

**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE DIAMOND BROACHED CORE LIFTER EN  
EL PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA**

**ROBERTO VILLA BEDOYA  
ANDRÉS AGUDELO GARCÍA  
LUIS FERNANDO SÁNCHEZ GIRALDO**

**Trabajo de Grado**

**Asesor: Christian González**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICO PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2014**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>0. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>16</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 OBJETIVO GENERAL</b>	19
<b>3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	19
<b>4. ESTADO DEL ARTE PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 INTRODUCCIÓN</b>	20
<b>4.2 LA PROSPECCIÓN Y LA EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA</b>	22
<b>4.3 TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES</b>	27
4.3.1 Recopilación de información.	28
4.3.2 Teledetección y gis.	28
4.3.3 Geología.	30
4.3.4 Geofísica y geoquímica.	31
4.3.5 Calicatas.	34
4.3.6 Sondeos de exploración.	35
4.3.7 Interpretación de resultados.	36
<b>4.4 TÉCNICAS DE PERFORACIÓN APLICADAS A LA EXPLORACIÓN MINERA</b>	38
4.4.1 Introducción.	38
4.4.2 Perforación a rotación con recuperación de testigo.	40
<b>5. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 HISTORIA DE LAS PERFORACIONES DE EXPLORACIÓN MINERA DIAMANTADA CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO</b>	50
<b>5.2 GEOLOGÍA</b>	54
5.1.1 Clasificación del tipo de roca.	54
5.1.2 Propiedades físicas.	55
<b>5.2 PAUTAS DE PERFORACIÓN</b>	59
5.2.1 Velocidades de rotación (índice rpi o r/cm).	59

5.2.2	Peso sobre la corona.	61
5.2.3	Flujo de fluido.	61
5.3	TRIBOLOGÍA	63
5.3.1	Mecánica de contacto.	65
5.3.2	Fricción.	65
5.3.3	Desgaste.	66
<b>6.</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>68</b>
6.1	FORMA DE INVESTIGACIÓN	68
6.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	68
6.3	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	68
6.4	FUENTES, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	68
6.4.1	Fuente.	68
6.4.2	Técnicas.	68
6.5	PROCEDIMIENTO	69
6.5.1	Paso 1.	69
6.5.2	Paso 2.	70
6.5.3	Paso 3.	72
6.5.4	Paso 4.	73
6.5.5	Paso 5.	74
6.5.6	Paso 6.	75
6.5.7	Paso 7.	75
6.5.8	Paso 8.	75
6.6	VARIABLES DE RESPUESTA	75
6.6.1	Diámetro del Core Lifter.	75
6.6.2	Metros de núcleo extraídos	76
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>77</b>
7.1	DESGASTE DIÁMETRO DEL CORE LIFTER	77
7.1.1	Tendencia de desgaste.	77
7.1.2	Porcentaje tendencia de desgaste de Diamond Core Lifter respecto al regular o control. Con el fin de comparar la tendencia de desgaste entre el Diamond Core Lifter y el regular o control se plantean las variables definidas en el gráfico 6.	79
7.2	METROS DE NÚCLEO EXTRAÍDOS	81

7.2.1 Media.	81
7.2.2 Porcentaje de muestra extraída con el Diamond Core Lifter respecto al regular o control.	82
7.2.3 Desviación estándar.	83
7.2.4 Costo por metro perforado.	84
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>9. RECURSOS.....</b>	<b>87</b>
9.1 RECURSOS MATERIALES	87
9.2 RECURSOS INSTITUCIONALES	87
9.3 RECURSOS FINANCIEROS	87
<b>10. CRONOGRAMA .....</b>	<b>88</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>
<b>12. CIBERGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ensamble core lifter.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>14</b>
Figura 2. Prospección aérea.....	<b>21</b>
Figura 3. Afloramiento en superficie .....	<b>22</b>
Figura 4 Mina escondida (chile).....	<b>30</b>
Figura 5. Anomalías magnéticas en Exploración.....	<b>33</b>
Figura 6. Calicata de exploración.....	<b>34</b>
Figura 7. Anomalía geofísica (color violeta) señala el yacimiento mineral de las cruces en profundidad.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>6</b>
Figura 8. Modelo de bloques y diseño de cantera.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>7</b>
Figura 9. Esquema de perforación con corona de diamante.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>1</b>
Figura 10. Operación de extracción de testigo.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>3</b>
Figura 11. Coronas de diamante para recuperación de testigo.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>4</b>
Figura 12. Testigo de roca.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>5</b>
Figura 13. Core lifter brochado recto.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>7</b>
Figura 14. Core lifter brochado helicoidal.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>7</b>

Figura 15. Core lifter con rebaje central.....	<b>48</b>
Figura 16. Diamond core lifter o titanium core lifter.....	<b>49</b>
Figura 17. Movimiento rotativo en la prehistoria.....	<b>50</b>
Figura 18. Tallado de piedras por percusión en la prehistoria .....	<b>52</b>
Figura 19. Primera perforadora accionada por aire comprimido .....	<b>53</b>
Figura 20. Juego de Rayadores.....	<b>57</b>
Figura 21. Diamond Core Lifter y Core Lifter Regular.....	<b>69</b>
Figura 22. Tubo interno.....	<b>71</b>
Figura 23. Core lifter instalado.....	<b>72</b>
Figura 24. Unidad de rotación taladro de perforación.....	<b>73</b>
Figura 25. Extracción de muestra o núcleo.....	<b>74</b>
Figura 26. Muestra o núcleo extraído.....	<b>74</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fases de desarrollo de una mina.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>4</b>
Tabla 2. Sistema de teledetección aplicables a la exploración minera.....	<b>29</b>
Tabla 3. Dureza de algunas rocas.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>6</b>
Tabla 4. Pautas de perforación.....	<b>62</b>
Tabla 5. Toma de muestras diámetro interior core lifters.....	<b>70</b>
Tabla 6. Ejemplo registro de extracción de núcleo en cuaderno de taladro.....	<b>75</b>
Tabla 7. Desgaste por metro perforado.....	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	<b>6</b>
Tabla 8. Tabla de registro de prueba de campo.....	<b>76</b>
Tabla 9. Diámetros core lifters desgastados.....	<b>77</b>
Tabla 10. Comparativo extracción de metros diamond core lifter respecto al regular o control.....	<b>81</b>
Tabla 11. Costo por metro perforado.....	<b>84</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva del proceso de exploración.....	<b>26</b>
--	-----------

Gráfico 2. El proceso de exploración minera mediante sondeos.....	<b>27</b>
Gráfico 3. Métodos de perforación de sondeos de exploración minera.....	<b>39</b>
Grafico 4. Tendencia de desgaste core lifter regular.....	<b>78</b>
Grafico 5. Tendencia de desgaste core lifter diamond.....	<b>79</b>
Gráfico 6. Comparativo tendencia de desgaste core lifters.....	<b>80</b>
Gráfico 7. Comparativo metros perforados core lifters.....	<b>82</b>
Gráfico 8. Desviación estándar core lifter regular o control.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.3</b>
Gráfico 9. Desviación estándar diamond core lifter.....	<b>84</b>
Gráfico 10. Costo por metro perforado.....	<b>85</b>

### **LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 1. Tendencia de desgaste core Lifter regular o de control por metro perforado.....	<b>78</b>
Ecuación 2. Tendencia de desgaste de diamond core lifter por metro perforado.	<b>79</b>
Ecuación 3. Porcentaje tendencia de desgaste de diamond core lifter respecto al regular o control.....	<b>80</b>
Ecuación 4. Porcentaje de muestra extraída con diamond core lifter respecto al regular o control.....	<b>82</b>

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado medición de Dureza.....	91
Anexo 2. Cotización Core Lifters.....	92

## Agradecimientos

Agradecemos al Ingeniero Felipe Franco de la empresa Fordia por gestionar el patrocinio de las herramientas, al Ingeniero Jorge Riveros de la empresa Explomin por mantener la puerta abierta a la innovación y el patrocinio de la manutención y transporte en campo. También agradecemos a los ayudantes, operadores y supervisores por hacer un excelente seguimiento a cada una de las pruebas realizadas.



## ABSTRACT

Mineral exploration core drilling is technically the right way to determine whether or not a mineral deposit is exploitable, since the sample precisely shows how it was positioned inside the rock.

This method, although ideal, is highly expensive due to the supplies needed for its performance such as sludge's, fuel and the spares for the drill and drill pipe. One of the spares needed is the Core Lifter, although it's also a piece that is in need of constant replacements making it one of the highest priced references on the invoice.

Core Lifters are designed for all of types of terrains however in order for them function on any terrain their geometry and thermal treatments must be modified, due to these changes the results vary considerably.

Among the many designs, we have the diamond coated lifter made for very abrasive terrains, it offers superior wear down resistance due to its thickness which is accomplished by a more elaborate thermal treatment and can last three times longer than a regular lifter.

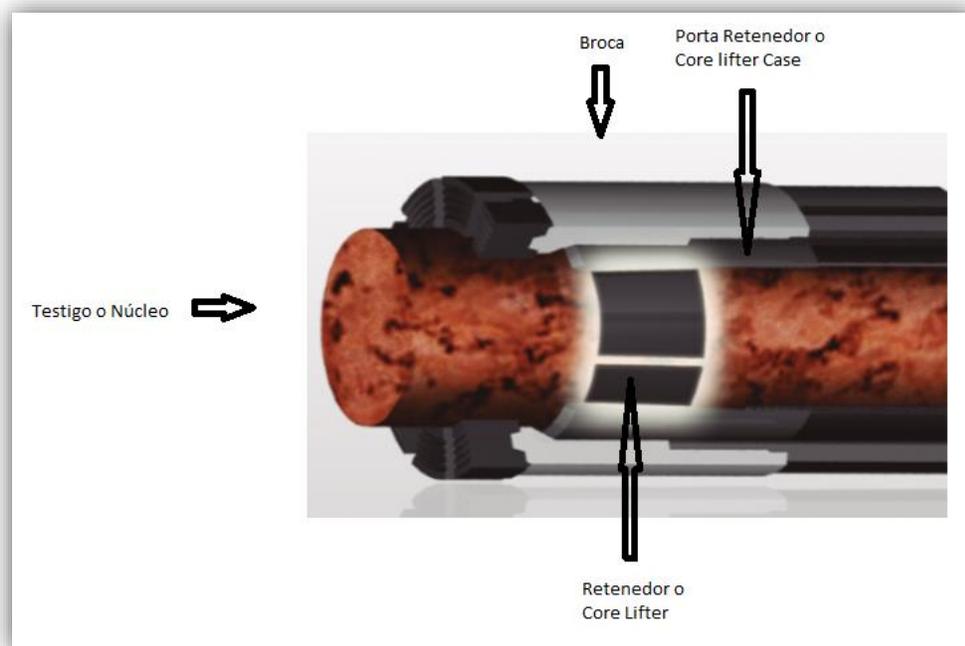
Currently there are no investigations or formal studies comparing the performance of a Diamond Core Lifter and a Regular Lifter with thermal treatment, under the same conditions of work. This project will either validate or object the following null hypothesis: Is it more economical to use a Diamond Core Lifter than a Regular Core lifter, considering that a diamond core lifter compensates its high cost with its performance, it retains a greater amount of drilled meters and has a greater superficial hardness than a regular core lifter. We must contemplate the fact that a harder substance will not be worn down by a softer substance.

If this hypothesis is confirmed it will influence decisions regarding the selection of a Core Lifter, the operating costs will be reduced and the process will be improved since the core lifter will not be replaced as often, therefore freeing up time than can be used in other activities and also decrease the required inventory units.

## 0. INTRODUCCIÓN

La perforación de exploración minera con recuperación de núcleo es técnicamente la forma idónea para determinar si un yacimiento minero es explotable o no. Esto debido a que la muestra nos revela de forma muy precisa la forma en la cual estaba depositada en la roca. Este método a pesar de ser técnicamente idóneo es altamente costoso. Esto debido a los insumos necesarios para la operación, como son: los lodos, el combustible y los repuestos tanto del taladro como de la columna de perforación. Siendo este último grupo, el más costoso de todos. Uno de estos repuestos es el Core Lifter. No solo es costoso como valor unitario, sino que además, es una pieza que necesita de un constante recambio. Haciéndolo una de las referencias con más costo en la factura de repuestos.

Figura 1. Ensamble Core Lifter



Brochure Diamantina Christensen 2013

Los Core Lifter están diseñados para todas las variedades que se pueden presentar en un terreno a explorar. Esto se logra cambiando su geometría y los tratamientos térmicos. Y como es de suponerse, su valor varía considerablemente cuando se

dan estos cambios. Dentro de estos diseños está el Diamond. Diseñado para terrenos muy abrasivos. Este diseño logra aumentar la resistencia a la abrasividad con un aumentando en la dureza gracias a un tratamiento térmico más elaborado.

En la actualidad no existen investigaciones o estudios formales que comparen el rendimiento de un Diamond Core Lifter respecto a otro con un tratamiento térmico regular en las mismas condiciones de trabajo. Por tal motivo en este proyecto se llevará a cabo una investigación que validará o refutará la siguiente hipótesis nula: es más económico usar Diamond Core Lifter que usar core Lifter regulares. Esto debido a que los primeros compensan su costo con rendimiento al ser capaz de retener una mayor cantidad de metros perforados. Esto debido a que el Diamond Core Lifter tiene una dureza superficial mayor comparada a la dureza del Core Lifter regular. Es sabido que una sustancia más dura no se dejara desgastar por otra con menos dureza.

De ser confirmada esta hipótesis influenciará la toma de decisiones respecto a la selección del Core Lifter, se reducirán los costos de la operación y se verá una optimización en el proceso al cambiar el Core Lifter con menos frecuencia, liberando tiempo al operador que puede aprovechar en otra actividad. Además de una disminución en las unidades requeridas en inventario.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El mundo empresarial está atravesando una etapa de alta competitividad y exigencia, en la cual solo sobrevive quien sea capaz de adaptar sus procesos haciéndolos más óptimos, eficientes y económicos. Para ello es necesario plantearse interrogantes como: ¿lo que compro es óptimo? ¿El precio es directamente proporcional a la calidad? ¿Cómo reducir costos sin deteriorar la calidad del producto o servicio? Gracias a estas conjeturas y sus respuestas las empresas de hoy están preparadas para tomar mejores decisiones en pro de la optimización de sus recursos, la calidad de sus productos y la satisfacción de sus clientes, lo cual finalmente garantiza su supervivencia.

En la industria minera existen varios procesos que van desde la prospección aérea de la zona hasta la explotación del mineral. En uno de estos procesos llamado perforación de exploración, es necesario tomar una decisión que afecta la competitividad de la empresa y esta es ¿Qué tipo de herramienta utilizar para la ejecución de la perforación? Actualmente el personal encargado de esta selección se enfoca en lo descrito en los manuales de campo o lo que dice su experiencia. Es decir que selecciona las herramientas para terrenos blandos, fracturados y abrasivos; mixtos; o duros, compactos y poco abrasivos. Estas reglas deben aplicarse estrictamente cuando se seleccionan las brocas. ¿Pero se debe ser tan estricto cuando selecciono las demás piezas que componen la columna de perforación? ¿Será que al usar piezas más duras para terrenos abrasivos en terrenos no tanto, rendirán mucho más? ¿Será que a futuro es más económico comprar piezas más duras aunque estas cuesten mucho más?

El personal de las empresas de perforación no tiene la claridad a la hora de invertir el dinero en las herramientas porque, en gran medida no se toman el trabajo de evaluar los resultados y mucho menos a salirse de lo que el comercio les dice.

Cuando el gerente del área de perforaciones hace una discriminación de sus gastos nota que gran parte de su dinero se gasta en repuestos como el Core Lifter. Estos repuestos de recambio permanente y por consecuencia, son unos de los costos más

grandes en las perforaciones con recuperación de núcleo. Haciendo de esta forma de perforación de exploración la más costosa.

El problema ocurre cuando el Core Lifter se desgasta tanto en su parte interior como exterior y deja de retener el núcleo o testigo. En ese momento el Core Lifter debe ser cambiado, porque de lo contrario se corre el gran riesgo de perder el núcleo en el pozo. Teniendo entonces que reperfilar reduciendo la vida útil de las brocas y por lo tanto la utilidad del proyecto.

El desgaste de los Core Lifter ocurre porque la roca extraída en forma de núcleo o testigo descasta abrasivamente el Core Lifter. Esta abrasividad de la roca se debe a su dureza y tamaño de grano. Las rocas con un tamaño de grano más grande suelen ser las más abrasivas. Estos granos de gran tamaño tienen la capacidad de penetrar el material del Core Lifter e ir arrancando parte de su material. Lo que lo irá desgastando.

