

ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN Y VOLADURAS EN MINERÍA DE SUPERFICIE EMPLEANDO EL ENFOQUE DE LA PROGRAMACIÓN ESTRUCTURADA

ANALYSIS AND DESIGN OF DRILLING AND BLASTING OPERATION ON OPEN PIT MINING USING FOCUS ON STRUCTURED PROGRAMMING

JUAN CARLOS DÍAZ-MARTÍNEZ

Ing., Universidad Nacional de Colombia, jcdiazmar@unal.edu.co

MELISSA ANDREA GUARÍN-ARAGÓN

Ing., Universidad Nacional de Colombia, maguarar@unal.edu.co

JOVANI ALBERTO JIMÉNEZ-BUILES

Ph. D., Universidad Nacional de Colombia, jajimen1@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 27 Junio2012/ Aceptación: 21 Septiembre: 2012 / Recibida Versión Final: 04 Diciembre 2012

RESUMEN: En este artículo se presenta el análisis y el diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada. El propósito de este trabajo es crear una interfaz, por medio de la cual se ingresan la densidad del explosivo, diámetro e inclinación de la perforación, resistencia a la compresión de la roca y dimensiones del banco. Luego se obtiene el valor de las variables más importantes que acondicionan el diseño de la operación de perforación y voladuras, tales como: altura del banco, burden, espaciamento, taco, carga del barreno, numero de barrenos, factor de carga, entre otras. Esta aproximación permite diseñar la operación de perforación y voladuras en menor tiempo y disminuir el error humano que se tiene por el uso repetitivo de las fórmulas para cálculos de los parámetros involucrados en el diseño de la perforación y voladura en minería de superficie.

PALABRAS CLAVE: Perforación, voladura, minería, minería ilegal, programación estructurada.

ABSTRACT: This article show analysis and design drilling and blasting operation on surface mining it focus on structured programming. The idea about this article a program where you can introduce different variables like, explosive density, diameter, inclination drilling, compressive strength rock and rock mass design, after that, we get most important variables for this design like rock mass height, burden, spacing, hole charging , hole number, load factor.

This article has allowed design drilling and blasting operation a lower time and get down mistake of the people that get it for repetitive use of calculation for parameter used in this design in drilling and blasting operation on surface mining.

KEYWORDS: Drilling, blasting, mining, illegal mining, structured programming.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década la minería ha cobrado gran importancia dentro del contexto nacional por su aporte a la economía, representada en el aumento de las exportaciones y contribución al crecimiento del producto interno bruto colombiano (Cárdenas y Reina, 2008). El escenario minero nacional está dominado por los sectores auríferos, la industria del ferroníquel y el sector carbonífero. Estos dos últimos son posibles en su mayoría por la aplicación de los métodos de minería a cielo abierto.

La optimización de las explotaciones mineras a cielo abierto, es en la actualidad, una herramienta que le permite a las diferentes empresas explotadoras de los recursos minerales aumentar la vida de sus diferentes proyectos mineros, explotar recursos minerales de menor tenor, incrementar las reservas probadas del mineral de interés y obtener utilidades mayores, entre otros. Lo anterior se da como una función del planeamiento y diseño minero, teniendo en cuenta que un yacimiento mineral es un negocio (Hustrulid y Kuchta, 2006). La operación de perforación y voladuras afectan el costo de la operación directamente y los costos operativos totales (Busuyi, 2009).

En minería, la optimización se lleva a cabo mediante la evaluación y análisis de cada una de las operaciones unitarias necesarias para la extracción del recurso mineral de interés (Afeni y Osasan, 2009). Una de estas, es la operación de perforación y voladura, la cual es uno de los métodos de arranque de material más utilizado, ya que permite obtener mayor cantidad de material arrancado en un tiempo más corto (Melieh et al., 2009). Puede ser empleado en rocas con diferentes propiedades físicas y mecánicas, además ofrece una adecuada fragmentación del material, aspecto que es fundamental para la remoción y transporte de material volado.

