

TABLA 18. Estadística para las Variables Analizadas en el Subsector 3 Mina Milagro. Brecha de Falla

| Variable | Media | Varianza | Desv. Estándar |
|----------|-------|----------|----------------|
| RQD | 30,3 | 650,9 | 25,5 |
| IRS | 34,7 | 288,0 | 17,0 |
| RMRL | 33,3 | 88,8 | 9,4 |
| RMRB | 43,2 | 34,2 | 5,8 |
| | | | |
| GSI | 38,2 | | |

CONCLUSIONES

La información sobre las propiedades de resistencia y deformación de masas rocosas es importante en cualquier análisis minero tanto subterráneo como de superficie. Los métodos empleados para su obtención están poco desarrollados, debido a grandes dificultades encontradas en la realización en el terreno y a los problemas de alcanzar el concepto del tamaño crítico para estas variables. Así nace la necesidad de determinar valores para dichos parámetros en forma indirecta, mediante esquemas establecidos de sistemas de clasificación del macizo rocoso, como son RQD, RMR, GSI, etc., y con estos determinar una resistencia del macizo rocoso basado en datos empíricos de fracturas. Al analizar los resultados obtenidos por litología en la zona en estudio se puede establecer lo siguiente:

1) Para el dominio de las andesitas se aprecia una gran uniformidad en los valores obtenidos del Índice de Resistencia (GSI entre 60 y 65), independientemente de la zona analizada (rajo Delirio, Los Mantos, Viña Vieja). El rango de valores obtenidos para las variables que definen los parámetros resistentes para este sector son como sigue:

$$m_b = 2.95 \text{ a } 3.52 \quad S = 0.017 \text{ a } 0.0205$$

$$E = 17782 \text{ a } 23713 \text{ Mpa.}$$

2) Al considerar este dominio (andesita) en los sectores de diseño definidos en la mina Milagro, el índice de resistencia presenta también poca variación (GSI entre 53 y 58) y el rango de valores obtenidos para los

parámetros que definen la envolvente de fractura para el macizo rocoso fue el siguiente:

$$m_b = 2.30 \text{ a } 2.74 \quad S = 0.0054 \text{ a } 0.0094$$

$$E = 11885 \text{ a } 15849 \text{ Mpa.}$$

3) Para el caso del dominio de las brechas de fallas, prácticamente no existió una gran variación en los valores de los parámetros, a pesar de existir gran separación (5 km), entre las brechas estudiadas. El rango de valores determinados para este dominio fue:

$$m_b = 1.08 \text{ a } 1.91 \quad S = 0.0010 \text{ a } 0.0018$$

$$E = 2404 \text{ a } 3537 \text{ Mpa.} \quad GSI = 38 \text{ a } 43$$

4) Finalmente para el dominio de la granodiorita, a pesar de tener sólo una muestra puntual (Los Mantos), los valores para los parámetros resistentes obtenidos son representativos y extrapolables para toda la zona en estudio, y fueron:

$$m_b = 3.17 \quad S = 0.0147$$

$$E = 19953 \text{ Mpa.} \quad GSI = 62$$

BIBLIOGRAFÍA

- BIENIAWSKI, Z.T.: «Rock Mass Classification in Rock Engineering», en: *Exploration for rock engineering*, Balkema, Cape Town, pp. 97-106, 1976.
- : *Engineering rock mass classifications*, Wilwy, New York, 1989.
- BRUNNER, F.E. y R. QUINTANA: *Análisis de la fábrica de roca y estudio preliminar de la existencia del macizo rocoso en Mina Tamaya*, Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Valparaíso, p. 4, 1997.
- DEERE, D.U.: *Technical Description of Rock Cores for Engineer Purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1 (1); pp. 17-22, 1964.
- HOEK, E.: «Strength of Jointed, Rock Masses», en: *Rankine Lecture, Geotechnique*, pp. 187-223, 1983.
- : «Strength of rock and rock masses», en: *ISRM News Journal*, 2 (2), pp. 4-16, 1994.
- HOEK, E. y E.T. BROWN: *Underground Excavations in Rock*, Inst. Min. Metall., London, p. 527, 1980.
- : *Practical estimates of rock mass strength*, Submitted to the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997.
- LAUBSCHER, D.A.: *Geomechanics Classification System for the Rating of Rock in Mine Design*, Inst. Min. Metall., 90, 2, pp.257-273, 1990.
- PALMSTRÖM, A.: *Characterizing the Strength of Rock Masses for Use in Design of Underground Structures*, Design and Construction of Underground Structures, New Delhi 23-25 February, 1995.

