

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS
DE DESGASTE EN BROCAS DE
PERFORACIÓN DE TESTIGOS DIAMANTINAS**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Mecánica

AUTOR

Alejandro Weston Teullet

ASESOR

Samuel Charca Mamani

Lima – Perú

Setiembre 2020

Dedicatoria:

A mi enamorada, mi familia, mis amigos y los profesores que
nos acompañaron a lo largo de este camino.

Agradecimientos:

A mi padre, por siempre motivar mi interés por la ingeniería.

A mis profesores Samuel, Carlos, Helard y Omar por su consejo durante la elaboración de esta investigación. A mis compañeros de trabajo Alex, Jorge, Renzo y Enrique por su ayuda, recomendaciones y consejos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Alcance	4
Antecedentes	5
Justificación y motivación	6
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	8
1.1 Estado del arte	8
1.1.1 ASTM B611 – Método estándar para la resistencia al desgaste abrasivo de carburos cementados	8
1.1.2 ASTM G65 –Método estándar para medir la abrasión utilizando el aparato de rueda con arena/neopreno	10
1.1.3 ASTM G190 – Guía estándar para el desarrollo y selección de ensayos de desgaste	13
1.1.4 Ensayos tribológicos de insertos de broca	15
1.1.5 Ensayo de desgaste que simula la situación tribológica en perforación de roca	17
1.1.6 Estudio de los mecanismos de desgaste en brocas diamantinas utilizada en la perforación de testigos	18
1.2 Brocas	21
1.2.1 Perforación de testigos	22
1.2.2 Parámetros de Perforación	24
1.2.3 Configuración de las vías de agua	28
1.2.4 Tipos de terreno	31

1.3 Tribología	33
1.3.1 Desgaste	33
1.3.2 Desgaste erosivo	34
1.3.3 Desgaste abrasivo	35
CONCLUSIONES	38
REFERENCIAS	39

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Especificaciones de los procedimientos A, B, C, D, y E	12
Tabla 1.2 Parámetros principales de perforación utilizados en los pozos	19
Tabla 1.3 Parámetros de los ensayos en laboratorio	20
Tabla 1.4 Dimensiones y parámetros recomendados por los principales fabricantes de brocas	24

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama del aparato para la evaluación de la resistencia al desgaste	9
Figura 1.2 Diagrama del aparato propuesto por la regla G65 para la evaluación de la resistencia al desgaste	11
Figura 1.3 Broca de botones sin desgaste y broca desgastada	15
Figura 1.4 Configuración de la regla ASTM G65 modificada	16
Figura 1.5 Configuración experimental del ensayo de Oskarsson	17
Figura 1.6 Configuraciones de los ensayos de Oskarsson y From	18
Figura 1.7 Ilustración de los pozos estudiados por From	19
Figura 1.8 Esquema de ensayo en laboratorio y fotografía del ensayo implementado	20
Figura 1.9 Broca diamantada para la perforación de testigos	22
Figura 1.10 Esquema de una broca perforando roca	23
Figura 1.11 Velocidades de rotación recomendadas según el tamaño de broca	25
Figura 1.12 Caudal de fluido recomendado según el tamaño del pozo	26
Figura 1.13 Carga máxima recomendada sobre brocas según su tamaño	27
Figura 1.14 Razón de penetración recomendada según el tamaño de la broca	28
Figura 1.15 Configuración de distintas vías de agua según los modelos de Dimatec.	29
Figura 1.16 Vista superior de una broca de vías regulares y una turbo	30
Figura 1.17 Matriz de selección de matriz según el terreno perforado	32
Figura 1.18 Esquema de desgaste erosivo	34
Figura 1.19 Esquema de desgaste abrasivo.....	35
Figura 1.20 Esquema de modos de desgaste abrasivo por deformación plástica	36
Figura 1.21 Esquema de una aspereza dura sobre una superficie de menor dureza ..	37

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es diseñar una máquina especializada para la evaluación de segmentos de brocas diamantinas para perforación de testigos. Se basa sobre trabajos previos en los que se demostró que es posible reproducir los mecanismos de desgaste que interactúan en la broca durante la perforación, mediante el uso de un torno que sostiene un cilindro de roca y un segmento de broca presionado contra el cilindro. La presente investigación presenta los planos estructurales y eléctricos necesarios para construir la máquina. Además, selecciona cada componente necesario en el diseño. El programa Autodesk Inventor se utilizó para el diseño de los componentes y el diseño estructural, así como el análisis de cargas sobre los componentes.

Palabras clave: brocas diamantinas, diseño, desgaste, ensayo abrasivo, rendimiento, matriz diamantada

ABSTRACT

DESIGN OF A MACHINE FOR DIAMOND CORE BITS WEAR TESTING

This thesis work objective is to design a specialized machine for diamond core bit wear testing. It is based upon previous works in which it was shown that is possible to reproduce the wear produced in core drilling through a lathe holding a rock cylinder and a core bit sample pressed against it. This thesis work presents the structural, electric, and sensor schematics required to build the machine. It also selects every component necessary in the design. Autodesk Inventor is used for the components and structural design, as well as analyzing loads on the parts.

Key words: *design, machine, core bit wear, diamond core bits, wear testing, abrasion testing*

INTRODUCCIÓN

La minería es un sector de gran impacto económico para el Perú. En el 2018, representó el 10% de nuestro PBI, además del 61% del valor total de las exportaciones. [1]. Genera divisas que contribuyen sustancialmente al desarrollo del Perú.

Una parte crítica del rubro es la exploración minera. Solamente en el 2017, se invirtieron aproximadamente 8 mil millones de dólares al redor del mundo en exploración [2]. Y, siendo más específicos, durante el año 2018, el costo de la inversión en exploración y desarrollo solamente por la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. y Subsidiarias fue mayor a 126 millones de dólares [3].

En la exploración, la parte de perforación se encarga de la obtención de testigos. Los testigos son las muestras del suelo, que son analizados para determinar la existencia de mineral y medir cómo se distribuye la veta [4].

La perforación se realiza mediante la unión de la broca, que es la herramienta de corte, al extremo inferior de una tubería de acero. Está compuesta por un casco de acero y una corona. La corona es un material compuesto, donde la matriz está conformada generalmente por una aleación de bajo punto de fusión, y el refuerzo por partículas de tungsteno y diamantes [5]. Se aplica una carga y se hace girar el conjunto en sentido horario. La carga aplicada sobre la broca controla el avance, que se define como los metros penetrados por unidad de tiempo. Generalmente, se mide en pulgadas por minuto.

Mientras se está perforando, la muestra de suelo obtenida se deposita en lo que se llama el tubo interior, un dispositivo que se introduce concéntricamente al interior de la tubería de acero y anexa a la broca. Al llenarse con la muestra del suelo, se lanza el pescador para retirarlo y colocar la muestra en unos depósitos especiales. Luego, se vuelve a introducir el tubo interior y se prosigue con la perforación. Este proceso se repite cada vez que el tubo interior alcanza su capacidad de almacenamiento.

Por otro lado, cada vez que la broca se consume, todo el conjunto debe ser retirado. La broca consumida se cambia por una nueva, y se coloca el conjunto de nuevo en el pozo. El tiempo total de este proceso es directamente proporcional a la profundidad en la que se está perforando. A mayor profundidad, mayor el tiempo utilizado en cambiar la broca [6].

Una forma de reducir dichos tiempos es mejorar el rendimiento de la broca, pues debe ser cambiada con menos frecuencia. Si se logran mayores rendimientos, se incrementa directamente el tiempo que el equipo está trabajando.

La presente investigación propone el diseño de un banco de pruebas capaz de reproducir el desgaste generado en la broca, así como la simulación de las condiciones que se dan en una perforación. El banco de pruebas tiene como objetivo homogenizar las condiciones que causan el desgaste en las brocas y acelerar su proceso de desarrollo.

Alcance

La presente investigación se enfoca en el diseño de un banco de pruebas para la evaluación del desgaste de brocas, en otras palabras, el desgaste de materiales compuestos con matriz metálica y refuerzo de diamantes, que reproduzca los parámetros y condiciones de perforación utilizados en campo, para su posterior implementación en el laboratorio de investigación y desarrollo de la empresa Boyles Bros Diamantina S.A.

El estudio utiliza los parámetros utilizados en la perforación diamantina para su reproducción en laboratorio. El diseño se realizará en un programa asistido por computadora (CAD). Los planos eléctricos y el sistema de control serán realizados en el programa FluidSIM de Festo.

La presente investigación solamente busca proveer el diseño del banco de pruebas para reproducir el desgaste que ocurre en las brocas durante la perforación diamantina, con el objetivo que posteriormente pueda ser utilizada para el análisis y predicción del

rendimiento de nuevas composiciones y concentraciones de diamantes sin la necesidad de realizar extensivas pruebas en campo.

Antecedentes

A partir del año 2015, la empresa Boyles Bros Diamantina S.A. decidió volver a invertir en su área de investigación y desarrollo. Uno de los proyectos desarrollados por el área es la caracterización de las propiedades mecánicas de las matrices analizando su elasticidad, dureza, resistencia al impacto, esfuerzo de flexión y resistencia a la abrasión [7] para correlacionar los datos obtenidos con el rendimiento de las brocas en el campo.

Para evaluar la resistencia a la abrasión, se utiliza una variación (para uso interno) de la regla ASTM B 611 – 85, Standard Test Method for Abrasive Wear Resistance of Cemented Carbides, sobre las matrices [8]. Este método de ensayo no puede ser utilizado para la evaluación del material compuesto conformado por la matriz y diamantes, pues el ensayo genera un desgaste excesivo sobre la rueda de acero antes que produzca resultados significativos sobre la probeta.

Por otro lado, en el año 2012 la Universidad de Uppsala, en Suecia, en colaboración con Sandvik Mining Tools, publicó un estudio donde se analizaba la posibilidad de reproducir el desgaste generado en insertos de carburos de tungsteno en un ensayo de laboratorio. Dichos insertos se encuentran en brocas de botones y triconos. A diferencia de una perforación real, donde las brocas percuten y giran sobre el terreno, se mantuvo el inserto fijo en una posición mientras se aplicaba rotación al cilindro. Sujetaron un cilindro de granito en un torno, y aplicaron una carga al inserto de carburo de tungsteno en contacto con el cilindro. Finalmente, la rotación del cilindro produjo desgaste sobre el inserto.