En este artículo se presenta el diseño y análisis de la operación de perforación y voladura en minería de superficie. La metodología utilizada fue la programación estructurada, la cual permite diseñar y analizar con facilidad algoritmos que por medio del ingreso de datos (variables de entrada), y la ejecución de ciertos cálculos (procesamiento), es posible encontrar la solución a un determinado problema de manera secuencial.

Para el diseño de las voladuras es necesario realizar ciertos cálculos matemáticos y tener en cuenta varias consideraciones, que hacen de este, una operación compleja. Debido a lo anterior, es necesario idear un método que permita obtener un diseño de voladura más sencillo y en menor tiempo. Por tal motivo, se ha creado un algoritmo, que permite calcular todas las variables necesarias para el diseño óptimo de la voladura, mediante el ingreso de datos claves para dicho cálculo.

En el siguiente capítulo se presenta el marco teórico de referencia haciendo énfasis en la importancia de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie. En los capítulos tres y cuatro se exponen las fases de la metodología y análisis de los resultados respectivamente; para finalmente en el capítulo cinco presentar las conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1. La Perforación de rocas

La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura (Karlinski et al., 2009). Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores,

denominados taladros, barrenos, hoyos o *blast holes*. Esta operación es necesaria para lograr el confinamiento del explosivo y aprovechar mejor las fuerzas expansivas (Yue et al., 2009).

Se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpes y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la roca y hasta una profundidad dada por la longitud del barreno utilizado. La eficiencia en perforación consiste en lograr la máxima penetración al menor costo (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

Los métodos de perforación más empleados son los métodos rotativos y rotopercutivos (Franca, 2012). Siendo este último el sistema más clásico de perforación de barrenos. La perforación a rotopercusión se basa en la combinación de las siguientes acciones: percusión, rotación, empuje y barrido (Wang et al., 2010).

La operación de perforación depende directamente de la dureza y abrasividad de la roca (Correa, 2009). La fragmentación de la roca se considera el parámetro más importante en las operaciones de minería a causa de sus efectos directos sobre los de perforación y voladuras (Morin y Ficarazon, 2006). La resistencia de la roca determina el método o medio de perforación a emplear: rotación simple o rotopercusión. Por lo general cuanto más blanda sea la roca mayor debe ser la velocidad de perforación. Por otro lado, cuanto más resistente sea a la compresión, mayor fuerza y torque serán necesarias para perforarla Centro Tecnológico de Voladura EXSA S.A (2009).

2.2. Voladura

La voladura es uno de los medios principales de extracción de minerales en las operaciones de minería a cielo abierto. El propósito principal de la operación de voladura es la fragmentación de la roca y para esto se requiere de una gran cantidad de explosivos. Los explosivos liberan una gran cantidad de energía durante la explosión, en donde, sólo el 20-30% es utilizada para la ruptura y el desplazamiento de las rocas, mientras que el resto de esta energía es desperdicia en forma de efectos secundarios ambientales (Ghasemi et al., 2011).

La voladura se puede definir como la ignición de una carga masiva de explosivos. El proceso de voladura

comprende el cargue de los huecos hechos en la perforación. Con una sustancia explosiva, que al entrar en acción origina una onda de choque y, mediante una reacción, libera gases a una alta presión y temperatura de una forma substancialmente instantánea, para arrancar, fracturar o remover una cantidad de material según los parámetros de diseño de la voladura misma (Glosario Técnico Minero, 2003).