El desgaste de Core Lifter es un proceso natural que se presenta desde que se inventó el proceso de perforación con recuperación de núcleo. Porque siempre ha tenido que existir un componente que cumpla con la función de retener el núcleo para que este no se pierda en pozo.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Debido a que en el sector minero no se ha determinado la eficiencia de un Core Lifter diamantado ni la de uno regular en terrenos abrasivos se hace necesario determinar de manera práctica y cuantitativa el rendimiento de ambos en metros perforados del Core Lifter, lo cual, podría ser resultar en una forma de optimizar el proceso de perforación. No solo por el ahorro en dinero sino también en tiempo. Ya que al no tener que cambiar la pieza con tanta frecuencia se reducen los tiempos muertos del proceso.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar el desempeño de Diamond Core Lifter respecto a Core Lifter regular o control en Andesita

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Hallar límite de servicio
- Establecer costo por metro perforado
- Determinar dureza
- Hallar el porcentaje de muestra extraída
- Establecer la tendencia de desgaste
- Hallar la desviación estándar

## 4. ESTADO DEL ARTE PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos de explotación minera se pueden definir de manera conceptual como aquellos en los que se describe de manera detallada cada una de las fases necesarias para la extracción de los recursos minerales.

Para desarrollar dicho proyecto, son necesarias muchas tareas previas para llegar a poder definir las características del yacimiento a explotar, incluyendo como parámetro fundamental la calidad del mineral y su ubicación espacial. En este aspecto es importante entender “calidad” de un mineral como la cantidad de elementos aprovechables económicamente dentro de la matriz rocosa, además de sus características geotécnicas, que nos influirán en gran medida en la selección del método de explotación.

De este modo, es clave conocer tanto la forma del yacimiento como la concentración de mineral en el macizo rocoso, debiendo definir la ley de mineral en cada uno de los puntos del yacimiento, con la mayor precisión posible.

La forma de conocer las propiedades mineralógicas y el contenido de mineral en un macizo rocoso puede obtenerse de dos formas diferentes:

- Indirecta: por medio del estudio de parámetros inferidos, a partir de las propiedades de los minerales, de la roca encajante y del macizo rocoso.
- Directa: a través del estudio de las propiedades de muestras de minerales y rocas, bien a través del estudio de afloramientos, bien por el estudio de muestras tomadas en profundidad.

En estudio de parámetros de forma indirecta se valdrá de técnicas de prospección geofísica, geoquímica, etc. para conocer el comportamiento del terreno frente a estímulos de tipo sísmico, eléctrico y electromagnético, entre otros.

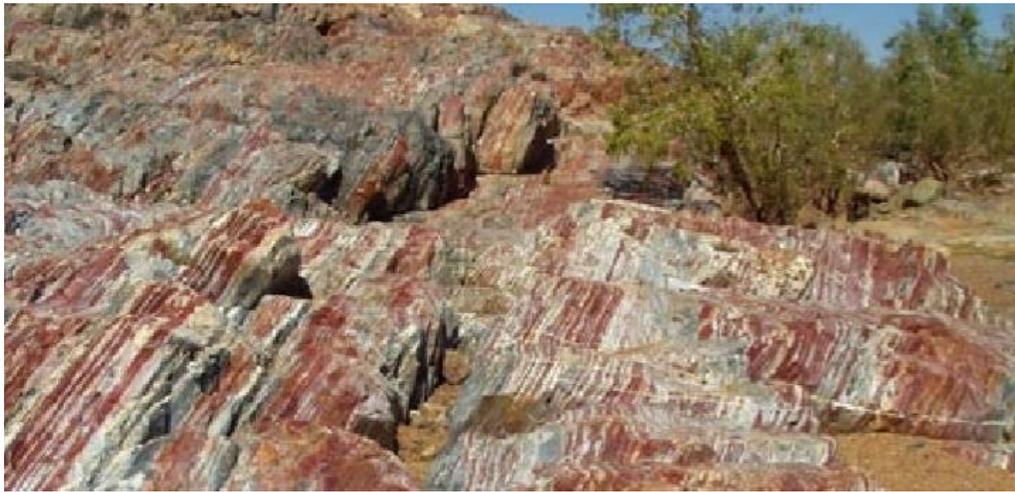
Figura 2. Prospección Aérea



Fuente: El proceso de exploración minera mediante sondeos

Será la determinación del contenido mineral de un macizo rocoso de manera directa la que necesitará de un gran conocimiento de técnicas de perforación de sondeos en el campo de la Exploración Minera, junto con un estudio geológico pormenorizado de los posibles afloramientos de los yacimientos a estudiar.

Figura 3. Afloramiento en superficie



Hiroshi Ohmoto – Sciencema

#### 4.2 LA PROSPECCIÓN Y LA EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA

Se distinguen cuatro etapas de trabajo en una mina, denominadas también fases en la vida de una mina:

- Prospección
- Exploración
- Desarrollo
- Explotación

La Prospección es la etapa en la que se buscan minerales aprovechables en una zona determinada. Las técnicas que se usan son las basadas en estudios geológicos, o bien mediante técnicas basadas en geofísica, geoquímica, etc. En esta fase se determinan anomalías del terreno que justifiquen estudios posteriores de mayor precisión.

La Exploración será aquella etapa en la que se realice un dimensionamiento del depósito mineral de modo que se definan tanto la forma y contenido de mineral

como el valor de dicho depósito, entendiendo como “valor” a la cantidad de mineral que se puede extraer de manera rentable. El consecuente valor monetario siempre estará definido por el precio de cotización del mineral en el momento de su puesta en el Mercado.

Para llegar al conocimiento de las características del depósito mineral habrá que emplear herramientas y métodos de cubicación de yacimientos y cálculo de leyes a partir de una serie discreta de muestras, por medio de análisis geo-estadísticos.

La etapa de Desarrollo será aquella en la que se definen cada uno de los elementos que serán necesarios para la extracción de mineral y su disposición en el lugar más adecuado, como por ejemplo, infraestructuras necesarias, planta de tratamiento, etc. de modo que no interfieran en fases posteriores.

La culminación del proceso de vida de una Mina será la etapa de Explotación, en la cual se establecen la sucesión de trabajos necesarios para alcanzar el depósito mineral, la secuencia necesaria y los métodos de extracción del mismo.

La exploración y la prospección son fases estrechamente ligadas y suelen combinarse entre sí. En estas fases tendrían un mayor peso las técnicas geológicas. El desarrollo y la explotación son las fases, en las que son necesarios unos conocimientos más relacionados con la Ingeniería Minera.

Tabla 1. Fases de desarrollo de una mina

Fase	Procedimiento	Intervalo de Tiempo
1) Prospección	Búsqueda de menas Métodos de prospección: Directo - física, geología. Indirecto - geofísica, geoquímica. Localización de lugares favorables: Mapas, publicaciones, minas antiguas y presentes. Aire: Fotos aéreas, imágenes de satélite, métodos geofísicos. Superficie: Métodos geofísicos y geológicos. Anomalía - Análisis - Evaluación.	1-3 Años
2) Exploración	Dimensión y valor del depósito mineral Muestreo: Excavación, roza, sondeo. Cubicación- cálculo de leyes. Evaluación.	2-5 Años
3) Desarrollo	Depósito mineral abierto para la producción 1. Estudio del impacto de minería al medio ambiente 2. Infraestructura 3. Planta 4. Explotación	2-5 Años
4) Explotación	Producción de las menas Factores que influyen en la selección del método de extracción son geología, geografía, economía, medio ambiente, aspecto social, seguridad.	10-30 Años

Fuente: Hartman (1987)

En el campo de la determinación de las propiedades y características de los yacimientos minerales, hay conceptos que, en ocasiones, se usan indistintamente:

- Investigación Minera
- Prospección Minera
- Exploración Minera

Algunos autores diferencian exploración de prospección en lo que concierne su objetivo, y, a partir de éste, el principio de trabajo aplicado es diferente.

El objetivo de la prospección es el reconocimiento general de un yacimiento mineral mientras que la exploración está enfocada en un reconocimiento detallado del depósito mineral. El primer objetivo de la prospección es la localización de una anomalía geológica con propiedades potenciales de definirse como un potencial depósito mineral, un objetivo común de la prospección y de la exploración es la reducción del área de investigación.

Para que un proceso de prospección tenga éxito se tiene que dar alguna de las tres condiciones siguientes:

- Que se busque algún indicio donde nadie haya buscado antes
- Que se investiguen indicios que anteriormente hayan pasado desapercibidos.
- En el caso de zonas mineralizadas conocidas, que se analicen nuevas zonas rodeando a éstas.

Para llegar a establecer un buen proyecto minero de explotación es necesario la correcta definición del depósito mineral por medio de un exhaustivo proceso de prospección. Estos datos obtenidos serán los que servirán de base a la interpretación geológica del macizo rocoso, cuya exactitud estará cuestionada cuanto mayor sea la incertidumbre en los datos obtenidos.

Por este motivo, durante la fase de prospección muchos de los datos obtenidos serán desechados tras confirmar la ausencia de materiales valorizables en su zona de influencia.

Solo un pequeño número de las prospecciones realizadas serán apropiadas para la determinación de las características del yacimiento y solo unas pocas de éstas serán las que alcanzarán la fase del estudio de viabilidad para llegar a definir el proyecto minero de extracción.

En la “Curva del Proceso de Exploración” se muestran diferentes casos de exploración con diferente resultado. Los casos “A” y “C” son exitosos, con la diferencia de que la “calidad” de los estudios realizados en “C” es mayor que en “A”,



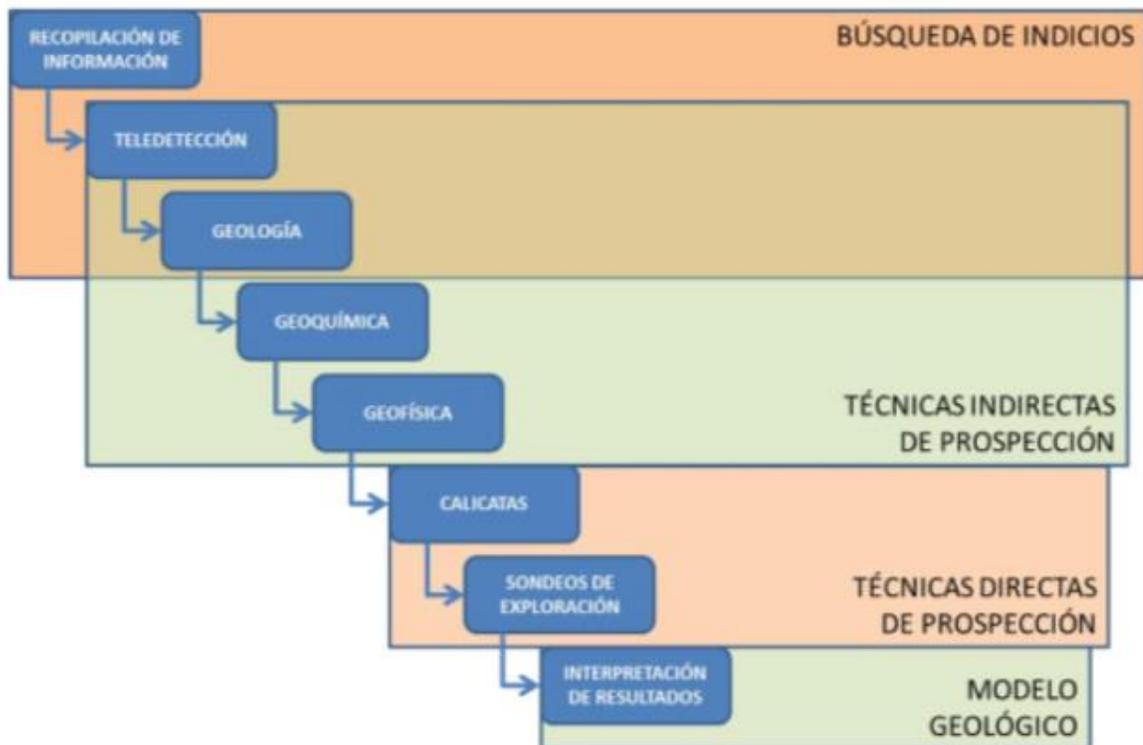
### 4.3 TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

El proceso de exploración minera recoge un gran grupo de técnicas multidisciplinarias que son complementarias entre sí. Como regla general habrá que seguir una secuencia de trabajo tal que la información obtenida en cada una de las fases sirva de referencia para las fases posteriores.

Con el fin de conocer la integración de los sondeos de exploración dentro del proceso general de prospección, se detallan cada una de las técnicas empleadas.

El correcto desarrollo de cada una de las fases determinará el éxito de las siguientes.

Gráfico 2. El proceso de exploración minera mediante sondeos



Jorge Castilla Gómez - Juan Herrera Herbert. Madrid, 2012

4.3.1 Recopilación de información. El primer paso para comenzar el proceso de exploración será el de obtener toda la información previa, existente tanto de las características geológicas de la zona objetivo, así como información de prospecciones realizadas en la zona con anterioridad.

En este aspecto también es de elevada importancia toda la información relativa a explotaciones mineras en dicha zona. Esta información puede extraerse de operaciones mineras que estén actualmente en funcionamiento, o bien de minas que hayan cesado en las labores de extracción mineral.

En aquellos casos en los que no haya información relativa a este respecto, se pueden conocer indicios de restos arqueológicos mineros, que pueden indicar explotaciones minerales en la Antigüedad, y, por lo tanto, una primera señal de presencia de mineral explotable.

4.3.2 Teledetección y gis. La teledetección es la técnica de adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes y datos asociados, que registran el comportamiento del terreno ante energía electromagnética incidente. Esta señal se obtiene por medio de equipos de medida remotos, con equipos inalámbricos. Estos equipos se emplean instalados en aviones y satélites.

En exploración minera se usan ambos sistemas, los basados en aviones y los que emplean satélites para la emisión y adquisición de la información. Algunos sistemas solo están disponibles mediante satélites (Landsat, SPOT) y otros están únicamente disponibles para su uso en aeronaves, como los sistemas hiperespectrales. En cambio, los sistemas Radar se pueden aplicarse tanto en satélites como en aeronaves. Los sistemas hiperespectrales se caracterizan por registrar imágenes en cientos de bandas espectrales muy estrechas.

Tabla 2. Sistema de Teledetección aplicables a la exploración minera

Característica	Landsat 4, 5 Thematic mapper™	Landsat 7 TM estimulado	SPOT Escaner multiespectral (XS)	SPOT Pancromático (Pan)	AVIRIS Escaner hiperespectral
<b>Región Espectral</b>					
Visible e IR reflejado	0,45 a 2,35 mm	0,45 a 2,35 mm	0,50 a 0,89 mm	-	0,40 a 2,50 mm
Pancromático	-	0,52 a 0,90 mm	-	0,51 a 0,73 mm	
IR Térmico	10,5 a 12,5 mm	-	-	-	
Bandas espectrales	7	8	3	1	224
<b>Cobertura de terreno</b>					
Este a Oeste	185 km	185 km	60 km	60 km	10,5 km cross-track
Norte a Sur	170 km	170 km	60 km	60 km	
<b>Resolución terrestre</b>					
Visible y IR reflejado	30 x 30 m	30 x 30 m	20 x 20 m	-	20 m
Pancromático	-	15 x 15 m	-	10 x 10 m	
IR Térmico	120 x 120 m	60 x 60 m	-	-	

Fuente: Sabins 1999

Las imágenes adquiridas mediante satélite tienen las siguientes ventajas:

- Pueden obtenerse registros de toda la corteza terrestre.
- Las imágenes cubren gran cantidad de terreno.
- El precio de adquisición por kilómetro cuadrado es relativamente más bajo.

En cuanto a las desventajas de las imágenes obtenidas mediante satélite, pueden ser:

- Las tecnologías hiperespectrales más recientes solo están disponibles para su uso en aeronaves, no en satélite.
- Las campañas de teledetección mediante aeronaves pueden configurarse de tal manera que se adapte mejor a una cierta zona de estudio.

La información obtenida mediante teledetección se gestiona de manera digital y se integra con la información georeferenciada del terreno mediante programas específicos denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG, o bien GIS, por sus siglas en inglés, Geographic Information System)

Este software permite reunir todos los datos obtenidos y realizar cálculos precisos por ordenador. Los sistemas GIS se integran con otros programas especializados para procesado de datos geofísicos y todo tipo de imágenes. Permiten gestionar información referenciada geográficamente mediante capas y solapar datos vectoriales como fallas geológicas, e información geotérmica, por ejemplo.

Figura 4. Mina Escondida (Chile)



Fuente: NASA - Japanese Space Team

4.3.3 Geología. La geología es la ciencia básica para el estudio de la Tierra, para lograr así determinar posibles zonas de presencia de minerales explotables

económicamente. Uno de los aspectos más importantes que aporta la geología al proceso de exploración minera es conocimiento de la paragénesis de los diferentes minerales para saber dónde y cómo aparecen en la corteza terrestre.

A partir de datos obtenidos y junto con el estudio de afloramientos en superficie, la Geología reproduce un modelo del terreno, imprescindible para escoger tanto los lugares donde realizar las prospecciones posteriores, como para definir qué propiedades de los minerales son determinables con las demás técnicas de prospección.

Como herramienta de partida, la Geología se basa en mapas geológicos de la zona objetivo, de modo que determinaría con una mayor precisión los datos concretos de la zona objetivo.

4.3.4 Geofísica y geoquímica. En áreas donde los afloramientos son escasos, o bien la zona ha sido extensamente explotada, lo que se suele llamar áreas de exploración “maduras”, se puede hacer uso de las técnicas geofísicas y geoquímicas para incrementar las posibilidades de encontrar contenido mineral.

