

Recibido: 09 / 07 / 2009, aceptado en versión final: 30 / 10 / 2009

## Explotación minera sin voladura

Mine hard rock excavation with no blasting

**Oswaldo Ortiz Sánchez\*, E. Mauro Giraldo Paredes\*, Gudelia Canchari Silverio\*.**

### RESUMEN

La fragmentación de roca dura in situ en una operación minera, generalmente se efectúa por perforación y voladura. Pero este método además de ser costoso, origina contaminación del medio ambiente por ruido, polvo, vibraciones, gases y hasta conflictos con las comunidades cercanas a la operación minera porque perturba la tranquilidad y seguridad de los pobladores. Urgen, por lo tanto, métodos de fragmentar la roca sin perforación y voladura. Esto puede lograrse con el conocimiento apropiado de los métodos de minado continuo en roca dura y con el eficiente aprovechamiento de la resistencia a la tensión de la roca que es del orden de 10 a 30 veces menor que la resistencia a la compresión. La mayoría de los equipos de perforación actuales hacen uso de la resistencia a la compresión de la roca para perforar y usar explosivos para fragmentar roca. No hay experiencia en el uso de minadores continuos en la minería metálica nacional excepto un intento en una operación subterránea de minerales de zinc que luego fue paralizado por razones técnicas. En los últimos años se han desarrollado algunos sistemas de minadores de roca dura sin voladura tanto para la minería subterránea como para la superficial. Pero los sistemas de excavación sin voladura pueden rendir más considerando que puede usarse la energía del agua a presión y la energía térmica de las microondas y rayos láser para fragmentar roca en tensión.

**Palabras clave:** Minador continuo, fragmentación, tensión, excavación, escarificación, perforación y voladura.

### ABSTRACT

Drilling and blasting is generally used for fragmenting hard in situ rock in mine excavation. This method however, in addition of being expensive, it causes environmental pollution by noise, dust, vibrations and gases. It may also generate social conflicts with native communities around the mining operation as it disturbs and alters the inhabitants safety and health. Consequently, it is important to develop non drilling and blasting rock breakage methods. This can be achieved by both appropriate usage of continuous mining systems in hard rock and ingenious use of the rock tensile resistance which is ten to thirty times lower than its compressive strength. Most of the current drilling systems make use of the compressive resistance to drill and blast rock with explosives. There is no domestic experience of hard rock mining with continuous miners. The unique continuous miner acquired by an underground metallic operation no longer operates due to technical reasons. Few mine excavators for underground and superficial hard rock were developed during the last twenty years. But rock fragmentation systems with no blasting, can advance more if water and thermal energies are considered. For example water jets at high pressure, micro waves and laser beams for generating areas of tensile stress inside rock masses.

**Keywords:** Continuous miner, fragmentation by tension, excavation, ripping, drilling and blasting.

\* Docentes EAP de Ingeniería de Minas UNMSM.

\*\* E-Mail: osoos1990@gmail.com

## I. INTRODUCCIÓN

La minería tradicional generalmente usa perforación y voladura en los frentes de minado para fragmentar roca. Este sistema tiene la desventaja de generar polución ambiental principalmente en las etapas de perforación y voladura. Además incrementa el costo de minado y expone a los trabajadores a accidentes.

Los nuevos métodos de minado del futuro especialmente en la minería metálica, pretenden eliminar la perforación y la voladura con lo que se tendría ventajas económicas y medioambientales. Una de estas técnicas es el minado continuo o excavación rápida que adicionalmente elimina el doble manipuleo del carguío en el frente de avance que es característico de los sistemas de minado intermitentes. El minado continuo no es nuevo, se aplica desde hace 50 años en países desarrollados, para explotar yacimientos de gran volumen y de baja dureza como el lignito. Su aplicación en la minería metálica de roca dura no es conocida. Otro sistema es el minado hidráulico utilizando chorros de agua a alta presión en dos formas: a) en el frente de ataque de la broca para ablandar la roca de alta dureza y b) dentro del taladro formando un lodo (minado por taladros), este último solo aplicable a minerales de baja dureza como los fosfatos, el uranio, etc.

Existen otras posibilidades para eliminar la perforación y voladura en la minería metálica muchas de las cuales requieren amplia investigación como: Minador escarificador que usa una broca de arrastra de alta dureza y de hasta 60 cm. de ancho, el perforador-separador radial y axial, la excavación y fragmentación térmica utilizando microondas y rayos laser, rompimiento de la roca utilizando ondas de choque en el agua, etc.

