

Calidad en el cálculo del Burden (B) basado en el modelo matemático de López Jimeno para contribuir en la gestión del riesgo en las voladuras, en cantera de roca caliza

Quality in the calculation of the Burden (B) based in the mathematical model of López Jimeno to contribute in the management of the risk in the blasting, in quarry of limestone rock

Manuel F. Peña Castillo ¹

Recibido: Enero 2019 - Aprobado: Junio 2019

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es contribuir en calcular aproximadamente la mejor distancia perpendicular desde el centro del taladro (agujero cilíndrico) de producción a la cara libre más cercana llamado Burden (B)(Konya, 1998), siendo el factor más importante en el diseño de la voladura en la cantera La Merced, para optimizar el tamaño del fragmento a 35 c.m. requerido y contribuir en la gestión de los riesgos en las voladuras de la cantera.

Para ello, se han realizado pruebas en las diferentes voladuras de roca caliza en la cantera llamada La Merced ubicada en el distrito de Chilca - Lima, donde se determinó que el mejor modelo matemático para el cálculo del burden es el de López Jimeno (1980) para taladros con perforaciones de 1,5 pulgadas de diámetro y con una longitud de perforación de 8 pies; donde las variables intervinientes son: diámetro del taladro, la densidad de la roca, velocidad sísmica de la roca, densidad del explosivo confinado en el taladro y la velocidad de detonación del explosivo.

Se realizó la recopilación de datos cualitativos y cuantitativos en información, basada en la técnica ensayo y error para el cálculo del Burden (B) más óptimo acompañado de todo un diseño adecuado de la malla de perforación, se evaluó las características y condiciones de la roca para evaluar luego los resultados de la voladura.

Palabras clave: Burden; densidad del explosivo confinado; diámetro del taladro; densidad de la roca; espaciamiento entre taladros; impedancia del explosivo; impedancia de la roca; velocidad sísmica; velocidad detonación.

ABSTRACT

The objective of the present work is to contribute in calculating approximately the best perpendicular distance from the center of the drill (cylindrical hole) of production to the nearest free face called Burden (B), being the most important factor in the design of the blasting in the Merced quarry, to optimize the fragment size at 35 c.m. required and contribute in the management of the risks in the blasting of the quarry.

For this, tests have been carried out in the different limestone rock blasts in the quarry called the Merced located in the district of Chilca - Lima, where it was determined that the best mathematical model for the calculation of the burden is that of López Jimeno (1980) for drills with 1,5-inch diameter perforations and with a drilling length of 8 feet; where the intervening variables are: diameter of the drill, the density of the rock, seismic velocity of the rock, density of the explosive confined in the drill and the speed of detonation of the explosive.

The collection of qualitative and quantitative data in information, based on the trial and error technique for the calculation of the most optimal Burden (B) accompanied by an adequate design of the perforation mesh, the characteristics and conditions of the rock were evaluated to evaluate later the results of the blasting.

Keywords: Burden; density of the confined explosive; drill diameter; density of the rock; spacing between drills; impedance of the explosive; impedance of the rock; seismic speed; detonation speed.

¹ Ingeniero de minas. UNI, maestría en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. E-mail: manuel.pena@unmsm.edu.pe; manuelpc25@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Las explotaciones mineras en open pit para la extracción de materiales de construcción son de gran importancia para el desarrollo de infraestructura y a la construcción de obras civiles.

Cantera es el término genérico que se utiliza a las explotaciones de rocas industriales y ornamentales. Se trata por lo general, de pequeñas explotaciones próximas a los centros de consumo, debido al valor relativamente escaso que poseen los minerales extraídos, que pueden operarse mediante los métodos de banco único.

En la cantera La Merced se extrae roca caliza que es el ingrediente principal para la elaboración del cemento, por lo cual las operaciones de voladura superficial en la cantera presentan mínimo dos caras libres, donde los taladros se perforan paralelamente a la cara frontal de alivio lo que facilita la salida de los disparos, pero no siempre los resultados en fragmentación y estabilidad del macizo rocoso están dentro de los estándares de seguridad requeridos. Por lo cual en la cantera se tuvo demasiado dimensionamiento en la fragmentación al utilizar una malla cuadrada¹, con un burden y espaciamiento entre taladros de 1,40 m a 1,50 metros, llegando a tener aproximadamente un 20% del total del volumen de fragmentos resultantes de la voladura un diámetro de 60cm a 80cm de pedrones grandes que eran reducidos posteriormente con voladura secundaria.