Dicho estudio concluye que el patrón de desgaste observado en el ensayo y una perforación en campo es similar, por lo que se concluye que están actuando los mismos mecanismos de desgaste [9].

En el 2018, una vez más, la universidad de Uppsala, en alianza con la compañía de exploración Epiroc (antes llamada Atlas Copco), publicó una tesis cuyo objetivo fue comprender y analizar los mecanismos de desgaste en las brocas diamantadas, con la finalidad de hallar maneras de incrementar la vida útil de las brocas y así reducir el costo de la perforación.

Dicho estudio, en resumen, estudió los mecanismos de desgaste de las brocas para perforación testigos en perforaciones en el campo. Además, modificó el ensayo de laboratorio realizado para los insertos de carburo de tungsteno para reproducir el desgaste.

El estudio halló que los mecanismos de desgaste varían significativamente según los parámetros de perforación, y que estos definen la vida útil de las brocas [10].

Justificación y motivación

La empresa Boyles Bros Diamantina S.A., en su esfuerzo por el desarrollo nuevos productos de calidad mundial, desea implementar un banco de pruebas para brocas diamantinas y así reducir la cantidad pruebas en campo, pues representan mayores costos de desarrollo en periodos de tiempos más largos.

Se sabe que las propiedades de la matriz, sean estas su módulo elástico, dureza, resistencia al impacto y esfuerzo de flexión [11], así como los parámetros de perforación utilizados de velocidad de rotación, carga sobre la broca y caudal del fluido [12] y las condiciones otorgadas por el tipo de suelo, sean estas con partículas duras o blandas [13] se encuentran directamente relacionadas con el desgaste que presentará la broca, pues los mecanismos de desgaste son un sistema complejo con muchas variables[14].

Por lo tanto, si se determinara la correlación entre el desgaste de la broca en el campo, con el desgaste ensayado en laboratorio para un tipo de terreno, sería posible estimar el comportamiento de una broca para un terreno específico.

Además, un banco de pruebas donde puedan ser controladas dichas propiedades y parámetros, permitirá observar de manera clara el efecto de cada variable sobre el desgaste de una broca. La máquina permitirá variar parámetros para encontrar maneras que la broca perforo más metros, de manera más rápida.

El objetivo final es desarrollar una broca más eficiente, para aumentar el tiempo efectivo de perforación, reduciendo costos de exploración.

Un mayor rendimiento en una broca afecta directamente el costo total del sondeo. Por ejemplo, normalmente se define un turno de perforación como un periodo de 12 horas. Se tiene un promedio de 25 metros perforados por turno, y el tiempo promedio de cambio de broca para una perforación a 500 metros de profundidad está entre 4 y 5 horas. Cabe resaltar que el tiempo de cambio de broca está directamente relacionado con la profundidad del pozo. Este tiempo representa el retiro de la tubería, cambiar la broca consumida por una nueva, e insertarla de nuevo en el pozo. Entonces, se puede definir el rendimiento de la broca como el total de metros perforados hasta consumirla. Dicho rendimiento promedio depende del terreno y condiciones de perforación. Si se diseñara una broca con el doble de rendimiento, el tiempo perdido en el cambio de broca sucedería con menos frecuencia, pues se tendría doble de metros perforados.

Objetivo general

Diseñar un banco de ensayos para la evaluación del desgaste de brocas diamantinas.

Objetivos específicos

- Determinar el rango de cargas a la que estará sometida la probeta.
- Determinar las cargas que soportará la estructura del banco de ensayos.
- Diseñar los planos de la estructura del banco de ensayos y de las conexiones eléctricas.

CAPÍTULO I

MARCO TEORÍCO

El objetivo de este estudio es diseñar una máquina para la evaluación de segmentos de brocas diamantadas para testigos, que logre reproducir los mecanismos de desgaste que afectan las mismas, y reduzca los costos de investigación involucrados con enviar brocas a campo. A continuación, se detallan los métodos de ensayo más comunes en la industria, así como los más especializados en el rubro.

1.1. Estado del arte

El desgaste de brocas diamantinas para perforación de testigos es un tema poco estudiado. Se puede intuir que se han realizado estudios no publicados, por secretismo de las distintas compañías en el rubro y la protección de sus productos. Solamente en los últimos años han empezado a surgir estudios donde se intenta analizar los mecanismos de desgaste de las brocas en perforación en roca, sin embargo, las de perforación de testigos continúan sin mayores investigaciones.

1.1.1. ASTM B611 –Método estándar para la resistencia al desgaste abrasivo de carburos cementados

La guía ASTM B611 es una de las guías comúnmente utilizadas en la industria para medir la resistencia a la abrasión de carburos cementados. Presenta una serie de indicaciones para la máquina donde se realizará el ensayo, así como la preparación de la probeta a ensayar.

La figura 1.1 muestra la configuración para la máquina. Incluye un contenedor de acero, una rueda de acero AISI 1020 recocido y aletas sobre dicha rueda para llevar el

abrasivo sobre el espécimen. El espécimen es sujetado perpendicularmente contra la rueda, y a este se le aplica una carga total de 20kg, mediante un brazo de palanca de 2 a 1.

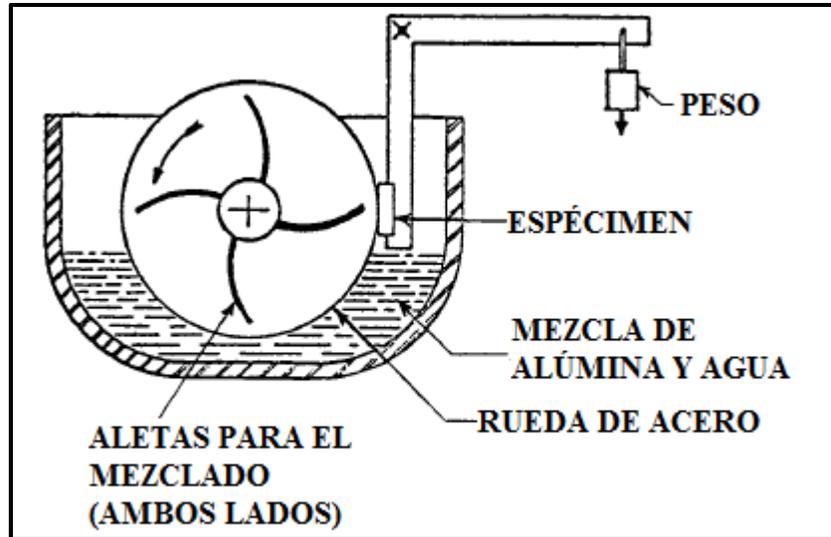


Fig. 1.1: Diagrama del aparato para la evaluación de la resistencia al desgaste.
Fuente: Guía ASTM B611 [8].

El abrasivo que se debe usar es óxido de aluminio (Al_2O_3), malla 30. La mezcla de agua y abrasivo tiene una proporción de 4cm^3 por 1g , y se debe llenar el contenedor hasta 25mm del centro de la rueda. Finalmente, se gira la rueda de acero a una velocidad de 100 RPM hasta llegar a las 1000 revoluciones. Se retira el espécimen, y, conociendo su densidad, se pesa, para compararlo con su peso inicial [8].

La resistencia a la abrasión (A) estará dada por la ecuación

$$A = (L/1000 D) \cdot 10^5 \quad (1)$$

Donde L es la pérdida de peso en gramos, D la densidad del espécimen en g/cm^3 . Se conoce como número de desgaste (W) en $1/\text{cm}^3$.

$$W = D/L \quad (2)$$

En lo que es la industria de manufactura de brocas de perforación diamantina, la guía ASTM B611 es buena para la evaluación de la resistencia a la abrasión de las matrices. Sin embargo, el problema es que no refleja dicha propiedad una broca en una perforación real. La matriz en este ensayo, no incluye diamantes, y el desgaste es una respuesta de sistema, por lo que el contenido de la matriz, el material del cuerpo contra el cual se está desgastando (la rueda de acero) y las condiciones de operación influyen.

Se ha intentado realizar este ensayo con una probeta conformada por el material compuesto de la matriz y diamantes, sin embargo, la rueda se desgastaba de manera agresiva antes que la probeta mostrara un desgaste significativo. Por lo que nace la necesidad del desarrollo de un ensayo que, primero, represente de manera más cercana la perforación en roca, y que sea lo suficientemente agresivo para generar un desgaste significativo y compararlo con brocas conformadas por matrices con otras aleaciones [16].

1.1.2. ASTM G65 –Método estándar para medir la abrasión utilizando el aparato de rueda con arena/neopreno

La guía ASTM G65, al igual de la B611, es adecuada para medir la resistencia a la abrasión por partículas duras de materiales metálicos. La máquina tiene una configuración similar a la B611, siendo las diferencias la superficie de la rueda metálica recubierta con caucho, que el contenedor no lleva agua y un flujo de partículas abrasivas colocado directamente entre el espécimen y la rueda. A diferencia del ensayo B611, es un ensayo en seco. La figura 1.2 muestra la configuración de este ensayo.

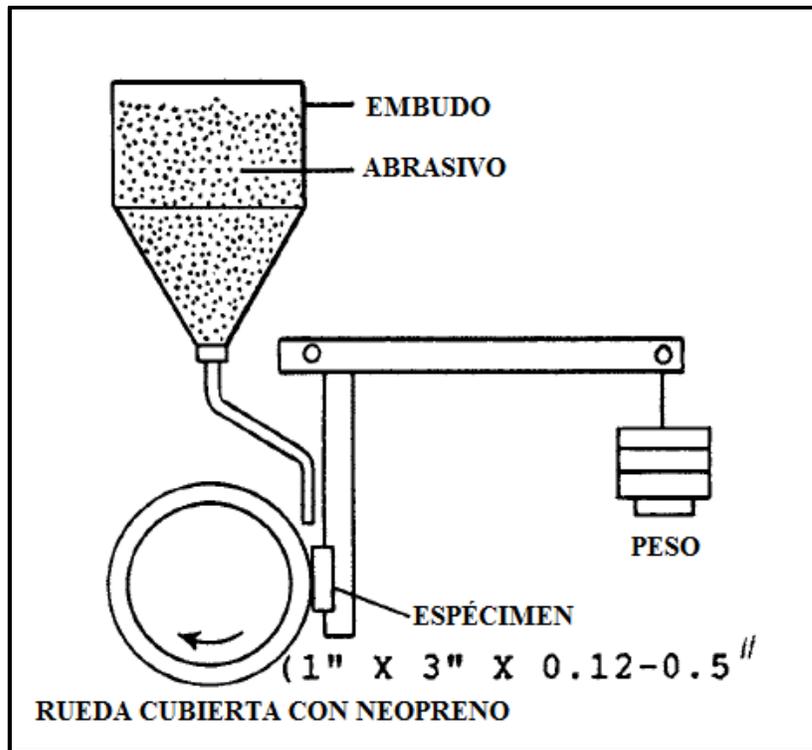


Fig. 1.2 Diagrama del aparato propuesto por la regla G65 para la evaluación de la resistencia al desgaste.
Fuente: Guía ASTM G65 [17].

