

## Cuantificación del desgaste en brocas de barrenación diamante mediante el modelo de abrasión pura y desgaste isotrópico

YOSTIN ORTEGA<sup>1</sup>, J. ANDRADE<sup>2</sup>, G. ALVARADO<sup>3</sup>, E. ESPINOSA<sup>4</sup>, D. NAVA<sup>5</sup> Y G. ROSALES<sup>6</sup>

### RESUMEN

**Los factores geológicos de desgaste en un Barreno ‘DD’ son actualmente motivo de estudio, ya que el tipo de suelo, así como el desconocimiento de su composición, tienen un impacto significativo en el desgaste de las brocas diamantinas. Los materiales abrasivos de las rocas y los agregados ocluidos metálicos de valor reducen la vida útil de las brocas. En el presente trabajo se hace referencia a brocas con diamante incrustados en la matriz, que fueron ensayadas en dos yacimientos: Zona Dolores Y18 y Zona Cobriza C12, donde el intrusivo de granodiorita semi-fracturada es variable en ambos yacimientos; para tal evaluación el modelo de abrasión pura y desgaste isotrópico fue resuelto. Este modelo demostró que la variación de la cantidad de granodiorita semi-fracturada impacta en el rendimiento de las brocas con una perforación de hasta 20m, lo que representa una disminución de hasta 8 horas en el trabajo de perforación.**

**Palabras clave:** Minería, Perforación, Desgaste de brocas, Modelo Isotrópico.

<sup>1</sup>Ingeniero de Minerales, Ingeniería de Minerales, Coordinación Académico Región Altiplano, Matehuala, San Luis Potosí, México, [yostindelangel97@gmail.com](mailto:yostindelangel97@gmail.com).

<sup>2</sup>Doctorado en Ingeniería de Materiales, Ingeniería de Minerales, Coordinación Académico Región Altiplano, Matehuala, San Luis Potosí, México, [jonatan.andrade@uaslp.mx](mailto:jonatan.andrade@uaslp.mx), 0000-0003-2899-031X.

<sup>3</sup>Doctorado en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Ingeniería de Minerales, Coordinación Académico Región Altiplano, Matehuala, San Luis Potosí, México, [gabriela.alvarado@uaslp.mx](mailto:gabriela.alvarado@uaslp.mx), 0000-0001-8504-2485.

<sup>4</sup>Doctorado en Ciencias, Ingeniería de Minerales, Coordinación Académico Región Altiplano, Matehuala, San Luis Potosí, México, [erik.espinosa@uaslp.mx](mailto:erik.espinosa@uaslp.mx), 0000-0001-7591-9140.

<sup>5</sup>Doctorado en Ciencias, Ingeniería de Minerales, Coordinación Académico Región Altiplano, Matehuala, San Luis Potosí, México, [dora.nava@uaslp.mx](mailto:dora.nava@uaslp.mx), 0000-0002-2651-6246.

<sup>6</sup>Doctorado en Ingeniería de Minerales, Ingeniería de Minerales, COARA e Instituto de Metalurgia UASLP, Matehuala, San Luis Potosí, México, [gilberto.rosales@uaslp.mx](mailto:gilberto.rosales@uaslp.mx), 0000-0003-3679-3981.

Autor de Correspondencia: Gilberto Rosales Marín, [gilberto.rosales@uaslp.mx](mailto:gilberto.rosales@uaslp.mx)

**Recibido:** 12 / 10 / 2021

**Aceptado:** 20 / 05 / 2022

**Publicado:** 23 / 05 / 2022

**Cómo citar este artículo:**

Ortega, Y., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., Nava Gómez, D. P., & Rosales Marín, G. (2022). CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN BROCAS DE BARRENACIÓN DIAMANTE MEDIANTE EL MODELO DE ABRASIÓN PURA Y DESGASTE ISOTRÓPICO. EPISTEMUS, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.184>