El precableado como reforzamiento en explotación de vetas estructuralmente controladas y su aplicación en la Cía. Minera Tamaya, IV región, Chile

Alfonso Carvajal¹
Federico Brunner¹
Roberto Díaz²

¹Ingeniero, M. Sc. Universidad de la Serena, Chile
²Jefe de operaciones de la Cía. Minera Tamaya

INTRODUCCIÓN

La explotación de vetas, en general, se realiza por medio de sistemas selectivos y de baja productividad, unido al hecho de que estos yacimientos se encuentran bajo condiciones geoestructurales muy difíciles donde el ancho de explotación depende de la calidad de las rocas de la mena y las de caja y, en muchos casos, los cortes no pueden realizarse a plena potencia del cuerpo mineralizado sino por etapas, lo que genera una baja productividad.

Los métodos selectivos de explotación para menas de alto valor comercial son aquellos cuya producción la constituye solamente el material fragmentado por la voladura. Entre estos métodos se encuentra el de corte y relleno con sus variantes, la aplicación del cual, al menos en Chile, se limita a yacimientos con importantes contenidos de oro (>5 g/ton), como la mina El Indio, El Bronce, Cía. Minera Tamaya, etcétera.

Indudablemente, la explotación a plena potencia de una veta contribuye al aumento de la productividad y a la disminución de los costos generales de extracción.

Cuando las vetas tienen potencias mayores de 5 m (en algunos casos hasta 20 m), la explotación a plena potencia es posible si se mejora la estabilidad de la excavación. Una forma de lograrlo es mediante el precableado del bloque que se extrae y que a la vez constituye la futura cámara de explotación.

Los mecanismos probables para el mejoramiento de la estabilidad de macizos son los del modelo de apertado de rocas. Por un lado se sugiere que los pernos de anclaje o cables pretensionados aten bloques sueltos a un material más competente situado a una mayor profundidad, y por otro, se opina que se forma una zona de compresión, dando origen a una viga estructural capaz de soportar el peso del material destresado sobre la excavación, lo que sugiere que estos sistemas, más que soportadores de rocas, sean considerados elementos modificadores de la resistencia del macizo rocoso, transformándolo en un sistema de autosoporte.

Esta técnica se aplicó a un sector de la mina Milagro en la Cía. Minera Tamaya y se obtuvieron resultados satisfactorios.

MECANISMO DE FALLAMIENTO EN EL ÁREA DE EXPOSICIÓN DE UNA CÁMARA

Generalmente, los efectos de la geología estructural y los esfuerzos inducidos por el minado interactúan e influyen en la formación de planos de debilidad que, de no ser controlados, pueden conducir a la inestabilidad general de la mina.

RESUMEN: Se presenta el precableado de cámaras explotadas en realce como sistema de reforzamiento tanto del techo como de las paredes. El uso de este sistema de pre-reforzamiento antes del minado constituye una solución para las vetas estructuralmente controladas que por razones de productividad se deben explotar a plena potencia. Se ofrecen los conceptos geomecánicos de los mecanismos provocadores de la inestabilidad en el techo y las paredes de una cámara explotada dinámicamente en realce.

El conocimiento de la respuesta de los cables bajo solicitaciones dinámicas de esfuerzos originados por el corte repentino y violento del techo con voladuras utilizando explosivo, constituye la base técnica que sustenta la aplicabilidad de este sistema de reforzamiento. Bajo estas condiciones de soporte es posible obtener alta productividad y seguridad al explotar vetas teniendo en cuenta el riesgo que representa la pequeña y mediana minería subterránea.

ABSTRACT: The use of cable for pre-reinforcement of roof and walls of stopes exploited by rising drifts is analyzed. Also, the practical applications and results of this technique at Cía Minera Tamaya (Coquimbo Region, Chile) are presented. The use of this method by installing long cables prior to mining could be a good alternative for structurally controlled veins that must be exploited to the full ore thickness. Otherwise these stopes can collapse under dynamic exploitation conditions. The geomechanical concepts that explain the mechanisms responsible for instability in the roof and wall of stopes, exploited by rising drifts are presented.

The understanding of cable behavior under the dynamic stress due to a sudden and violent cut of the roof by explosives is basic for the technical application of this reinforcement system. Finally, this method allows higher levels of productivity and safety at the small and medium mining levels of underground exploitation of vein-type ore deposits.

Palabras claves: Explotación de vetas, precableado, reforzamiento en minas.

Mecanismos de fallamiento del pendiente

a) Fractura por carga

La existencia de rocas que acumulan energía y generan una relajación normal a las paredes de la abertura en presencia de esfuerzos paralelos crean una condición favorable al fallamiento de la pared pendiente. Debido a las condiciones mencionadas, el mecanismo de fallamiento se puede aproximar a lo siguiente (Jeremic and Cassidy, 1980):

1. Bajo la acción de los esfuerzos principales mayores e intermedios se produce una barra o columna de roca cuya separación son los planos de esquistocidad que la separan del macizo remanente.
2. Esta barra queda simplemente empotrada en sus dos extremos generando una rotación hacia el vacío. Su espesor es mucho menor que su largo.
3. La columna, al estar separada del macizo remanente y sometida a esfuerzos compresivos en sus dos extremos, falla en el momento en que es vencida la resistencia de la roca (recordemos el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial en una prensa hidráulica).