La guía indica que la severidad de la abrasión en cualquier sistema depende del tamaño de la partícula abrasiva, su tamaño, su dureza, la magnitud del estrés sometido al material por la partícula y la frecuencia de contacto entre el espécimen y las partículas abrasivas. Por lo tanto, la cantidad de revoluciones, especificaciones para la geometría del espécimen, el abrasivo a utilizar, su tamaño de partícula y su flujo, especificaciones de material y dureza para la rueda recubierta por caucho y la carga a utilizar sobre el espécimen son especificadas para realizar el ensayo.

Cinco posibles procedimientos son especificados (A, B, C, D, E) según el ancho del espécimen o su resistencia a la abrasión, donde se especifica la carga sobre el espécimen y las revoluciones de la rueda.

Procedimiento	Carga ejercida contra el Espécimen, (N)	Revoluciones de la rueda	Abrasión Lineal (m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71.8
D	45	6000	4309
E	130	1000	719

Tabla 1.1 Especificaciones de los procedimientos A, B, C, D y E
Fuente: Guía ASTM G65 [17].

La abrasión lineal hace referencia a la distancia que la abrasión por partículas genera utilizando una rueda de 228.6mm de diámetro. Las revoluciones especificadas en la tabla 1.1 deberán ser modificadas según cambie el diámetro de la rueda, que será desgastada con el espécimen conforme se ensayen.

Los resultados se presentan calculando el volumen perdido, según la ecuación

$$VL = \frac{m}{p} \times 1000 \quad (3)$$

Donde “m” es la masa perdida en gramos (g) y “p” la densidad de la probeta en (g/cm³).

El “volumen perdido ajustado” compensa el desgaste el diámetro de la rueda conforme se ensayan los especímenes, y se calcula según

$$AVL = VL \times \frac{228.6}{WD} \quad (4)$$

Donde “WD” el diámetro de la rueda después del ensayo del espécimen en mm [17].

El problema que presenta este ensayo para la caracterización de segmentos de broca, al igual que en la B611, es que no refleja de manera real el sistema. Un espécimen de segmento de broca real, compuesto por una matriz metálica y refuerzo de diamantes, al ser ensayado según los parámetros establecidos, no presenta desgaste significativo [16]. Al

modificar los parámetros de carga, revoluciones y abrasión lineal, se presentó un desgaste agresivo de la rueda antes que el segmento de broca presentara resultados medibles. Además, lo que se busca es representar el sistema de desgaste que ocurre en el campo, por lo que también este ensayo resulta ser inadecuado.

1.1.3. ASTM G190 – Guía estándar para el desarrollo y selección de ensayos de desgaste

El desgaste es un fenómeno complejo que involucra distintos factores. Es una respuesta de sistema, no una propiedad de un material. La guía ASTM G190 propone una serie de consideraciones para el diseño del diseño ensayos de desgaste, dando las herramientas para la simulación apropiada de distintas situaciones de desgaste en aplicaciones reales. La palabra “simulación” hace referencia al sistema de desgaste diseñado para la evaluación del fenómeno en el laboratorio, mientras que “aplicación” al sistema en el campo de trabajo real.

La primera consideración es el entorno que se busca simular con el ensayo. Una simulación correcta asegura que los mecanismos de desgaste. La simulación exacta de un sistema de desgaste no es posible, por lo que se deben aceptar ciertas diferencias, y evaluadas detalladamente para asegurar que la simulación presente resultados significativos respecto a la aplicación.

Las condiciones de contacto, tales como el movimiento entre las superficies de contacto, carga, abrasivo, lubricación y ambiente generalmente deben ser representativas de la aplicación. En el caso de perforación con brocas para la extracción de testigos, estos parámetros son el movimiento rotatorio de la broca, la carga aplicada, la composición de la roca perforada, las partículas de roca desprendidas y el fluido de perforación.

Debe considerarse también acelerar el proceso de desgaste. Sucede que muchas veces el desgaste se da en periodos largos de tiempo, por lo que hacer una simulación en tiempo real puede resultar difícil y costosa. Se puede lograr acelerar el proceso mediante la alteración de

parámetros, teniendo en cuenta que los mecanismos de desgaste suelen cambiar según sus condiciones de operación. Alterar los valores de la carga aplicada y velocidad puede causar que un mecanismo de desgaste predomine sobre otro, resultando en un sistema que no simula la aplicación real.

El diseño del banco de ensayos, la preparación del espécimen y una correcta especificación del protocolo del ensayo influyen considerablemente en la repetibilidad y precisión de los resultados.

Se recomienda que al documentar el ensayo diseñado se especifiquen los siguientes puntos:

1. Aparato (configuración de los elementos del ensayo)
2. Geometría de contacto
3. Tipo de movimiento
4. Carga
5. Velocidad
6. Descripción de los materiales
7. Preparación de la superficie y materiales
8. Aspereza
9. Condiciones ambientales
10. Condiciones del medio de desgaste
11. Descripción del lubricante utilizado
12. Descripción del tiempo de desgaste
13. Observaciones no usuales

Se debe tener en cuenta que la existencia de una correlación entre la simulación del desgaste y su aplicación real no está asegurada, pues la simulación típicamente no es exacta. La correlación debe ser demostrada por comparación de resultados, entre los ensayos y aplicaciones [18].

1.1.4 Ensayos tribológicos de insertos de broca

En el año 2012, la Universidad de Uppsala publicó la tesis de Jakob Oskarsson, donde se buscó hallar un método adecuado para la evaluación tribológica de insertos de carburos cementados en brocas de botones. Este particular tipo de brocas se utilizan para realizar perforaciones para introducir explosivos en el proceso de voladura.



Fig. 1.3 Broca de botones sin desgaste y broca desgastada.
Fuente: Jakob Oskarsson, Tribological testing of drill bit inserts [19].

Sucede que existen distintos métodos para la evaluación del desgaste de carburos cementados, sin embargo, ninguno está diseñado específicamente para la industria de la perforación de roca. Esta investigación revisó los métodos existentes para ensayos de desgaste, y prosiguió a diseñar un método específico para las necesidades de esta industria.

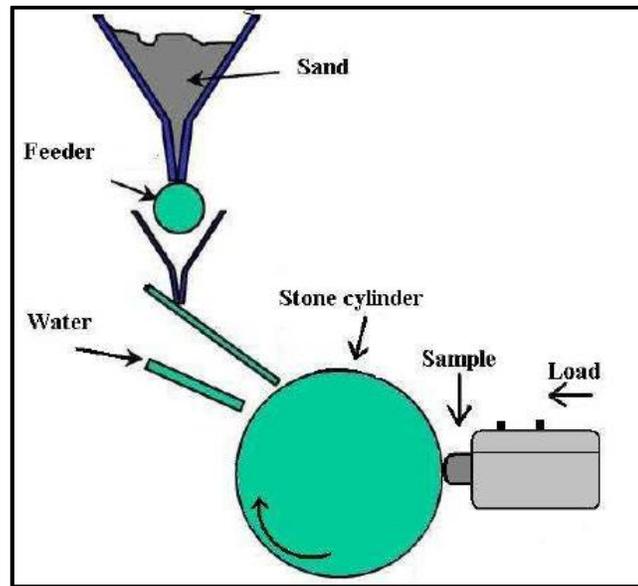


Fig. 1.4 Configuración de la regla ASTM G65 modificada
Fuente: Jakob Oskarsson, Tribological testing of drill bit inserts [19].

Oskarsson diseñó una versión modificada del ensayo ASTM G65, donde se reemplazó la rueda recubierta de caucho por un cilindro de roca, tal como se muestra en la figura 1.4. Dicho cilindro fue sostenido en un torno. El desgaste es una respuesta del sistema, donde importan las propiedades de los materiales en contacto, por lo tanto, este cambio es lo más adecuado para simular lo que sucede en la perforación de roca.

Se ejerce una carga sobre el inserto contra el cilindro de roca mediante la regulación de la tensión de un resorte. Además, una mezcla de arena y agua fue añadida en vez de su alimentación por separado. La tesis concluye que el método diseñado es adecuado para la reproducción de los mecanismos de desgaste que suceden en una perforación real [19]. La figura 1.5 muestra una fotografía de la configuración utilizada por Oskarsson.



Fig. 1.5 Configuración experimental del ensayo desarrollado por Oskarsson.
Fuente: Jakob Oskarsson, Tribological testing of drill bit inserts [19].

1.1.5 Ensayo de desgaste que simula la situación tribológica en perforación de roca

Anna From realizó su investigación sobre el trabajo de Oskarsson. Se concentró en desarrollar más el método y contestar las preguntas que Oskarsson no resolvió, como ¿Por qué la carga sobre el inserto no parece mostrar una influencia sobre el desgaste?

Para optimizar el trabajo de Oskarsson, From decidió que utilizar alimentaciones por separado de partículas abrasivas y agua era lo más eficiente, pues una sola alimentación con una mezcla de estas presentaba problemas. Las partículas se sedimentaban en la tubería y no se tenía certeza de la cantidad de abrasivo que llegaba a la muestra. Además, From decidió

posicionar la alimentación del agua y abrasivo directamente sobre el inserto, para asegurar la cantidad de partículas que se encontraban en contacto con él. La figura 1.6 presenta un esquema de las configuraciones del ensayo utilizadas por Oskarsson y From.