## Quantification of Wear in Drill Bits Using the Pure Abrasion and Isotropic Wear Model

### ABSTRACT

*Geological wear factors in a hole are currently being studied since the type of soil, as well as the lack of knowledge of its composition, have a significant impact on the wear of diamond drill bits. Abrasive materials in rocks and valuable metal occluded aggregates reduce bit life. In the present work, drill bits with diamond embedded in the matrix are tested in two deposits, Zona Dolores Y18 and Zona Cobriza C12, where the semi-fractured granodiorite intrusive is variable in both deposits, for such evaluation the model of pure abrasion and isotropic wear was resolved. This model showed that the variation in the amount of semi-fractured granodiorite impacts the performance of the drill bits with a drilling of up to 20m, which represents a reduction of up to 8 hours in the drilling work.*

**Key words:** Mining, Drilling, Drill beat wear, Isotropic Model



## Introducción

El método de perforación con obtención de testigo es la herramienta más utilizada para la exploración minera, dado que es capaz de perforar en cualquier ángulo y obtener testigos de roca continuos de varios diámetros en un rango de profundidades que puede llegar a superar los 1.500 metros. Además, este método de exploración también ayuda a confirmar la ubicación, profundidad y propiedades de los recursos existentes, permitiendo conocer información sobre las leyes y la estructura del material que se quiere extraer.

Este es uno de los métodos de sondaje favorito de los ingenieros geólogos y metalurgistas debido a que es una herramienta versátil y eficaz. No obstante, los costos de perforación con este método son significativamente altos de tal forma que es necesario realizar un análisis muy cuidadoso para diseñar una eficaz campaña de barrenación.

Una de las principales complicaciones dentro de las actividades de perforación diamantina es el complejo y variado macizo rocoso que presenta la geología de cada terreno a explorar. Por esta misma razón, el uso adecuado de los accesorios de perforación tales como: aditivos y brocas diamantadas para cada terreno en específico, es de suma importancia para llevar una campaña de perforación eficiente y económicamente costeable. De igual manera, usar los parámetros de perforación adecuados y el talento humano, es un factor importante para considerar.

El consumo de metal durante la barrenación es uno de los principales factores que contribuyen a pérdidas económicas, esto debido a que dicho desgaste impacta directamente en el rendimiento de las brocas de perforación. El diseño y composición de la broca, así como las características



mineralógicas de la zona geológica de trabajo y habilidades del operador de la maquinaria, son factores fundamentales para entender cómo se da este desgaste. Con el fin de proponer rutas de mejora que aumenten el rendimiento de las brocas, se han realizado diferentes estudios relacionados. Para esto, distintos modelos de desgaste han sido propuestos con diversas aplicaciones; uno de ellos es el propuesto por Menacho, J. y Concha, F. [1], que buscaron proponer un modelo para medir el desgaste en medios de molienda. Para esto, utilizaron una ecuación diferencial parcial de primer orden utilizando una cinética de orden cero. En el presente estudio, un análisis del consumo de metal usando un modelo de desgaste isotrópico de primer orden similar al de Menacho [1], es resuelto, con el fin de estimar el desgaste en dos zonas mineralógicas (Zona Dolores Y18 y Zona Cobriza C12) en brocas de perforación Hero 7, utilizadas en la plaza de barrenación "SANDY-1". El cálculo del rendimiento es estimado en kg/h para evaluar tal efecto.

## ANTECEDENTES TEÓRICOS

### Zona geológica de estudio.

La zona del Distrito Minero La Paz se encuentra ubicada geológicamente en el límite de dos provincias paleogeográficas del Mesozoico, la porción occidental corresponde a la CMCM (cuenca mesozoica del centro de México), y al oriente, la PVSLP (plataforma valles San Luis Potosí). Este yacimiento se encuentra actualmente en explotación con dos minas: Dolores con una producción diaria de 4900 toneladas, y la minas: de Cobriza con 4250 toneladas por día. El yacimiento presenta una generalidad en todo el distrito en cuanto a litología y mineralogía; más sin embargo el skarn de Dolores no sólo presenta mineralización de diseminación y micro venillas en el skarn, sino también una serie de vetas con sulfuros que atraviesan la masa de este en diferentes

direcciones, dándole una densidad mayor de sulfuros de mena y un aspecto de “stockwork” (González, J. [2]). Las leyes de dichos yacimientos se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Contenidos metálicos en la zona geológica de estudio.**