## II. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTO

Suprimir la perforación y voladura en la minería metálica significa eliminar gran parte de la polución minera medioambiental originado por ruido, polvo, gases y vibraciones.

Un método para eliminar la perforación y voladura es el minado continuo pero no está desarrollado para aplicarlo en el minado de roca dura excepto el TBM y el RBM.

Para aplicar el minador continuo en producción minera metálica de roca dura, el equipo debe tener peso, estabilidad, flexibilidad, bajo costo y alta resistencia de sus elementos de corte, superior al de la roca que excava.

El minador continuo tiene varias ventajas, entre otras: Eliminación del carguío en el frente, incremento de la seguridad, gran estabilidad de las labores,

bajo costo de sostenimiento, alta disponibilidad del equipo.

El minado continuo es desconocido en las operaciones mineras de roca dura.

La única experiencia nacional de minado continuo en roca dura se tuvo en la mina San Vicente, con una rozadora sobre orugas que fue paralizada después de un corto tiempo de operación.

Todos los sistemas de perforación de taladros rompen la roca por compresión y molimiento de la superficie de ataque en la interfase broca-roca, requiriendo mucha energía y causando desgaste prematuro y falla de la broca.

No se aprovecha la resistencia a la tensión de la roca que es 15 a 30 veces menor que su resistencia a la compresión.

Considerando el grado de dureza de la roca (de menos dura a más dura), el rompimiento puede efectuarse en orden ascendente de dureza por:

- presión de agua,
- excavación,
- escarificación,
- perforación y voladura.

Al diseñar el minado de la roca no se hace clara diferenciación para decidir el tipo de rompimiento que debe aplicarse principalmente en el límite de la escarificación con la perforación y voladura; la mayoría de los operadores prefiere aplicar perforación y voladura casi por costumbre.

## III. OBJETIVOS

Efectuar un análisis de los métodos existentes de fragmentar roca sin perforación y voladura que pueden ser aprovechados por la minería metálica en roca dura, dar a conocer el nivel en que se encuentran estas investigaciones, presentar un caso de aplicación de minado continuo en roca dura en una operación minera nacional y dar algunas ideas sobre fragmentación de roca utilizando la tensión como propiedad física aprovechable de la roca.

## IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Los equipos actuales de excavación rompen la roca de alta resistencia a la compresión mediante elevados esfuerzos de compresión que muelen el material en la interfase roca-broca. Para cortar roca muy dura con tales equipos, se requiere fuerza excesiva, lo que origina desgaste y rotura rápida de la broca. Una vez perforada la malla de taladros se cargan con explosivos y se detonan para su fragmentación. Este sistema además de originar polución ambiental por ruido, polvo, vibraciones y gases tóxicos, son de alto costo operativo.

El concepto nuevo para romper la roca es el de someterlo a tensión durante la excavación aprovechando que esta propiedad física de la roca es 10 a 30 veces menor que su resistencia a la compresión. El sistema es, por lo tanto, excavación por tensión que puede consistir de un componente que genere una fuerza tensiva superior a la resistencia a la tensión de la roca que se excava originando fracturamiento en el interior de la roca, acoplándolo a un sistema de carguío y acarreo para tener un minado continuo o de otra forma, el carguío puede ser independiente para un minado discontinuo. Este concepto eliminará el alto requerimiento de energía para perforar la roca en compresión y eliminará la voladura.

Los minerales y roca encajonante poseen durezas que van desde los muy resistentes como las rocas ígneas y plutónicas hasta las muy blandas como las areniscas, arcillas, rocas ígneas alteradas, rocas sedimentarias no consolidadas y también consolidadas como la caliza y la pizarra. Para fragmentar estos materiales generalmente se usa perforación y voladura. Una de las técnicas apropiadas es excavar la roca con equipos minadores cuyo peso y resistencia sobrepasen la resistencia de la roca. Este tipo de excavación puede lograrse con los equipos actuales de minado continuo para lo cual deberá mejorarse la resistencia de los elementos de corte (dientes, picas, botones, discos, etc.), y usar chorros de alta presión en los puntos de ataque de la broca para minimizar la fricción y el desgaste en el contacto con la roca. La aplicación de estos equipos al tajeado en roca dura debe ser ayudado por una mayor estabilidad y resistencia de la estructura del equipo. Tanto en los tajos subterráneos como en los bancos de minado superficial, el equipo de excavación no tiene puntos de soporte en techos y hastiales como para ejercer gran presión en el frente de avance del minado y mantener su estabilidad. Así, por ejemplo, el tunelero TBM y el perforador de chimeneas RBM son equipos de desarrollo minero que operan en áreas de gran longitud pero de poco ancho y altura, donde se apoyan para ejercer gran presión y empuje. Estos equipos además poseen elementos de corte de alta dureza para la roca más resistente pero no son equipos de explotación minera para operación en tajos y bancos porque en estas áreas no existen puntos de apoyo para ejercer gran fuerza y además estas áreas son muy reducidas para el movimiento de estos equipos de alta productividad.