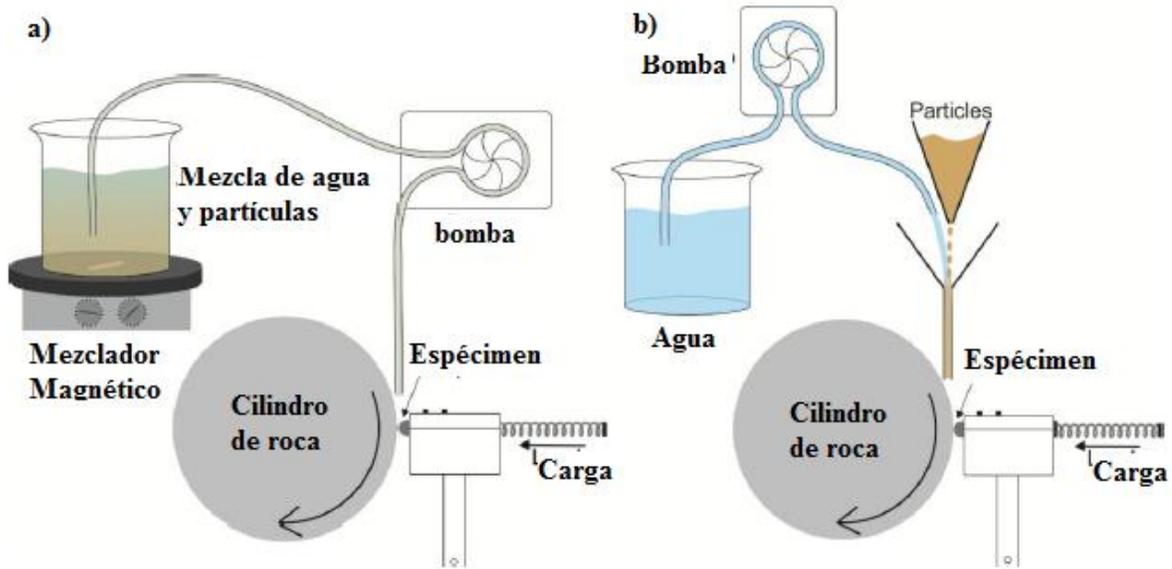


Fig.1.6 a) Configuración del ensayo utilizado por Oskarsson, b) Configuración utilizada por From
Fuente: Anna From, A wear test mimicking the tribological situation in rock drilling [9].

El estudio concluye los patrones de desgaste en las muestras son similares a los que muestran los insertos después de una perforación en el campo, por lo tanto, el ensayo es adecuado para evaluar sus propiedades tribológicas. Además, no se determina una relación entre la carga aplicada a los insertos de carburos de tungsteno y la razón de desgaste mientras no se añadan partículas abrasivas al ensayo. Finalmente, la superficie del cilindro de roca no presentó un efecto notable en la razón de desgaste de los insertos [9].

1.1.6 Estudio de los mecanismos de desgaste en brocas diamantinas utilizadas en la perforación de testigos

La autora Emy Guttenkunst investigó los mecanismos de desgaste en las brocas diamantinas. Basó su investigación en los avances realizados por Oskarsson y From respecto

a la perforación de roca, sin embargo, se enfocó en las brocas diamantinas. Guttenkunst estudió los mecanismos de desgaste que se dan en la perforación diamantina en el campo, y luego diseñó una prueba de laboratorio para el desgaste de segmentos de broca.

Durante los ensayos de campo, Guttenkunst varió las velocidades de rotación y carga sobre la broca. En las perforaciones, el principal material hallado en el terreno fue granito y diabasa. La figura 1.7 muestra un esquema de los pozos perforados, mientras que la tabla 1.2 muestra los parámetros de perforación utilizados.

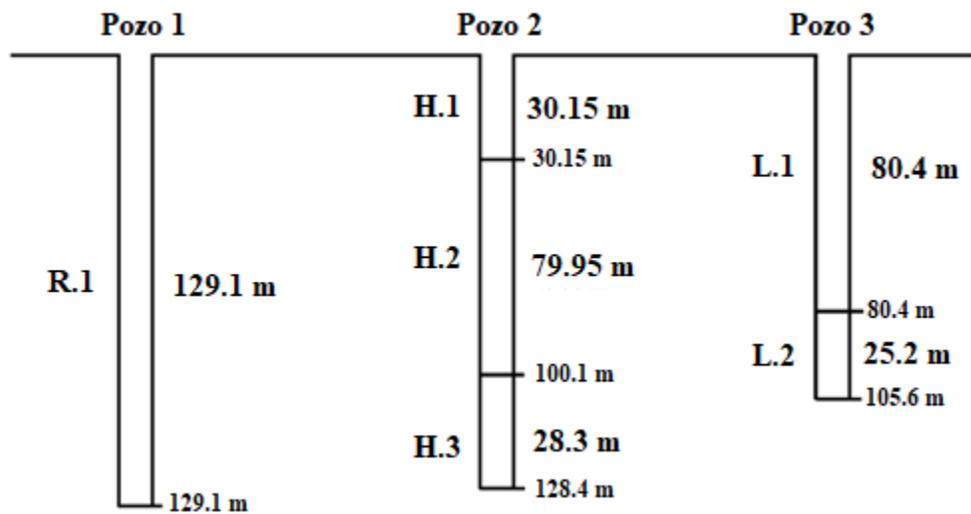


Fig. 1.7 Ilustración de los 3 pozos perforados.

Fuente: Emy Guttenkunst, Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling [6].

	L.1	L.2	R.1	H.1	H.2	H.3
Razón de penetración [cm/min]	12	12	18	25	25	25
RPM	1200	1200	1000	700	700	700
Caudal [l/min]	40	40	40	40	40	40

Tabla. 1.2 Parámetros principales de perforación utilizados en los pozos de la figura 1.7.

Fuente: Emy Guttenkunst, Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling [6].

Luego, se diseñó un ensayo de laboratorio para la evaluación de segmentos de broca diamantinas. Este ensayo se encontró en la capacidad de controlar la carga, velocidad de rotación, caudal y tiempo de manera individual, algo que no es posible en el campo. La figura

1.8 presenta una imagen la configuración utilizada, y la tabla 1.3 los parámetros que se utilizaron por ensayo.



Fig. 1.8 (a) Esquema del ensayo en laboratorio (b) Configuración del ensayo, bomba de agua a la izquierda, cilindro de piedra en el medio. En el cuadro azul, se observa el porta muestras ejerciendo una carga sobre la probeta.

Fuente: Emy Guttenkunst, Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling [6].

	Carga [N]	Velocidad de rotación [RPM]	Caudal [l/min]	Tiempo [s]
Media	200	395	0.33	45
Carga Baja	100	395	0.33	40
Carga alta	400	395	0.33	40
Velocidad baja	200	270	0.33	65
Velocidad alta	200	470	0.33	35
Caudal bajo	200	395	0.025	40
Caudal alto	200	395	2	40
Carga alta, flujo alto	600	395	9	35

Tabla. 1.3 Parámetros principales de perforación utilizados en los pozos.

Fuente: Emy Guttenkunst, Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling [6].

La autora se vio a reducir la carga significativamente en el ensayo. Se calculó una presión de 25 MPa para reproducir la presión utilizada en el pozo, sin embargo, el equipo

utilizado no permitía ejercer esta carga, por lo tanto se utilizaron cargas más bajas. La velocidad de rotación fue calculada según la velocidad tangencial de la tubería exterior, la cual corresponde a la velocidad tangencial en el extremo del diámetro del cilindro de roca. Guttenkunst especifica que no fue posible calcular el flujo exacto para el agua, pues en el ensayo de laboratorio no es posible reproducir el efecto de la configuración de las vías de agua.

Los especímenes fueron pesados antes de ensayarlos. Después de una corrida, los especímenes fueron limpiados y pesados de nuevo. El surco generado en ellos fue medido con un calibrador. Luego, se analizó el desgaste con un microscopio. Finalmente, el espécimen fue montado de nuevo en el porta muestras y se ensayó de nuevo. Este proceso fue realizado 5 veces por espécimen.

Guttenkunst concluye que el ensayo manifiesta los mismos mecanismos de desgaste que ocurren en el campo. También que los parámetros variados en el campo fueron lo suficientemente grandes para producir cambios en el sistema de desgaste. Halla que el desgaste erosivo es el mecanismo que ocurre cuando se aplica una menor presión y alta velocidad de rotación. Por otro lado, el mecanismo de desgaste abrasivo de 3 cuerpos sucede cuando se presenta una mayor presión y una baja velocidad de rotación. Finalmente, concluye que el flujo de agua afecta el mecanismo de desgaste. Un flujo bajo contribuye a la abrasión de 3 cuerpos mientras que un flujo alto contribuye a la erosión [6].

1.2. Brocas

Las brocas diamantinas para perforación de testigos son herramientas utilizadas en la minería para extraer muestras de mineral del suelo, con el fin de determinar si una zona es apta para su explotación, así como modelar la veta. Están compuestas por una matriz de bajo punto de fusión y partículas metálicas de alto punto de fusión, que soportan los diamantes, que son los elementos de corte. Son producidas por técnicas de la pulvimetalurgia, en particular, infiltración.



Fig. 1.9 Broca diamantada para perforación de testigos
Fuente: Boyles Bros Diamantina S.A., Catálogo de productos [20].

Están conformadas por 2 partes principales: el casco y la corona. El casco es la sección de acero que se une a la tubería y sostiene la corona. La corona es el material compuesto conformado por una matriz y diamantes. Para evitar confusiones, el autor Ríos denomina “matriz de la broca” al material compuesto que sujeta los diamantes, y “matriz” a la aleación que conforma lo descrito anteriormente [5]. La figura 1.9 presenta lo mencionado. La matriz está compuesta por una aleación de bajo punto de fusión, por ejemplo, plata y cobre. La matriz de la broca está conformada por dicha aleación y un material de refuerzo, como tungsteno pulverizado [21].

1.2.1. Perforación de testigos

El objetivo principal de este tipo de perforación es obtener la muestra de mineral de terreno. Para esto, se puede decir que la perforación de testigos se divide en 3 partes: la perforación en sí, la extracción del testigo y el reinicio de la perforación. Los equipos y herramientas principales son la máquina de perforación, encargada de aplicar la carga y velocidad de rotación, la tubería de perforación, y la broca. La broca se coloca en el extremo inferior de la tubería, y se rota en sentido horario con una carga aplicada. Conforme se perfora los metros equivalentes a la longitud de la tubería, se coloca una nueva en la parte superior. Esta se le conoce como la tubería exterior.

El tubo interior es el encargado de recibir la muestra. La perforación es detenida cada vez que el tubo interior es llenado con el testigo, para poder retirarlo del pozo, y extraer la muestra para almacenarla en un depósito. Finalmente, se vuelve a introducir el tubo interior y se prosigue con la perforación. La figura 1.10 muestra un esquema de una broca perforando un pozo.