Las técnicas geofísicas y geoquímicas normalmente miden propiedades objetivas que tienen en mayor o menor medida todos los minerales y que dan lugar a gran cantidad de datos digitales referenciados geográficamente.

Los técnicos geofísicos y geoquímicos entienden dos tipos de prospección: aquella que busca definir la geología regional y aquella que busca directamente la presencia de depósitos minerales. En muchos casos, ambos tipos se solapan porque cada tipo puede dar lugar a otro.

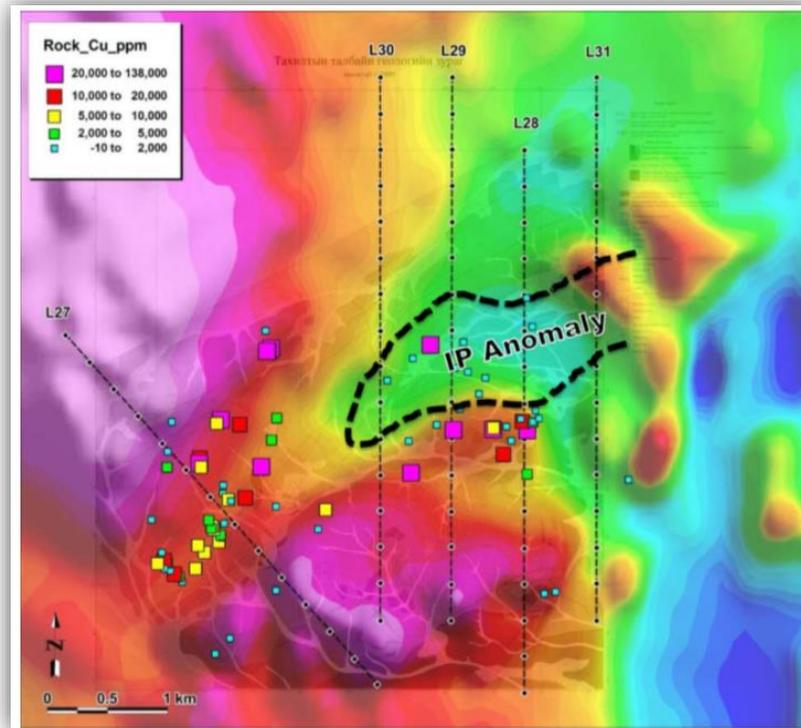
El objeto de las técnicas que buscan definir la geología regional es la creación de mapas con la distribución de una cierta propiedad de un suelo o roca. Puede ser, por ejemplo, patrones de reflejo electromagnético, susceptibilidad magnética o conductividad de la roca. Esas medidas no tienen necesariamente una relación directa con un depósito mineral buscado. Los datos son usados junto con mapas

geológicos y otros mapas creados al efecto por los geólogos a partir de observaciones directas de la superficie terrestre. Los modelos geológicos son usados para predecir dónde puede encontrarse los yacimientos y dirigir búsquedas posteriores.

El segundo tipo de prospección geofísica/geoquímica, que busca definir directamente un depósito mineral, busca medir valores inusuales o anómalos de rocas, que tienen relación directa con un depósito mineral. Este tipo de prospecciones suele hacerse a partir de datos de prospecciones previas, puesto que cubren un área relativamente pequeña y su coste es generalmente elevado.

El paso crítico es el definir qué valores se consideran “anómalos”, para poder considerar esos valores como parte de un depósito mineral. Estos valores seleccionados serán los que servirán como punto de partida para definir la forma, tamaño y valor del depósito mineral. Para mejorar la precisión de estos datos habrá que recurrir a un programa de exploración más detallada, que suele ser una campaña de perforación de sondeos.

Figura 5. Anomalías magnéticas en Exploración



Fuente: Proyecto Takhilt. Mongolia

Los principales tipos de exploración geoquímica son:

- Muestreo en rocas: Este tipo de muestreo incluye las rocas superficiales, materiales de filones y capas y trabajos subterráneos.
- Muestreo en redes de drenaje: Incluye muestreos de sedimentos de corrientes de agua, lagos y aguas subterráneas.
- Muestreo de suelos: En este tipo de investigaciones se incluyen el muestreo superficial y profundo de suelos, de suelos transportados y de suelos residuales.
- Muestreos biogeoquímicos: Incluyen el muestreo de hojas y tallos de la vegetación.
- Muestreos geobotánicos: Consiste en la interpretación de la relación entre la litología y los diferentes tipos de vegetación.

En cuanto a métodos geofísicos los métodos que se usan con más frecuencia en la valuación de yacimientos metálicos son:

- Método magnético
- Método gravimétrico
- Métodos electromagnéticos
- Método de polarización inducida
- Métodos eléctricos
- Métodos sísmicos

4.3.5 Calicatas. Cuando aún se tiene incertidumbre de los datos obtenidos, la apertura de calicatas puede ser una forma fácil y rápida de obtener más información litológica y estructural de una zona determinada de la corteza superficial.

Las calicatas son zanjas de que se abren sobre la superficie hasta alcanzar la roca para conocer la estructura y calidad del material de cobertera que se encuentra cubriendo el macizo rocoso.

Figura 6. Calicata de exploración



Fuente: Lucky Strike Resources Ltd.

Las calicatas cuentan con las siguientes limitaciones:

- La profundidad no suele exceder de 4m
- La presencia de agua limita su utilidad.
- El terreno debe poderse excavar con medios mecánicos.
- Para su ejecución es imprescindible cumplir las normas de seguridad frente a derrumbes de las paredes, así como cerciorarse de la ausencia de instalaciones, conclusiones, cables, etc.

4.3.6 Sondeos de exploración. La realización de una campaña de prospección puede implicar realizar todas y cada una de las fases anteriores, aunque, durante el proceso, por las características de la zona y resultados obtenidos puede prescindirse de alguna de ellas. Es esencial que una vez dado por finalizado las técnicas de prospección previas se debe haber definido una zona de anomalías que necesite ser estudiada con mayor precisión.

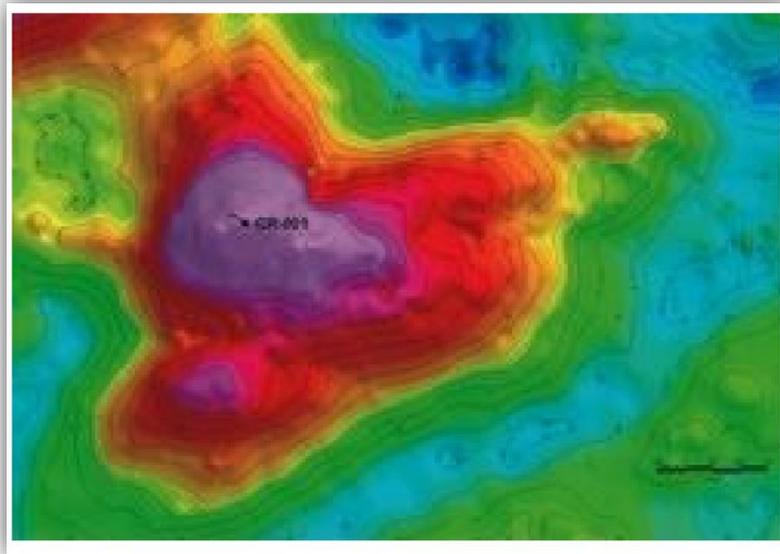
La manera de conocer más en detalle el terreno que presenta tales anomalías es tomar muestras en profundidad de la zona a estudiar, por medio de una, o varias, campañas de sondeos de exploración.

La perforación de sondeos es una de las más importantes y quizá una de las más caras técnicas de exploración. En casi todos los casos, los sondeos de perforación son los que localizan y definen el valor económico de una mineralización, y la perforación proporciona los test esenciales para la verificación de todas las ideas, teorías y predicciones que han sido generadas en prospecciones precedentes y en las demás fases del proceso de exploración.

En cualquier campaña de exploración, el porcentaje del presupuesto asignado a perforación de “sondeos objetivo” (conocidos también como sondeos exploratorios) proporciona una media de la eficiencia de la campaña, entendiendo por “sondeos objetivo” aquellos que se perforan en zonas donde existen pruebas fehacientes de la existencia de mineralización, para distinguirlos de aquellos que se perforan para definir la geología regional. En algunas compañías se ha comprobado a lo largo de los años que, al menos, el 40% del presupuesto de la exploración debe invertirse en la perforación de esos “sondeos objetivo”.

Además de la inversión realizada en sondeos de exploración, es imprescindible que la calidad de los datos obtenidos sea muy alta, porque sobre estos datos se basarán interpretaciones posteriores que implicarán inversiones mucho mayores, como son el diseño de la futura explotación.

Figura 7. Anomalía geofísica (color violeta) señala el yacimiento mineral de Las Cruces en profundidad. CR001: primer sondeo exploratorio.



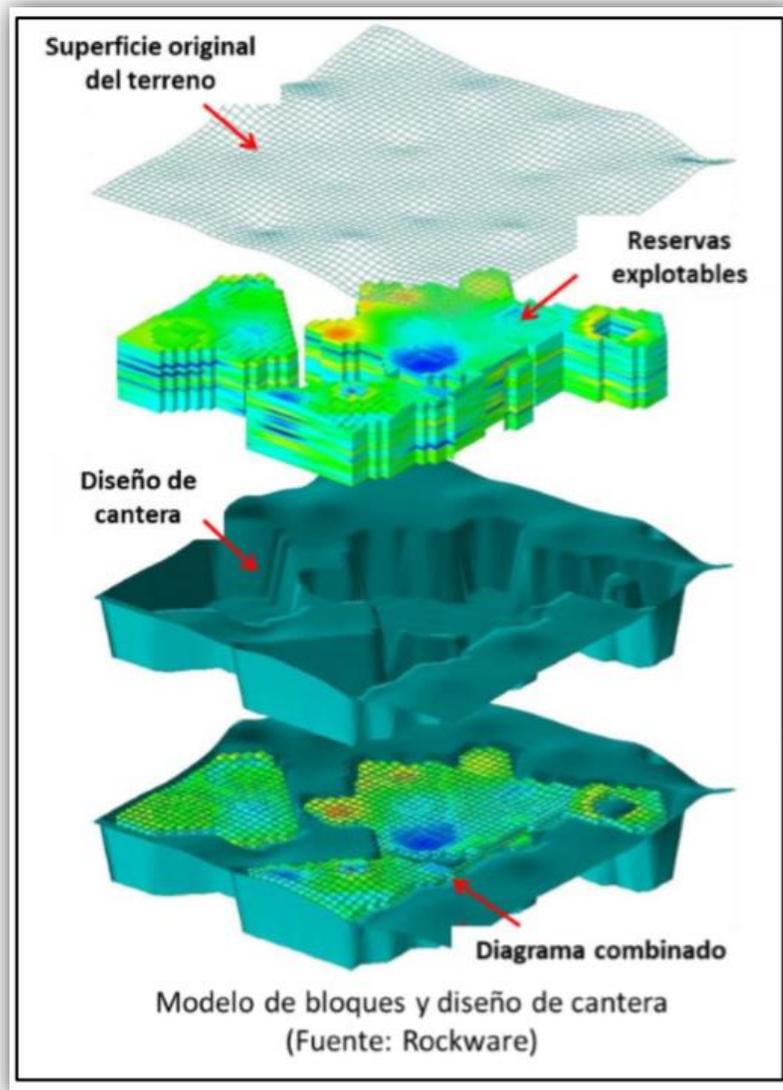
Fuente: CLC

4.3.7 Interpretación de resultados. La última fase del proceso de exploración será la recopilación de todos los datos adquiridos. Con estos datos será necesario el estudio de todos ellos para lograr una interpretación lo más cercana a la realidad posible, realizando un modelo geológico tridimensional que recoja los valores de concentración mineral y su distribución en el macizo rocoso.

El principal problema que surge a veces en el proceso de exploración es la dificultad de pasar de un conjunto de datos discreto, que, aunque puede ser muy numeroso, no son datos continuos que nos permitan definir el cuerpo mineral automáticamente, siendo necesaria una interpretación de los mismos.

Dentro de esta interpretación, uno de los datos clave a obtener es la determinación de las reservas minerales, para lo cual se pueden emplear técnicas clásicas de cubicación (secciones, triangulación o polígonos), o bien uso de modelos de bloques, en los que resultan necesarias técnicas geoestadísticas para su correcta interpretación.

Figura 8. Modelo de Bloques y diseño de cantera



Fuente: Rockware

## 4.4 TÉCNICAS DE PERFORACIÓN APLICADAS A LA EXPLORACIÓN MINERA

4.4.1 Introducción. Hay un gran número de técnicas de perforación, pero, sin pretender ser un tratado de métodos de perforación, se van a describir los métodos de perforación más empleados en exploración minera. Estos métodos son: perforación a rotación con recuperación de testigo (perforación con corona de diamante), perforación a rotación y perforación a rotopercusión.

La elección del método de perforación requiere siempre llegar a un compromiso entre velocidad, coste y cantidad y calidad de la muestra a recuperar, además de aspectos logísticos y medioambientales.

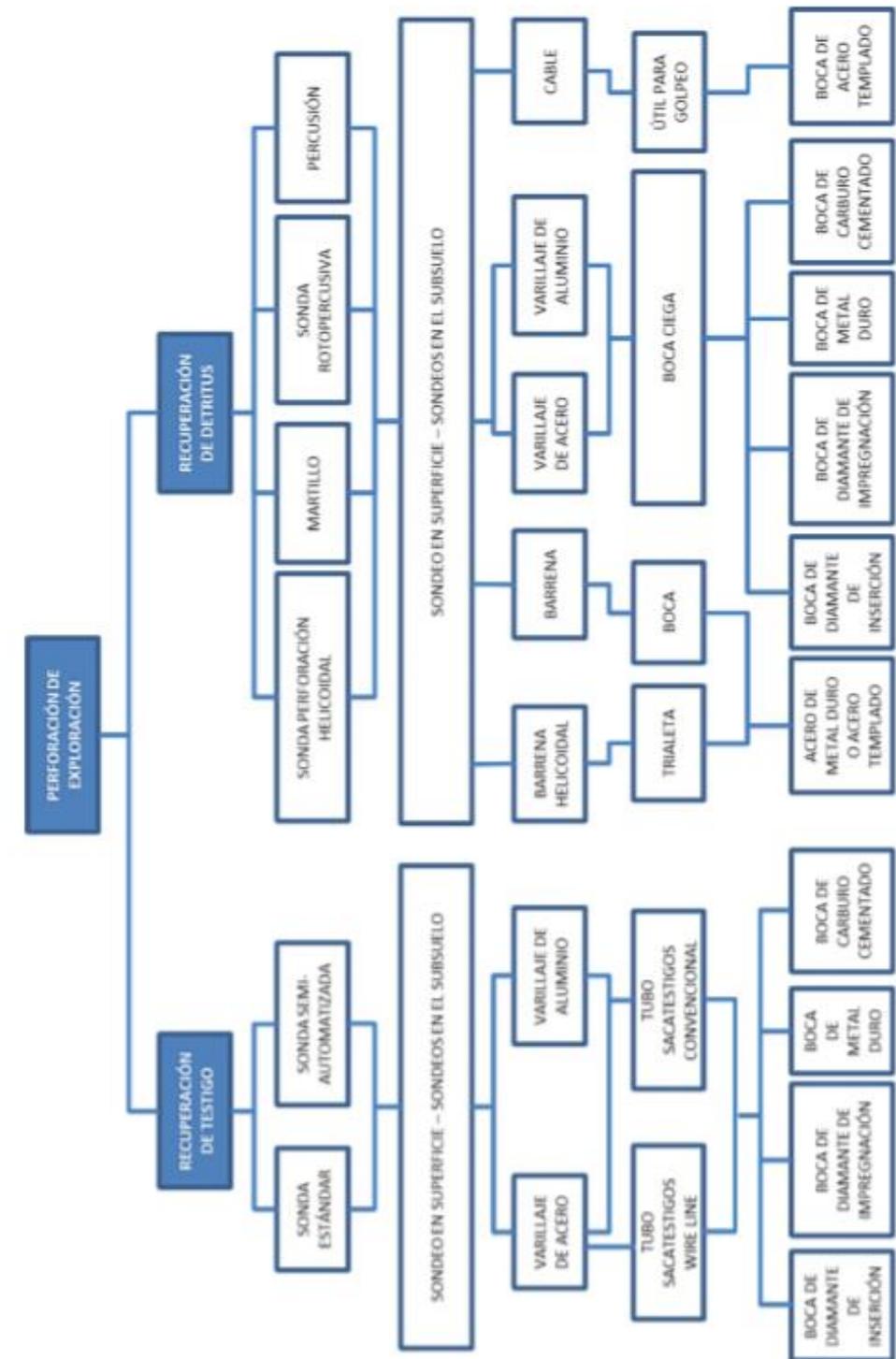
Las técnicas de perforación aplicadas a la exploración minera son las siguientes:

- Perforación a rotación
- Perforación a rotopercusión
- Perforación a rotación con recuperación de testigo

Las técnicas más habituales son la perforación a rotación y la perforación a rotación con recuperación de testigo, siendo esta última la técnica que posibilita la obtención de muestras de roca para su posterior análisis.

De menor a mayor coste comparativamente, los métodos a rotación son los más baratos, seguido por la perforación a rotopercusión, siendo la técnica generalmente más cara la perforación con diamante.