<i>Elemento metálico</i>	<b>Zona Dolores Y18</b>	<b>Zona Cobriza C12</b>
<i>Au (g/ton)</i>	1.50	0.80
<i>Ag (g/ton)</i>	50	60
<i>Cu (%)</i>	0.90	1.20

### **Barrenación en la zona geológica de estudio.**

Las brocas o coronas de perforación diamantinas son uno de los constituyentes esenciales de una perforación, ubicado en frente de la sarta de barrenación cumple la función de cortar la roca y avanzar con el sondaje. Las diferentes combinaciones de cantidad y tipos de polvos metálicos, como cantidad y tamaño de diamantes, da como resultado diferentes tipos de brocas, y cada una de estas recomendadas para un determinado tipo de suelo a perforar (suelos duros, extra-duros, abrasivos, no abrasivos, blandos o suaves). Las principales brocas usualmente usadas son las siguientes:

Brocas de carburo de tungsteno. Su geometría es basada en prismas octogonales de carburo de tungsteno que proporciona una sujeción segura al cuerpo de la broca. Las brocas se fabrican en tres diámetros 4,5.5 y 7.5 mm. Estas brocas son utilizadas a velocidades relativamente bajas.

Brocas con diamantes incrustados. Actualmente en la mayoría de las brocas insertadas se usan diamantes naturales. Los diamantes son insertados en la matriz de la parte frontal de la broca dejando el diamante expuesto de un octavo a un tercio. Se permite mayor exposición del diamante para formaciones de roca blanda a semiblanda y menor exposición para formaciones duras,

fracturas y abrasivas. Los diamantes son montados de tal forma que la matriz quede cubierta uniformemente. Los diamantes, estos pierden su capacidad de corte principalmente por haberse pulido, fracturado o quemado. La matriz que sujeta los diamantes en una posición de corte está compuesta de carburo de tungsteno en forma de carburo cementado el cual es resistente al desgaste.

Para este estudio brocas de la serie GJDS con diamantes incrustados marca Hero 7 son analizados en la Zona dolores y Zona cobriza.

### **Mecanismos de desgaste en la barrenación.**

El desgaste es definido como la interacción de la superficie expuesta de un material con el medio ambiente, teniendo como resultante la pérdida de material de la superficie expuesta (Rosales-Marín G., [3]). Actualmente se reconocen por lo menos tres mecanismos que gobiernan el desgaste de metal en las operaciones mineras; abrasión, impacto y corrosión (Changhua X. [4]). Sin embargo, en el caso particular de la barrenación es principalmente la abrasión el principal mecanismo de desgaste.

### **Desgaste por abrasión.**

Se da cuando el metal se desplaza sobre el terreno a perforar, en el cual se genera un deterioro. Si, además se ejerce presión a desplazamiento constante, como es en el caso de la barrenación, la pieza sometida al deterioro en este caso la broca, se desgasta hasta quebrarse o romperse, provocando la inutilidad de esta. Este tipo de accidentes genera paros en la producción impactando negativamente los costos de la compañía. Es necesario analizar qué tipo de

fenómeno de abrasión es el que está deteriorando la pieza. De esta manera es posible elegir el tratamiento o recubrimiento adecuado para combatir dicho fenómeno.

En la barrenación, es la abrasión el mecanismo principal por el cual ocurre el desgaste en su superficie, esto debido a la interacción superficial que existe entre la broca diamantina y el mineral perforado. Para comprender de mejor manera como se da el desgaste es necesario fundamentar una teoría del desgaste para barrenos.