El mecanismo de fallamiento bajo estas condiciones se muestra en la Figura 1 y está representado por la ecuación de Euler.

$$\sigma'' = \pi^2 E (R/L)^2 \quad (1)$$

donde:

- R: radio de giro en la dirección de fallamiento
- L: largo de la barra entre los puntos de empotramiento
- E: módulo de elasticidad

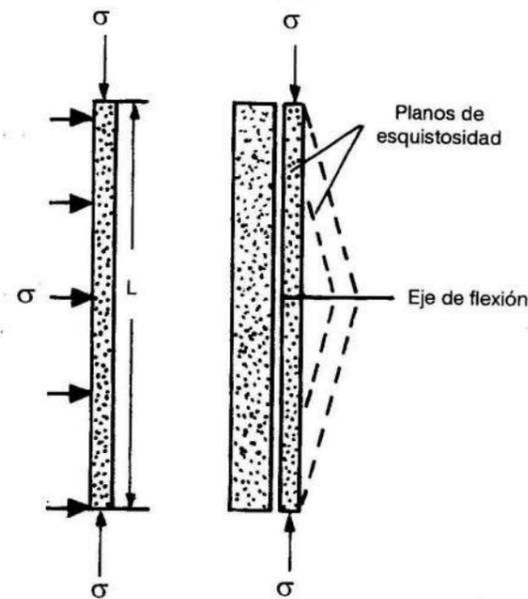


FIGURA 1. Fallamiento del pendiente por carga.

b) Otros modelos de falla

En la Figura 2a se muestra un fallamiento asociado a altos esfuerzos de compresión paralelos al manto

de la pared pendiente. La Figura 2b corresponde a una falla relacionada espacialmente con la estructura del pendiente, específicamente aquí se muestra una estructura de capas de espesor común

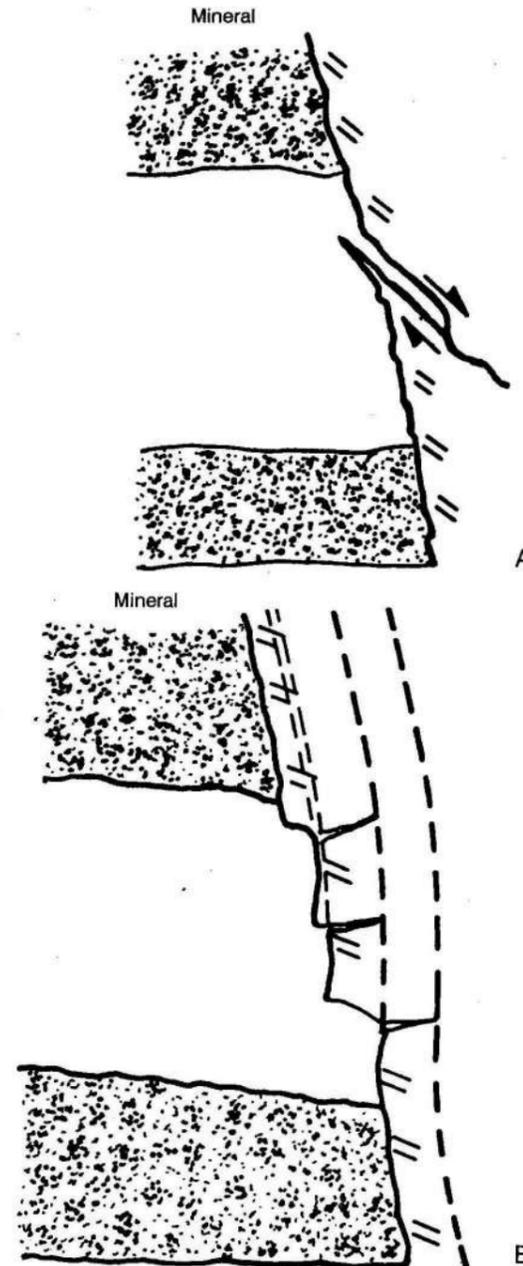


FIGURA 2. Otros modos de falla del pendiente.

Mecanismos de fallamiento del yacente

a) Fallamiento por descarga de energía

Cuando se tiene una pared de roca que permite grandes deformaciones, sobre todo en minas profundas (> 800 m), aumentan los esfuerzos y la tendencia de la pared yacente es cerrar la excavación, fenómeno que termina con el fallamiento de la pared. Vale decir que este fenómeno es una descarga debido a la energía acumulada (Figura 3a).

b) Otros modelos de falla

La Figura 3b muestra el fallamiento subhorizontal y la 3c el caso de que la pared yacente esté formada por capas de rocas.