Gráfico 3. Métodos de perforación de sondeos de exploración minera



Fuente: López C. 2001

4.4.2 Perforación a rotación con recuperación de testigo. En todo proceso de exploración existe un punto en el que después del estudio realizado con métodos indirectos prospección es necesaria la verificación de éstos mediante la toma de muestras de roca en profundidad. Esta toma de muestras se realiza por medio de los sistemas de perforación con recuperación de testigo.

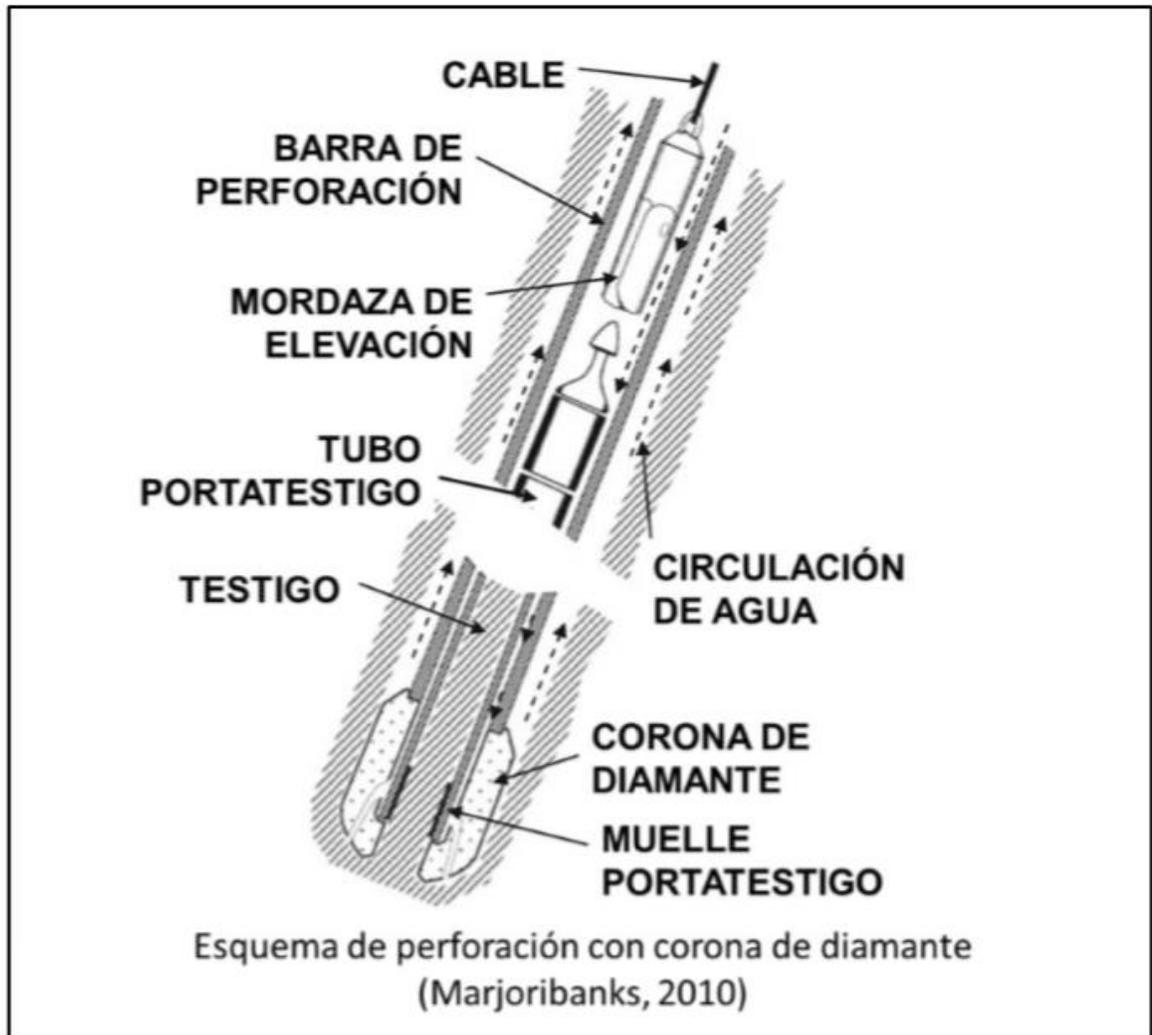
Los testigos son las muestras del macizo rocoso que nos van a permitir un análisis directo de los diferentes materiales que atraviesa, así como la presencia de mineralizaciones, para estudiar su potencial explotación.

La perforación a rotación con recuperación de testigo se basa en que un elemento de corte de forma anular, con diamantes industriales incrustados colocado en el extremo de una sarta de perforación, “corta” la roca obteniendo un cilindro de roca que se aloja en el interior de la sarta, a medida que el elemento de corte avanza. El elemento de corte se denomina corona de diamante.

La perforación con coronas de diamante y recuperación de testigo es, generalmente, el método de perforación más útil de cara a la obtención de muestras para su análisis, inspección visual y ensayo, particularmente en depósitos masivos de leyes bajas donde la mineralización se distribuye a través de la roca matriz.

Sin embargo, la recuperación de los testigos es baja en las zonas mineralizadas superficiales debido a la fracturación, meteorización o friabilidad del material, siendo entonces necesario recoger muestras procedentes del fluido de perforación, incrementándose los costes.

Figura 9. Esquema de Perforación con corona de Diamante



Fuente: Marjoribanks, 2010

En la perforación con diamante el agua es el fluido de perforación más usual, aunque el aire es usado en algunas ocasiones con éxito. En ocasiones también se usa una mezcla de agua y lodo. El agua se bombeada por el interior de la sarta de perforación hasta alcanzar la corona de diamante, saliendo por el espacio anular entre la sarta de perforación y la roca. En la superficie, el agua de retorno suele ser recogido en un tanque donde se decanta el contenido de finos en suspensión procedentes del detritus de perforación. Una vez decantado, el agua puede ser recirculado de nuevo.

El testigo recuperado se aloja en los denominados tubos sacatestigos (o portatestigos), que permiten su desmontaje en el exterior para una mejor maniobrabilidad del mismo. Para la extracción de los núcleos de roca se han desarrollado tubos sacatestigos de diferentes características que han permitido mejorar la recuperación en terrenos difíciles. En los sondeos profundos el sistema "Wireline" ha posibilitado la extracción de testigos sin extraer todo el varillaje en cada maniobra.

El testigo entra en el tubo interior (portatestigo), situado dentro del tubo de sarta de perforación inmediatamente detrás de la corona de perforación. Se evita que el testigo caiga de nuevo en el barreno por medio de un casquillo en forma de cuña montado en la base de la sarta, llamado muelle rompe testigo o portatestigo. La longitud de las barras es normalmente de hasta 6 metros de longitud, dependiendo del tamaño del equipo de perforación. Cuando la barra está completa con testigo en su interior, el tubo portatestigo se extrae de la sarta, por medio de una mordaza que se baja por el interior de la sarta hasta que "pesca" anclándose a un dispositivo con forma de arpón. Este es el denominado sistema wireline. En esta posición la barra portatestigos queda liberada y una vez en el exterior el testigo puede extraerse fácilmente gracias a que esta barra suele poder desmontarse longitudinalmente, siendo especialmente útil en el caso de testigos altamente fracturados o alterados. Una vez extraído el testigo se monta de nuevo y se descende de nuevo hasta la corona de perforación.

Figura 10. Operación de extracción de testigo



Fuente: Atlas Copco

La perforación con coronas de diamante es relativamente lenta y costosa, consiguiéndose rendimientos de 15 a 20m por relevo en buenas condiciones. En cuanto al coste, como regla general, puede decirse que el precio de un metro perforación con corona de diamante equivale a perforar hasta 4 metros de perforación con circulación inversa y hasta 20 metros de perforación a rotación.

La perforación con corona de diamante permite realizar sofisticados estudios geológicos, e incluso se pueden obtener gran volumen de muestra para evaluaciones geoquímicas. El testigo puede ser orientado permitiendo la medida de las estructuras geológicas, reproduciendo la posición del testigo en el macizo rocoso.

Los tamaños de testigo estándar van desde 27 mm a 85 mm de diámetro. Los diámetros de testigo usados normalmente con el sistema wireline son: AQ (27 mm), BQ (36,5 mm), NQ (47,6 mm), HQ (63,5 mm) y PQ (85 mm).

Desde casi todos los puntos de vista, el mejor tamaño de testigo es el mayor posible. Mayores diámetros permiten mejor grado de recuperación y permiten menores desviaciones en la perforación. En testigos de mayor tamaño se facilitan los ensayos geoquímicos y los cálculos de estimación de reservas. Sin embargo, el coste de la perforación con corona de diamante crece exponencialmente en relación al tamaño de testigo, por lo que hay que llegar a una solución de compromiso entre diámetro y coste.

Figura 11. Coronas de diamante para recuperación de testigo



Fuente: Sandvik

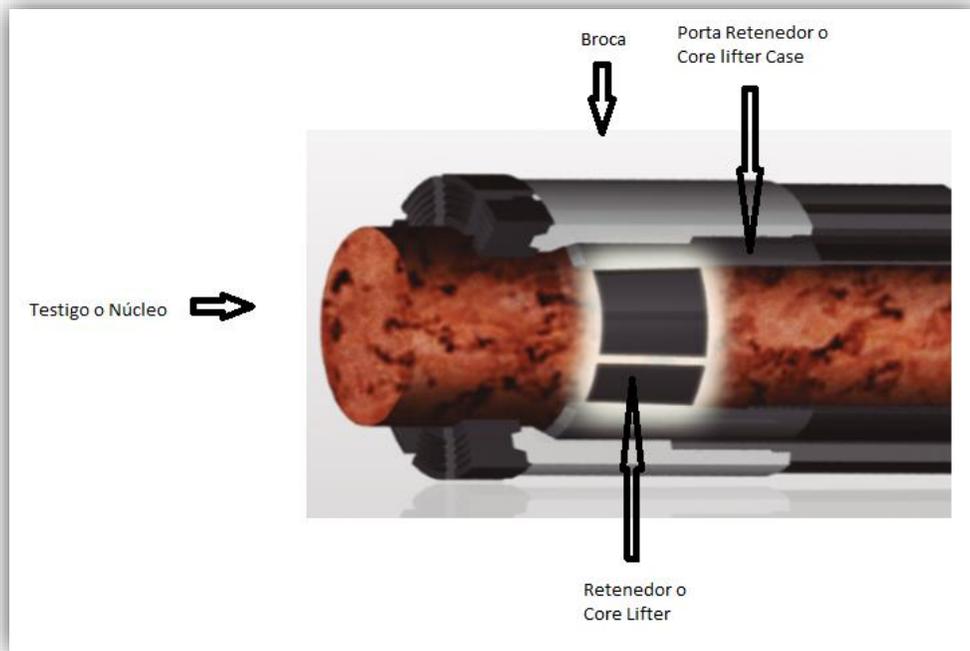
Figura 12. Testigo de roca



Fuente: ABRA Mining

4.4.2.1 Core Lifter O retenedores de núcleo. Hacen parte fundamental del Tubo interior o porta testigo. Los hay en distintas geometrías y con distintas durezas para diferentes tipos de terreno.

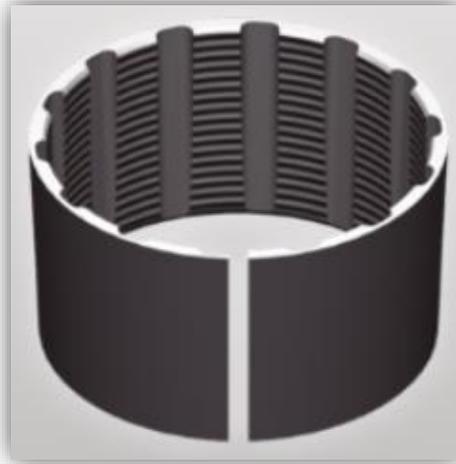
Figura 1. Ensamble core Lifter.



Brochure Diamantina Christensen 2013

4.4.2.1.1 Core Lifter brochado recto. Diseñado para roca fracturada a compacta. Se adapta a formas irregulares de testigo. Los brochados entregan un Core Lifter sumamente elástico lo que permite su uso en diversos tipos de terreno. (Brochure Diamantina Christensen, 2013)

Figura 13. Core Lifter brochado recto



Brochure Diamantina Christensen, 2013

4.4.2.1.2 Core Lifter brochado helicoidal. Diseñado para terreno competente a ligeramente fracturado. Su dirección de brochado angular permite que se descompongan que ayudan al corte. Aumenta la zona interna de contacto con el testigo y evita su deslizamiento, mejorando así la recuperación. (Brochure Diamantina Christensen, 2013).

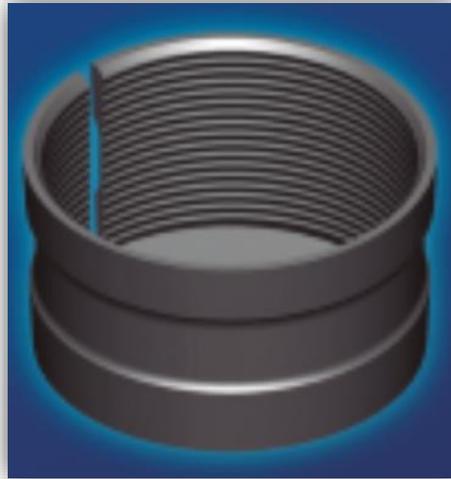
Figura 14. Core Lifter brochado helicoidal



Brochure Diamantina Christensen, 2013

4.4.2.1.3 Core Lifter con rebaje central. Diseñado para uso en roca competente. La doble área de contacto permite una mejor adaptación del testigo. El hilo interior mejora la tracción durante el corte del testigo. (Brochure Diamantina Christensen, 2013).

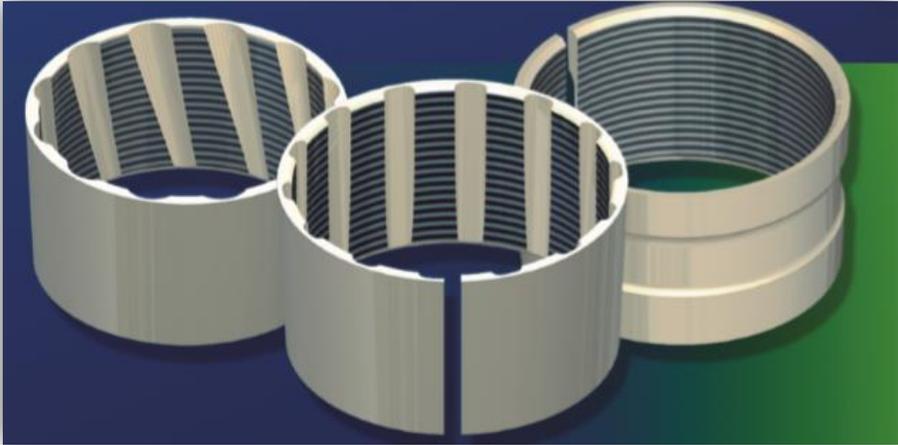
Figura 15. Core Lifter con rebaje central



Brochure Diamantina Christensen, 2013

4.4.2.1.4 Diamond Core Lifter o Titanium Core Lifter. Poseen un recubrimiento de aleación de alta resistencia al desgaste, lo que aumenta considerablemente la vida útil. (Brochure Diamantina Christensen, 2013).

Figura 16. Diamond Core Lifter o Titanium Core Lifter



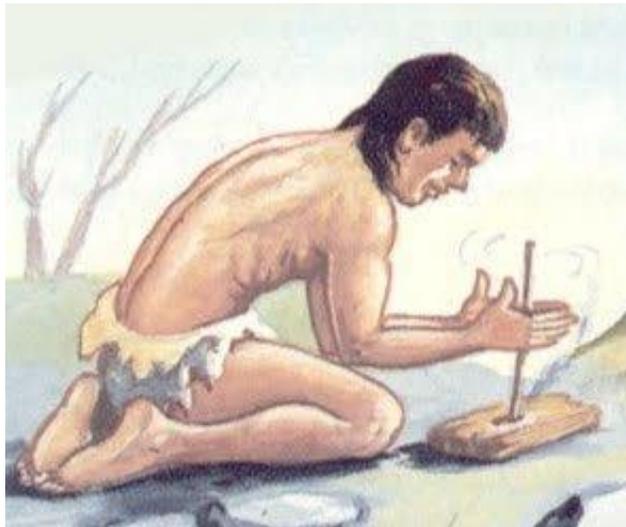
Fuente: Brochure Diamantina Christensen, 2013

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1 HISTORIA DE LAS PERFORACIONES DE EXPLORACIÓN MINERA DIAMANTADA CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO

4.000 años A.C. tenemos las evidencias más antiguas de que los artesanos de Egipto ya dominaban las técnicas de la perforación rotativa. Probablemente las necesidades de las mega construcciones de esa época dieron surgimiento a éstas, que con el paso del tiempo darían lugar a la creación de herramientas de mayor desempeño que la simple fuerza humana: las máquinas, con sus herramientas y accesorios para realizar perforaciones de mayor nivel que las manuales o artesanales.