En vista de esta problemática por el alto riesgo de causar algún incidente en el rompimiento de estos fragmentos y en el carguío, se realizaron los estudios para mejorar la calidad de las voladuras y se empezó por optimizar el burden mediante el uso del modelo matemático de López Jimeno (2003).

Teniendo presente que la mecánica² de rotura de rocas es muy importante en el proceso de fracturación de la roca.

La voladura comprende a la acción de una mezcla explosiva 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 interacción.

La rotura de rocas requiere condiciones fundamentales como: confinamiento del explosivo en el taladro, cara libre, relación entre diámetro del taladro a distancia óptima a la cara libre (burden), condiciones geológicas, parámetros de la mezcla explosiva, pero lo difícil y crítico hoy en día es determinar con precisión el burden (B), para un buen diseño de malla de perforación.

Pues para el cálculo del burden se tomó en consideración parámetros como el diámetro del taladro de producción, la impedancia (Agreda, 1993) de la roca que es definida como el producto de la velocidad de la onda P (sísmica) (Exsa, 2002) y la densidad del macizo rocoso y la impedancia del explosivo que es definida como el producto de la densidad de la mezcla explosiva confinada en el taladro y la velocidad

de detonación (Exsa, 2002). Por ello, el presente trabajo tiene por objetivo calcular aproximadamente el burden (B) con los parámetros mencionados, tomando como base el modelo matemático de López Jimeno. Con el nuevo burden calculado se optimizó el diseño de la malla de perforación y se obtuvo una fragmentación aproximada de 33cm de diámetro a un mejor costo.

II. METODOLOGÍA

2.1. Aplicación del modelo matemático de López Jimeno e identificación de resultados

Se utilizó el modelo matemático de López Jimeno (1980) para calcular el Burden en la cantera La Merced para un diámetro de perforación de 1,5 pulgadas y una longitud de perforación de 8 pies.

El modelo matemático de López Jimeno es el siguiente:

$$B = 0,76 \times D \times F$$

Donde:

B = burden en metros

D = diámetro del taladro de producción en pulgadas

F = factor de corrección en función del tipo de roca y del explosivo.

F = f roca x factor explosivo

d_{roca} = densidad de la roca en gr/cc

$d_{explosivo}$ = densidad del explosivo en gr/cc, según fabricante.

$V_{sismica}$ = velocidad sísmica en m/s

$V_{explosivo}$ = velocidad de detonación del explosivo en m/s

$$f_{roca} = (2,7 \times 3500)^{0,33} \div (d_{roca} \times V_{sismica})^{0,33}$$

$$f_{explosivo} = (d_{explosivo} \times V_{explosivo}^2)^{0,33} \div (1,3 \times 3660^2)^{0,33}$$

$$F = 0,0836 \times (I_e \times V_d \div I_r)^{0,33}$$

2.2 Se realizaron cambios en el modelo matemático de López Jimeno (1980) al no tener los resultados esperados con el B = 0,86m., los costos en perforación aumentaron por el número mayor de taladros perforados, aumento del factor de carga explosiva, tamaño de fragmento aproximado de 23c.m. y un mayor daño al macizo rocoso.

Se recopilieron datos mediante prueba y error en diferentes voladuras en la cantera, con una revisión bibliográfica de acuerdo a U. Langefors (1963) y el modelo matemático de López Jimeno (1980), para ser aplicado en cada diseño de la malla de perforación.

En revisiones bibliográficas de López Jimeno, se encontró que para el caso de taladros con diámetros menores a 6,5 pulgadas el valor del burden deberá ser afectado por un coeficiente de C = 0,9.

1 Figura N° 1. Diseño de voladura en open pit

2 Figura N°2. Fases de la voladura-mecánica de rotura. Manual de Exsa. Langefors y B. Kihlstrom. (1963)

Los cambios realizados al modelo matemático son los siguientes:

1. Se consideró el coeficiente $C = 0,9$
2. Se varió el $F =$ factor de corrección en función del tipo de roca y del explosivo. Se Consideró la densidad del explosivo confinado en el taladro.
3. En las pruebas realizadas se encontró que el factor F es inversamente proporcional al factor explosivo con un diámetro de 1,5 pulgadas:

Por lo tanto: $F = f_{roca} \div \text{factor explosivo}$

Quedando el nuevo modelo matemático de la siguiente manera:

$$B_1 = 0,684 \times D \times F$$

Donde:

$B_1 =$ burden en metros.

$$f_{roca} = (2,7 \times 3500)^{0,33} \div (d_{roca} \times V_{sismica})^{0,33}$$

$$f_{explosivo} = (d_{explosivo\ confinado} \times V_{explosivo}^2)^{0,33} \div (1,3 \times 3660^2)^{0,33}$$