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de iteración (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

La fragmentación del macizo rocoso es causada inmediatamente después de la detonación. El efecto de impacto de la onda de choque y de los gases en rápida expansión sobre la pared del taladro, se transfiere a la roca circundante, difundiéndose a través de ella en forma de ondas o fuerzas de compresión, provocándole solo deformación elástica, ya que las rocas son muy resistentes a la compresión. Al llegar estas ondas a la cara libre en el frente de voladura causan esfuerzos de tensión en la masa de roca, entre la cara libre y el taladro. Si la resistencia a la tensión de la roca es excedida, esta se rompe en el área de la línea de menos resistencia (burden). En este caso las ondas reflejadas son ondas de tensión que retornan al punto de origen creando fisuras y grietas de tensión a partir de los puntos y planos de debilidad naturales existentes, agrietándola profundamente (efecto de craquelación) (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

Casi simultáneamente, el volumen de gases liberados y en expansión penetra en las grietas iniciales ampliándolas por acción de cuña y creando otras nuevas, con la que se produce la fragmentación efectiva de la roca. Si la distancia entre el taladro y la cara libre está correctamente calculada la roca entre ambos puntos cederá. Luego los gases remanentes desplazan rápidamente la masa de material triturado hacia adelante, hasta perder su fuerza por enfriamiento y por aumento del volumen de la cavidad formada en la roca. En este momento en que los fragmentos o detritos caen y se acumulan para formar la pila de escombros o material volado. Concluyendo de esta forma el proceso de voladura (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

3. METODOLOGIA

En este capítulo se presenta la descripción de las variables de diseño de las voladuras (variables de entrada) y el algoritmo empleando para el cálculo de los parámetros que condicionan la operación de perforación y voladura.

3.1. Variables de diseño de las voladuras

3.1.1. Diámetro del pozo (D): es el diámetro con el que se construye el barreno de perforación, este depende principalmente del equipo que se emplea para su construcción (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

3.1.2. Inclinación de la perforación: el componente principal del movimiento de las rocas es perpendicular al eje de los barrenos, por lo que cuando estos se inclinan el material se proyecta hacia arriba y hacia adelante (Long, 2003).

En teoría, el desplazamiento horizontal es máximo cuando el ángulo de los barrenos es de 45° , pero en la práctica lo habitual es utilizar inclinaciones no superiores a los 30° . Esto es debido a las características de los equipos de perforación, que en algunos casos, incluso aconsejan la perforación vertical, como sucede con los grandes equipos rotativos con rocas duras (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

3.1.3 Densidad del Explosivo: es el peso específico g/cm^3 (a mayor densidad, mayor potencia), varía entre 0,7 a $1,6 \text{ g/cm}^3$. Todo explosivo tiene una densidad crítica encima de la cual ya no detona (Karlinsku et al., 2008)

3.1.4 Resistencia a la compresión de la roca (σ_c): es la propiedad mecánica de la roca de oponerse a las fuerzas de compresión y tensión (Yilmaz, 2009). Esta propiedad determina la energía que se necesita aplicar para la perforación del macizo rocoso y condiciona en gran parte los parámetros y características de la operación de perforación y voladura (Zhantao e Itakura, 2012).

3.1.5 Dimensiones de la voladura: comprende el área superficial delimitada por el largo del frente y el ancho o profundidad del avance proyectado (m^2) por la altura de bando o de corte (H), en m^3 (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009).

Las variables de diseño de voladura descritas anteriormente, son las que se utilizan como variables de entrada en el algoritmo para el diseño de la operación de perforación y voladura. Dichas variables nos permiten obtener como resultado, parámetros fundamentales como el burden (B),

espaciamiento (E), altura de banco (H), taco (T), sobre perforación (SP), volumen de carga (VC), factor de carga (PF), entre otras, que influyen directamente en la ejecución de la voladura en minería de superficie.