Figura 17. Movimiento rotativo en la prehistoria



Fuente: perforacionesdiamantinas.com

La técnica de la perforación rotativa, posterior al descubrimiento, implicó el desarrollo de diferentes ramas según sus aplicaciones, como es el caso de los taladros domésticos que todos conocemos. Más en este caso nos limitaremos

específicamente a ir esbozando ¿Cómo es que llegamos al desarrollo actual de la industria que dio nacimiento a empresas internacionales y locales a lo largo del planeta, prestando servicios principalmente a la industria minera, actividad en la cual ha cobrado un papel muy importante?

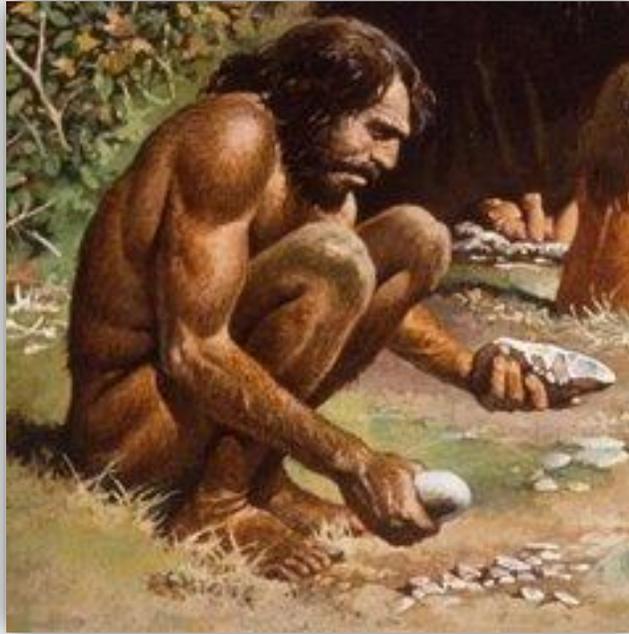
Es posible que el nacimiento de la técnica de la perforación rotativa se sustente en una práctica mucho más antigua: la técnica de producir fuego con una varilla de madera o palo, donde precisamente rotación y presión eran los componentes para generar calor hasta el punto de iniciar el fuego.

Entonces estaríamos hablando de épocas prehistóricas. Sin embargo no hay registros de las técnicas empleadas para producir el fuego, solo sabemos que es posible hacerlo y entonces cabe preguntarnos si ¿Fue una de las técnicas de producción de fuego la que precedió a la perforación rotativa? ó ¿Es a raíz del descubrimiento y dominio de ésta que nos proyectamos hacia la prehistoria, considerándolo como una de las posibles técnicas empleadas en la antigüedad?

Según Carlos López Jimeno, en la cultura china existen referencias históricas que demostrarían la práctica de perforaciones superiores a los 200 m. de profundidad para la extracción de sal y agua. Entonces la técnica empleada era la percusión con cable. “El mecanismo consistía en un balancín contrapesado, que se accionaba mediante un grupo de hombres, que efectuaban el tiro en un extremo de una cuerda mientras que del otro lado colgaba la sarta de perforación construida con cañas de bambú.”

De manera que por la misma época en culturas diferentes ya se dominaban las técnicas de la perforación rotativa por un lado y por otro lado la perforación a percusión. Igualmente si nos remontamos en el tiempo podemos ver que la perforación a percusión también podría tener sus orígenes en la prehistoria, cuando los hombres primitivos desarrollaron capacidad o habilidad de modificar sus primeras herramientas: las piedras, que talladas por percusión unas contra otras irían adquiriendo la formas para para el uso requerido.

Figura 18. Tallado de piedras por percusión en la prehistoria



Fuente: perforacionesdiamantinas.com

1859 “El coronel Drake realizó el primer pozo de petróleo del que se tiene noticias, por el método de percusión. De aquí que este método también se denomine pensilvanience”

1833 “Un ingeniero francés de nombre Flauville se hallaba mirando la operación de perforación con herramienta de cable cuando el aparato de perforación descubrió agua. Entonces, se dio cuenta que el agua que brotaba era muy efectiva para sacar los recortes fuera del pozo. Éste fue el momento en que se estableció el principio de usar un fluido en movimiento para retirar los recortes del pozo. El francés ideó una manera para que el agua se bombeara hacia abajo dentro de una tubería de perforación, y arrastrara los recortes consigo cuando regresara a la superficie, en el espacio entra la tubería de perforación y la pared del pozo. Este es un procedimiento estándar aún hoy en día. La perforación rotativa ha reemplazado ampliamente a la herramienta de cable.”

1861 “Parece que durante la construcción del túnel del Mont Cenis (1861, Alpes) se utilizó la primera perforadora accionada por aire comprimido. El túnel, en granito, tardó diez años en perforarse, siendo su longitud 12.8 km y 8 x 7.5 m su sección.”

Figura 19. Primera perforadora accionada por aire comprimido



Fuente: perforacionesdiamantinas.com

1862“ el nacimiento de la técnica moderna de perforación rotativa con diamante para la obtención de testigos tuvo lugar a partir de los experimentos llevados a cabo por el Ingeniero Suizo Jean Rudolphe Leschot, cuando vivió en Paris en 1862 y concibió la idea que después se materializó en un prototipo. Un impulso importante se produjo a comienzos de los años 50 cuando la empresa E.J Longyear Company introdujo los tubos sacatestigos con cable wireline con los que no es necesario extraer todo el varillaje cada vez que el sacatestigos se haya llenado. Por medio de un cable y un extractor por el interior del varillaje se extrae el tubo interior lleno de testigo. Este sistema reporta numerosas ventajas como se comentara más adelante” (Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras. M Bustillo Revuelta y C. López Jimeno páginas: 56,57).

1863. La primera máquina acabó de construirse con la ayuda del mecánico llamado Pihet. La máquina era operada por dos hombres y, tanto la rotación como el empuje, eran manuales. Las brocas que se emplearon tenían un diámetro interior de 30mm y exterior de 40-42 mm. Los diamantes con que se fabricaron esas brocas eran los denominados diamantes negros (carbonos).

1870. Se fabricaron los primeros equipos de perforación accionados por motores de vapor, de 5 a 7 caballos de potencia y velocidades de rotación superiores a las 360 r/min.

1890.- fundación de Boart Longyear marca los inicios de la industria de la perforación. A partir de este precedente estamos hablando de poco más de 100 años de la historia de la moderna industria de la perforación de las formaciones geológicas con diferentes aplicaciones y en la industria minera como una de las técnicas de sondaje de mayor efectividad.

## 5.2 GEOLOGÍA

Los sondaje de perforación diamantina tienen como finalidad, el permitir identificar la ubicación y concentración de los minerales, en los puntos de perforación. De esta manera se puede realizar una ubicación del mineral dentro del yacimiento minero.

5.1.1 Clasificación del tipo de roca. Se conoce como roca al material compuesto por uno o más minerales que se originan como producto final de diferentes procesos geológicos.

Suelen ser clasificadas por su origen en: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

5.1.1.1 Ígneas o magmáticas. Son formadas cuando el magma en estado líquido se enfría, dependiendo de la forma de enfriamiento pueden ser intrusivas o extrusivas.

5.1.1.1.1 Intrusivas. son resultado del enfriamiento y cristalización lento del magma dentro del interior de la tierra. Ej: granito y diorita.

5.1.1.1.2 Extrusivas se originan del enfriamiento del magma luego de aflorar a la superficie en forma de lava volcánica. Ej: basalto y obsidiana.

5.1.1.2 Sedimentarias. Se forman cerca a la superficie de la tierra, por la deposición de sedimentos, materia orgánica o precipitados químicos al que le sigue un proceso llamado diagénesis, que es la compactación y cementación de la deposición. Ej: caliza, arenisca, limonita.

5.1.1.3 Metamórficas. Son las formadas al someter cualquier tipo de roca a condiciones diferentes de presión y temperatura, formaciones existentes. Estas variaciones de presión y temperatura deben de ser mayores a las que se alcanzan en la superficie de la tierra. Ej: Mármol, cuarcita, pizarra y gneis.

5.1.2 Propiedades físicas. Para poder seleccionar apropiadamente el tipo de broca a emplear en la perforación, se deben identificar previamente o durante la extracción de muestras, las características del tipo de roca. Las principales son: Dureza, nivel de abrasividad, estructura (Litología).

5.1.2.1 Dureza. La dureza de un material expresa la resistencia que ofrece este a ser rayado o desgastado por otro. Como indicador de nivel de dureza se emplea la escala de MOHS. Esta escala considera desde el grado nivel de dureza 1 hasta 10, como ejemplo podemos considerar: (Talco 01 MOHS) Y diamante (10 MOHS), el material más duro conocido por el hombre.

Parte fundamental para realizar la selección de la broca adecuada, pasa por identificar la serie correcta de la broca. Para esto es necesario tomar como referencia el nivel de dureza más alto de la roca, siempre y cuando se encuentre concentrado en mayor proporción o en la mayoría de tramos.

Comúnmente empleamos una hoja de sierra, para evaluar el nivel de dureza (Suave o duro), sin embargo este método no indica el nivel exacto, lo que puede generar una equivocada selección en la serie de la broca.

Mediante las visitas a campo, se viene registrando las escalas de dureza de diferente tipo de roca, las cuales se vienen registrando en un cuadro informativo (Tabla 1.0), el cual es continuamente actualizado.

Tabla 3. Dureza de Algunas Rocas

<b>TIPO DE ROCA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>DUREZA (MOHS)</b>
ÍGNEA INTRUSIVA	GRANITO	7
ÍGNEA INTRUSIVA	GRANODIORITA	7
ÍGNEA INTRUSIVA	DIORITA	7
ÍGNEA INTRUSIVA	GABRO	6
ÍGNEA EXTRUSIVA	RIOLITA	9
ÍGNEA EXTRUSIVA	ANDESITA	4
ÍGNEA EXTRUSIVA	BASALTO	6
SEDIMENTARIA	LODOLITA	7
SEDIMENTARIA	DOLOMITA	4
SEDIMENTARIA	CALIZA	3
SEDIMENTARIA	ARENISCA	7
METAMÓRFICA	CUARCITA	7
METAMÓRFICA	GNEIS	6

Manual de Campo Perforación Diamantina. Boart Long Year. Edición 2013

Para realizar la mediación de la escala de dureza de la roca se hace uso de un juego de rayadores, los cuales poseen diferentes escalas de dureza (MOHS).

Figura 20. Juego de Rayadores



EJEMPLO DE APLICACIÓN: Al ser rayado un tramo superficial de roca, mediante un rayador de dureza 8 MOHS, y notamos que permite rayar y dejar una marca perceptible, se podrá considerar a este tramo una dureza 7 MOHS.

De ser muy profunda la marca se deberá reducir el grado de dureza del rayador, procediendo a realizar el rayado nuevamente. Como principal referencia de la selección de la serie de la broca, se deberá considerar el tramo de mayor dureza y/o en mayor proporción, durante la inspección.

Mediante registros estadísticos, se ha podido determinar que las rocas de mayor dureza por lo general corresponden a una escala entre 7 o 8 MOHS, para el caso

de Perú. No obstante en algunos casos se ha detectado roca con dureza 9 MOHS, como es el caso de Zinter.

5.1.2.2 Litología. Respecto a su estructura o litología, las rocas pueden ser compactas, fracturadas o mixtas. Por lo general para el caso de Colombia se presenta en la mayoría de operaciones en superficie cobertura de terreno (0-50 m), roca mixta a profundidades intermedias (50-600 m) y compactas a altas profundidades (600- 2500 m). No obstante también se presentan zonas de fallas geológicas o/y cavernas, resultando un inconveniente durante la perforación.

Una roca muy fracturada atacará el diámetro interno de la corona, por lo que se requiere de una corona más dura (series bajas) y/o reforzadas (series bajas e intermedias) las cuales se deben utilizar en caso que se tengan problemas en el avance, por la dureza del terreno.

Los casos de roca compacta, desde los primeros metros de perforación hasta la culminación del pozo, resultan ser más aislados. En la práctica también se pueden encontrar terrenos compactos (competentes), pero a la vez muy abrasivos. Por tal motivo las brocas en series intermedias o altas resulta la mejor opción para este tipo de terreno.

Como principal ventaja de las brocas, tenemos que ante una buena selección y operación adecuada se presenta un menor índice de pulido del filo.

5.1.2.3 Abrasividad. La abrasividad es la capacidad que tiene un material para desgastar o pulir, por fricción, a otros materiales. Esta propiedad está relacionada al tamaño de grano de la roca, mientras más fino el grano entonces la roca es más abrasiva y desgastará con más facilidad materiales duros. Por lo general la abrasividad tiende a pulir rápidamente a las brocas, pese a ser de series altas, por tal motivo una combinación de roca dura y abrasiva, generalmente resulta una de las rocas más difíciles de perforar, ocasionado por pulido excesivo de la broca, reduciendo la productividad considerablemente.

Por tal motivo en estos terrenos se hace necesaria una selección adecuada, no resultando del todo eficiente, la selección de una serie más alta de una broca, las cuales están diseñadas para perforar en roca dura pero poco abrasivas. Las series altas están diseñadas para trabajar a altas RPM sin el control estricto del peso sobre la corona, en un terreno duro y abrasivo, se producirá un pulido excesivo.

Debemos recordar, que en una broca de serie alta el grano de diamante por lo general es de menor diámetro en comparación al de una serie intermedia, baja o/y de configuración abrasiva. Esto es el principal impedimento para usar una serie alta en terrenos abrasivos, dado que tenderá a pulirse constantemente, por razones indicadas anteriormente

## 5.2 PAUTAS DE PERFORACIÓN

5.2.1 Velocidades de rotación (índice rpi o r/cm). Cuando se están empleando coronas incrustadas, la mayoría de los perforistas adopta la práctica de escoger la velocidad de rotación (rpm) y el peso sobre la corona que ellos desean emplear y luego regulan la palanca de avance fino para mantener este peso particular a medida que varía ligeramente la formación.

Como norma, las coronas diamantadas impregnadas requieren velocidades de rotación mayores para lograr velocidades de penetración comparables con aquellas de las coronas incrustadas. Esto es simplemente debido a que la exposición del diamante (prominencia del diamante) es menor con una corona impregnada; por lo tanto, la penetración por revolución es menor.

Con las coronas impregnadas, se recomienda un enfoque bastante distinto en el que las velocidades de penetración están controladas dentro de un rango muy estrecho para una determinada velocidad de rotación (rpm) y el peso sobre la corona es de importancia secundaria. Este procedimiento se conoce como método de perforación rpi (r/cm).

El índice de rpi (revoluciones de la corona por pulgada de penetración) o r/cm (revoluciones por cm de penetración) constituye el cálculo más importante para lograr la máxima vida útil de la corona, bajos costos y una máxima productividad.

Para calcular el índice de rpi (r/cm), divida la velocidad de rotación (rpm) de la corona por la velocidad de penetración. Es decir, 800 rpm dividido por 4 pulg/min = 200 rpi, u (800 rpm dividido por 10 cm/min = 80 r/cm). EL RANGO ACONSEJADO ES DE 200 - 250 rpi (80 - 100 r/cm)

Siempre que trabaje dentro de esta norma y la corona de SERIE seleccionada corresponde a la formación, la perforación debería progresar sin dificultades y la corona se desgastará a un ritmo más o menos constante durante toda su vida útil.

Si el índice de rpi (r/cm) se encuentra bajo el mínimo recomendado de 200 (80), se producirá un desgaste excesivo de manera que usted deberá o aumentar las rpm o disminuir la velocidad de penetración, mediante la reducción del peso sobre la corona. Si las condiciones de terreno o las limitaciones de la sonda le impiden efectuar estos ajustes, cambie a una corona de SERIE menor, por ejemplo: de una SERIE 9 a una SERIE 7.

Si el índice de rpi (r/cm) es muy superior al máximo recomendado de 250 (100), la corona se puede “pulir”, de manera que usted debe reducir las rpm o aumentar la velocidad de penetración, aumentando el peso sobre la corona. Si las rpm o el peso no pueden ser modificados, cambie a una corona de SERIE mayor, por ejemplo: de una SERIE 2 a una SERIE 6.

“Pulido”, “glaseado” y “vitrificado” son términos empleados comúnmente para describir una condición en la que la cara de la corona adquiere una textura metálica y no sobresalen puntas de diamante desde la matriz que puedan cortar la roca.

La penetración virtualmente cesa y se hace necesario afilar la corona en el pozo o, en otros términos, reexponer nuevamente el diamante (consulte la página 18). Es

de suma importancia, para evitar el pulido, que el perforista MANTENGA LA CORONA CORTANDO.

5.2.2 Peso sobre la corona. Aunque anteriormente hemos establecido que el peso sobre la corona es sólo de importancia secundaria cuando se está perforando con coronas impregnadas, estamos conscientes de que puede transformarse en un factor importante en algunas circunstancias, especialmente cuando se está alcanzando el límite de las herramientas dentro del pozo para soportar empujes elevados, o cuando el control de la desviación es de primordial importancia.

En tales casos, se sugiere emplear una corona de SERIE mayor a la normalmente recomendada, teniendo cuidado con las velocidades de penetración. Esto tenderá a disminuir la desviación o los problemas con el equipo dentro del pozo, con costos en coronas de serie mayores.

