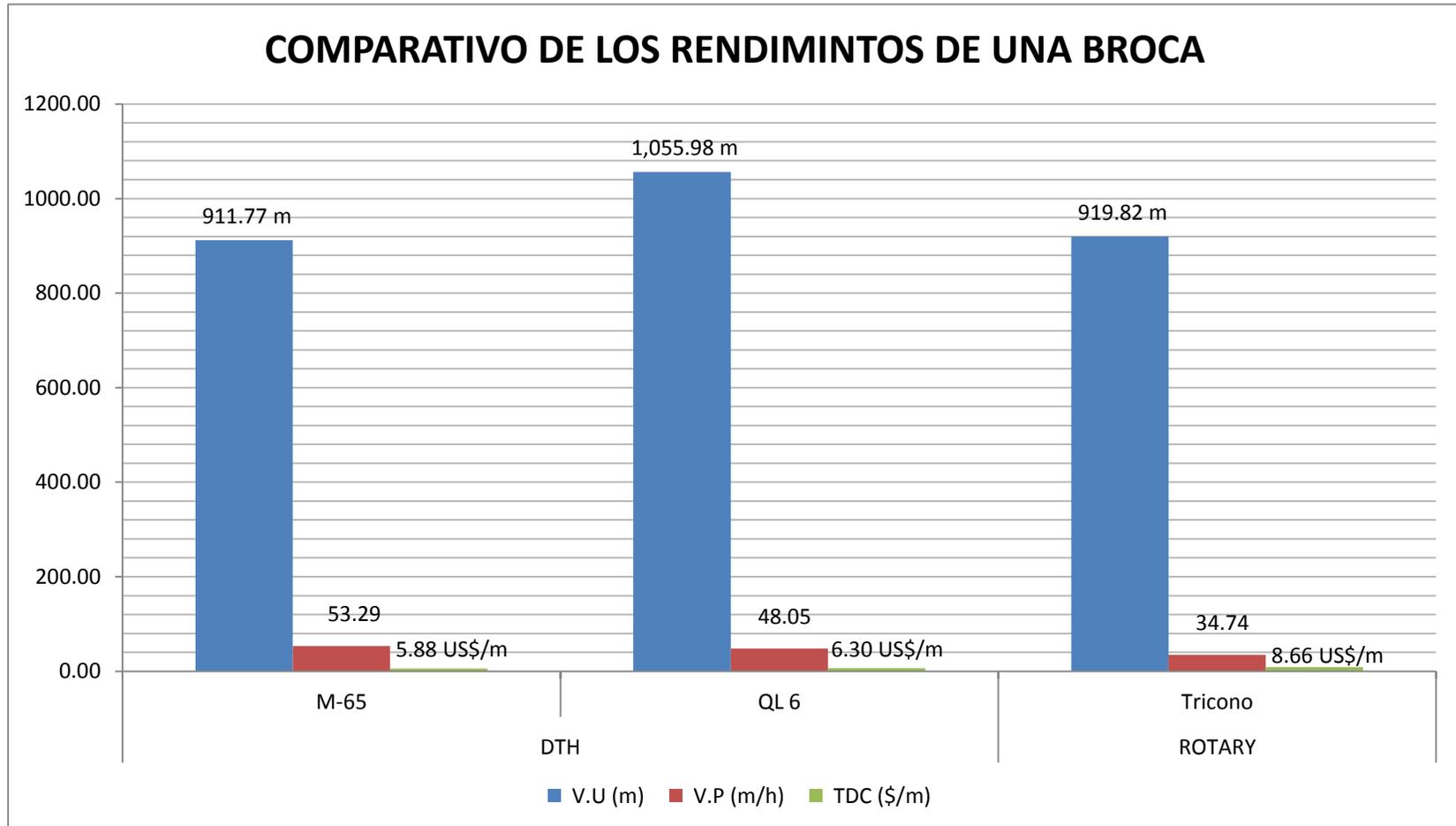
ANEXO 8: revestimiento de culatas y driver sub



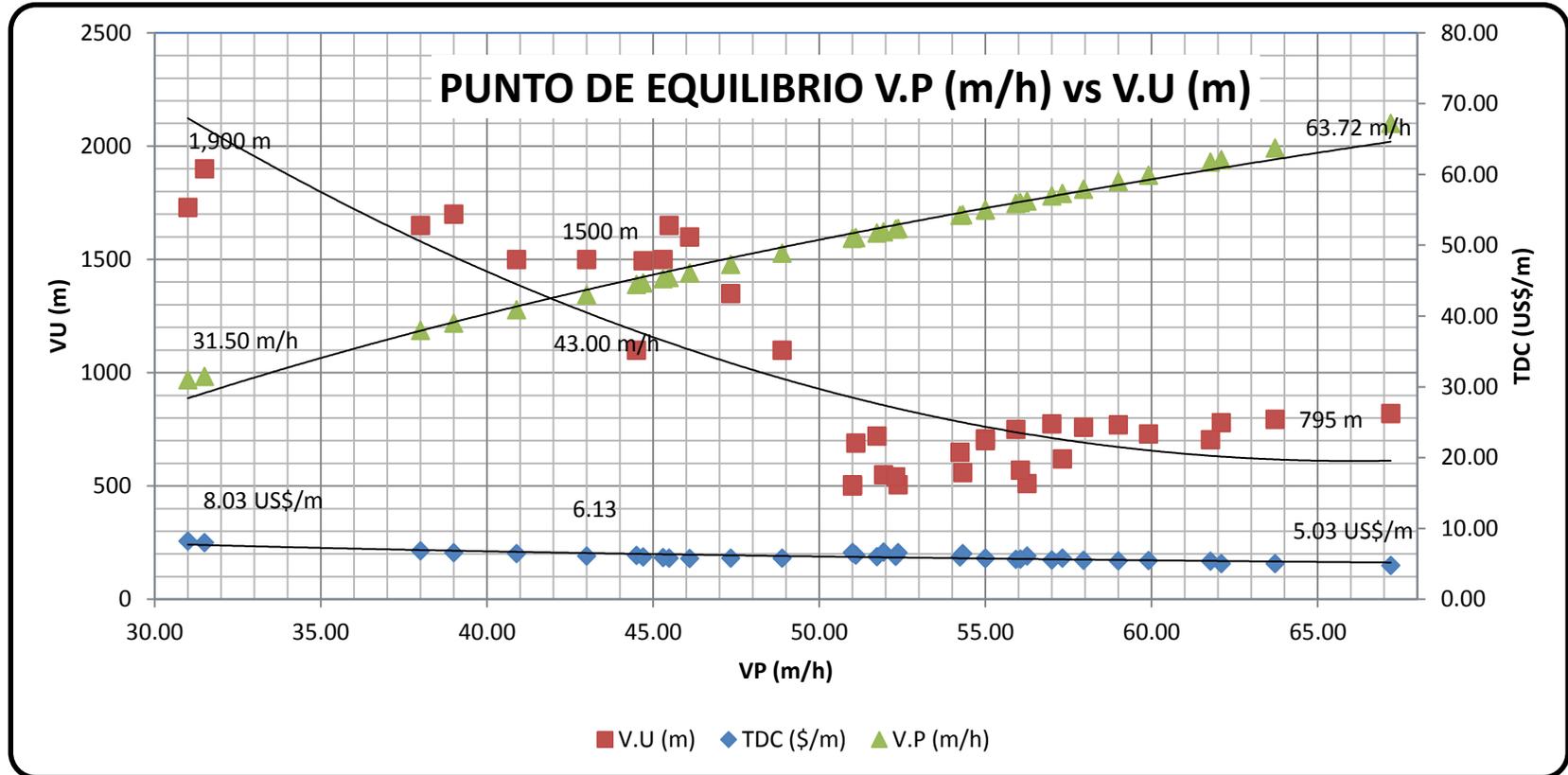
ANEXO 9: Aceros de perforación revestidos