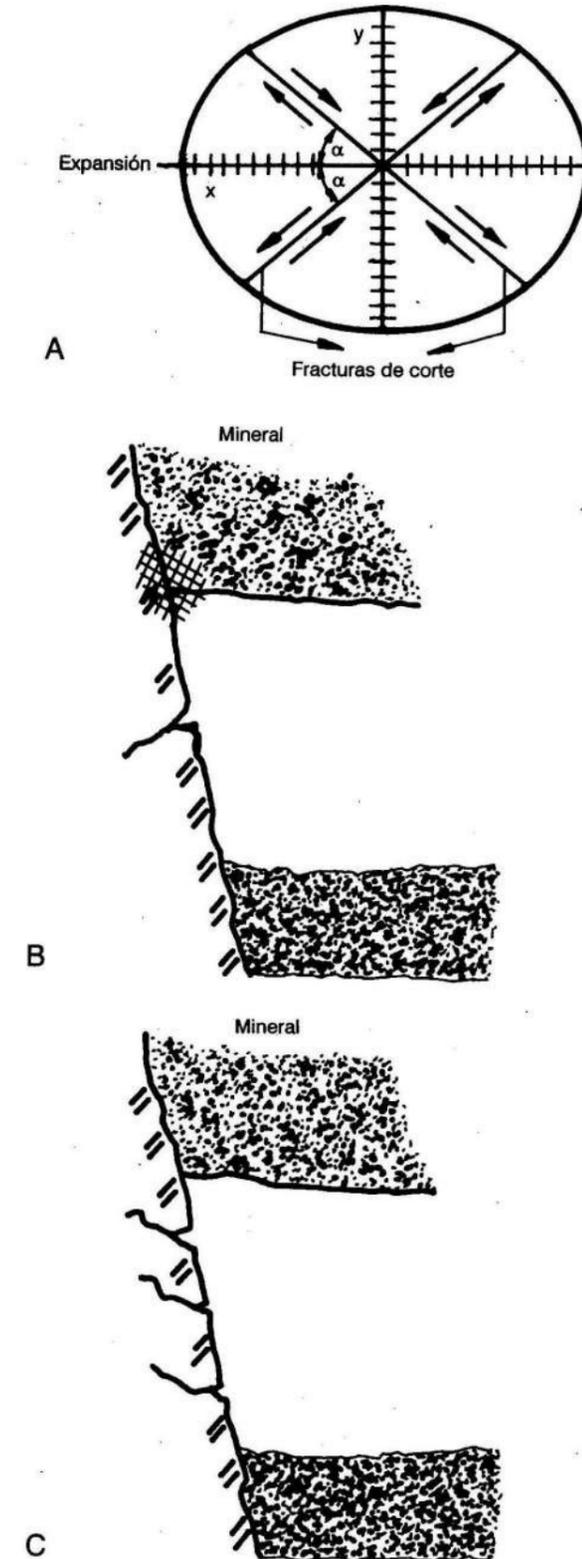


FIGURA 3. Modos de falla del yacente.

Mecanismos de fallamiento del techo

a) Debido al peso muerto del techo

El estar sometida una excavación a altos esfuerzos laterales y perpendiculares puede significar una ventaja hasta luces de 5 m (Figura 4a), en este caso los componentes tensionales pueden ser nulos. Sin embargo, en excavaciones mayores de 15 m (Figura 4b) aparecen estos componentes.

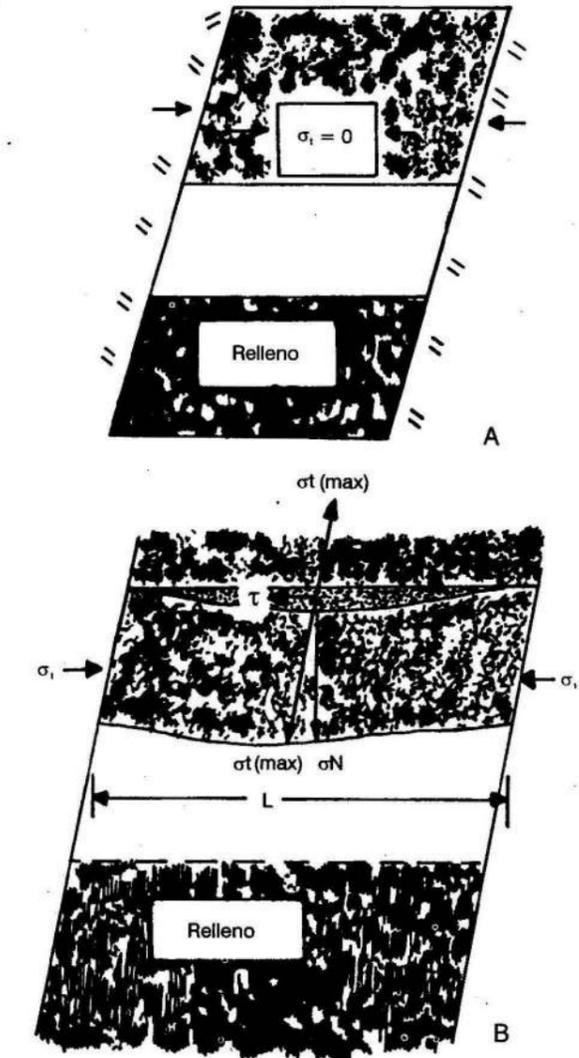


FIGURA 4. Fallamiento del techo debido al peso muerto.