Si se requieren cargas muy elevadas sobre la corona para cortar la roca, seleccione un rango de SERIE mayor. Esto normalmente dará por resultado que se requerirán pesos más bajos sobre la corona mientras se mantienen velocidades de penetración aceptables.

Los pesos sobre la corona indicados en el cuadro de la página 17 están destinados simplemente a indicar el rango de pesos considerados normales para un tamaño determinado de barril sacatestigos. Si sobrepasa el peso máximo indicado, puede esperar que surja desviación, desgaste excesivo de los barriles sacatestigos y de las barras e incluso fallas dentro del pozo.

5.2.3 Flujo de fluido. La regulación de la salida de la bomba de lodo mediante un medidor de flujo de agua, puede ser una técnica útil para ayudar a la perforación de formaciones ilíceas muy duras. Si, cuando se está empezando a bombear el volumen máximo de fluido recomendado, surge la necesidad de afilar la corona, la salida de la bomba debe reducirse al valor menor recomendado en el cuadro siguiente. Esto ayudará a que se acumule una pequeña cantidad de detritus en la cara de la corona lo que, a su vez, desgastará la matriz.

Si el pulido o la necesidad de afilar la corona continúa, se debe realizar un cambio de corona a la corona de SERIE mayor más próxima (es decir, de SERIE 6 a una SERIE 7) A los clientes se les recomienda usar aceites solubles o fluidos lubricantes con las coronas impregnadas de la serie, sólo en formaciones de roca dura.

Tabla 4. Pautas de Perforación

SISTEMA	RANGO DEL VOLUMEN DE FLUIDO		VELOCIDAD DE ROTACIÓN	VELOCIDADES DE PENETRACIÓN				RANGO INDICATIVO DEL PESO SOBRE LA CORONA	
	gpm	l/min	(rpm)	pulg/min	cm/min			lbf	Kn
				200 rpi	250 rpi	80 r/cm	100 r/cm		
LTK 46	2,5 - 3,5	10 - 13	2300	11,5	9,2	29	23	1.000	5-13
			1400	7	5,6	18	14	-	
			1000	5	4	13	10	3.000	
LTK 48	2,5 - 4	11 - 20	2000	11	8,8	28	22	1.900	8-14
			1500	7,5	6	19	15	-	
			900	4,5	3,6	11	9	3.100	
AQ/AQT K	3 - 5	11 - 15	2000	10	8	25	20	2.000	9-23
			1200	6	4,8	15	12	-	
			850	4,25	3,4	11	9	5.000	
BQ/BQT K	6 - 8	23 - 30	1700	8,5	6,8	22	17	2.000	9-23
			1000	5	4	13	10	-	
			700	3,5	2,8	9	7	5.000	
NQ NQ-3 CHD 76	8 - 10	30 - 38	1350	6,75	5,4	17	14	3.000	14-27
			800	4	3,2	10	8	-	
			550	2,75	2,2	7	6	6.000	
HQ HQ-3 CHD 101	10 - 12	38 - 45	1000	5	4	13	10	4.000	18-36
			600	3	2,4	8	6	-	
			400	2	1,6	5	4	8.000	
PQ PQ-3 CHD 134	18 - 23	68 - 87	800	4	3,2	8	8	5.000	23-45
			500	2,5	2	5	5	-	
			350	1,75	1,4	4	4	10.000	

Fuente: Manual Para Terreno Productos Diamantados. Boart Long Year.

### 5.3 TRIBOLOGÍA

La palabra Tribología se deriva del término griego tribos, el cual se entiende como el “frotamiento o rozamiento”, así que la interpretación de la palabra puede ser, “la ciencia del rozamiento”

Los diccionarios definen a la Tribología como la ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas. La Tribología es el arte de aplicar un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento, y desgaste del equipo técnico, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas. El entendimiento de las interacciones superficiales en una interface requiere tener conocimiento de varias disciplinas incluyendo la física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, geología, lubricación, diseño de máquinas, desempeño y confiabilidad.

En sí, la Tribología podría parecer algo nuevo, pero solamente el término como tal lo es, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran “fijados” con rodamientos hechos de cornamentas o huesos.

Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el 3500 a.C., lo cual ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante.

El artista-científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo la leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus

descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referente al tema. Científicos como Charles Agustín de Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia. Al surgir la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo veinte, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente.

La Tribología se centra en el estudio de tres fenómenos; la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este fenómeno y la lubricación como un medio para evitar el desgaste, para el proceso de perforación minera aplica esta ciencia como parte fundamental en los análisis de costo y presupuesto, esto debido a que es un ítem en el gasto y mantenimiento de las herramientas del proceso y/o proyecto.

La fricción se genera al perforar un terreno entre la herramienta de corte y el material perforante, debido a la fricción que se genera entre estas dos superficies es necesario un aditivo refrigerante ya que se pretende obtener una muestra de material que no esté contaminado con agentes externos desprendidos del material perforado o muestras que cambiaron sus propiedades debido a las altas temperaturas generadas en el proceso de corte.

Se pretende no generar gastos innecesarios o pérdidas que eleven el costo del proyecto debido a daños prematuros o fracturas de las herramientas que aunque estén en contacto directo con otras superficies en el proceso de perforación, tales como los taladros y las piezas que lo componen, siendo el principal al análisis a realizar los retenedores core-lifter.

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes.

De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la ignorancia en tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto (\$200 billones de dólares por año en 1966), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria. Según Jost (1966,1976), el Reino Unido podría ahorrar aproximadamente 500 millones de libras al año, y los Estados Unidos llegarían a ahorrar hasta 16 billones de dólares al año utilizando mejores prácticas tribológicas. Este ahorro es significativo y puede obtenerse sin hacer una gran inversión de capital.

5.3.1 Mecánica de contacto. Estudia la relación entre la carga aplicada y la deformación ocasionada en los cuerpos.

El contacto macroscópico admite que las superficies en contacto son lisas. La fricción y el desgaste entre dos superficies en contacto y sin lubricación, dependen de como las irregularidades superficiales se deforman (elástica, elasto-plástica o plástica, en dependencia de la fuerza aplicada)

5.3.2 Fricción. Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción cinética) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática).

Las fuerzas de fricción son importantes en la vida cotidiana ya que nos permiten caminar y correr. Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo.

En el movimiento que se realiza al perforar se tiene la fuerza de fricción por el contacto del taladro con la fuerza de rozamiento que se genera con el material perforado al sacar las muestras. También se genera fuerzas de fricción entre los componentes de las herramientas del taladro perforador tales como rodamientos, porta retenedores, retenedores (core-lifter) los cuales están en contacto entre si por lo que se genera desgastes por el contacto regular entre superficies.

La norma ASTM G40/93 define la fuerza de fricción y el coeficiente de fricción de la siguiente manera.

La fuerza de fricción es la fuerza tangencial resistente que actúa en la interface de dos cuerpos y es la resultante de la acción de una fuerza externa aplicada a un cuerpo que se mueve o tiende a moverse sobre otro.

El coeficiente de fricción es la razón entre la fuerza tangencial ( $F_f$ ), resistente al movimiento entre dos cuerpos y la fuerza normal  $N$  aplicada a estos cuerpos.

5.3.3 Desgaste. El proceso de desgaste, puede definirse como una pérdida de material de la interface de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales, y se han identificado seis tipos principales de desgaste, como sigue:

#### 5.3.3.1 Tipos de desgaste.

5.3.3.1.1 Desgaste por fatiga de contacto (FC). Tipo de desgaste importante en el caso de piezas que trabajan teóricamente en rotación pura (se ha controlado en forma eficiente cualquier pequeño deslizamiento). Este tipo de desgaste es común en dientes de engranajes, sistemas biela, seguidor y cojinetes de rodamiento

5.3.3.1.2 Fatiga de contacto en un sistema rueda – riel. El mecanismo principal de falla es la aparición y propagación de grietas después que las superficies han almacenado una determinada deformación plástica.

5.3.3.1.3 Desgaste adhesivo. La adhesión está asociada a toda formación y posterior rompimiento de enlaces adhesivos entre las interfaces, cuando dos superficies son colocadas contacto íntimo. La adhesión conlleva además al soldado en frío de las superficies.

Esta forma de desgaste ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto, proyecciones microscópicas o la aspereza de

la unión en la interface donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.

5.3.3.1.4 Desgaste por cavitación. Frecuentemente encontrado en equipos hidráulicos. Este tipo de desgaste es un problema serio que genera grandes dificultades en la manutención de equipos hidráulicos.

5.3.3.3.1 Desgaste erosivo. Es el daño provocado en una superficie por impactos repetitivos de partículas, que pueden ser de diferente naturaleza, tamaño y forma.

Según la norma ASTM G40/90: pérdida progresiva de material de una superficie sólida debido a la interacción mecánica con un fluido, un fluido multi-componente o impacto de líquido o partículas sólidas.

La erosión afecta principalmente equipos y piezas en las industrias agrícola, minera y alimenticia, como es el caso de turbinas hidráulicas, implementos para labrar la tierra, sistemas de bombeo y dragado en ríos y minas; al igual que piezas específicas usadas en las industrias petrolífera y petroquímica; en vehículos, aviones, entre otros sistemas

Formas de actuación de partículas erosivas; microcorte y micro-arado, agrietado superficial, desplazamiento de material, grietas por fatiga superficial y sub-superficial, formación de pequeñas hojuelas por múltiples impactos

5.3.3.1.6 Desgaste abrasivo. Según la Norma ASTM G40-92, el desgaste abrasivo es la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras forzadas a moverse contra a lo largo de una superficie sólida.

Este tipo de desgaste constituye una de las causas más importantes de daño en elementos y maquinaria del sector minero, agroindustrial, de movimiento de tierra, entre otros.

## **6. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **6.1 FORMA DE INVESTIGACIÓN**

Por la característica determinística del proceso de perforación, se realizó una investigación basada en pruebas de campo y análisis estadísticos comparativos entre los resultados obtenidos con el core Lifter Diamond y su testigo.

### **6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Se realizará una investigación tipo experimental. Ya que no existe información conocida sobre el rendimiento en campo de los Core Lifter.

### **6.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

Se realizará un método de investigación práctico. Esto debido a que se observará el comportamiento de Core Lifter Diamond respecto a uno regular o de control en campo.

### **6.4 FUENTES, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

6.4.1 Fuente. La fuente de la información para este escrito es de tipo terciaria. Es recopilada de manuales técnicos, libros e internet. Estos documentos ya han sido publicados con anterioridad.

6.4.2 Técnicas. Se analizará información de textos. Se realizarán algunas entrevistas con personal técnico especializado en perforaciones. Además de sondeos en campo.

## 6.5 PROCEDIMIENTO

La unidad experimental estuvo conformada por 3 unidades de Diamond Core Lifter y 3 unidades de Core Lifter Regulares como control de marca Fordia. Se realizaron 3 pruebas en roca andesita con intrusiones de silicatos con una fracturación mixta.

Una vez en campo, los core Lifters son separados en 3 parejas, conformadas por un Diamond Core Lifter y otro regular como se muestra en la figura 20. Las unidades experimentales contaron con pasos comunes que se describen a continuación.

Figura 21. Diamond Core Lifter a la izquierda y Core Lifter Regular a la derecha.



6.5.1 Paso 1. Se toman medidas diametrales internas con la finalidad de tener un diámetro de referencia para hacer una posterior evaluación del desgaste de Core Lifters como se muestra en la tabla 5. El promedio de del diámetro se tomará del retenedor regular, el diámetro del diamantado no es confiable porque este tiene una capa de polvo resultado de su tratamiento termo-químico.

Tabla 5. Toma de muestras del diámetro interior de los Core Lifters

**DIÁMETRO INTERIOR CORE LIFTER**

	<b>REGULAR</b>	
	<b>D.I.I.</b>	<b>D.I.S.</b>
<b>Muestra 1</b>	61.48	61.06
<b>Muestra 2</b>	61.46	61.56
<b>Muestra 3</b>	61.44	61.07

D.I.S.= Diámetro Interior Superior

D.I.I.= Diámetro Interior Inferior

PROMEDIO REGULAR          61.35

6.5.2 Paso 2. Los dos Core Lifter se instalaron en tubos interiores independientes con la finalidad que sean probados bajo las mismas condiciones en cada turno de trabajo como se muestra en la figura 21 y 22

Figura 22. Tubo Interno

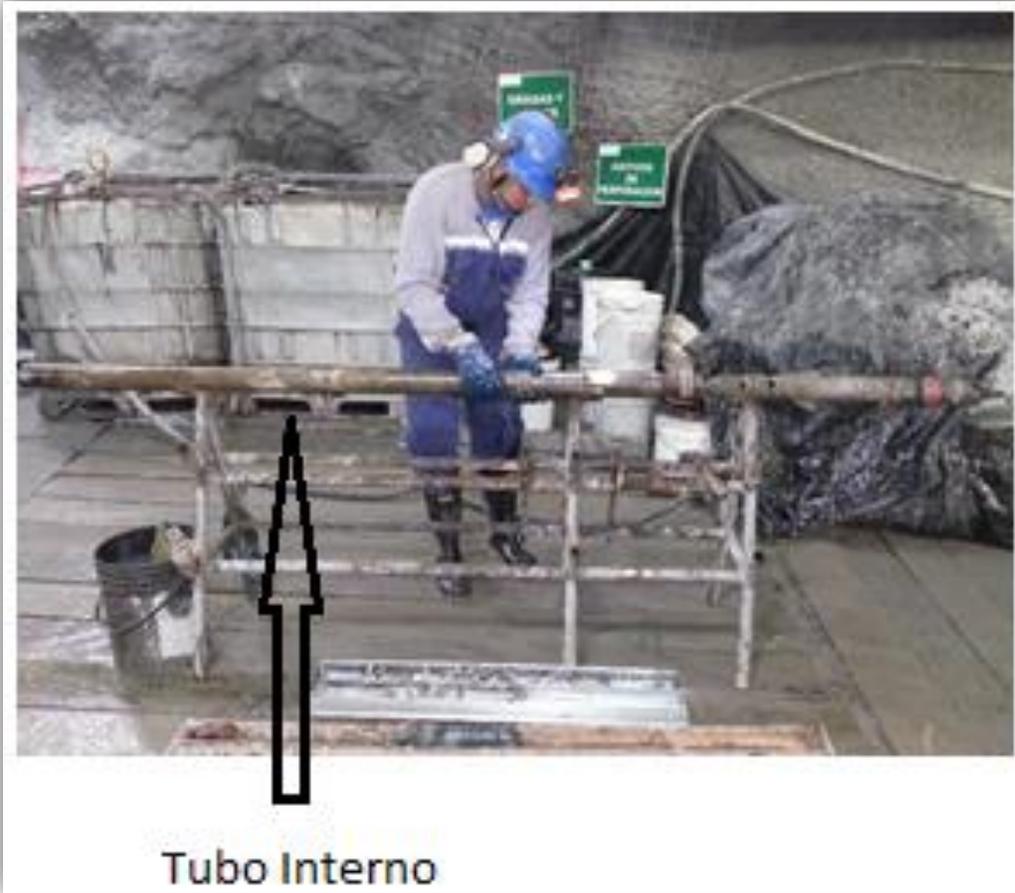


Figura 23. Core Lifter Instalado



6.5.3 Paso 3. El tubo interno es introducido en la tubería y se procede con la maniobra de perforación como se muestra en la figura 23. En el proceso de perforación se presentan variables tales como:

- RPM
- Velocidad de avance
- Caudal de lodo

Las cuales son despreciables porque las RPM influyen sobre toda la parte exterior de la columna de perforación. El tubo interno donde está alojado el Core Lifter siempre está a 0 RPM. La velocidad de avance en una perforación con recuperación de núcleo es relativamente lenta. Una velocidad muy rápida sería de unas 8 in/min.

Esta velocidad no es considerada lo suficientemente alta como elevar el desgaste comparado con una velocidad de avance más baja y el caudal de lodo es despreciable porque este no pasa directamente por el Core Lifter.

Figura 24. Unidad de Rotación Taladro de Perforación



6.5.4 Paso 4. Una vez el tubo interno esté lleno y ya no sea posible el ingreso de núcleo, se extrae el tubo interno y la muestra contenida en su interior como se muestra en la figura 24 y 25.

Figura 25. Extracción de Muestra o núcleo



Figura 26. Muestra o núcleo Extraído



6.5.5 Paso 5. Se registra la longitud de núcleo extraído y la profundidad en la cual se tomó la muestra como se indica en la tabla 6.

6.5.6 Paso 6. Se toma nota de la longitud de núcleo extraído y se identifica con cuál de los Core Lifter se realizó el trabajo como se indica en la tabla 6.

6.5.7 Paso 7. Una vez los Core Lifter ya no retengan más muestra porque ha finalizado su vida útil se toma registro de los diámetros.