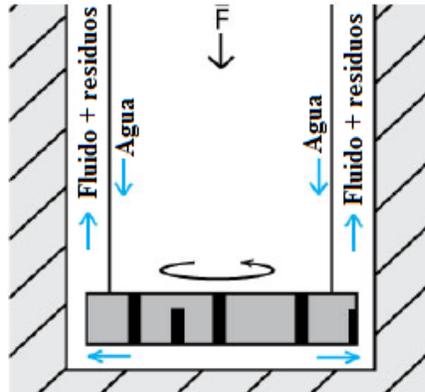


Fig. 1.10 Esquema de una broca perforando roca

Fuente: Emy Guttenkunst, Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling [10].

Por el interior de la tubería se bombea fluido de perforación. Este se encarga de retirar los detritos dejados por el corte de la roca y desplazarlos hacia la superficie. Fluye del interior de la tubería hacia la sección anular del exterior, entre la tubería y las paredes del pozo, pasando a través de la geometría segmentaria de la corona. Dicho arreglo geométrico de la corona se le conoce como vías de agua.

Conforme la broca se desgasta, el espacio de las vías de agua se reduce, presentando un incremento de presión en el manómetro en la superficie, lo cual es una indicación de que se debe cambiar la broca. Es en ese momento que toda la tubería debe ser removida del pozo para realizar el cambio de la broca, y una vez realizado, la tubería debe ser reinsertada. Este proceso involucra desensamblar cada segmento de tubería conforme se retira del pozo, cambiar la broca, y luego re ensamblar la tubería conforme se desciende en el pozo. Es este proceso el que le otorga los mayores costos a la perforación de testigo, pues el cambio de una tubería a 500 metros puede demorar entre 4 a 5 horas, incrementando conforme se alcanza mayor profundidad.

Es por esta razón que se debe seleccionar la broca adecuada para el terreno de perforación, así como los parámetros de operación recomendados, para obtener el mejor rendimiento posible.

1.2.2. Parámetros de Perforación

En las brocas de perforación de testigos diamantinas, existen distintos tamaños comerciales, los cuales hacen referencia al diámetro exterior, conocido como OD (Outer Diameter), y al diámetro interior, conocido como ID (Inner Diameter). La tabla 1.4 presenta los tamaños más comerciales, así como sus parámetros de operación.

Tamaño	GEOMETRÍA		PARÁMETROS DE OPERACIÓN				
	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Velocidad de giro (RPM)	Fluido de refrigeración (l/min.)	Fuerza sobre la broca (N)	Penetración de la broca (mm/min.)	
						200 RPI	250 RPI
AQ	48	27	2000	15.0 - 19.0	9000 - 23000	254	203.2
			1200			152.4	121.9
			850			108	86.4
BQ	59.9	36.4	1700	23.0 - 30.0	9000 - 23000	215.9	172.7
			1000			127	101.6
			700			88.9	71.1
NQ	75.7	47.6	1350	30.0 - 38.0	14000 - 27000	171.5	137.2
			800			101.6	81.3
			550			59.9	55.9
HQ	96.1	63.5	1000	38.0 - 45.0	18000 - 36000	127	101.6
			600			76.2	61
			400			50.8	40.6
PQ	122.6	85	800	68.0 - 87.0	23000 - 45000	101.6	81.3
			500			63.5	50.8
			350			44.5	35.6

Tabla 1.4 Dimensiones y parámetros de operación principales de las líneas o tamaños más empleados y recomendados comercialmente por los principales fabricantes de brocas
Fuente: Carlos Ríos, Documento interno Boyles Bros Diamantina S.A [5].

El tamaño de la broca a utilizar depende de distintos factores, como la profundidad objetivo del pozo, el diámetro objetivo de muestra a obtener, capacidad de la máquina, entre otros. Se empezará por un tamaño de mayor diámetro, y conforme se alcance una determinada profundidad, se procederá a utilizar un tamaño menor. La perforación es de tipo telescópica: de mayor a menor diámetro.

Además, cada parámetro ocasiona un comportamiento distinto en el desgaste de las brocas. La velocidad de rotación, por ejemplo, afecta la proporción de penetración en la roca. Generalmente, una velocidad mayor generará un ratio de penetración más alto. Sin embargo, de ser la velocidad muy alta podría afectar la razón con la que se desgasta la matriz, de modo que no se espongan diamantes nuevos conforme se desgastan, y los filos de corte de los mismos se pulirán. Velocidades lentas, a su vez, causaran que la matriz se desgaste de manera más agresiva por erosión y fricción, causando que la corona falle de manera prematura. La figura 1.11 muestra las velocidades recomendadas por la empresa Dimatec Inc para el uso de sus brocas, según su tamaño [22].

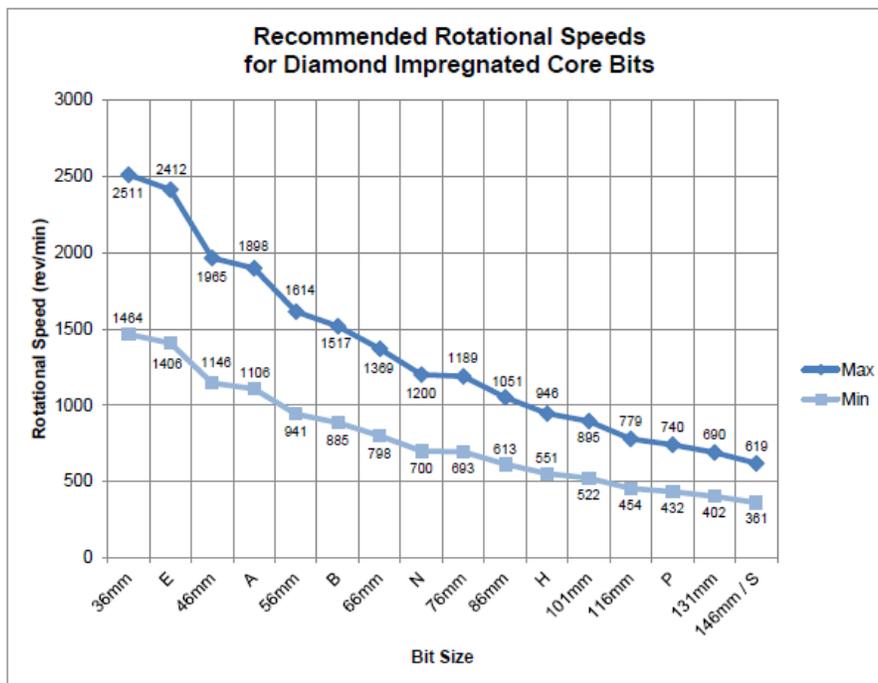


Fig. 1.11 Velocidad de rotación recomendada por Dimatec Inc. según el tamaño de broca.
Fuente: Dimatec Inc., Parámetros de operación de velocidad rotacional para brocas diamantinas [22].

El fluido de perforación tiene el rol principal de remover los detritos desprendidos de la roca durante el corte. Se recomienda que la velocidad de ascenso del fluido sea mayor que el de la velocidad de precipitación. Como resultado, sucede que a mayor tamaño de detritos, se necesitará mayor cantidad de fluido. La cantidad total de fluido necesario en el sistema es determinada por 2 componentes principales: la configuración de las vías y el espacio anular entre la tubería y el pozo. A la velocidad del fluido en la columna anular entre la tubería y la pared del pozo se le llama velocidad anular. Suele medirse en metros por minuto. Se recomienda una velocidad anular de 60 a 90 m/s. Velocidades anulares muy altas pueden erosionar la pared del pozo, aunque depende del terreno que se esté perforando. Por otro lado, velocidades anulares bajas causan que los detritos no sean removidos del pozo y se estanquen, dañando el equipo de perforación y aumentando la posibilidad de causar un atasco de la tubería. La figura 1.12 muestra el caudal recomendado en litros por minuto en función del tamaño del pozo [23].

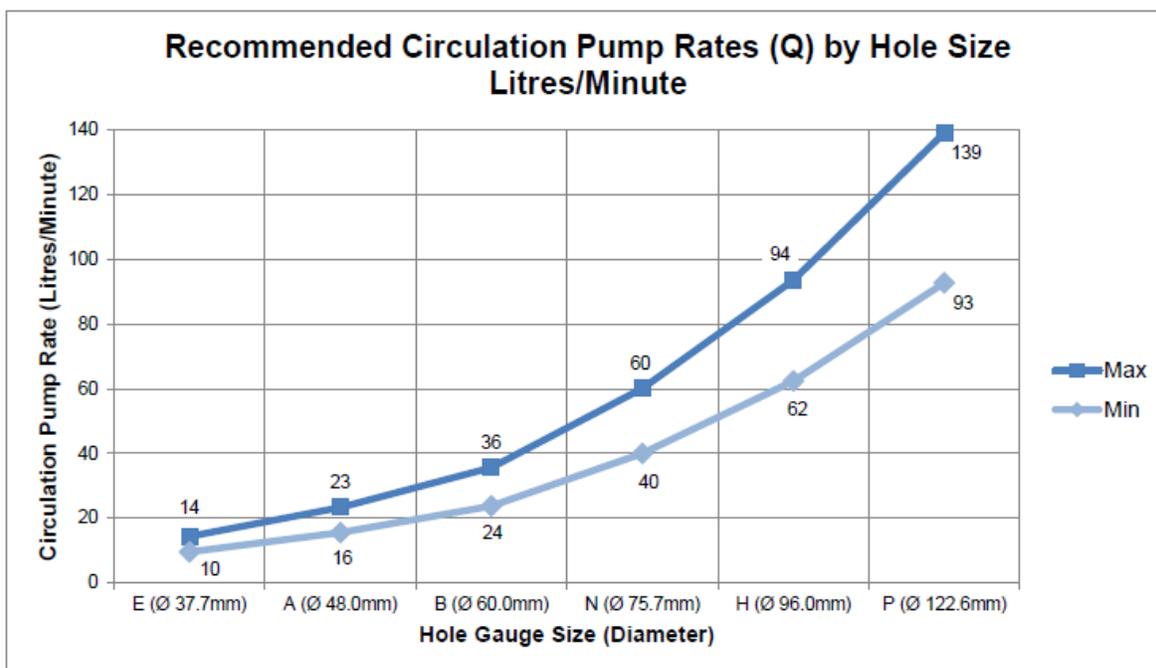


Fig. 1.12 Caudal de fluido de recomendado por Dimatec según el tamaño del pozo.
Fuente: Dimatec Inc., Bit Hydraulics [23].