El mecanismo de fallamiento puede aproximarse a lo siguiente: cuando el peso muerto de la barra formada en el techo (1-3 m de espesor) genera tensiones mayores que la resistencia de la roca a lo largo del plano de separación, el macizo rocoso falla por la separación que se produce. El fenómeno ocurre en definitiva porque la barra se flexiona por su propio peso y al transcurrir un determinado tiempo sobreviene el colapso.

Se hace notar que durante la voladura con explosivos las fracturas iniciadas por la onda de choque contribuyen a limitar la zona de fallamiento como resultado de la intersección del fisuramiento vertical y el plano de falla.

b) Otros modelos de fallamiento

La Figura 5a muestra el fallamiento en forma de cuña, propio de ambientes de altos esfuerzos compresivos casi normales al plano del depósito. Cuando el macizo está en una zona de alteración, y por tanto de

baja resistencia y alta deformabilidad, el efecto de la tensión paralela al manto es mayor que el producido por las fuerzas compresionales (Figura 5b). El tipo de fallamiento en condiciones de bajos esfuerzos se representa en la Figura 5c.

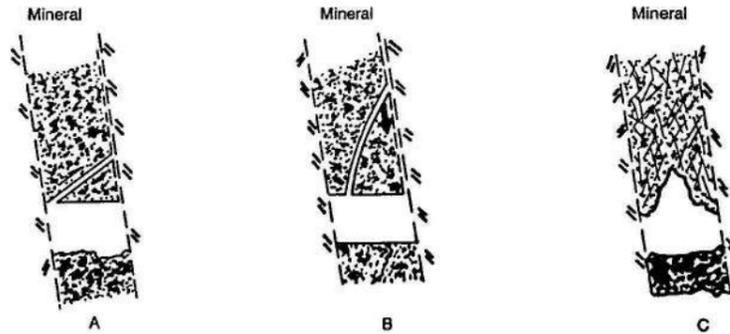


FIGURA 5. Otros modos de falla del techo.

MONITOREO DE CABLES EN LA MINA NBHC (NEW BROKEN HILL CONSOLIDATED), AUSTRALIA

En esta mina se realizó un detallado programa de monitoreo en voladuras sucesivas de una cámara explotada por corte y relleno. Los resultados indican que los cables actúan como refuerzo en el macizo rocoso haciéndolo más estable.

La investigación se realizó en una cámara de 10 m de ancho, explotada dinámicamente (Fuller, 1980). El precableado se realizó desde el nivel 13 (superior) al nivel 14 (inferior). La Figura 6 representa un perfil transversal de la cámara con la ubicación de las celdas de monitoreo. Los cables estaban formados por alambres de alta resistencia de 7 mm de diámetro, ubicados en una malla de 4 x 4 m. Cada cable posee un alambre instrumentado e instalado cuidadosamente para evitar problemas con el agua y la lechada de cemento. Las voladuras de los cortes alcanzaron alrededor de 2 m como promedio.

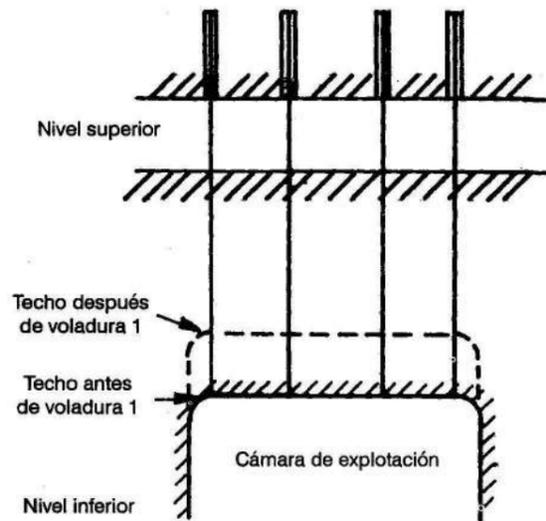


FIGURA 6. Esquema de cámara con cables del movimiento.

Inmediatamente después de la voladura 1, todas las celdas ubicadas hasta unos tres metros sobre el techo indicaron que los cables estaban en tensión, y alcanzaron un promedio de 300 microextensiones, que equivale al 5 % de la capacidad de tensión del cable (Figura 7). Las celdas localizadas sobre los 5 m indicaron una pequeña extensión de unas 40 microextensiones. Esta condición se mantuvo por unos 70 minutos para llegar a un estado cercano al de pre-voladura.