Tabla 6. Ejemplo Registro de Extracción de Núcleo en Cuaderno de Taladro

**Broca** T 25 9552 **Fecha:** 05/04/2014  
**R. Shell** A 8212  
**Inclinación** 0°  
**Azimut** 352

Long. Tubería	Sobrante	Profundidad	Perforación	Recuperación	Cant. Tubos	Core Lifter
185.60	1.45	182.85	0.00	0.00	61	
188.60	2.95	184.35	1.50	1.50	62	Diamond
188.60	1.80	185.50	1.15	1.15	62	Regular
188.60	0.90	186.40	0.90	0.90	62	Diamond
191.60	2.40	187.90	1.50	1.50	63	Regular
191.60	0.80	189.50	1.60	1.60	63	Diamond
194.60	2.30	191.00	1.50	1.50	64	Regular
194.60	1.00	192.30	1.30	1.30	64	Diamond

6.5.8 Paso 8. Hecho esto se repite los pasos alternado los tubos internos y por ende los Core Lifters

## 6.6 VARIABLES DE RESPUESTA

6.6.1 Diámetro del Core Lifter. Esta variable nos indica el desgaste del Core Lifter en el diámetro interior como en el exterior.

El desgaste entre las extracciones de núcleo son mínimas, prácticamente imperceptibles para un pie de Rey Vernier. Por este motivo estas medidas en los diámetros se tomarán cuando el core Lifter termine su vida útil, para garantizar que

ambas muestras tengan el mismo desgaste. Hecho esto los valores serán consignados en la tabla 7.

Tabla 7. Desgaste por metro perforado

<b>PROMEDIOS</b>	<b>REGULAR</b>	<b>DIAMOND</b>
METROS PERFORADOS	38.74	82.28
DESGASTE INTERIOR (mm)	0.74	0.74
DESGASTE POR METRO PERFORADO (mm)	0.0191017	0.0089940

6.6.2 Metros de núcleo extraídos. Se toma nota de la longitud de núcleo extraído y se identifica con cuál de los Core Lifter se realizó el trabajo. Se identifica con un punto la extracción realizada por el Diamond Core Lifter. Se procede a consignar la información en la tabla de registro de prueba de campo.

Tabla 8. Tabla de registro de prueba de campo

<b>PRUEBA DE CAMPO # 1</b>			
<b>FECHA</b>	<b>TURNO</b>	<b>LONGITUD NÚCLEO EXTRAÍDO (m)</b>	
		<b>REGULAR</b>	<b>DIAMOND</b>
03/04/2014	TURNO A	0.70	1.20
03/04/2014	TURNO A	1.20	1.50
03/04/2014	TURNO A	1.15	1.10
03/04/2014	TURNO A	1.25	0.95
03/04/2014	TURNO A	0.65	0.55
03/04/2014	TURNO B	1.10	0.85
03/04/2014	TURNO B	0.85	1.55
03/04/2014	TURNO B	1.40	1.50
03/04/2014	TURNO B	1.50	1.50

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información obtenida para las variables de respuesta en ambas muestras en las 3 pruebas de campo, se realizó el análisis que se describe a continuación.

### 7.1 DESGASTE DIÁMETRO DEL CORE LIFTER

Se observa que el límite de servicio de un Core Lifter es cuando su diámetro interior aumenta en aproximadamente 0.74 mm y el diámetro promedio del core Lifter desgastado es de 62.2 mm como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Diámetros Core Lifters Desgastados

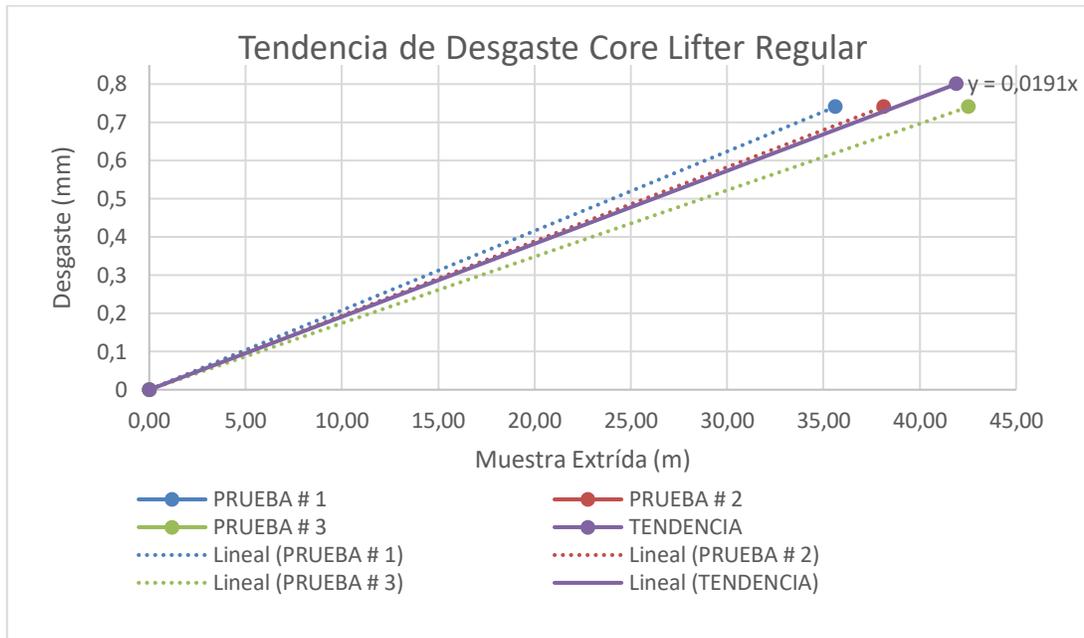
	PRUEBA # 1		PRUEBA # 2		PRUEBA # 3	
	Regular	Diamond	Regular	Diamond	Regular	Diamond
Muestra 1	62.20	62.15	62.20	62.20	62.15	62.25
Muestra 2	62.15	62.20	62.15	62.20	62.20	62.20
Muestra 3	62.25	62.25	62.15	62.25	62.15	62.25

Promedio Diámetro Core Lifter	61.46 mm
Promedio Desgaste Diámetro Core Lifter	0.74 mm
Promedio Core Lifter Desgastado	62.2 mm

7.1.1 Tendencia de desgaste. Al saber el desgaste promedio para los Core Lifters y la cantidad de metros extraídos en las tres pruebas, es posible calcular la pendiente de la línea tendencia de desgaste.

Para el caso Core Lifter Regular la tendencia de desgaste por metro perforado es del 1.91 % como se muestra en el gráfico 4.

Grafico 4. Tendencia de desgaste Core Lifter Regular



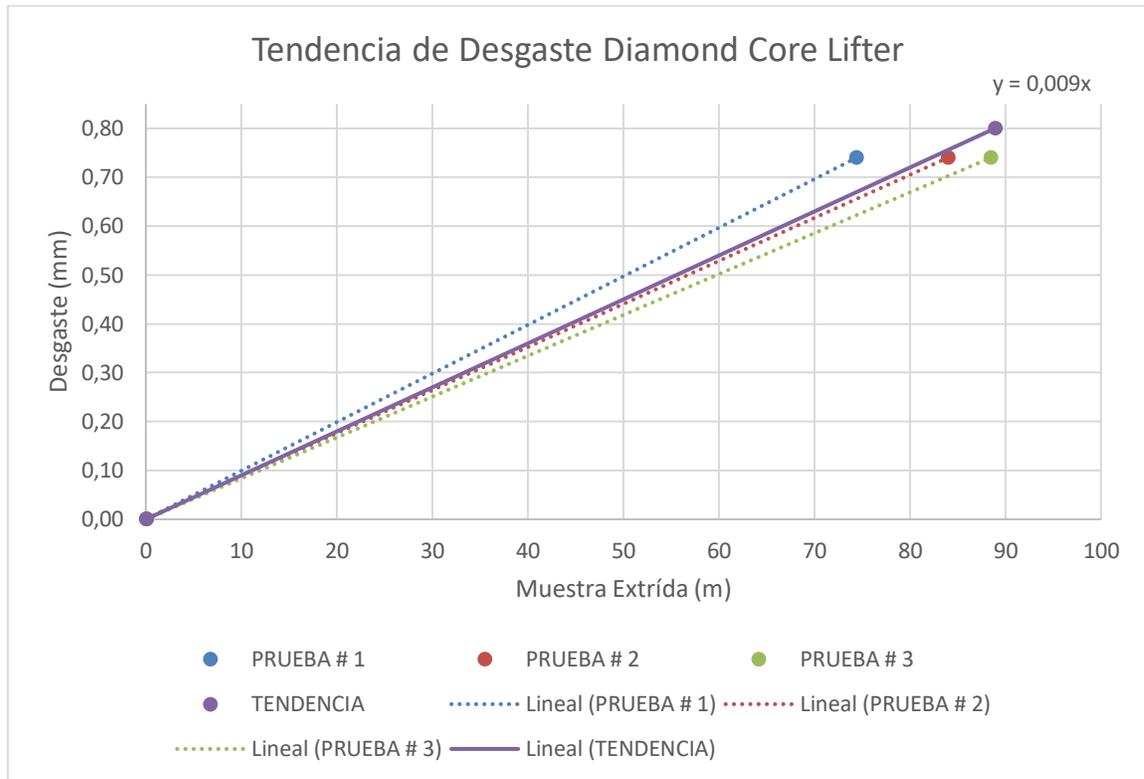
Con base en lo anterior se infiere que la tendencia de Desgaste por Metro Perforado del Core Lifter Regular o de Control se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 1. Tendencia de desgaste core Lifter regular o de control por metro perforado

$$Tendencia\ Desgaste\ de\ Core\ Lifter\ Regular\ por\ Metro\ Perforado\ X = \left( \frac{0,0191\ mm}{m} \right)$$

Para el caso Diamond Core Lifter la tendencia de desgaste por metro perforado es del 0.9 % como se muestra en el gráfico 5.

Grafico 5. Tendencia de desgaste Core Lifter Diamond



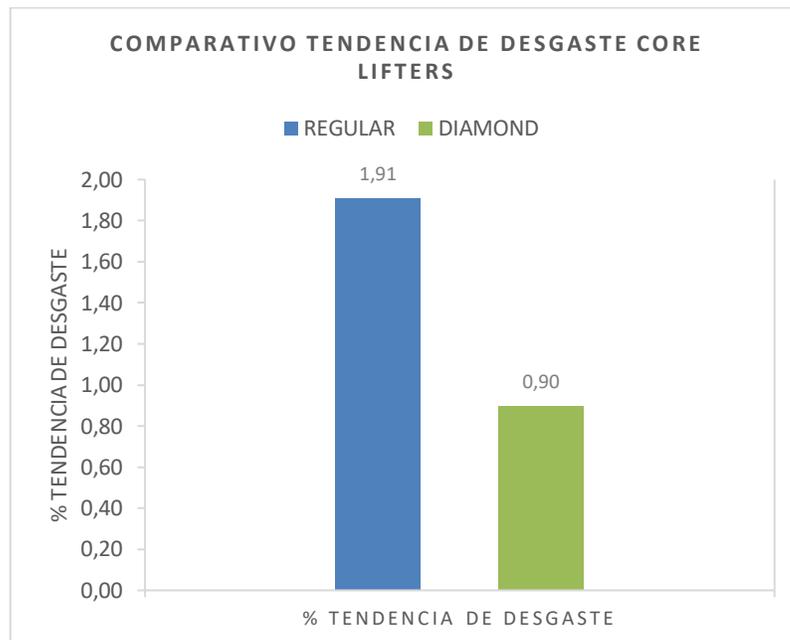
Con base en lo anterior se infiere que la tendencia de Desgaste por Metro Perforado del Diamond Core Lifter se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Tendencia de Desgaste de Diamond Core Lifter por Metro Perforado

$$Tendencia\ Desgaste\ de\ Diamond\ Core\ Lifter\ por\ Metro\ Perforado\ X = \left( \frac{0,009\ mm}{m} \right)$$

7.1.2 Porcentaje tendencia de desgaste de Diamond Core Lifter respecto al regular o control. Con el fin de comparar la tendencia de desgaste entre el Diamond Core Lifter y el regular o control se plantean las variables definidas en el gráfico 6.

Gráfico 6. Comparativo Tendencia de Desgaste Core Lifters



Se observa que la tendencia de desgaste del Core Lifter Diamon tiene un desgaste inferior que el Regular o de Control, lo cual equivale al 52.88% menos para los mismos metros perforados.

Con base en lo anterior y aplicando la ecuación 3, se puede determinar las diferentes variaciones porcentuales de las tendencias de desgaste.

Ecuación 3. Porcentaje tendencia de desgaste de Diamond Core Lifter respecto al regular o control.

$$\begin{aligned} & \% \text{ Tendencia de Desgaste Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} \\ &= \left( \frac{\%TDD - \%TDR}{\%TDD} \right) * 100\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \% \text{ Tendencia de Desgaste Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} \\ &= \left( \frac{1.91 - 0.9}{1.91} \right) * 100\% \end{aligned}$$

$\% \text{Tendencia de Desgaste Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} = 52.88 \%$

Donde:

- %TDD= Porcentaje de Tendencia de Desgaste Diamond Core Lifter
- %TDR= Porcentaje de Tendencia de Desgaste Core Lifter Regular o control

## 7.2 METROS DE NÚCLEO EXTRAÍDOS

Con la información obtenida en las 3 pruebas, se determinó (ver tabla 10) la tendencia central media y la desviación estándar.

Tabla 10. Comparativo Extracción de Metros Diamond Core Lifter Respecto al Regular o Control

COMPARATIVO EXTRACCIÓN DE METROS CORE  
LIFTER REGULAR Y DIAMOND

	REGULAR	DIAMOND
Prueba # 1	35.60 m	74.40 m
Prueba # 2	38.10 m	83.97 m
Prueba # 3	42.52 m	88.46 m

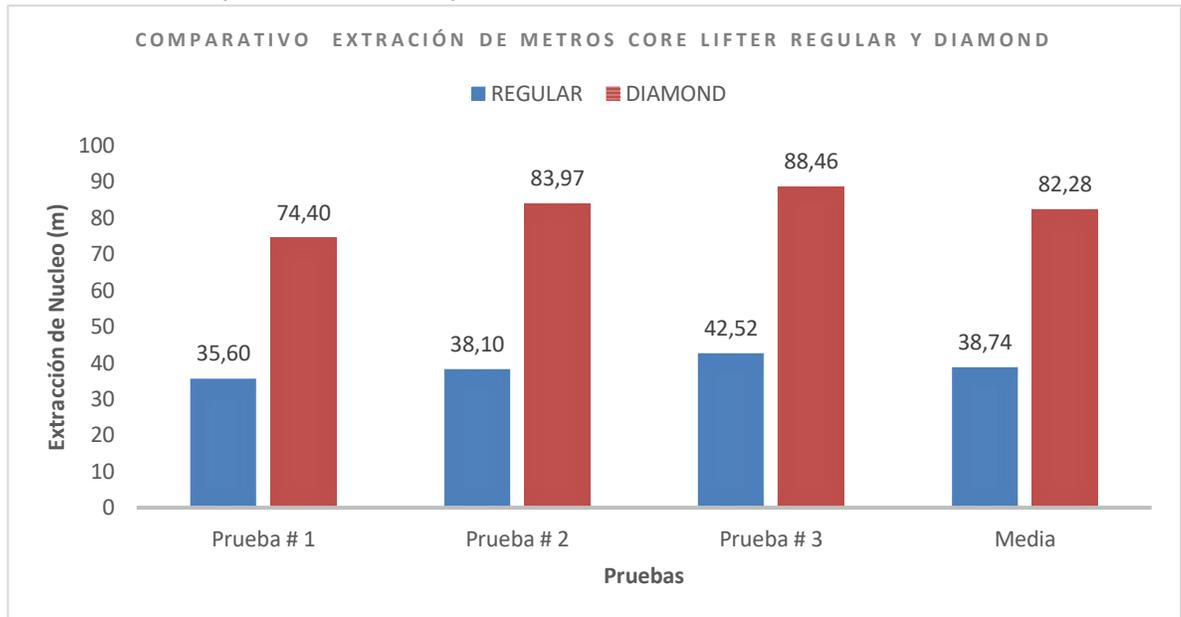
Media o Promedio                      38.74 m      82.28 m

Desviación Estándar (S):            2.86 m      5.86 m

### 7.2.1 Calculo de la Media Estándar.

Mediante la media estándar se determinó el promedio aritmético de la cantidad de metros perforados con cada Core Lifter en las 3 pruebas como se enseña en el gráfico 7.

Gráfico 7. Comparativo metros perforados Core Lifters



7.2.2 Porcentaje de muestra extraída con el Diamond Core Lifter respecto al regular o control.

Aplicando la ecuación 4 se determinó que con el Diamond Core Lifter se puede extraer un 52.91% más que con el regular o control.