### **Modelo de abrasión pura y desgaste isotrópico.**

Este modelo está basado en la teoría lineal del desgaste (Sepúlveda, [4]) la cual es ampliamente aceptada para caracterizar la cinética de consumo, según la cual la velocidad de desgaste del cuerpo moedor es directamente proporcional al área expuesta por éste, a los diferentes mecanismos de desgaste. Por lo cual el fenómeno de desgaste puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\Omega_t = \frac{d(m)}{d(t)} = -k_m \cdot A_b \quad (1)$$

Donde  $\Omega_t$  es la velocidad de desgaste másico (kg/h);  $m$  hace referencia en este fenómeno al peso del barreno, kg;  $A_b$  es el área del cuerpo de la broca expuesta al desgaste (m<sup>2</sup>) y  $k_m$  representa la constante cinética de desgaste, (kg/h/m<sup>2</sup>).

Tomando en consideración la geometría del cuerpo de la broca de barrenación diamante, se obtiene:

$$\frac{d(m)}{d(t)} = -2k_m = -k_b \quad (2)$$

La expresión anterior es fácilmente dando la siguiente ecuación:

$$d = d^R - k_b t \quad (3)$$

Lo cual indica que el desgaste de la corona es uniforme con respecto al tiempo teniendo una cinética de primer orden. Este fenómeno ocurre por micromecanizado y rayado de superficies, es decir, es un fenómeno netamente superficial. En este caso, la velocidad de pérdida de masa es proporcional al área superficial del medio moledor, lo cual equivale a decir que la velocidad de disminución de su diámetro característico es constante en el tiempo.

$$g(d) = \frac{dy}{dx} = \alpha_A = \frac{2k_A}{\rho} \quad (4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de la broca y  $k_A$  es la constante cinética por abrasión pura, la cual depende de la abrasividad de la roca mineral así como la dureza, macro y microestructural de la broca.

## METODOLOGÍA

### Pruebas de dureza en las zonas de estudio.

La dureza es una propiedad física de los minerales y materiales que consiste básicamente en la firme unión de las moléculas que la conforman, impidiendo así que cualquier otro objeto o sustancia lo raye, lo penetre, o lo comprometa a fractura. Uno de los parámetros más importantes para poder cuantificar el desgaste de la barrenación es precisamente la dureza de la zona de estudio, para esto, dos metodologías de dureza han sido seleccionadas para tal fin.



## Dureza de Knoop.

Frederick Knoop [6] desarrollo un ensayo de dureza (dureza de Knoop) para determinar la dureza mecánica en cualquier tipo de mineral, sin embargo, la metodología tuvo tal efectividad que también fue usada para determinar la dureza en minerales o materiales muy frágiles o láminas delgadas, donde solo se pueden hacer hendiduras pequeñas para realizar la prueba. Este procedimiento fue definido por el estándar ASTM D1474.

El ensayo consiste en presionar en una zona de la muestra con un indentador piramidal de diamante, sobre la superficie pulida del material a ensayar, con una fuerza conocida, durante un tiempo de empuje determinado. Las diagonales de la huella resultante se miden usando un microscopio óptico. El indentador es una pirámide que presenta una relación entre la anchura y la altura media de 7:1 y con los ángulos de las caras respectivas de 172 grados sexagesimales para el borde largo y 130 grados sexagesimales para el borde corto. La profundidad de la incisión puede ser aproximadamente de 1/30 de la longitud. Para el cálculo del índice de dureza de Knoop se utiliza la siguiente expresión:

$$H_K = \frac{P}{C_P L^2} \quad (5)$$

Donde  $P$  hace referencia a la carga (kgf mm<sup>2</sup> o MPa), mientras que  $L$  es la longitud de la hendidura en su eje largo (mm), esta ecuación usa un factor de corrección relativo a la forma de la hendidura, idealmente 0.070279 el cual es un número adimensional denotado como  $C_P$ .