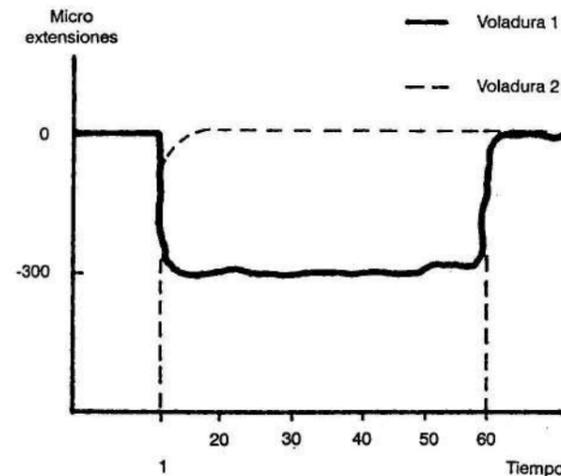


FIGURA 7. Tensiones alcanzadas en voladuras 1 y 2.

De acuerdo con Fuller (1980) existen dos explicaciones para el fenómeno de tensión producido. Por un lado, podría ser el resultado de una falla en la interfase cable lechada, hasta una cierta profundidad (unos 5 m sobre el nuevo techo generado), y por otro lado se podría haber producido un destresamiento del macizo rocoso en la zona mencionada haciendo trabajar los cables.

Al cabo de 6 meses se realizó una nueva voladura (voladura 2) en el mismo sector, con algunas modificaciones en la malla de precableado, cuyo objetivo era alcanzar condiciones similares de estabilidad. Des-

pues de esta voladura los cables no sobrepasaron las 50 microextensiones (ver Figura 7). Una vez terminada la extracción del material fragmentado, se realizó una tercera voladura (voladura 3). El registro indicó solo pequeñas pulsaciones a una profundidad de 2 m sobre el nuevo techo generado. Esto indicó que a la cota de esta voladura (unos 5 m sobre el nuevo techo generado) se logró la estabilización del macizo rocoso haciéndolo autosoportante. Cabe señalar que en los límites de la cámara se generaron grandes fuerzas compresivas.

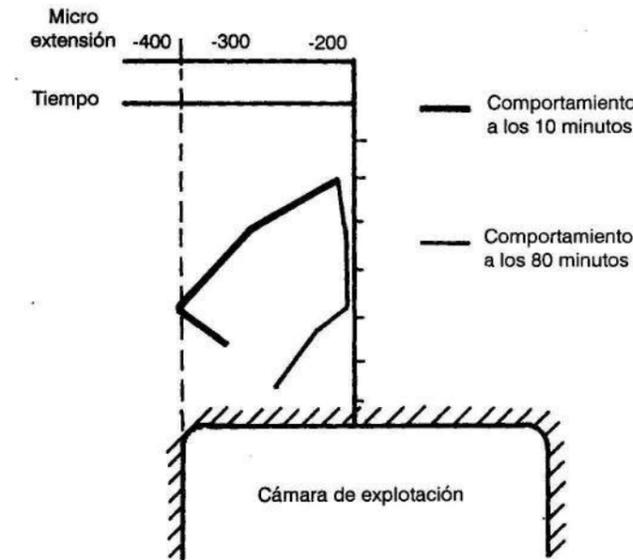


FIGURA 8. Tensión desarrollada después de los 10 y 80 min. de la voladura.

En la mina CSA en Cobar, Australia, se usó un cable similar pero sin tensar, con lo que se logró mejoras en la estabilidad de la cámara y con ello el aumento de la productividad al eliminar el proceso de tensado. La Figura 9 muestra la secuencia de operaciones en este caso: 1) cortar las colas de los cables instalados que asoman en el techo de la labor, 2) evacuar el mineral fragmentado y 3) rellenar para realizar la siguiente voladura.

Uno de los principales problemas presentados fue la desviación de los barrenos, lo que en algunos casos se mejoró disminuyendo su longitud. Por otro lado, la existencia de pequeños bloques que caen desde el techo se convierte en una constante amenaza para el personal y los equipos. Esto pudo solucionarse en parte colocando planchuelas en el extremo del cable.

APLICACIÓN DEL PRECABLEADO EN MINA MILAGRO, CÍA. MINERA TAMAYA

Este sistema se implementó en el sector denominado clavo 4 de Mina Milagro, cuya veta presenta características geotécnicas de mala calidad (Figuras 10 y 11).