La carga sobre la broca depende de su tamaño y la composición de la matriz. En el campo, el equipo de perforación aplicará dicha carga sobre la tubería que la transmitirá a la

broca. Conforme se alcancen mayores profundidades, la carga que genera el peso de las tuberías será cada vez mayor, por lo que el equipo de perforación a determinada profundidad (determinada por la matriz y tamaño de la broca) cambiará de aplicar fuerza a sostener la tubería y controlar la carga ejercida. La carga máxima aplicada dependerá de la composición de la matriz y el terreno que se perfora. La figura 1.13 muestra la relación entre el tamaño de la broca, el modelo de matriz y la máxima carga aplicada de las brocas de la empresa Dimatec [24].

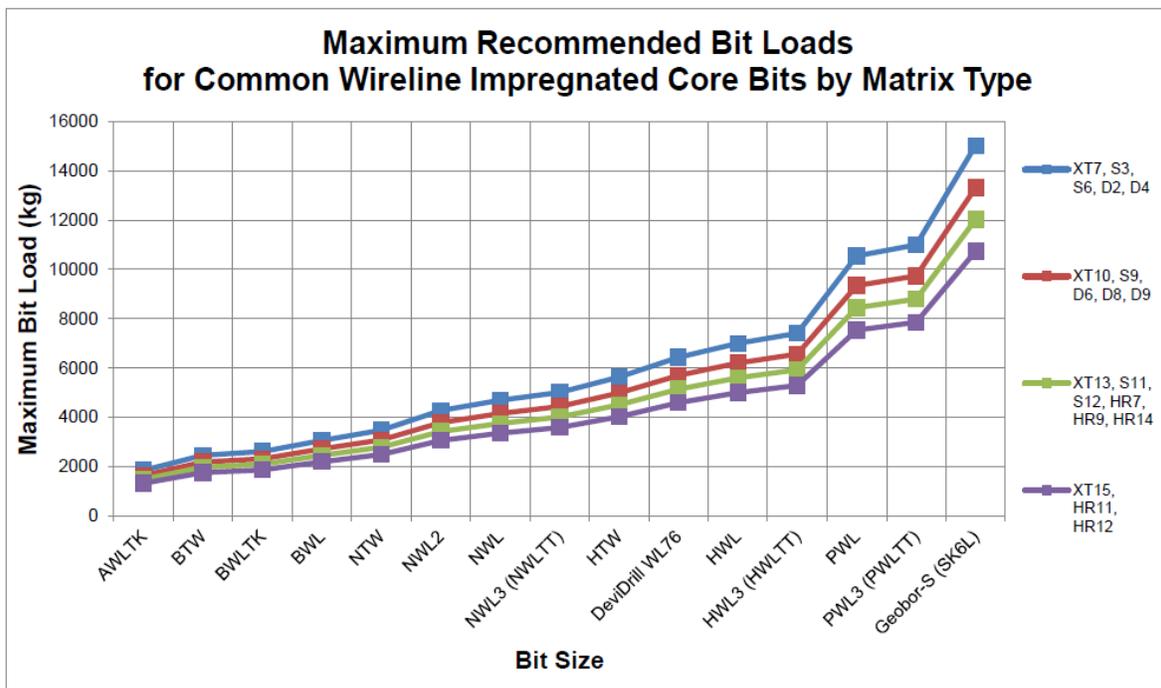


Fig. 1.13 Carga máxima recomendada sobre brocas diamantinas según su tamaño y composición de la matriz. Fuente: Dimatec Inc., Parámetros de operación: Carga en brocas diamantinas [24].

Se conoce como “índice de razón de penetración” (Penetration Rate Index) In a la relación obtenida de la división de la velocidad rotacional en RPM (s), entre la distancia penetrada en la roca en cm. Puede ser calculada mediante

$$PRI = \frac{s}{r} \quad (5)$$

Dimatec recomienda entre 80 a 120 revoluciones por cm para una eficiencia de desgaste óptima en sus brocas. La figura 1.14 muestra las recomendaciones de PRI según el tamaño de broca seleccionado [22].

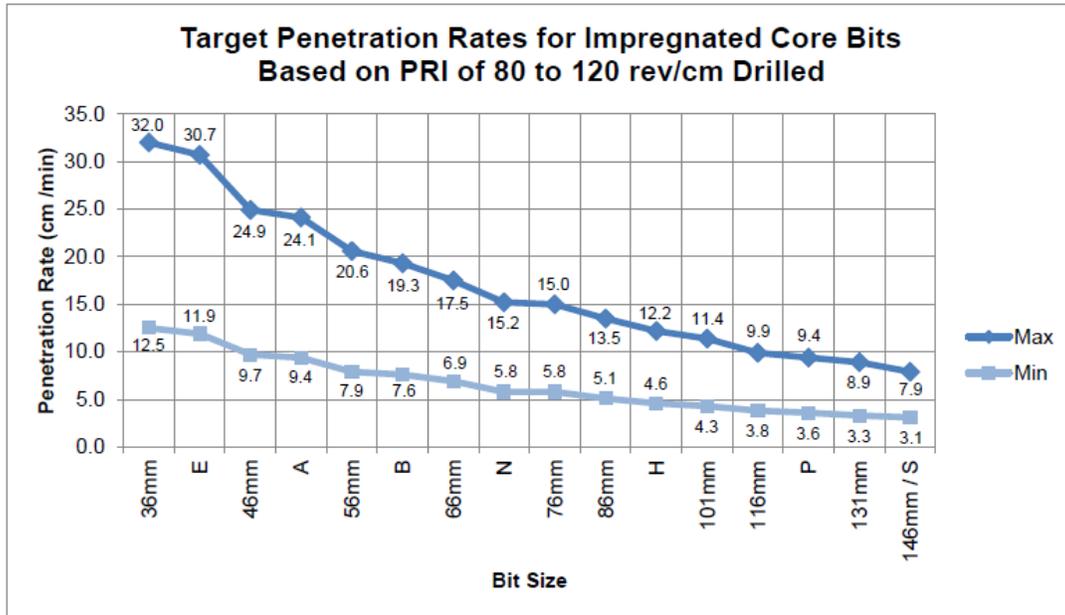
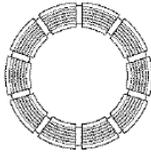
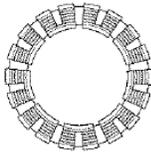
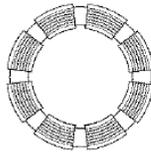


Fig. 1.14 Razón de penetración objetivo.

Fuente: Dimatec Inc., Parámetros de operación de velocidad rotacional para brocas diamantinas [22].

1.2.3. Configuración de las Vías de Agua

La configuración de las vías de agua hace referencia a la geometría de la corona de las brocas, la cual depende de las vías de agua seleccionadas. Cada vía de agua tiene su propia función. Por ejemplo, se prefiere una broca con vías de agua delgadas cuando el terreno es compacto, sin embargo, cuando el terreno es fracturado, se suele seleccionar un modelo de vías anchas para evitar la erosión de la muestra. La figura 1.15 muestra configuraciones comunes en brocas diamantinas.

Regular (Style 'W')	T-Turbo (Style 'TT')	Trapezoidal Extra Wide (Style 'TXW')	Extra Extra Wide (Style 'XXW')
			
1.00	0.78	0.92	0.88

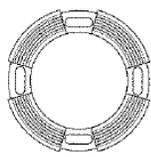
Face Discharge (Style 'FD')	Slot Face Discharge (Style 'SFD')	VORTEX (Style 'VX')
		
0.88	0.78	1.00

Fig. 1.15 Configuración de distintas vías de agua según los modelos de Dimatec Inc.
Fuente: Dimatec Inc., Parámetros de operación: Carga en brocas diamantinas [24].

El área superficial de la corona la de broca depende directamente la configuración seleccionada. Siendo la distribución de cargas sobre la superficie de la corona, la presión

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

La carga sobre el segmento depende del área de la corona y el total de segmentos. Por ejemplo, el modelo “turbo” es utilizado cuando se quiere aplicar una mayor carga sobre la broca, pues su área superficial es menor que en un modelo de vías regulares, como se muestra en la figura 1.16.

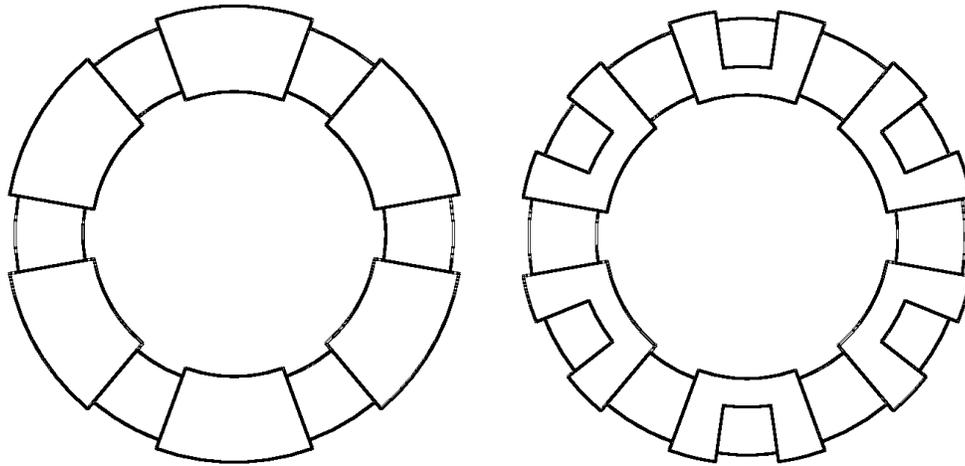


Fig. 1.16 Vista superior de una broca de vías de agua regulares (izquierda) y una turbo (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

El área superficial del modelo de vías regulares se puede calcular mediante la ecuación:

$$A_{reg} = (OD^2 - ID^2) * \frac{\pi * \alpha * n}{1440} \quad (7)$$

Donde

- “ α ” corresponde al tamaño del ángulo de 1 segmento de diente
- “ n ” corresponde al número de dientes

Por otro lado, el área de la superficie del modelo turbo estará dado por:

$$A_{tb} = [(OD^2 - ID^2) * \alpha - (OD^2 - tD^2) * \beta] * \frac{\pi * n}{1440} \quad (8)$$

Donde

- “ β ” corresponde al ángulo de la hendidura
- “ tD ” es el diámetro entre las hendiduras

De (6), (7) y (8) se puede observar como la presión sobre la corona varía según la geometría de vías de agua seleccionada. Existen situaciones en las que el perforista considerará pertinente incrementar la carga sobre la broca. Sin embargo, la máquina de perforación tiene una capacidad máxima. En estos casos, resulta práctico el cambio entre una broca con geometría de vías anchas y otra turbo.