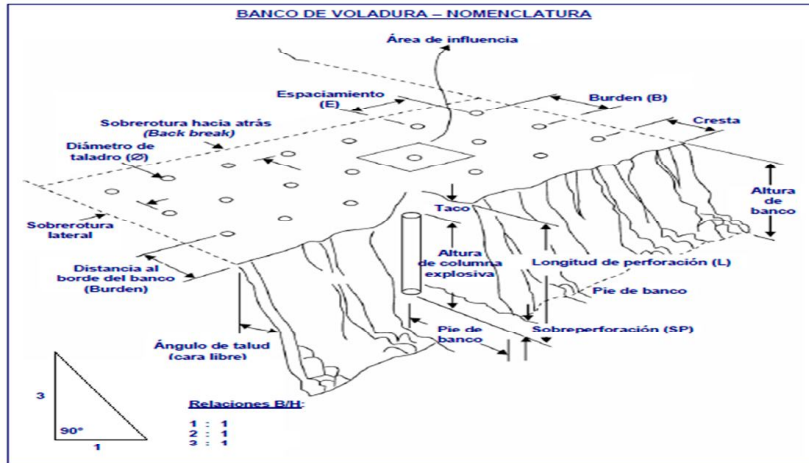


Figura 1: variables de diseño en Voladura en banco.
Tomado de Centro Tecnológico de Voladura EXSA S. A, 2009

3.2. Algoritmo

El propósito de esta fase es mostrar el algoritmo empleado que permite realizar los cálculos de los parámetros fundamentales en el diseño de perforación y voladura.

Para dicho objetivo, se definieron cuatro funciones en un módulo, como se puede observar en la tabla 1. Estas funciones permiten calcular los valores de los parámetros: Volumen de carga (VC), carga del barreno (CP), Volumen del material removido por barreno (BCM) y el factor de carga (PF).

Tabla 1: Módulo de funciones.

Módulo 1 : Creación de Funciones
Function VC(D As Single, L As Single, T As Single) As Single $VC = (3.1416 * (L - T) * ((D / 1000) ^ 2)) / 4$ End Function
Function CP(VC As Single, D As Single) As Single $CP = VC * D$ End Function
Function BCM(B As Single, E As Single, H As Single) As Single $BCM = B * E * H$ End Function
Function PF(CP As Single, BCM As Single) As Single $PF = CP / BCM$ End Function

Luego de definir las funciones, se presenta el algoritmo que permite lectura de las variables de entrada y el cálculo de cada uno de los parámetros necesarios para la voladura.

En el diseño del algoritmo se utilizó un condicional simple que permite realizar el cálculo de los diferentes parámetros teniendo en cuenta la resistencia a la compresión de la roca, es decir, si se trata de una roca

dura ($\sigma_c > 120$ MPa) o una roca blanda ($\sigma_c < 120$ MPa).

que se ejecutó para el cálculo de los diferentes parámetros en el diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie.

En la tabla 2, se describe de forma sistemática y ordenada a través de un pseudocódigo el algoritmo

Tabla 2: Pseudocódigo para el cálculo de los parámetros de perforación y voladura.

Fuente: Elaboración propia.

Botón ejecutar: Calculo de variables de diseño de voladura	
1:	INICIO
2:	Leer datos de entrada
3:	Si ($R \geq 120$)
	R: Resistencia a la compresión de la roca.
4:	Calcular parámetros
	HB: Altura de Banco
	B: Burden
	E: Espaciamiento
	T: Taco
	SP: Sobre Perforación
	LP: Longitud de Perforación
	VC: Volumen de carga → Se llama la función VC
	CP: Carga del Barreno → Se llama la función CP
	BCM: Vol Mat removido por barreno → Se llama la función BCM
	PF: Factor de Carga → Se llama la función PF
	VT: Volumen de Tajo
	NB: Número de Barrenos
	CE: Cantidad de Explosivo Empleado
5:	Mostrar parámetros para roca dura
6:	De lo contrario
7:	Calcular parámetros
8:	Mostrar parámetros para roca blanda
9:	Fin si
10:	FIN

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

de voladura y el algoritmo realizado en este artículo.

Para comparar y valorar los resultados obtenidos tras el diseño de este algoritmo, se presenta a continuación una tabla comparativa, entre el modelo tradicional del diseño

Adicionalmente se presenta un ejemplo donde se ejecuta el algoritmo para el cálculo de los parámetros en la operación de perforación y voladuras.