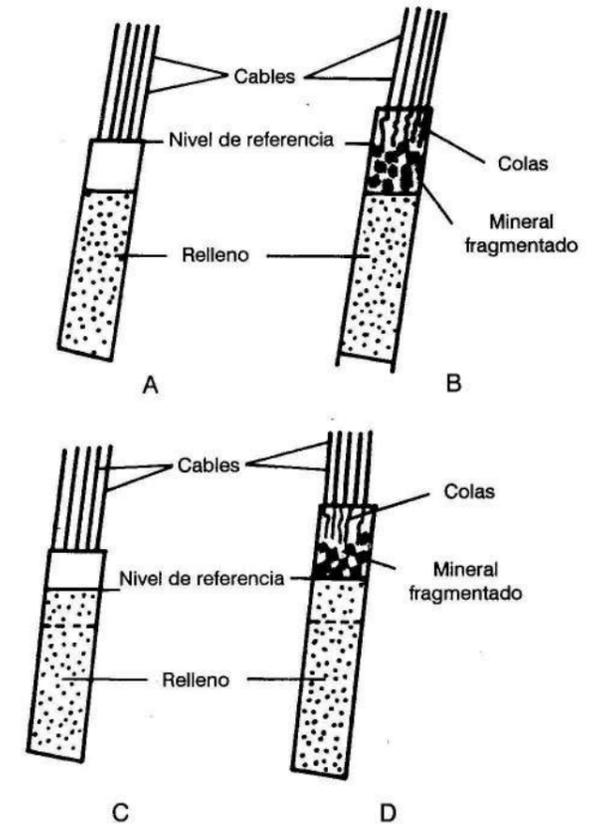


FIGURA 9. Secuencia de operaciones.

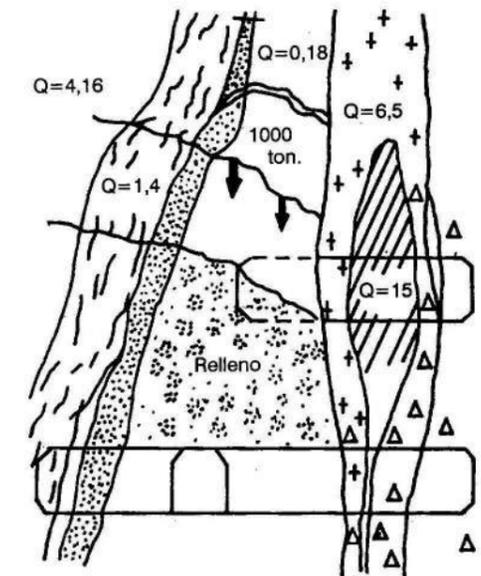


FIGURA 10. Calidades de roca en la zona de explotación.

Los colapsos de vigas preformadas en el techo de la explotación de una cámara a partir del nivel 260 obligaron a la realización de un análisis sobre la aplicación del precableado para la explotación a plena potencia del mencionado sector (ver Figura 10).

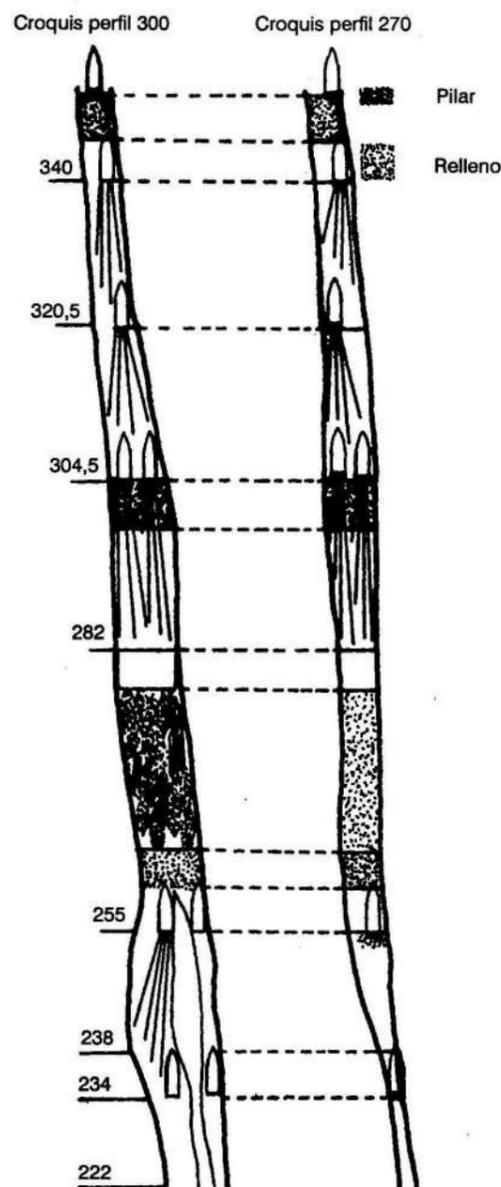


FIGURA 11. Perfiles del proyecto del cuerpo mineralizado a ser precableado.

Los estudios geomecánicos mostraron que la clasificación de roca basada en el índice de Barton «Q» arrojaron para este sector valores muy bajos, aproximados a 0,18. Para este valor, las condiciones de abertura máxima están bajo los valores de la potencia de la veta. Por otro lado, según la metodología de Laubscher, el radio hidráulico (razón área:perímetro para que se produzca el derrumbe espontáneo) ofrece valores no mayores de 8 m, y por supuesto este valor tampoco alcanza la plena potencia. Según Bieniawski, el RMR (rock mass rating) es igual a 35, el que define un ancho máximo de 10 m, siendo este un valor límite y por tanto sin ningún rango de seguridad.

Evaluación de la zona a cablear

Datos inferidos:

Longitud del cuerpo: 60 m.
Potencia del cuerpo basada en la media de dos perfiles de clavo 4
Malla definida de cableado: 3 x 3 m.
El cuerpo alcanza hasta la cota 340.