1.2.4. Tipos de suelo

La composición exacta del suelo alrededor de la tierra varía dependiendo de donde uno se ubique. Está formada por una gran cantidad de minerales, donde dentro de estos, una parte son los diferentes tipos de roca. Los elementos más comunes son el aluminio, hierro, calcio, sodio y potasio. El granito es uno de los minerales más comunes en la superficie terrestre. Está compuesto principalmente por feldespato y sílica [25].

En la perforación, ningún pozo es exactamente igual a otro. El terreno cambia constantemente conforme uno perfora. Los fabricantes de brocas diamantinas recomiendan seleccionar la composición de la matriz de la broca, según la dureza y abrasividad del terreno. La abrasividad hace referencia a la cantidad de cuarzo presente en la roca perforada [5]. La figura 1.17 muestra un ejemplo del fabricante de brocas Dimatec para la selección de la matriz.

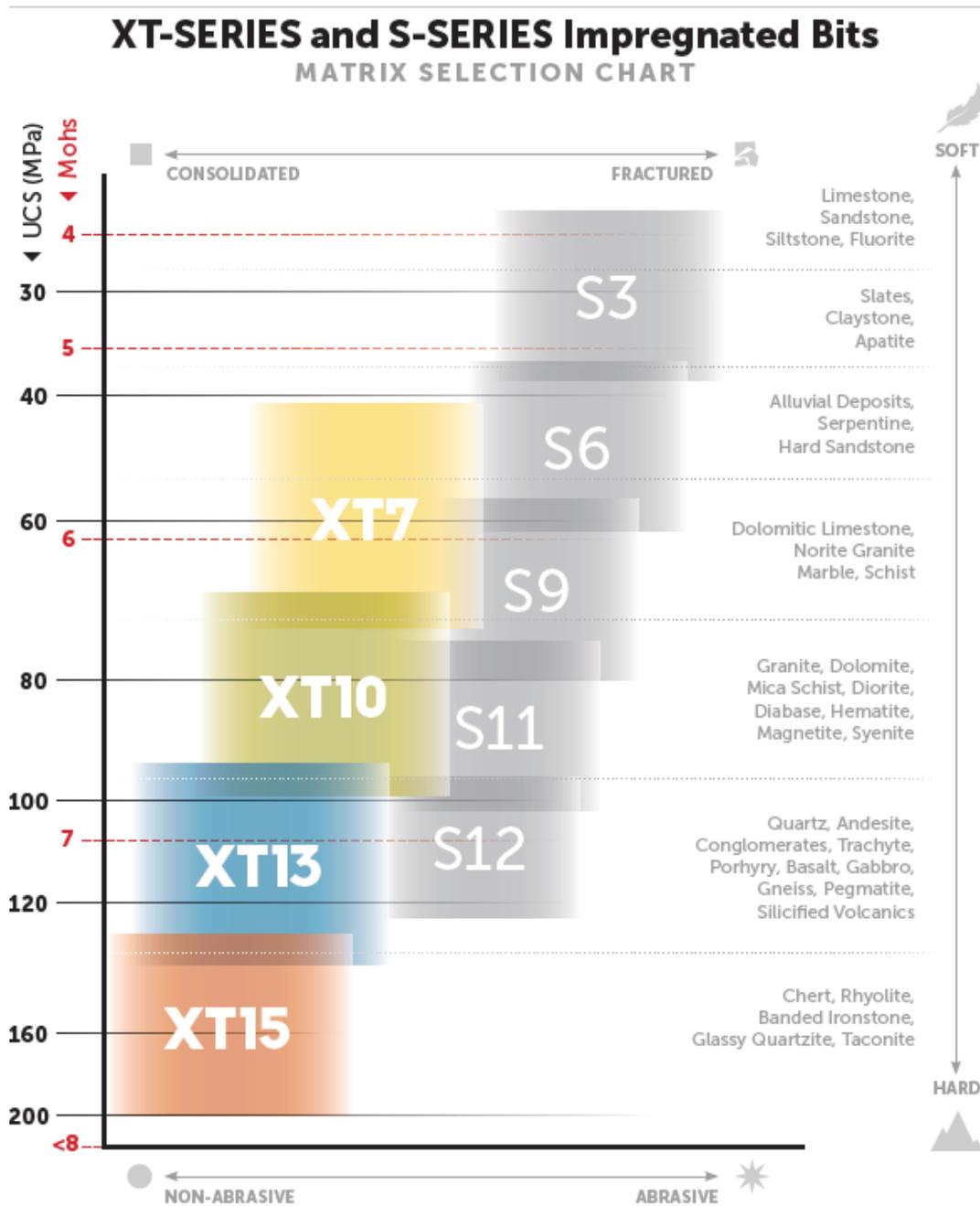


Fig. 1.17 Matriz de selección de matriz para las composiciones ofrecidas por Dimatec Inc.
Fuente: Dimatec Inc., Cuadro de selección de matriz [26].

1.3. Tribología

La tribología es la ciencia que estudia el desgaste, fricción y lubricación y analiza como distintas superficies interactúan entre sí, en entornos reales y artificiales. Es una ciencia compleja, multidisciplinaria donde los avances se realizan por la colaboración de distintas áreas de ingeniería, como la manufactura, mecánica o química entre otras. Es crucial para maquinaria moderna que involucre superficies en contacto. El propósito de la investigación en tribología es entender y optimizar las pérdidas de material resultantes de la fricción y desgaste, para obtener mejor eficiencia, menores fallas y ahorrar costos [27].

1.3.1. Desgaste

El desgaste se define como el daño o desprendimiento de material correspondientes a movimientos de deslizamiento, rodamiento o impacto de una superficie relativa a otra. La definición del desgaste generalmente se refiere a la pérdida de material de una de las superficies.

El desgaste no es una propiedad del material, sino una respuesta de sistema. En el caso de las brocas diamantinas, está ligado directamente a los parámetros de perforación, las propiedades de la matriz y los parámetros del terreno. El cambio de cualquiera de estas variables influye en la respuesta del sistema de desgaste.

El desgaste incluye 6 principales fenómenos, que como factor común tienen el desprendimiento de material de una de las superficies. Los principales fenómenos son:

- Adhesivo
- Abrasivo
- Fatiga
- Impacto por erosión y percusión
- Químico (corrosivo)
- Desgaste por inducción de arco eléctrico [27].

El desgaste puede ser beneficioso o dañino. Por ejemplo, en el caso de brocas de perforación de testigos, el desgaste es necesario para exponer nuevos diamantes en la matriz conforme estos se van consumiendo, exponiendo nuevos filos que permiten un corte eficiente de la roca.

En su investigación, la autora Guttenkunst halla que los mecanismos de desgaste predominante en la matriz de las brocas son el desgaste erosivo y la abrasión de 3 cuerpos. Cada uno de estos mecanismos se presenta como resultado de las condiciones de operación a la que se someten las brocas [2].

La máquina es diseñada a partir de controlar estas condiciones de operación que definen el desgaste en la broca.

1.3.2. Desgaste erosivo

Este tipo de desgaste ocurre por flujos de partículas, gotas líquidas e implosión de burbujas en fluidos. Depende del ángulo de impacto, la velocidad y el tamaño de las partículas. La broca está sometida a este tipo de desgaste durante operaciones a baja presión y alta velocidad rotacional [6]. La figura 1.18 muestra esquema de una partícula impactando sobre una superficie, como sucede en el desgaste erosivo.

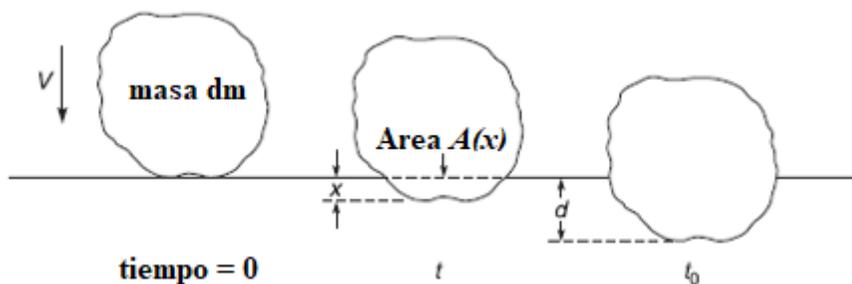


Fig. 1.18 Esquema de la erosión por una única partícula dura impactando sobre una superficie de menor dureza con una incidencia normal.

Fuente: Bharat Bhushan, Introduction to Tribology, Second Edition (2013) [27].

El volumen de material erosionado (v) es

$$v = \frac{kmV^2}{2H} \quad (9)$$

Donde “ k ” es la proporción del material desplazado, “ m ” es la masa total de las partículas, “ V ” es la velocidad de las partículas y “ H ” la dureza del material. Se asume las partículas no se deforman y que la dureza del material erosionado es constante en toda su superficie [27].

En el caso de una broca, la dureza dependerá de la composición de la matriz, mientras que la velocidad de las partículas dependerá de la velocidad de rotación de la broca y el caudal del fluido de perforación

1.3.3. Desgaste abrasivo

El desgaste por abrasión se da cuando cuerpos partículas duras se desplazan sobre una superficie de menor dureza. En el caso de materiales dúctiles con alto fracturamiento, como son los metales y aleaciones, las partículas duras resultan en la deformación plástica del material [27]. La figura 1.19 muestra la interacción entre una superficie dura, una de menor dureza y partículas abrasivas.

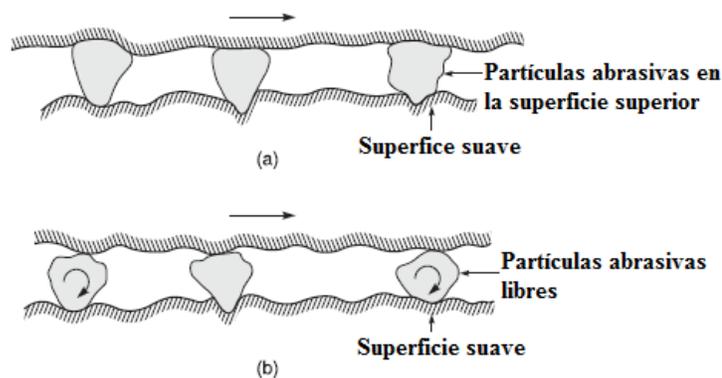


Fig. 1.19 Esquema de (a) una superficie con partículas abrasivas montadas deslizando sobre una superficie de menor dureza, y (b) partículas abrasivas atrapadas entre 2 superficies con al menos una de las superficies con menor dureza que las partículas abrasivas.