## **Dureza de Mohs.**

Friedrich Mohs (1822), definió una escala ordinal cualitativa que caracteriza la resistencia al rayado de varios minerales a través de la capacidad de un material más duro para rayar un material más blando. El test de dureza de Mohs es una prueba muy simple con una escala de diez minerales, en la que el Diamante es el que mayor dureza y el talco el de menor. La metodología consiste en utilizar materiales cuya dureza es conocida para hacer la prueba. Cuando la dureza relativa de ambos materiales es igual, entonces no se producirá entalle. A partir de esta premisa tenemos que si intentamos rayar el material B del cual no se conoce la dureza se empieza a rayar por el más blando (menos duro) en este caso Talco. Si el material talco no raya al material B, entonces B es más duro que el material Talco, para este caso, se procede a intentar rayar con otro mineral más duro por ejemplo yeso. Este procedimiento se repite hasta que algún mineral de diferente dureza logre rayar al material B, de esta manera tendremos una escala de valor entre la cual un mineral A no logra rayar, mientras que otro mineral C consigue rayar, de esta forma conociendo ambas durezas del Mineral A y C podemos calcular mediante una relación la dureza del mineral B.

## **Broca de estudio (HERO 7).**

La serie HEROTM ha surgido como una interesante opción para la perforación de suelos, puede proporcionar una buena relación entre indentación en la roca y vida útil. Se fabrican mediante un proceso de endurecimiento mediante el tratamiento térmico de templado en horno el cual favorece la rigidez en toda la herramienta. Otras características se muestran a continuación:

**Tabla 2. Características físicas de la broca de estudio.**

<b>Características Físicas</b>	<b>Valor</b>
<i>Diámetro interno (mm)</i>	36.4
<i>Diámetro externo (mm)</i>	60.0
<i>Altura de impregnación diamante (mm)</i>	13
<i>Identación preferente en rocas</i>	SiO <sub>2</sub> y Granito

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Dureza en las zonas de estudio.

La dureza calculada por el método de KNOOP y el índice de MOHS fue determinada utilizando la metodología previamente descrita y se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3. Dureza en escalas de Knoop y Mohs.**

<b>Zona de estudio</b>	<b>Dureza KNOOP</b>	<b>Dureza de MOHS</b>
<i>Dolores Y18</i>	654.1	6.25
<i>Cobrizo C12</i>	540.3	5.51

Como se puede apreciar la zona que denota una mayor dureza es la Dolores Y18 con un valor de 654.1 para la escala de Knoop y de 6.5 en la escala de Mohs, Mientras que la zona Cobrizo C12 tiene un valor de dureza de Knoop de 540.3 y en la escala de Mohs de 5.5, esto coloca a ambos macizos rocosos como moderadamente duros. Sin embargo, existen diferencias que pueden afectar el rendimiento de la broca al momento de la barrenación. Para ello es importante poder conocer la Geología del área, y apreciar los eventos estructurales que afectaron o modificaron el

área de estudio de cada una de las zonas, con la cual se puede identificar y describir la secuencia de las rocas presentes en las zonas de estudio. La Figura 1 y Figura 2 describe la Geología para ambas zonas de estudio.

inicio	Rocas perforadas			final
0.m	Skarn	Granodiorita		96 m
	mayoritariamente compactada	compacto	semi-fracturado	

**Figura 1. Geología de Zona Dolores Y18.**

inicio	Rocas perforadas			final
0.m	Skarn	Granodiorita		116 m
	mayoritariamente compactada	compacto	semi-fracturado	