$D =$ diámetro del taladro producción en pulgadas.

$$F = 5028 \div (I_e \times V_d \div I_r)^{0,33}$$

$I_r =$ impedancia de la roca $= d_{roca} \times V_{sismica}$

$I_e =$ impedancia del explosivo $= d_{explosivo\ confinado} \times V_d$

$V_d =$ velocidad de detonación del explosivo en m/s

2.3 El diseño de malla (ENAEX, 2012) de perforación y voladura involucra varios aspectos y variables (ver Figura N°1). Las condiciones particulares de cada mina determinaran los detalles del diseño de voladura superficial. Las condiciones son: diámetro del taladro, burden, espaciamento, altura del banco, condiciones de agua, tipo de roca, explosivos, etc.

Tabla N° 1. Ejemplo del cálculo de burden en la cantera, utilizando el modelo matemático de López Jimeno sin modificar

Burden utilizado en voladuras anteriores (B)	Burden calculado por López Jimeno (B)	Diámetro taladro producción (D)	densidad de Roca (d roca)	Velocidad Sísmica de la roca (Vsísmica)	densidad Explosivo ANFO (d explosivo)	Velocidad detonación (Vexplosivo)	Factor de corrección
1,40m - 1,50m	0,86m	1,5 pulg.	2,70 gr/cc	4 580 m/s	0,80 gr/cc	3 500 m/s	0,757

Fuente. Elaboración propia

DISEÑO DE VOLADURA EN OPEN PIT



Figura N° 1. Diseño de Voladura en OPEN PIT

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Generalidades

Se realizaron estimaciones para el cálculo del burden con diferentes modelos matemáticos en la cantera de caliza, los resultados no fueron los esperados, pero en las pruebas con el modelo matemático mejorado de López Jimeno fue el que nos dio mejores resultados al utilizar el burden de 1,10 m (ver tabla N° 2) y al obtener un diámetro de fragmentación promedio de 33 c.m. a menor costo y se minimizaron también los riesgos en la generación de fragmentos subdimensionado.

La densidad (m/v) del explosivo confinado en el taladro, depende de la cantidad en kilos de mezcla explosiva y del volumen que ocupa en el taladro en una longitud de perforación de 8 pies. La cantidad de explosivo es de 1,6 kg de Anfo por taladro (Konya Calvin, 1998). Ver Figura N° 4.

La impedancia es definida como el producto de la velocidad por la densidad, describe el comportamiento de oposición y resistencia.

Así se tiene, que la impedancia del explosivo se refiere al producto de la densidad del explosivo cargado dentro del taladro, por la velocidad de detonación de dicho explosivo.

Mientras que, la impedancia de la roca es definida como el producto de la velocidad de la onda sísmica por la densidad de la roca.

Al respecto, las pruebas realizadas para fines del presente trabajo de investigación se llegó a un resultado final, con base en las mediciones realizadas en campo. (Ver Tabla N° 2).

El promedio de longitud de perforación es 2,4m. Se estimó un taco según ASH de 70% del burden: 0.70 x 1,1m = aproximadamente 0.8m, quedando una longitud para la carga de explosivo de 1,6m.

La cantidad de explosivo aproximado en kilos es de 1,6kg calculado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad kg. de explosivo por metro de carga} &= \text{densidad Anfo} \times \pi \times (\frac{\text{Ø}_{\text{taladro mm}}}{2})^2 / 4000 \\ &= 0,8 \times 3,1416 \times 1451,61 / 4000 \\ &= 0,912 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

En un taladro será 0,912 x 1,6m = 1,5 kg de Anfo; pero fue conveniente aumentar a 1,6kg por los buenos resultados obtenidos.

El taco no es corto, no se obtuvo resultados de Fly Rock.

D confinada Anfo en el taladro = 1,6kg / volumen que ocupa el Anfo en el taladro

$$\text{Volumen ocupado} = 3,1416 \times 1,905^2 \times \text{longitud carga} = 3,1416 \times 3,63 \times 1,6\text{m} = 1824,64\text{cc}$$

$$\text{D confinada Anfo en el taladro} = 1,6\text{kg} / 1824,64 = 0,88 \text{ gr/cc.}$$

3.2 Se tomaron en cuenta los parámetros del macizo rocoso, por la cual son propiedades que se derivan de las estructuras geológicas y la geología local, tales como la densidad, dureza, tenacidad, resistencia entre otras propiedades, las cuales condicionan el diseño y exigen un aprovechamiento de estas para lograr buenos resultados tanto en la estabilidad de la roca como en la fragmentación.