Fuente: Bharat Bhushan, Introduction to Tribology, Second Edition (2013) [27].

En el caso de las brocas, dicha aleación de menor dureza viene ser la matriz que sostiene a los diamantes. Las partículas duras que causan el desgaste pueden provenir del terreno perforado o los diamantes desprendidos de la matriz.

El desgaste abrasivo se da generalmente en 2 situaciones, conocidas como “abrasión de 2 cuerpos” y “abrasión de 3 cuerpos”. Las brocas, durante condiciones de operación de alta presión y baja velocidad de rotación, presentan la situación de desgaste de abrasión de 3 cuerpos [6].

La abrasión de 3 cuerpos sucede cuando una partícula de abrasivo lo suficientemente dura es atrapada entre las superficies. En el caso de la broca, las superficies son la matriz y el terreno perforado.

El desgaste abrasivo por deformación plástica puede darse de distintas formas, entre ellas el arado, formación de cuña y corte. Los factores que determinan en qué modo se da el desgaste son el ángulo de ataque de la protuberancia o partícula abrasiva, y la resistencia al corte entre las interfaces. La figura 1.20 muestra de manera gráfica estos tres fenómenos.

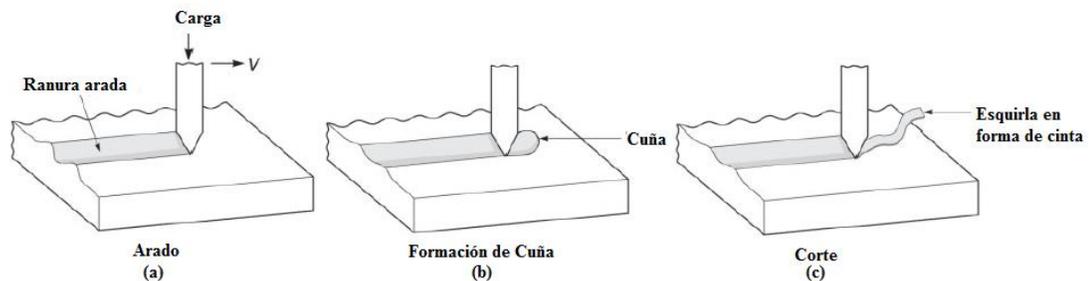


Fig. 1.20 Una aspersion cónica y dura deslizándose sobre una superficie de menor dureza, produciendo desgaste abrasivo.

Fuente: Bharat Bhushan, Introduction to Tribology, Second Edition (2013) [27].

En el modo de arado (a), se forman surcos donde el material es desplazado sin ser removido hacia los lados. Después que la superficie ha sido arada repetidas veces, el material desplazado se desprende por causa de un ciclo de fatiga. Además, se forman crestas en los extremos de los surcos. Estos eventualmente se fracturan y desprenden.

En el modo de formación de cuñas (b), la partícula abrasiva desarrolla un surco donde se forma una cuña en el extremo. En este modo, sólo una parte del material es desplazado hacia los lados del surco y el resto hacia la cuña.

Finalmente, en el modo de corte (c), una protuberancia abrasiva con un ángulo de ataque pronunciado ara el material y lo remueve como una esquirra en forma de cinta. Este proceso generalmente remueve una elevada cantidad de material, respecto a los modos de arado y formación de cuña.

Se considera un modelo simplificado de los modos de desgaste mencionados anteriormente para facilitar el cálculo del material removido, como se muestra en la figura 1.21.

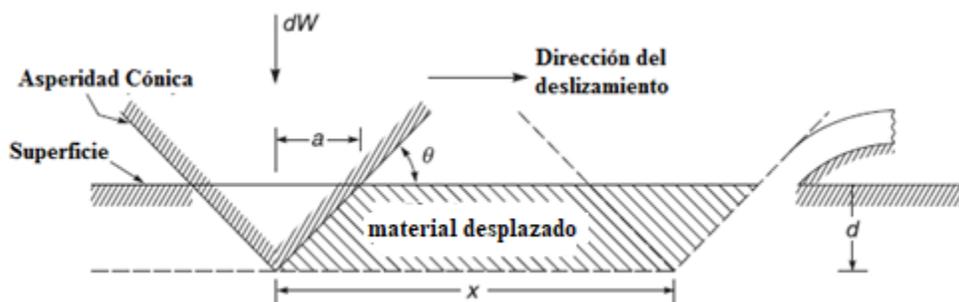


Fig. 1.21 Una asperidad cónica y dura deslizándose sobre una superficie de menor dureza, produciendo desgaste abrasivo.

Fuente: Bharat Bhushan, Introduction to Tribology, Second Edition (2013) [27].

El modelo considera asperidades cónicas, en la cual una superficie dura con asperidades cónicas se desliza sobre una de menor dureza. También se considera la longitud y profundidad de los surcos igual. El volumen de material desplazado (v) está dado por la ecuación:

$$v = \frac{2Wx \overline{\tan \theta}}{\pi \cdot H} \quad (10)$$

Donde “ v ” es el material desplazado, “ W ” la carga normal, “ x ” la longitud del surco, “ H ” la dureza del material desgastado y “ $\overline{\tan \theta}$ ” el ángulo promedio de ataque de las partículas [27].

CONCLUSIONES

El estado del arte de la evaluación tribológica de brocas de perforación, en general, indica que, aunque no se hayan realizado una gran cantidad de estudios públicos, los pocos que se han desarrollado se han enfocado en comprender los mecanismos de desgaste.

1. Los ensayos desarrollados por Oskarsson, From y Guttenkunst demuestran que se puede reproducir el desgaste que sucede en un pozo en el campo en laboratorio. En particular, el trabajo de Guttenkunst concluye que, en el campo de brocas diamantinas, es posible reproducir el desgaste que sucede en el campo en un laboratorio. Concluye que la situación de desgaste en las brocas diamantinas corresponde al desgaste erosivo y al desgaste abrasivo de 3 cuerpos. Los resultados de dichos estudios respecto a los parámetros de perforación son acordes a las recomendaciones de los principales fabricantes de brocas.
2. La guía ASTM G190 propone una serie de pasos y recomendaciones para reproducir una situación tribológica real en un laboratorio. Indica de manera concisa las consideraciones que se debe tener al diseñar un ensayo, así como las variables a controlar y cómo expresar los resultados.
3. Por otro lado, en la perforación diamantina para recuperación de testigos, la selección de brocas a utilizar depende de una serie de parámetros, tales como el terreno perforado, la capacidad de la máquina y la profundidad del pozo. El sistema tribológico de desgaste de la broca dependerá de múltiples factores, entre ellos la composición del terreno, la presencia del fluido de perforación, el caudal del fluido, la composición de la matriz, la velocidad de rotación y la carga aplicada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Energía y Minas, “Anuario Minero 2018”, 2018. [Online]. Available: [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2018/AM2018\(VF\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2018/AM2018(VF).pdf)
- [2] Ferguson, M., “Mining exploration budgets rebound in 2017”, 2019. [Online]. Available: <https://pages.marketintelligence.spglobal.com/global-exploration-budget-trends-2017-EMC.html?aliId=87124701>
- [3] Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. y Subsidiarias, “Estados financieros consolidados por los años 2018, 2017 y 2016”, 2019. [Online]. Available: <https://www.buenaventura.com/es/inversionistas/estados-financieros/2018>
- [4] *Hard rock miner’s handbook*, 5th ed., Stantec Consulting, EDM, Canada, 2008.
- [5] C. Ríos, “Caracterización de brocas diamantinas”, Documento interno de Boyles Bros Diamantina S.A., sin publicar.
- [6] E. Guttenkunst, “Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling”, Masters thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2019.
- [7] J. Konstanty, “Powder metallurgy diamond tools”, 1st ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005, pp. 106-114.
- [8] *Standard Test Method for Abrasive Wear Resistance of Cemented Carbides*, ASTM Standard B611-85, 2005.
- [9] A. From, “A wear test mimicking the tribological situation in rock drilling”, thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2012.
- [10] E. Guttenkunst, “Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling”, Masters thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2019.
- [11] J. Konstanty, “Powder metallurgy diamond tools”, 1st ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005, pp. 106-112.
- [12] E. Guttenkunst, “Study of the wear mechanisms for drill bits used in core drilling”, Masters thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2019.
- [13] A. From, “A wear test mimicking the tribological situation in rock drilling”, thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2012.

- [14] J. Konstanty, “Powder metallurgy diamond tools”, 1st ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005, pp. 114-125.
- [16] Documento sin título. Reporte interno Boyles Bros Diamantina S.A. Febrero, 2016, sin publicar.
- [17] *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, ASTM International G65-04, 2010.
- [18] *Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests*, ASTM G190-06, 2006.
- [19] J. Oskarsson, “Tribological testing of drill bit inserts”, thesis, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2011.
- [20] *"UP Series - Boyles Bros"*, Boyles Bros Diamantina S.A., 2019. [Online]. Available: <https://www.boyles.com.pe/producto/productos-diamantinos/brocas/up-series/>.
- [21] J. Konstanty, “Powder metallurgy diamond tools”, 1st ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005, pp. 78-79.
- [22] *Operating Parameters: Rotational Speed for Diamond Impregnated Core Bits*, Dimatec Inc., Winnipeg, Canada, 2019.
- [23] *Operating Parameters: Bit Hydraulics*, Dimatec Inc., Winnipeg, Canada, 2019.
- [24] *Operating Parameters: Weight on Bit*, Dimatec Inc., Winnipeg, Canada, 2019.
- [25] U. Beste, “On the nature of cemented carbide wear in rock drilling”, PhD dissertation, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, 2004.
- [26] *"Matrix Selection Chart"*, Dimatec Inc, 2019. [Online]. Available: <http://www.dimatec.com/wp-content/uploads/2019/10/XT-S-Matrix-Chart-Final.pdf>
- [27] B. Bhushan, “*Introduction to tribology*”, 2nd ed., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2013, pp. 1-6, 314-316, 328-333, 349.