Para fragmentar la roca a un nivel de adecuada granulometría se requiere el empleo de gran cantidad de energía que se obtiene de la reacción del explosivo pero con las desventajas y con los peligros inherentes a su manipuleo. Mientras que con el sistema no tradicional se eliminan todas las desventajas como la perforación de taladros y el uso de explosivos. En el caso de minadores continuos su aplicación no re-

quiere equipo de carguío (scoops, cargador frontal, etc.), dado que simultáneamente excava y carga el material arrancado.

## V. PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS

### Minador Continuo

Los minadores continuos son equipos de excavación rápida que no requieren perforación y voladura. Algunos de estos equipos pueden perforar roca dura como el TBM y el RBM pero no son equipos de extracción minera. En tajos y labores de minado no existe espacio para anclar el equipo y se requiere gran movilidad en áreas reducidas.

### Clasificación de los sistemas de minado continuo

Se tiene minadores continuos horizontales y verticales de acuerdo a la dirección de ataque en el frente de avance.

#### Minadores Continuos Verticales

- Perforador de chimeneas (rbm). Su uso principal es en corrida de chimeneas en roca dura o semidura de operaciones mineras subterráneas. Tritura la roca en compresión y puede perforar chimeneas de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo. La aparición de este equipo agilizó la minería sin rieles. Fig. N.º 1.
- Perforador de piques (sbm). Se utiliza en desarrollo de mina, perfora hacia abajo en roca dura o blanda. La Fig. N.º 2 presenta un bosquejo de este equipo y sus componentes.
- Minador escarificador (rm). Patentado en años recientes, hace uso de la baja resistencia a la tensión de la roca. Según Chamberlain y otros, (1992a), el equipo extrae tajadas verticales del frente de minado con una broca de arrastre en su viaje de abajo hacia arriba. La broca es plana con un ancho de hasta 60 cm. Puede usarse en tajos



Figura N.º 1. Perforador de chimenea (RBM)



- Minador móvil (mm). Fue desarrollado para la minería subterránea de roca metálica semidura. Elimina la perforación y voladura en forma eficiente con solo un 36% de utilización. Boyd (1987) indica que el equipo es versátil en los frentes de minado pudiendo operar en tajeos de explotación subterránea. Fig. N.º 7.

**Sistemas en minería superficial**

- Cargador Holland (hl). Excava y carga material del piso o de un talud de hasta 5 m de alto. Se puede emplear como equipo de minado en cielo abierto para roca blanda a semidura. El material excavado es cargado a camiones o faja por medio



Figura N.º 7. Minador movil (MM)

de un alimentador lateral (Fig. N.º 8). La Fig. N.º 9 presenta el equipo excavando el piso y arrojando el material a un costado (talud lateral), a través de una faja.

- Excavador de rueda de cangilones (bwe). Es un equipo de minado selectivo en minería superficial. Excava y carga materiales blandos a semiduros a una altura preestablecida de un talud. Tiene alta productividad y disponibilidad. Puede constituirse en el equipo de minado superficial más apropiado para reemplazar a la perforación, voladura y carguío si se mejoran los cortadores de los baldes en el frente de excavación y se le da suficiente peso y estabilidad como para resistir la presión de excavación en roca dura. Actualmente se construye a pedido, es de alta inversión. La Fig. N.º 10 presenta el equipo con su cabezal formado por un tambor giratorio de baldes con uñas cortadoras.
- Minador de superficie (sm). Es un equipo similar al cargador Holland. Excava el piso en roca blanda a dura en operaciones mineras a cielo abierto. La Fig. N.º 11 presenta este equipo cargando un camión en un banco de una cantera.
- Escarificador/cargador/camión. El sistema consiste de un tractor equipado con escarificadores