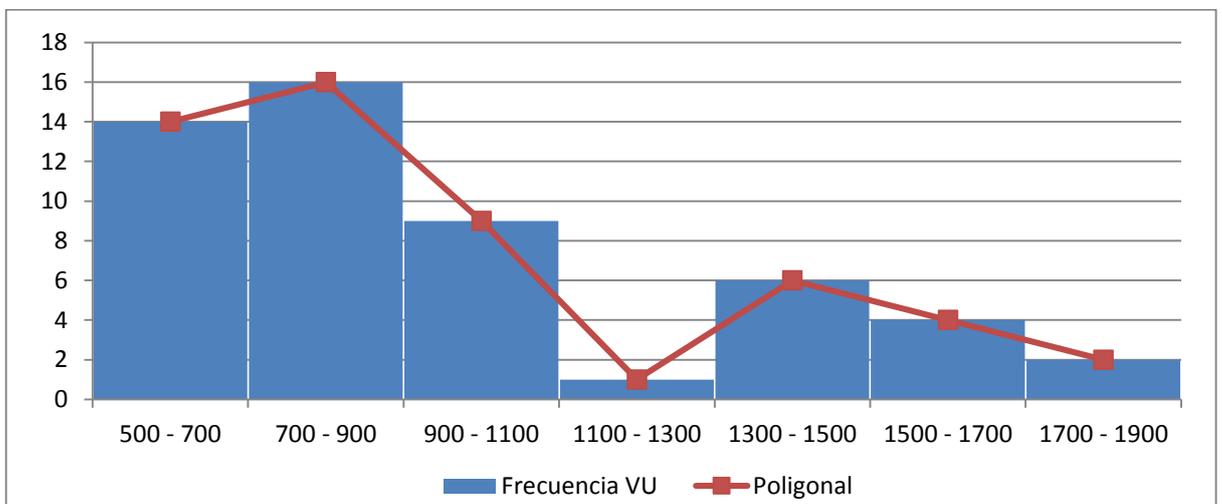
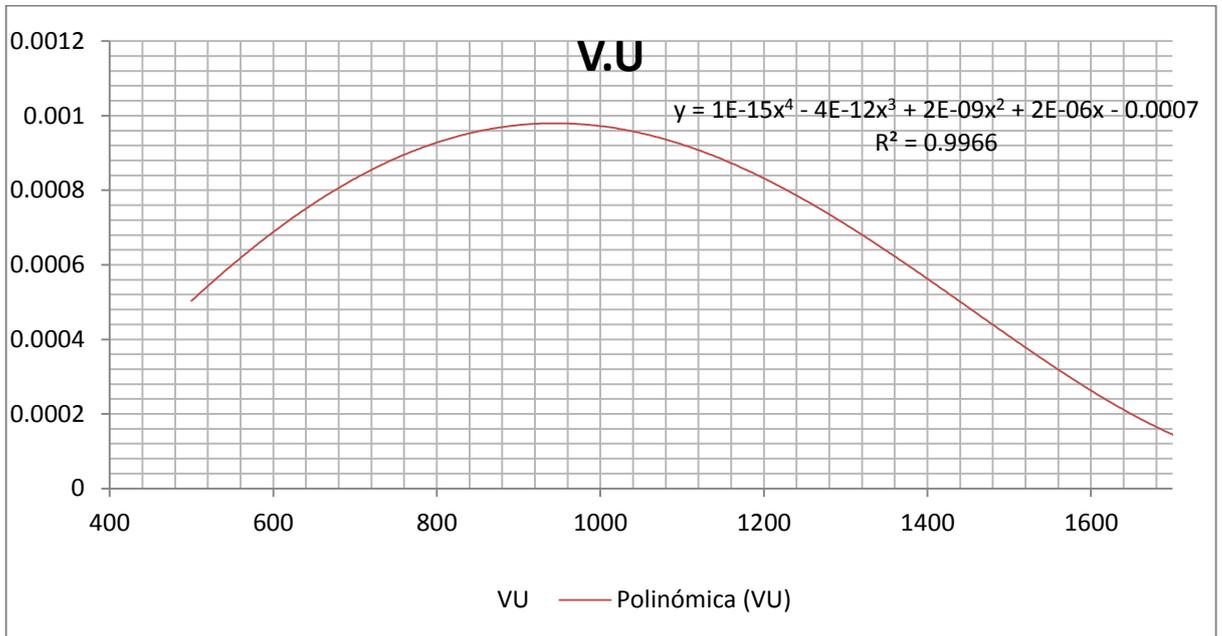
ANEXO 10: Rendimiento promedio de las Brocas de perforación



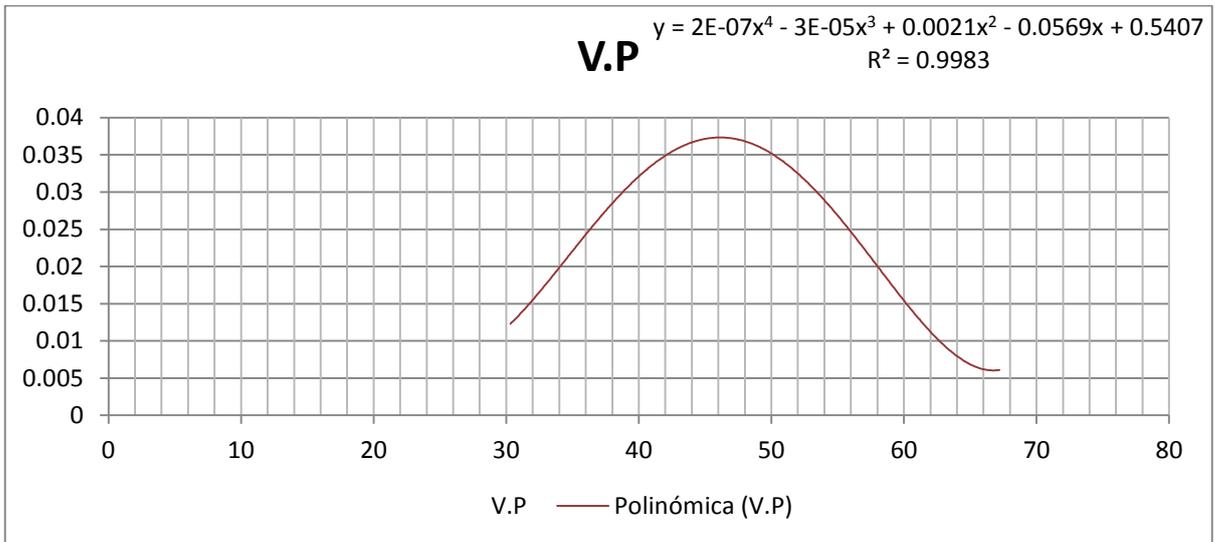