Ecuación 4. Porcentaje de Muestra Extraída Con Diamond Core Lifter Respecto al Regular o Control.

$$\% \text{ Muestra Extraída Con Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} = \left( \frac{\sum D - \sum R}{\sum D} \right) * 100\%$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Muestra Extraída Con Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} \\ = \left( \frac{82.28 \text{ m} - 38.74 \text{ m}}{82.28 \text{ m}} \right) * 100\% \end{aligned}$$

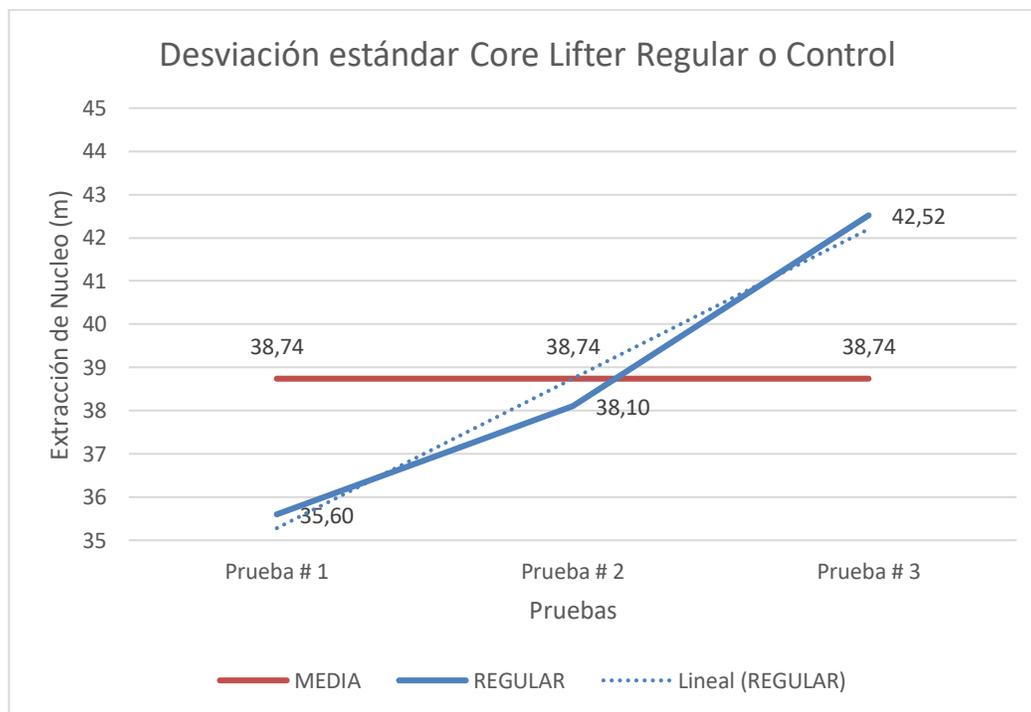
$$\% \text{ Muestra Extraída Con Diamond Core Lifter}_{\text{Resp. al control}} = 52.91 \%$$

Donde:

- $\sum D =$  Sumatoria de metros extraídos por el Diamond Core Lifter
- $\sum R =$  Sumatoria de metros extraídos por el Regular Core Lifter o control

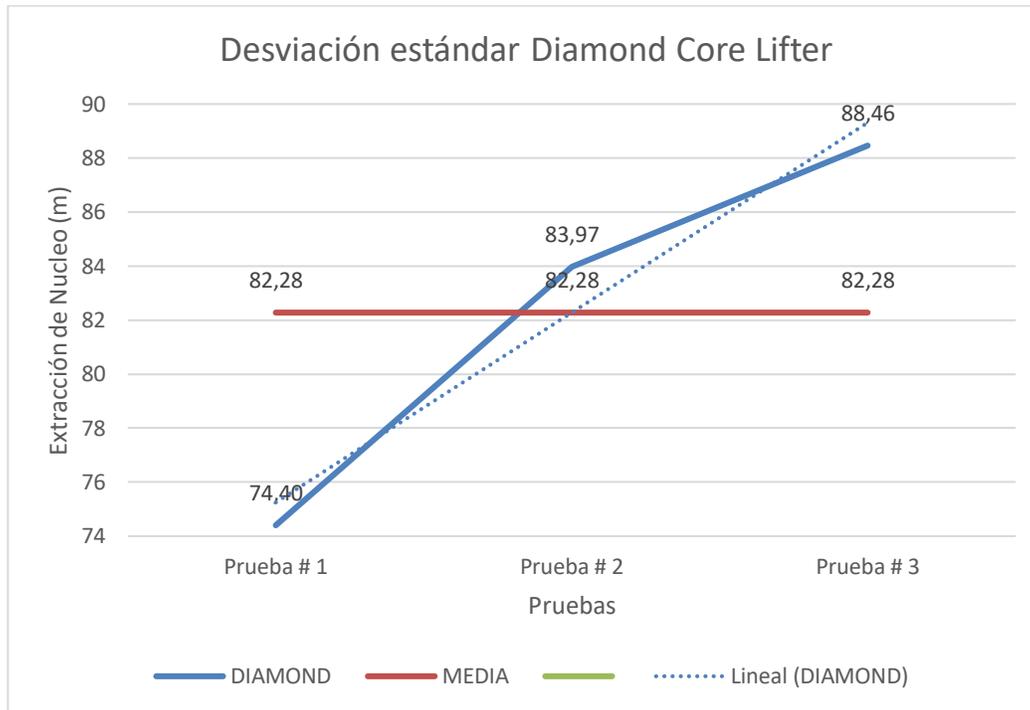
7.2.3 Desviación estándar. Enseña la dispersión de los datos respecto a la media. Para el caso del Core Lifter Regular nos indica que la medida de metros extraídos puede variar en  $\pm 2.86$  m respecto a la media, la cual es de 38.74 m como se indica en el gráfico 8

Gráfico 8. Desviación estándar Core Lifter Regular o Control



La desviación estándar para el Diamond Core Lifter nos indica que la cantidad de metros extraídos puede variar en  $\pm 5.86$  m respecto a la media, la cual es de 82.28 m como lo revela el gráfico 9.

Gráfico 9. Desviación estándar Diamond Core Lifter



#### 7.2.4 Costo por metro perforado.

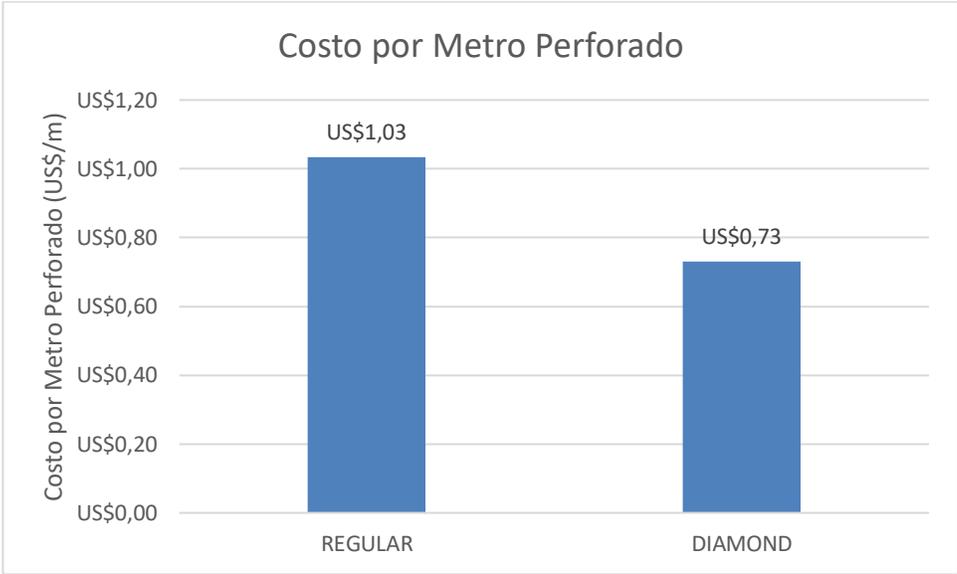
Teniendo como base el costo actual (2014) del core Lifter en el país de producción (Canadá) y los metros perforados tanto del Regular como del Diamond se puede calcular el costo por metro perforado

Tabla 11. Costo por Metro Perforado

#### COSTO POR METRO PERFORADO

	REGULAR	DIAMOND
Valor Unitario	US\$40.07	US\$60.06
Media Metro Perforado	38.74 m	82.28 m
Costo por Metro Perforado	US\$1.03/m	US\$0.73/m

Gráfico 10. Costo por Metro Perforado



## 8. CONCLUSIONES

El desgaste de un Core Lifter Diamond es 52.88% menor respecto al Regular bajo las condiciones de esta prueba.

El porcentaje de muestra extraída con un Core Lifter Diamond es 52.91% mayor al obtenido con uno Regular bajo las condiciones de esta prueba.

Con base en la desviación estándar obtenida tanto para las pruebas del Core Lifter regular como del Diamond, se puede inferir que la variación del desgaste entre prueba y prueba es despreciable, demostrando que este es un proceso determinístico.

La dureza del Diamond Core Lifter es de 43 HRC, la del Core Lifter Regular o de control es de 40 HRC. Se demuestra que el Core Lifter Diamond es 3 HRC más duro que el Regular

El costo por metro perforado con el Diamond Core Lifter es US\$ 0.30/m menor que usando el regular, lo cual equivale a un ahorro de 33.29%

Se valida la hipótesis nula que indica que es más económico usar Diamond Core Lifter que usar core Lifter regulares. Esto debido a que los primeros compensan su costo con rendimiento al ser capaz de retener una mayor cantidad de metros perforados.

## 9. RECURSOS

### 9.1 RECURSOS MATERIALES

- 3 Core Lifter Regulares o de Control Marca Fordia
- 3 Diamond Core Lifter Marca Fordia
- 1 Taladro de perforación de exploración corazonada diamantada.
- 1 Durómetro.
- 1 Core Barrel y tubería de perforación.
- 1 Cámara fotográfica.
- 1 Computador portátil.

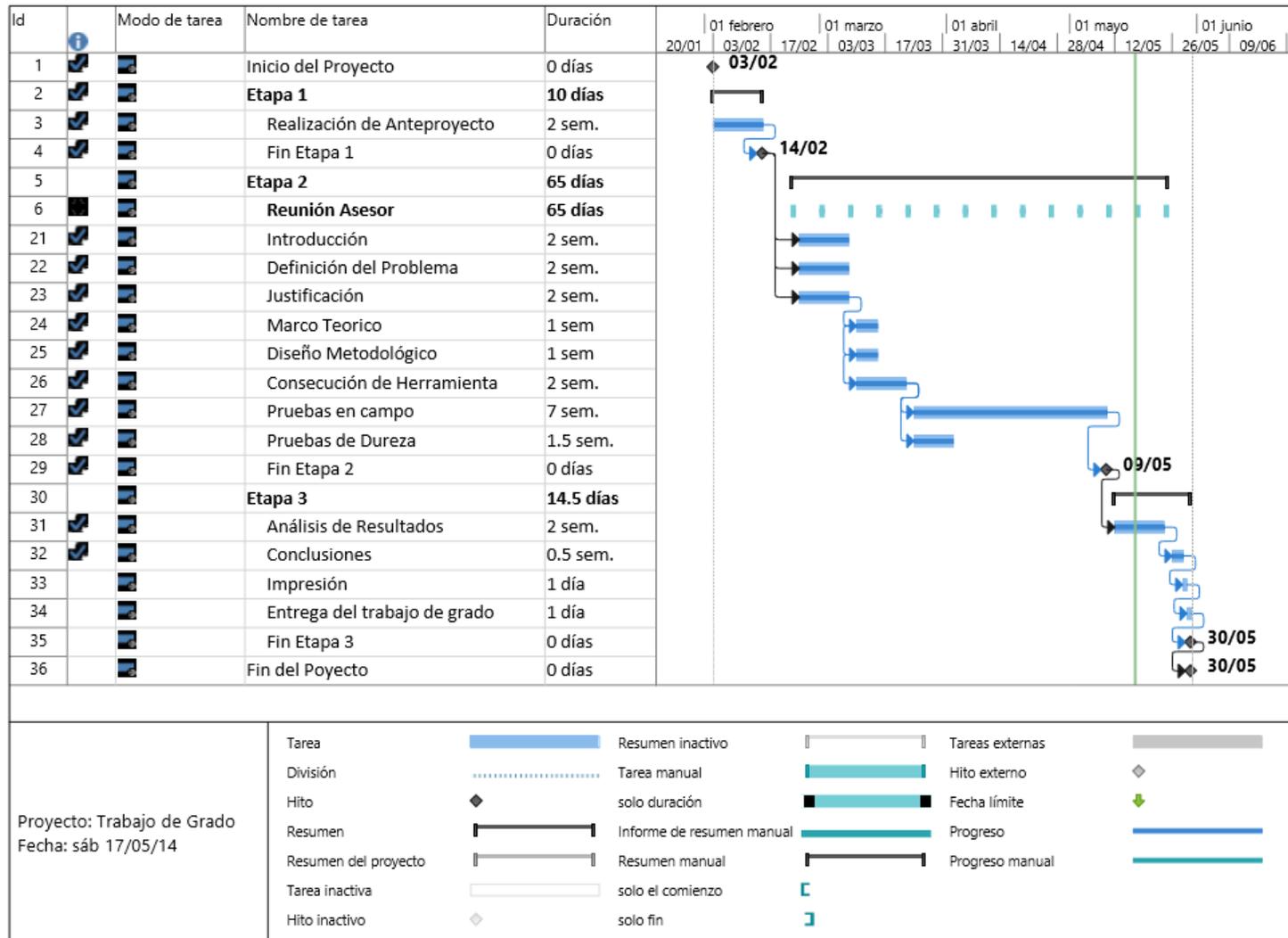
### 9.2 RECURSOS INSTITUCIONALES

- Fordia Colombia S.A.S.
- Explomin Colombia S.A.S.
- Ferro Temple LTDA
- Institución Universitaria Tecnológico Pascual Bravo.

### 9.3 RECURSOS FINANCIEROS

- \$ 700.000 Core Lifters Marca Fordia
- \$ 500.000 Viáticos
- \$ 300.000 Ensayo de Dureza
- \$ 120.000 Papelería

## 10. CRONOGRAMA



## **11. BIBLIOGRAFÍA**

- Manual de Campo Boart Long Year 2013.
- Manual Para Terreno Productos Diamantados. Boart Long Year.
- Manual de campo Diamantina Christensen Trading 2013.
- Diamond Drilling Handbook – W. F. Heinz – Cuarta Edición – 2007
- El Proceso de Exploración Minera Mediante Sondeos – Jorge Castilla Gómez y Juan Herrera Herbert - 2012

## 12. CIBERGRAFÍA

- LUBRICACIÓN Y LIBRO DE TRIBOLOGÍA Y LUBRICANTES. Disponible en internet:  
[http://www.fidena.edu.mx/biblioteca/MAQUINAS/Lubricacion\\_Libro%20de%20Tribologia%20y%20Lubricantes.pdf](http://www.fidena.edu.mx/biblioteca/MAQUINAS/Lubricacion_Libro%20de%20Tribologia%20y%20Lubricantes.pdf) [sábado, 06 de febrero de 2010]
- PRINCIPIOS DE TRIBOLOGÍA. Disponible en internet:  
<http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/ppiosdetribologia.pdf> [viernes, 28 de abril de 2006]
- TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. Disponible en internet: <http://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/TRIBOLOGIA.pdf> [martes, 01 de diciembre de 2009]
- HISTORIA DE LA PERFORACIÓN DIAMANTINA. Disponible en internet:  
<http://www.perforacionesdiamantinas.com/historia.html>

## ANEXO 1 CERTIFICADO DE DUREZA CORE LIFTERS



CERTIFICADO N° 001

Medellín, Mayo 05 de 2014

Señores:  
TALLER INDUSTRIAL ALEJO  
Medellin

ASUNTO: CERTIFICADO DE DUREZA

FERROTEMPLE LTDA con NIT 900.194.103-7 certifica lo siguiente:

INSPECCION DE DUREZA DE 2 ANILLOS CON ROSCA INTERNA A (45-48) RC

ORDEN DE SERVICIO N°

Atentamente,



MANUEL MOSQUERA CÓRDOBA  
Gerente Técnico

Carrera 52 B No. 8 Sur 17 Tels.: 444 61 04 - Telefax: 255 57 25 Celular: 310 540 99 38  
E-mail: ferrotemple@une.net.co www.ferrotemple.amawebs.com Medellin - Colombia

## ANEXO 2. COTIZACIÓN CORE LIFTERS



**FORDIA COLOMBIA S.A.S.**  
**NIT. 900.465.686-2**  
 Calle 79B Sur 50 - 150 Bodega N°147 - Promision  
 La Estrella - Antioquia  
 Telf : 448-0896

A: LUIS FERNANDO SANCHEZ TEL.:  
 Att: Sr. Luis Fernando Sanchez FAX:  
 Fecha: 20 de Mayo de 2014 Email: [lfsanchez@gmail.com](mailto:lfsanchez@gmail.com)

### COTIZACION # 1005

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPTION	Precio unit. US \$	Precio Total US \$	T.C 1,921.16		ENTREGA
					Precio unit. Pesos	Precio Total Pesos	
1	3	HWL CORELIFTER BROACHED DIAMOND	61.50	184.50	118,151	354,454	INMEDIATA
2	3	HWL CORELIFTER BROACHED	40.07	120.21	76,981	230,943	INMEDIATA
Sub Total				<b>304.71</b>		<b>585,397</b>	
TOTAL \$ US:				<b>304.71</b>	TOTAL \$ CO	<b>585,397</b>	

Los precios no incluyen el IVA  
 Se cancela en pesos colombianos (COP) a la TRM de la fecha factura

Saludos cordiales,

Francisco Torres  
 Asistente de Compras y Cobranzas

**FORDIA COLOMBIA SAS**  
 Telf : 321 753 5896  
 Email: [ftorres@fordia.com](mailto:ftorres@fordia.com)  
 Web: [www.fordia.com](http://www.fordia.com)