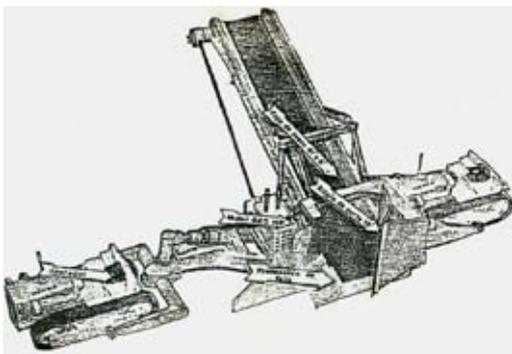


Figura N.º 8. Excavador-Cargador Holland mod 1600 (HL)



Figura N.º 9. Excavador-Cargador Holland para corte horizontal

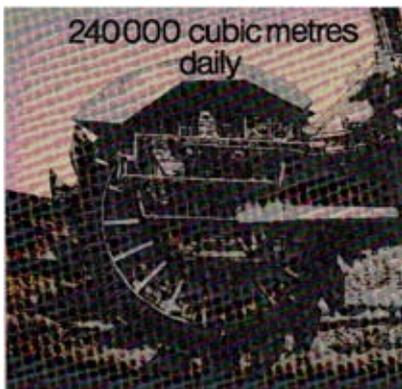


Figura N.º 10. Excavador de rueda de cangilones (BWE)



Figura N.º 11. Minador continuo de superficie (SM)

o desgarradores para romper in situ la roca del piso. La potencia del tractor da la capacidad al sistema. En el límite con la perforación y voladura debe diferenciarse al material que puede escarificarse antes de decidir la aplicación de perforación y voladura. Figs. N° 12 y 13. La experiencia indica que gran cantidad de operaciones mineras especialmente las de pequeña a mediana escala, pueden aplicar escarificación evitando la perforación y voladura.

**VI. FRACTURAMIENTO SEGÚN DUREZA DE ROCA**

**6.1. Formas de fragmentar roca considerando su dureza**

La Tabla N.º 1 presenta las tres operaciones unitarias principales de la extracción minera: Rompimiento, carguío y acarreo.

Tabla N.º 1. Niveles de rompimiento, carguío y acarreo según dureza de roca.

Rompimiento	- dureza	Carguío	Acarreo
1) Presión del agua (monitor)		Corriente del agua	Corriente del agua Bombeo
2) Excavación		Dragalina Rueda de cangilones Dragas	Dragalina Faja transportadora Bombeo, faja, escalera de cangilones
3) Ripiado		Mototralla Rastrillaje Escarificación	Mototralla Rastrillo Cargador frontal, Tractor, Camión.
4) Perforación/voladura	+ dureza	Pala, Cargador frontal	Camión, tren, skip inclinado, Faja transportadora.

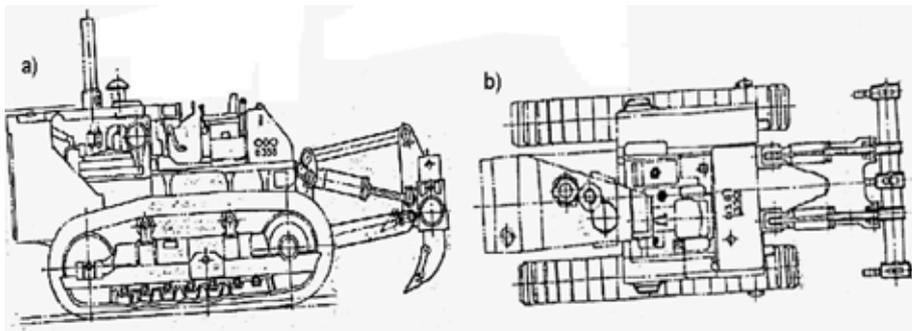


Figura N.º 12. Tractor con escarificador. a) Sección longitudinal b) Vista en plano