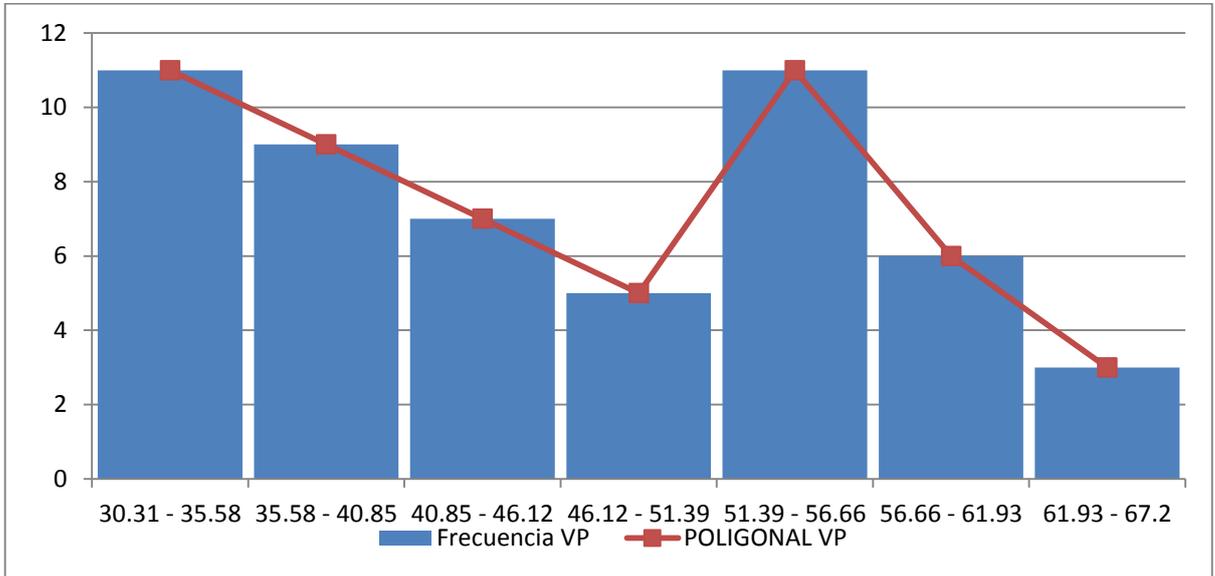
ANEXO 11: Rendimiento ideal con una adecuada selección de la columna de perforación.



ANEXO 12: Distribución de frecuencia y distribución normal de la VU (m)



ANEXO 13: Distribución de frecuencia y distribución normal de la VP (m/h)



ANEXO 14: Distribución de frecuencia y distribución normal del TDC (US\$/m)