**Figura 2. Geología de Zona Cobriza C12.**

Como se puede apreciar ambos análisis Geológicos – estratigráficos tienen una zona donde predomina la roca tipo skarn en una forma mayoritariamente compactada. La roca tipo Skarn refiere es una roca que tiene una matriz carbonatada con minerales producto de metasomatismo, esta zona es relativamente suave y fácil de perforar. En la zona dolores se puede apreciar que la cantidad de skarn es de 40.64% mientras que la zona cobriza la roca tipo skarn es significativamente mayor teniendo un total de 61.3%. Por otro lado, la cantidad de granodiorita en la zona Dolores Y18 es de 59.36% mientras que para la zona Cobriza C12 es de 38.7%, la granodiorita esta principalmente constituida por cuarzo (>20%) y feldespatos. El cuarzo es un mineral cuya característica principal es ser particularmente abrasivo. También se puede apreciar que la granodiorita se encuentra constituida en dos fases la primera de ella compacta, mientras que la segunda es semi fracturada. Una mayor cantidad de granodiorita semi-fracturada contendrá una mayor distribución de partículas de cuarzo con metales como Cu, Au y Ag ocluidos, por lo que esta fase semi-fracturada será aún más abrasiva que la compacta. Para el caso de la Zona



Dolores de la cantidad total de granodiorita la fase semi-fracturada es predominante con un 71.59%, mientras que para la Zona Cobriza no solo presenta una menor cantidad de granodiorita si no que del total de esta sólo un 58.77% se encuentra en la fase semi-fracturada.

### Resolución del modelo isotrópico de desgaste.

El modelo isotrópico de desgaste fue resuelto para determinar las constantes de consumo de metal  $k_A$ , a través de la ecuación número 4. Los valores de dichas constantes para las zonas estudiadas se encuentran en la Tabla 4. Las constantes cinéticas se obtuvieron usando los datos experimentales para evaluar la capacidad del modelo propuesto para lograr una aproximación numérica confiable a los datos experimentales. La Suma de Error de Residuales (SSR) es una medida de la discrepancia entre los datos y un modelo de estimación, entre una regresión lineal y datos experimentales. La constante cinética de primer orden denota un SSR menores a 1.0 para las zonas la broca Hero 7 en ambas zonas de estudio, con lo cual se puede apreciar que el Modelo de Desgaste Isotrópico puede predecir de buena manera el comportamiento de pérdida de masa en la barrenación para las brocas estudiadas Hero 7.

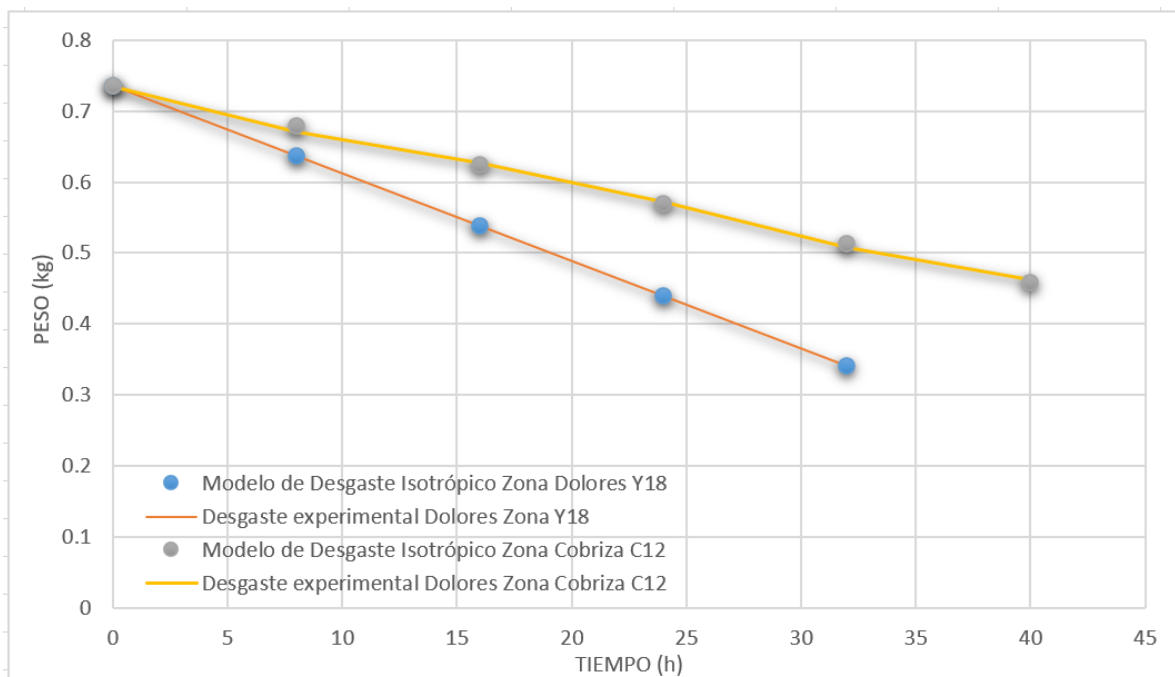
**Tabla 4. Constantes cinéticas de desgaste para las zonas de estudio.**