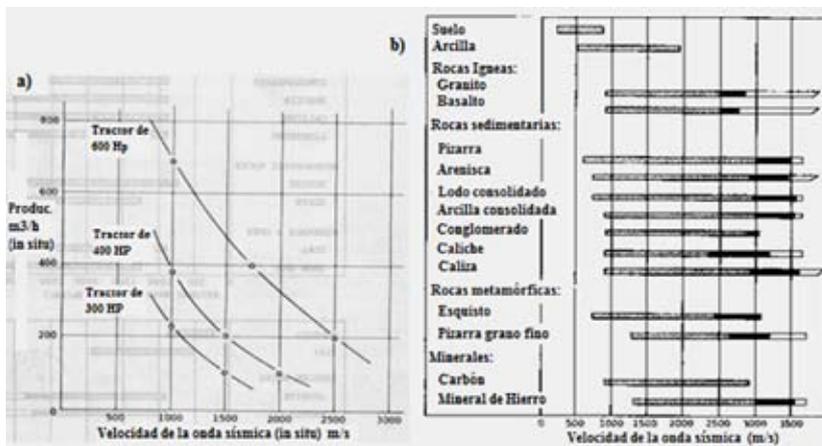


Figura N.º 13. Límites de aplicación de la escarificación por: a) Potencia de tractor b) Tipos de roca (Tramos en negro = Tractor de 600HP)

El fracturamiento de la roca in situ puede lograrse mediante una de las cuatro formas que aparecen en la columna “Rompimiento” que va desde la roca más blanda a la más dura según indica la flecha. La roca más blanda puede fragmentarse mediante un chorro de agua que puede ser entregado por un monitor a unas 120 lb/pulg<sup>2</sup> de presión aplicada en el frente de avance. El material rocoso poco consolidado se disgrega y es cargado y transportado por el agua que corre por gravedad o puede ser bombeado a un área de tratamiento.

El segundo nivel de rompimiento es para roca más consolidada que el anterior. Las tres operaciones unitarias mencionadas: Rompimiento, carguío y acarreo pueden ser ejecutadas por el mismo equipo como mototraílla, draga, rueda de cangilones.

El nivel 3) de rompimiento corresponde al rypiado que se aplica a roca de mayor dureza que las anteriores. En este nivel se aplica el tractor-escarificador. La decisión de usar rypiado o perforación/voladura (cuarto nivel de rompimiento), no está bien definido pero puede aplicarse reglas de decisión basadas en mediciones de ciertos parámetros de la roca.

**6.2. Herramientas para determinar la facilidad de rompimiento de la roca**

Los niveles de rompimiento 1) y 2) de la Tabla N.º 1 son fácilmente identificables por el técnico. Sabemos que no se usará perforación y voladura. No obstante el nivel 3), en que debe decidirse por la escarificación, tiene espacios indeterminados en ambos lados de su límite de aplicabilidad siendo el más crítico, para el análisis de este estudio, el lado superior a medida que se incrementa la dureza de la roca. Generalmente, la mayoría de operadores se inclinarán por la perforación y voladura sin efectuar un examen minucioso. Razones económicas, medio-ambientales y de seguridad exigen que no se descarte la escarificación a favor de la perforación y voladura sin previo análisis detallado. A continuación se dan reglas simples para hacer esta diferenciación que pueden aplicarse no solo a proyectos sino también a operaciones mineras en marcha.

Herramientas para diferenciar límites de escarificación:

- Utilizando velocidad de la onda sísmica en la roca: máximo 3,000 m/seg, mínimo 500 m/s. Perforación > 3,000 m/s. Excavación < 500 m/s.
- Utilizando índice de calidad de la roca (rmr): máximo 60, mínimo 30. Perforación > 60 rmr. Excavación < 30 rmr.
- Utilizando índice noruego (Q): máximo 5.2, mínimo 1.05. Perforación > 5.2. Excavación < 1.05.

- Utilizando índice de excavabilidad (n): máximo: 1,000, mínimo: 1. Perforación > 1,000 n. Excavación < 1 n. Donde:

$$n = ms \cdot rqd \cdot jr \cdot js / (jn \cdot ja)$$

ms: resistencia de la masa rocosa.

rqd: calidad de la roca.

jr: parámetro que expresa rugosidad de las discontinuidades.

js: parámetro que representa la estructura de la roca o la orientación de bloques individuales con relación a la dirección de la escarificación.

jn: parámetro que expresa las familias de discontinuidades.

ja.: parámetro que expresa alteración de las discontinuidades.

**VII. APLICACIÓN DEL MINADO CONTINUO EN EL ÁMBITO NACIONAL**

El minado continuo puede utilizarse para eliminar la perforación y voladura. Solo existe un caso de uso de un minador continuo en la extracción de minerales de zinc en la minera nacional. No obstante, esta aplicación fue paralizada por razones operativas que se explicará en seguida.

**7.1. Minador Continuo San Vicente**

**7.1.1. Características**

- Tipo: Rozadora para frentes de minado subterráneo
- Marca: Dosco Fig. N.º 14.
- Capacidad: 400 t/h
- Tipo de yacimiento: Cuerpos de gran potencia y longitud horizontales y subhorizontales de minerales de zinc (blenda, esfalerita, pirita, pirrotita, otros).
- Roca encajonante: Pizarra concordante con los cuerpos tabulares inclinados a 29°.