Tabla 3: Comparación entre el método tradicional y el algoritmo diseñado.

Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO TRADICIONAL	ALGORITMO
Requiere más tiempo para el cálculo de los diferentes parámetros.	Permite el cálculo de los diferentes parámetros prácticamente de forma instantánea.
Mayor posibilidad de equivocarse debido al error humano.	Menor posibilidad de error.
Se deben realizar operaciones matemáticas, que se vuelven tediosas y algunas veces complejas.	No es necesario conocer las fórmulas, puesto que el algoritmo las tiene implícitas en su diseño.
Dificultad en la obtención de resultados, influyendo negativamente en la interpretación de dicha información.	Facilidad en la obtención de resultados: de forma más organizada y estructurada.
Mayor inversión de capital humano y tiempo lo que se traduce en mayores costos.	Menor inversión en capital humano y ahorro de tiempo lo que para el sector minero significa disminución de costos.
Poca optimización en la metodología aplicada para el cálculo de los diferentes parámetros.	Optimización en la metodología aplicada para el cálculo de los diferentes parámetros.

A continuación en la figura 2 se muestra un ejemplo de los datos arrojados por el algoritmo, para una voladura con un diámetro de perforación de 76mm,

una inclinación de 10° y una densidad de explosivo de 804kg/m^3 para una roca dura con resistencia a la compresión de 180MPa .

DISEÑO DE VOLADURAS

INGRESE EL DIAMETRO DE PERFORACIÓN [mm] INGRESE LA INCLINACIÓN DE LA PERFORACIÓN [°] INGRESE LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO [kg/m³] INGRESE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION [MPa]

76 10 804 180

INGRESE LAS DIMENSIONES DEL TAJO

LARGO [m] PROFUNDIDAD [m]

200 50

Los parametros para una voladura con un diametro de perforación de 76mm, una inclinación de 10° y una densidad de explosivo de 804kg/m^3 para una roca dura con resistencia a la compresión de 180MPa son:

Altura de banco [m]	4,56
Burden [m]	1,824
Espaciamiento [m]	2,0064
Taco [m]	1,52
Sobreperforación [m]	0,608
Volumen de carga [m ³]	1,686816E-02
Carga del barreno [kg]	13,562
Volumen removido [m ³]	16,68811
Factor de carga [kg/m ³]	0,8126745
Volumen de tajo [m ³]	45600
Numero de barrenos	2732,484
Cant. de explosivo [kg]	37057,96

EJECUTAR

LIMPIAR

SALIR

Figura 2: Ejemplo.

Teniendo en cuenta los datos suministrados en el ejemplo anterior fueron obtenidos los siguientes resultados:

El volumen de material a volar es de 45.600m^3 , para el cual se necesitan aproximadamente 37.058Kg de explosivo, con un total de 2.732 barrenos, espaciados 2m y cargados cada uno con aproximadamente $13,562\text{Kg}$ de explosivo y un taco de $1,52\text{m}$.

La relación entre el peso de explosivo utilizado y el volumen de material roto, es decir, el factor de carga (PF) para este caso en particular fue de $0,813\text{Kg/m}^3$.

5. CONCLUSIONES

En el caso en el cual el único problema a resolver es el cálculo de las variables o parámetros empleando las fórmulas empíricas en el diseño de la operación de perforación y voladuras, el uso del algoritmo presentado en este trabajo es válido. Sin embargo

debe tenerse en cuenta que el programa solo está diseñado para arrojar los resultados, y que la correcta interpretación o no de estos depende directamente de la preparación y facultad que posea la persona a cargo.