Definición del bloque 1

Este sector corresponde al cuerpo comprendido entre las cotas 222 y 234. Su altura es de 12 m (ver Figura 11). Este es el subnivel más bajo, tiene unos 30 m de longitud y potencia promedio de 4 m. En los 30 m siguientes la veta se bifurca en dos ramas de 4 m de potencia cada una. Vale decir que en ninguno de los dos tramos a explotar se utilizaron cables debido a que la potencia era inferior al ancho máximo definido para esa calidad de roca.

Definición del bloque 2

En este sector el cuerpo está comprendido entre los niveles 238 y 255. En este subnivel se presentan 2 vetas en los primeros 30 m, las cuales tienen una potencia de 4 y 11 m, respectivamente. En los siguientes 30 m hay un solo cuerpo mineralizado con una potencia de 9 m, por lo que se utilizó la técnica de precableado en esta última y en el tramo con potencia de 11 m.

Datos técnicos de la operación:

Longitud máxima de perforación: 20 m.
Área: 600 m²
Resistencia del cable: 500 ton/cable
No. de cables: 54 unidades
Metros a perforar: 1 080 m.

Definición del bloque 3

El bloque 3 corresponde al cuerpo comprendido entre las cotas 282 y 304,5. Este subnivel tiene una potencia de 18 m y una altura de 22 m. Dada la potencia de la veta se realizaron dos galerías de perforación para el precableado y se evitó de esta forma una perforación radial, la cual induce a mayores errores en la desviación de los barrenos. Se dejó un pilar de 6 m entre las dos galerías (ver Fig. 11).

Datos técnicos de la operación:

Longitud máxima de perforación: 25 m.
Área: 1 080 m²
Resistencia del cable: 625 ton/cable
No. de cables: 103 unidades
Metros a perforar: 2 575 m.

Definición del bloque 4

Este sector corresponde al cuerpo comprendido entre las cotas 304,5 y 320,5. Tiene una potencia de 15 m y altura de 16 m.

Datos técnicos de la operación:

Longitud máxima de perforación: 19 m.
Área: 900 m²
Resistencia del cable: 475 ton/cable
No. de cables: 80 unidades
Metros a perforar: 150 m.

Definición del bloque 5

Se ubica entre las cotas 320,5 y 340. Este subnivel tiene una potencia de 11 m y una altura de 19,5 m.

Datos técnicos de la operación:

Longitud máxima de perforación: 23 m.
Área: 660 m²
Resistencia del cable: 575 ton/cable
No. de cables: 59 unidades
Metros a perforar: 1 357 m.

En general, el proyecto contempla 7 000 m de cableado, la colocación de los cuales se realiza según la secuencia siguiente:

1. Preparación del área
2. Perforación
3. Instalaciones
4. Lechada

El costo estimado está entre 0,65 y 0,70 USD por tonelada cableada.

CONCLUSIONES

- Los mecanismos de fallamiento del techo pueden ser de distinta naturaleza en dependencia de las condiciones geotécnicas asociadas.

- El mejoramiento de las condiciones de estabilidad en excavaciones puede lograrse utilizando la técnica de precableado.
- Los cables, al ser sometidos a requerimientos dinámicos como es la voladura de rocas, responden con una elongación acorde al destresamiento alcanzado por el macizo. Si nuevamente son sometidos a una acción dinámica la respuesta estará acorde a la relajación alcanzada por el macizo pero esta vez la elongación será mucho menor debido a que la estabilidad del macizo ha mejorado por la actuación de los cables.
- La aplicación de este sistema de pre-reforzamiento permitió recuperar 120 000 ton de mineral con la explotación a plena potencia. Asimismo se logró un nivel adecuado de seguridad para el personal de la mina en correspondencia con el riesgo inherente a la explotación de vetas.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVARADO, J.: *Proyecto cableado Mina Milagro*, Informe interno, Cía. Minera Tamaya, 1996.
- BRUNNER, F.; A. CARVAJAL; R. DIAZ y M. GÓMEZ: *Evaluación de los métodos de explotación minera aplicados en Cía. Minera Tamaya. Informe interno*, Project FONDEF (D9611003), 1997.
- CARVAJAL, A.: *Compendio de métodos de explotación*, Textos universitarios, Universidad de la Serena, Chile, 1996.
- FULLER, P.: «Preinforcement of Cut and Fill Stopes. CSIRO, Australia», Conference of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining, University of Lulea, Sweden, June 1980.
- Ingeniería de rocas Ltda.: *Estudio geomecánico*, Proyecto Tamaya, Informe, 1995.
- JEREMIC, M. y K. CASSIDY: «Mechanics of Ground Fracturing at Con Gold Mine, Canada». Conference of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining, University of Lulea, Sweden, June 1980.
- NILSSON G., KRAULAND: «Rock Mechanics Observations and Measurements in Nasliden Mine, Sweden». Conference of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining, University of Lulea, Sweden, June 1980.