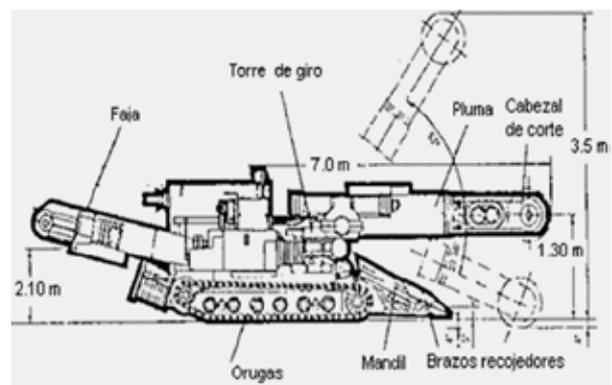


Figura N.º 14. Rozadora “San Vicente” mostrando componentes principales

### 7.1.2. Antecedentes para su adquisición:

- La perforación y voladura origina inestabilidad permanente en la pizarra y peligro constante para el personal, reflejado en la alta frecuencia y severidad de los accidentes en el interior mina. La baja inclinación de la pizarra confinada al ser liberada en galerías y tajeos tiende a desprenderse en lajas ayudada por las vibraciones de los disparos.
- El costo de sostenimiento es muy elevado (cerchas de acero, concreto rociado reforzado, pernos de anclaje longitudinal, cuadros de madera, relleno hidráulico).
- La estructura geológica del yacimiento es de tipo tabular subhorizontal de gran potencia y longitud.
- El sistema de minado es por cámaras y pilares con relleno ascendente.
- Las galerías son de 4x5 m para acarreo sin rieles.
- El acceso a los tajeos es mediante una rampa a 12% pendiente.

Tiempo de operación del equipo: 30 días.

Motivos para su paralización:

- Generación de polvo y ruido en el frente de excavación.
- Dificultad para eliminar el material roto en el frente de avance.
- Exposición del equipo y del personal a la caída de rocas.
- Frentes con abundante agua.

Los motivos para la paralización fueron subsanados a un costo apreciable pero la paralización continuó en razón de que ya no existían cuerpos tabulares potentes de baja inclinación. La operación minera estaba recuperando pilares de mineral dejados en la explotación pasada. La operación de la rozadora en la extracción de pilares es ineficiente y riesgosa.

## VIII. FRAGMENTACIÓN DE ROCA DURA CONSIDERANDO RESISTENCIA A LA TENSIÓN

Todos los métodos de perforación conocidos someten a la roca a compresión y molimiento en la interfase roca-broca para perforar el taladro. Este procedimiento es ineficiente y costoso porque origina el desgaste prematuro de los insertos y picas además de un requerimiento elevado de energía. Debido a que las resistencias a la tensión de la roca están en el orden de 10 a 30 veces menor que su resistencia a la compresión, debemos buscar métodos de rotura de la roca por tensión y sin el uso de explosivos.

### 8.1. Desarrollo de un sistema de fracturamiento de roca por tensión

El fracturamiento tradicional de roca dura es mediante la detonación de una carga explosiva en el interior de un taladro. Las técnicas actuales de perforación de taladros comprenden varios métodos como el ataque puntual de la interfase roca-broca, corte por disco, corte por rodillo, corte por botones y broca de arrastre. Todos estos métodos perforan la roca por compresión a excepción de la broca de arrastre que usa la resistencia a la tensión y al corte de la roca. En los últimos diez años fue desarrollado un equipo de fracturamiento de roca que aplica a la interfase roca-broca esfuerzos tangenciales y radiales de tipo tensional y de corte. Fig. N.º 3. Este equipo es el minador escarificador aplicable al tajeado minero subterráneo y a la construcción de galerías. La característica básica del sistema es la eliminación de la perforación y la voladura, pudiendo convertirse en minador continuo si se acopla un sistema de carguío y acarreo. El equipo puede aplicarse a roca muy dura para lo cual debe agregarse un dispositivo de chorro de agua a alta presión muy cerca del punto de ataque de la broca. Fig. N.º 4.