Este algoritmo a diferencia del método tradicional o manual ofrece la posibilidad de diseñar la operación de perforación y voladuras en menor tiempo, prácticamente de forma instantánea puesto que no es necesario conocer las fórmulas para el cálculo de los diferentes parámetros, ya que el algoritmo las tiene implícitas en su diseño. Además con la aplicación del algoritmo se evita incurrir en el error humano que se tiene por el uso repetitivo de las fórmulas para el cálculo de los parámetros involucrados en el diseño de la perforación y voladura en minería de superficie.

Los métodos expuestos en este artículo pueden ser aplicados de forma manual, aunque es un proceso que suele convertirse en largo, complejo y tedioso, debido a las numerosas fórmulas y consideraciones que deben tenerse en cuenta, en especial al momento de considera

el valor de la resistencia a la compresión de la roca, parámetro que condiciona todo el proceso.

La mayor ventaja que ofrece el algoritmo presentado en este artículo es la facilidad y rapidez con que se obtienen las diferentes variables que condicionan la operación de perforación y voladura, puesto es solo cuestión de ingresar los datos de entrada a la interfaz para conocer el valor de dichas variables. Esta ventaja que permite el algoritmo se traduce en ahorro de tiempo, lo cual para la industria minera es sinónimo de disminución de costos.

El diseño y análisis de la operación de perforación y voladuras por medio de la aplicación de la programación estructurada permite obtener la información de forma más atractiva, es decir, ordenada, estructurada, simplificada y lo que es mejor en menor tiempo. Enriqueciendo de esta manera la operación de perforación y voladura en minería de superficie.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo que se describe en este documento forma parte del programa de investigación: “Plan de Acción para el fortalecimiento de los grupos de Investigación Inteligencia Artificial en Educación y Diseño Mecánico Computacional” (código Hermes: 14198) patrocinado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

[1] Afeni, T. Osasan, S. (2009) Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine. A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. Mining science and technology. Nigeria.

[2] Busuyi, T. (2009). Optimization of drilling and blasting operations in an open pit mine the SOMAIR experience. Mining Science and Technology. South Africa.

[3] Cárdenas, M. y Reina, M., 2008. La minería en Colombia: Impacto Socioeconómico y Fiscal. 1st ed. Colombia: Fedesarrollo

[4] Correa, A. (2009). La geomecánica en la perforación y voladura de rocas. Información minera de Colombia. Colombia.

[5] Franca, L. (2010). A bit-rock interaction model for rotary-percussive drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Australia.

[6] Ghasemi, E. Sari, M. Ataei, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Turkey.

[7] Glosario Técnico Minero, (2003). Ministerio de Minas y Energía. Bogotá D.C., Republica de Colombia.

[8] Hustrulid, W y Kuchta, M. (2006). Open pit mine planning and design. Taylor & Francis plc. London, UK.

[9] Karlinski, J. Rusiński, E. Lewandowski, T. (2008). New generation automated drilling machine for tunnelling and underground mining work. Automation in Construction. Poland.

[10] Long, O. (2003). Problems in underground deep diamond drilling. Geoexploration. Norway.

[11] Centro Tecnológico de Voladura EXSA S.A, (2009). Manual Práctico de Voladura, International Journals of Rock Mechanics & Mining Sciences.

[12] Patenlidis, L. (2008). Rock Slope Stability Assessment Through Rock Mass Classification Systems. Greece.

[13] Melieh, I. Mahmut, Y. Adnan, K. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Turkey.

[14] Morin, M. Ficarazzo, F. (2006). Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz Ram model. Computers & Geosciences. Canada.

[15] Wang F. Renc T. Hungerford F. TU S. Aziz N. (2012). Advanced directional drilling technology for gas drainage and exploration in Australian coal mines. First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering. Sciverse Science Direct. China.

[16] Yilmaz, I. (2009). A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Turkey.

[17] Yue, Z. Lee, C. Law, K. Tham, L. (2003). Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization-illustrated by a case example in Hong Kong. China.

[18] Zhantao, L. Itakura, K. (2012). An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength. Soils and Foundations. China.