<b>Zona de estudio</b>	<b>Constante <math>k_A</math></b>	<b>SSR</b>
<i>Dolores Y18</i>	0.0123	0.000016
<i>Cobriza C12</i>	0.0069	0.001521

Como se puede apreciar en la Tabla 4, la constante de cinética de desgaste para la zona de estudio Dolores Y18 describe un valor de 0.0123 kg/h, este valor es significativamente mayor si se

compara con la de la Zona Cobriza C12 la cual solo tiene una constante de desgaste de 0.0069 kg/h.

En la Figura 3, se ha graficado el tiempo (h) versus el peso (kg). Este gráfico describe la pérdida de peso con respecto a tiempo, lo cual puede traducirse en una disminución en el área diamantada que es usada para llevar a cabo la perforación. Como se puede apreciar el tiempo de perforación en la Zona Dolores Y18 solo fue de 33 horas, mientras que para la Zona Cobriza C12 el tiempo de perforación se incrementó siete horas más hasta llegar a las 40 horas antes de ser desechada.



**Figura 3. Desgaste experimental y modelado en las zonas Dolores Y18 y Cobriza C12.**

### Medición del avance en la perforación.

En la Figura 4, se puede apreciar el avance en metros de la perforación de la broca Hero 7, la Zona Dolores Y18 reporta un avance de 96 metros en 40 horas de trabajo antes de ser cambiada;

este es el menor avance entre ambas pruebas debido a las condiciones geológicas de la granodiorita, en su mayor parte está semifracturada en esta zona. La zona Cobriza C12 demostró una mejor eficiencia en el avance en metros con un valor de 116 m en tan solo 32 horas. Con esto podemos concluir que la granodiorita semi-fracturada es un factor que aumenta el desgaste en la broca de estudio (Hero 7).