### 8.2. Dos formas de aplicar fuerza de tensión como base para el desarrollo de un equipo

#### 8.2.1. Fundamento teórico

- Para generar esfuerzos de tensión en la roca puede tomarse el principio del anclaje puntual de un perno de roca en el fondo de un taladro.
- El anclaje puntual de un perno de roca fija el techo y hastiales de una excavación. Si se persigue fragmentar la roca por fallamiento tensional, el esfuerzo tensivo generado debe trasladarse a un punto crítico cerca de la superficie libre. Figs. N.º 15 y 16.
- Las fuerzas  $P$  que se generan en la cuña 1) y en el bloque 2) de la Fig. N.º 15 puede expresarse por:

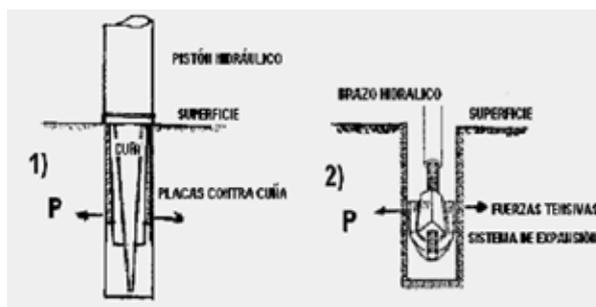


Figura N.º 15. Sistema de fragmentación tensional en roca dura insitu

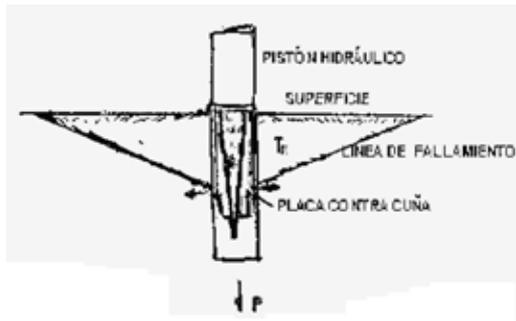


Figura N.º 16. General de fracturas por tensión puntual en roca

$$P = f \cdot q (\sin \alpha + b \cos \alpha)$$

$$b = k \cdot q \cdot y$$

$$P = n \cdot b \cdot q \cdot f$$

donde:  $P$  = resistencia a la tensión de la roca

$f$  = área de acción de  $P$  en  $\text{cm}^2$ .

$q$  = capacidad de resistencia de la roca en  $\text{kg}/\text{cm}^2$

$\alpha$  = ángulo de la cuña

$b$  = coeficiente de fricción entre roca y cuña o bloque metálica.

$k$  = coeficiente equivalente a 0.0014.

$n$  = número de bloques actuantes

Para conseguir fracturamiento, la fuerza  $P$  aplicada debe ser mayor que la resistencia a la tensión de la roca por fracturar. Esta fuerza puede calibrarse para diferentes durezas de roca y profundidades críticas.

El equipo que use el concepto anterior para fracturar la roca dura, debe contener dos sistemas: uno para perforar un taladro a la profundidad crítica y otro para aplicar la fuerza tensiva a una profundidad inferior a la crítica. La profundidad crítica es función del diámetro del taladro y de las características de la roca.

### 8.2.2. Equipo

El sistema de fragmentación de roca in situ puede ser de un solo equipo para tajeos pequeños o de dos o más equipos montados en una plataforma que operen en conjunto atacando un frente amplio en tajeos de gran dimensión. Los taladros pueden iniciarse en el centro de la labor o en los bordes (áreas confinadas). La generación de polvo se debe controlar con agua atomizada o chorros de agua ubicados en puntos cercanos a la zona de ataque de la roca.

### 8.2.3. Nuevas formas de crear tensión en roca dura

El objetivo es romper la roca con facilidad al más bajo costo en forma segura y sin producir polución. Bajo estos conceptos se tienen algunas posibilidades que se presentan a continuación:

- Fragmentación hidráulica. Mediante el uso de chorros de agua potentes ubicados a corta distancia del punto de ataque de la broca, para ayudar a la fragmentación mecánica de los equipos como minadores continuos y otros que usen el principio de la tensión de la roca para fracturarla. Summers (1992) indica que altas presiones de agua pueden conseguirse mediante chorros de agua de alta presión lanzados desde distancias no mayores a 8 cm. y generados por bombas de agua de 5,000 a 10,000 psi. Los chorros de agua, además de disminuir el polvo, pueden ablandar la roca más dura y hacer factible su fragmentación por los minadores continuos. (rozadoras, minador-escarificador y otros).
- Fragmentación térmica. Utilizando microondas o rayos láser para inducir esfuerzos de tensión por calentamiento puntual de la roca como técnica primaria de romper y excavar roca sin explosivos o ayudar a la excavación mecánica.
- Las microondas penetran la roca y crean puntos de alta temperatura. Chamberlain y otros (1992b) indican que la energía electromagnética que generan se convierte en calor por rápida vibración de las moléculas en un punto escogido en la masa rocosa. El área caliente se expande y origina esfuerzo de tensión en la roca circundante, con lo que se produce su fragmentación. La propiedad de las microondas de fracturar la roca no depende del tamaño de la inclusión térmica ni de la resistencia a la compresión de la roca. Para alcanzar un diseño económico solo debe optimizarse la frecuencia, energía y densidad de la corriente usada.
- El rayo láser abre surcos en la superficie rocosa confinada liberando esfuerzos y permitiendo su fácil excavación entre surcos. De esta forma la broca de un equipo puede cortar rocas de resistencia superior a 73,000 psi (500 mpa) tipo gabro, granodiorita, granito, etc. Así, las técnicas de fragmentación mecánica pueden aplicarse con eficiencia en roca muy dura si se combinan con las ondas electromagnéticas.
- Onda de choque. La onda sísmica generada en el agua origina alta presión rompedora que puede usarse para fragmentar roca y crear superficies de pre corte en taludes. Este concepto, según Chamberlain y otros (1992c), ha sido utilizado por los fabricantes en un rompedor portátil de roca que crea ondas de choque disparando cartuchos de un arma de fuego dentro de un taladro lleno de agua. Se utiliza en construcciones para demoler estructuras de concreto y romper rocas de gran tamaño en zonas de alta densidad poblacional.

## IX. CONCLUSIONES

Los métodos de minado continuo actuales pueden excavar roca dura y evitar la perforación y voladura. Para tal efecto puede ayudarse con instalaciones de chorros de agua de alta presión en puntos cercanos a la broca.

- El minador móvil (MM) ya trabaja en roca dura con buenos resultados.
- Los equipos de minado continuo requieren cuerpos minerales extensos y de poca pendiente para su eficiente operación.
- Los minadores continuos son de alto costo, alta disponibilidad y alta producción por lo que requieren planes de minado bien elaborados.
- Se cuenta en la actualidad con un equipo de minado que no requiere disparo en tajeos y galerías y que usa una broca de arrastre de hasta 60 cm de ancho.
- Para romper la roca con eficiencia debe utilizarse su resistencia a la tensión en lugar de su resistencia a la compresión.
- El uso de las microondas y el rayo láser para introducir tensión en la roca que se va a excavar tiene potencial para el desarrollo de equipos de minado sin perforación ni voladura.
- El agua en chorro de alta presión muy cercano al punto de ataque de la broca, puede ayudar a disminuir la resistencia a la compresión ablandando la roca in situ que se quiere fragmentar.
- Utilizando los principios de anclaje de un perno de roca para sostenimiento de labores mineras y la profundidad crítica de rotura de roca, puede

desarrollarse un sistema de fragmentación de roca dura que aprovecha su baja resistencia a la tensión (10 a 30 m veces menor que la resistencia a la compresión), en forma eficiente y de bajo costo.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boyd, R. J. (1987). Performance an experimental development of the mobile miner at Mount Isa. Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference, v. 2. SME-AIME, 1: 747-768.
2. Chamberlain, P. G.; Morrell R, J. and Larson D. A. (1992a). Ripper Miner. SME Minig Engineering Handbook, 2nd Edition, 2: 2028-2031.
3. Chamberlain, P. G. and Lindroth D. P. (1992b). Thermal Fragmentation and Excavation. SME Mining Engineering Handbook, 2nd. Edition, 2: 2037-2040.
4. Chamberlain P. G. and Savanick G. A., (1992c). Shock Wave Rock Breakers. SME Mining Engineering Handbook, 2nd. Edition, 2: 20037-2040.
5. McFeat-Smith J., (1986). Survey of Rock Tunneling Machines Available for Mining Projects. Transactions Institute of Mining and Metallurgy. Mining Industry, Jan. 91: A23-A31.
6. Robbing R. J. (1986). Future of Mechanical Excavation in Underground Mining. Mining Engineering, SME-AIME pp. 61-69.
7. Summers D. A. (1992). Hydraulic Mining. Jet Assisted Cutting. SME. Mining Engineering Handbook, 2nd. Edition, 2: 1918-1929.