Los parámetros de la mezcla explosiva que se evaluaron: velocidad de detonación, densidad, poder rompedor entre otras; estas propiedades condicionan el explosivo a utilizar según las necesidades de la roca a fracturar. El rendimiento energético de las voladuras por la acción de los explosivos es muy importante sobre las rocas es la resultante de un conjunto de acciones simultaneas asociadas a los efectos de la onda de choque (Hopler, 2008) que transporta la energía de tensión y a los efectos de los gases de explosión. Ver figura N° 2.

3.3 La velocidad de la onda sísmica longitudinal de la roca (figura N°3) están influenciadas y dependen de: la litología, porosidad del material, compactación, litificación, módulo elástico y de la densidad de la roca. Tales parámetros son importantes para el análisis en el modelo matemático de López Jimeno modificado en esta investigación.

V. CONCLUSIONES

Las proposiciones realizadas en la investigación de López Jimeno (1980) que es un modelo matemático aplicado para calcular el burden en minería superficial se realizaron cambios necesarios para ser aplicado en la cantera La Merced en el distrito de Chilca – Lima, con un diámetro de perforación de 1,5 pulgadas y longitudes de perforación de 8pies, por la cual dieron resultados positivos en las voladuras realizadas. Los cambios se determinaron mediante ensayo y error en dicho modelo matemático por lo cual son los siguientes: considerar que el factor explosivo es inversamente proporcional al factor (F) tomando en consideración la densidad de la mezcla explosiva confinado

Tabla N° 2. Cálculo del burden (B) final, con el nuevo modelo matemático mejorado de López Jimeno

Burden utilizado en voladuras anteriores (B)	Burden calculado por López Jimeno (B)	Diámetro taladro producción (D)	densidad de Roca (d roca)	Velocidad Sísmica de la roca (Vsísmica)	densidad Explosivo ANFO confinado gr/cc	Velocidad detonación Vexplosivo	Factor de corrección (F)
1,40m - 1,50m	1,10m	1,5 pulg.	2,7 gr/cc	4 580 m/s	0,88	3 500 m/s	1,07

Fuente. Elaboración propia

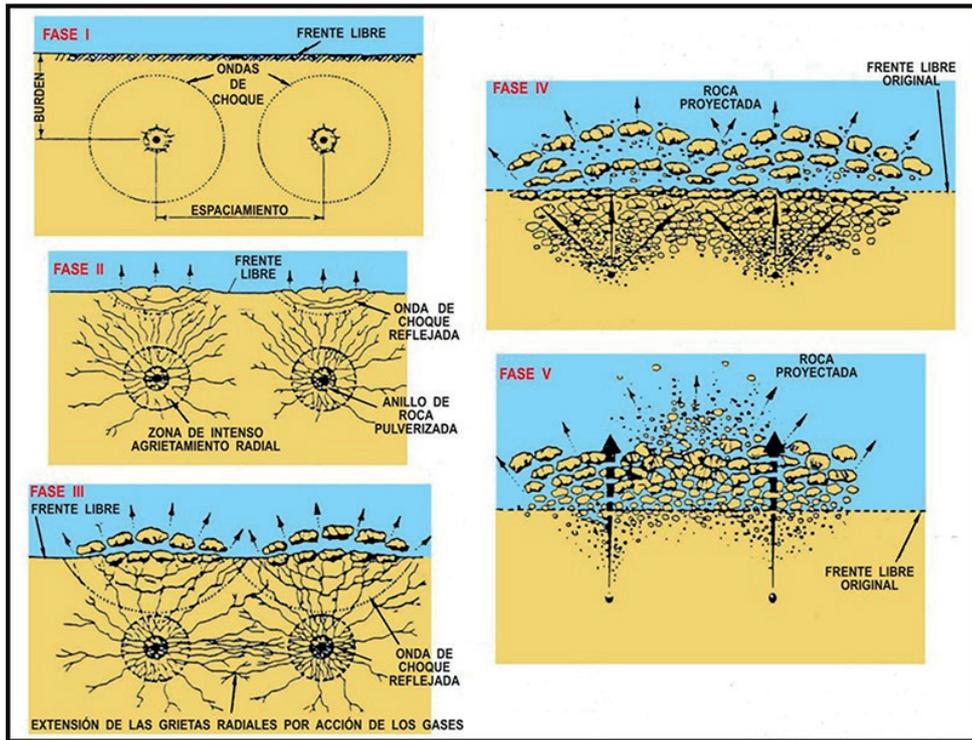


Figura N° 2. Fases de la voladura –mecánica de rotura.
Fuente: Manual de Exsa. Langefors y B. Kihlstrom. (1963)