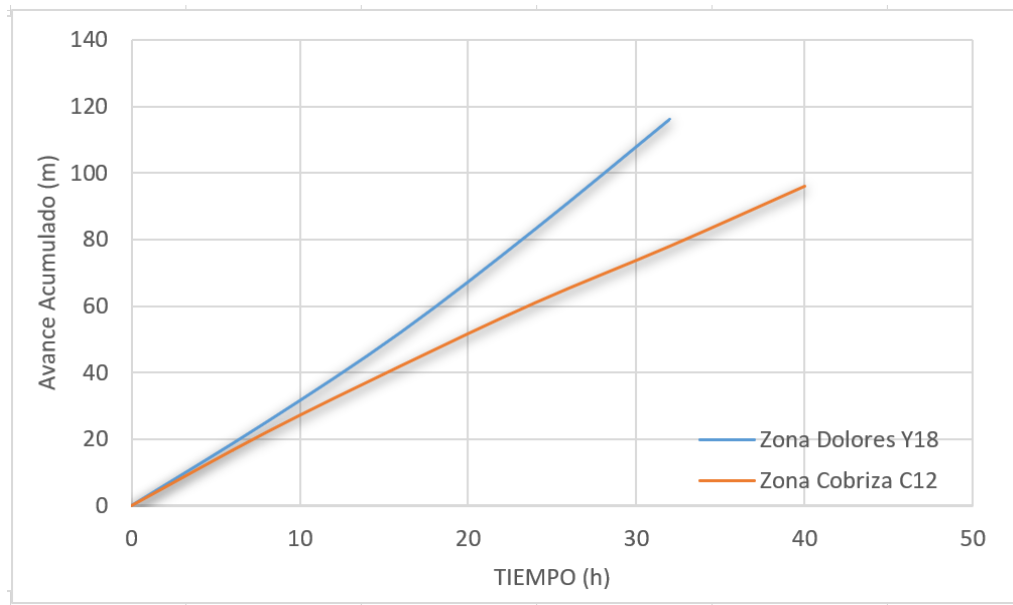


Figura 4. Gráfico de avance de la broca Hero 7 en las zonas de estudio.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos a partir de la resolución del modelo de abrasión pura y desgaste isotrópico enfocado a brocas de perforación diamantina Hero 7, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El modelo de desgaste isotrópico puede predecir el desgaste por el fenómeno de abrasión en las brocas diamantadas para perforación de testigo, siendo este de primer orden, esto

de acuerdo con las pruebas experimentales hechas en las zonas Dolores Y18 y Cobriza C12.

- El índice de desgaste determinado en la resolución de modelo es de 0.0123 kg/h para la zona Dolores Y18, y de 0.0069 kg/h para la zona Cobriza C12, teniendo el mayor índice de desgaste Zona Dolores.
- La geología estructural de la zona demuestra que a mayor cantidad de granodiorita semi-fracturada, el índice de desgaste será mayor debido a que una mayor distribución de partículas de cuarzo puede contener agregados metálicos de Cu, Au y Ag ocluidos.
- Para evaluar el índice de desgaste de las brocas es indispensable conocer las características petrológicas de las áreas de estudio, asimismo las condiciones y su intensidad de eventos geológicos estructurales que han afectado a dichas áreas. Este estudio pretende dar el primer paso en la creación de un modelo fenomenológico geometalúrgico que pueda ser capaz de evaluar las brocas de perforación para la toma de muestra.

## Referencias

- [1] Menacho, J., Concha, F., Mathematical model of ball wear in grinding mills I. Zero-order wear rate, Powder Technology, Volume 47, Issue 1, 1986, Pages 87-96. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)80013-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)80013-4)
- [2] González, J. (2013), Análisis estructural de la Sierra del Fraile y sistemas de mineralización del distrito minero La Paz, S.L.P, Tesis de Maestría, pp 125-135. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/4087>
- [3] G. Rosales-Marín, J. Andrade, G. Alvarado, J.A. Delgadillo, E.T. Tuzcu, Study of lifter wear and breakage rates for different lifter geometries in tumbling mill: Experimental and simulation



- analysis using population balance model, *Minerals Engineering*, Volume 141, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105857>.
- [4] Changhua Xie, Yongzhi Zhao, (2021), Investigation of the ball wear in a planetary mill by DEM simulation, *Powder Technology*, 117057. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117057>
- [5] Gangopadhyay A, Moore J. (1985), The role of abrasion and corrosion in grinding media wear. *Wear*, vol. 104, pp 49-64. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90245-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90245-5)
- [6] Sepulveda, J. E. (2004), Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale, *Minerals Engineering*, vol 17, pp 1269–1279. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.007>
- [7] F. Knoop, C.G. Peters and W.B. Emerson, “A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, V. 23 n° 1, julio de 1939, Research Paper RP1220, Pp. 39–6. <https://archive.org/details/jresv23n1p39/mode/2up>

**Cómo citar este artículo:**

Ortega, Y., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., Nava Gómez, D. P., & Rosales Marín, G. (2022). CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN BROCAS DE BARRENACIÓN DIAMANTE MEDIANTE EL MODELO DE ABRASIÓN PURA Y DESGASTE ISOTRÓPICO. *EPISTEMUS*, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.184>