CLASE DE FORMACION	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA LONGITUDINAL (m/s)
CAPA METEORIZADA	300 – 900
ALUVINES MODERNOS	350 – 1500
ARCILLAS	1000 – 2000
MARGAS	1400 – 4500
CONGLOMERADOS	2500 – 5000
CALIZAS	4000 – 6000
DOLOMITAS	5000 – 6000
SAL	4500 – 6500
YESO	3000 – 44000
ANHIDRITA	3000 – 6000
GNEIS	3100 – 5400
CUSRCITAS	5100 – 6100
GRANITOS	4000 – 6000
GABROS	6700 – 7300
DUNITAS	7900 – 8400
DIABASAS	5800 – 7100

Figura N° 3. Frecuencia sismica

Fuente: C. Figueroa: Tratado de Geofísica Aplicada



Figura N° 4. Sección de corte - variables determinadas.
Fuente: Elaboración propia

en el taladro y el diámetro de perforación en 1,5 pulgadas, se consideró el coeficiente $C = 0,9$ recomendado por López Jimeno para diámetros menores a 6,5 pulgadas.

Como se sabe la variable más importante y crítica es el Burden (B) en el diseño de malla de toda voladura y es la distancia medida perpendicularmente desde es el centro del taladro cargado con mezcla explosiva a la cara libre. La función esencial es proveer caras libres al cual la roca pueda ser arrancada, dependiendo mucho de los tiempos de retardo que se colocan en los taladros.

Se sabe que hasta la fecha no existe un modelo matemático para el diseño y que se pueda aplicar de manera directa para obtener a lo que se llama disparo óptimo. Esto se debe a que intervienen muchos factores, parámetros y variables muy complejas de roca-explosivo como las utilizadas en esta investigación. Con este modelo matemático se mejoró la calidad de la voladura y se minimizaron los riesgos en la generación de fragmentación subdimensionado a 2% y se mejoró la estabilidad de la roca después de la voladura.

Con el nuevo burden calculado ($B = 1,10m$) se optimizo el diseño de la malla cuadrada de perforación y se obtuvo una fragmentación aproximada de 33 c.m. de diámetro.

Con este trabajo de investigación espero despertar la curiosidad de seguir investigando, para llegar a obtener un mejor modelo matemático en el cálculo del burden (B) y así obtener calidad en la fragmentación y seguridad en la voladura de rocas.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a todos los profesores de las siguientes universidades y empresas que me formaron y que lograron despertar en mí la curiosidad de investigar el proceso de la voladura de rocas, del cual se desprendió el presente artículo: Universidad Nacional de Ingeniería, Universidad

Nacional Mayor de San Marcos, Famesa Explosivos S.A.C. y Exsa S.A.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agreda T., Carlos (1993). *Tecnología de Explosivos y Voladura de Rocas*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Departamento Técnico Exsa S.A. (2002). *Manual Práctico de Voladura*. Lima: Exsa S.A. Recuperado de https://www.academia.edu/23767654/MANUAL_PRACTICO_DE_VOLADURA_Edici%C3%B3n_especial_La_L%C3%ADnea_m%C3%A1s_Completa_para_Voladura_Das_Komplette_Sprengstoffprogramm_The_Most_Complete_Blasting_Line
- ENAEX. (2012). *Manual de Voladura a Cielo Abierto*. Recuperado de https://www.academia.edu/7267880/Manual_de_Tronadura_ENAEX
- Hopler, Robert B. 17va edición (2008). *Manual del Especialista en Voladura*. Cleveland, Ohio USA. Recuperado de https://www.academia.edu/5904908/Manual_del_Especialista_en_Voladura
- Konya Calvin, J. (1998). *Diseño de Voladuras*. Impreso en México, D.F.: Konya Calvin J. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/30213148/Manual-de-Voladura-KONYA>
- López Jimeno, C. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. España: Instituto Tecnológico Geo Minero de España. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/209393479/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-LOPEZ-JIMENO>
- López Jimeno (1980). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Serie: Tecnología y Seguridad Minera. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/371379440/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-Lopez-Jimeno-LIBROSVIRTUAL-com-1>
- Langefors y B. Kihlstrom. (1963). *The Modern Technique of Rock Blasting*. Impreso en Suecia. <https://catalogue.nla.gov.au/Record/587980>