

EL “SUBLEVEL STOPING” APLICADO A LA MINA DE CALIZA “EL TORO” DE CEMENTOS EL CAIRO S.A.

Jorge Iván TOBÓN*, Juan E. MONSALVE O.†

RESUMEN

La mina de caliza “El Toro” de Cementos El Cairo S.A. está localizada sobre el flanco Occidental de la Cordillera Central, formada por rocas metamórficas que han sufrido varios eventos tectónicos; por esto, ellas muestran múltiples estructuras tales como esquistosidades, fallas, diaclasas y cavernas.

Durante muchos años la cantera fue explotada por minería a cielo abierto y desde los 90's se comenzó la explotación subterránea debido a problemas técnicos producidos por la disposición estructural del cuerpo mineral con relación a las condiciones topográficas.

Como un método alternativo de explotación el “Sublevel Stoping” fue seleccionado con cámaras de 65m de alto, 20m de ancho y 120m de largo; pilares verticales de 10m de espesor y pilares horizontales entre bloques de explotación de 16m de potencia.

Este artículo presenta una pequeña descripción de la operación de la mina donde este método es aplicado, también como los más representativos índices obtenidos durante las labores.

Palabras Claves: Explotación minera, Sublevel Stoping, túneles, fortificación, Mármol, Cementos El Cairo S.A.

ABSTRACT

The limestone mine “El Toro” of Cementos El Cairo S.A. is located on western flank of the Central Cordillera, formed by metamorphic rocks that had suffered many tectonic events; for this, they show a lot of structures such as schistosity, faults, joints, and caves.

During many years the quarry was exploited by open pit mining and since the 90's began the underground exploitation due technical problems produced by the structural disposition of mineral body in front of the topographic conditions.

As an alternative method of exploitation “Sublevel Stoping” was selected, with 65m high, 20m wide and 120m long stopes; 10m thick vertical pillars and 16m thick horizontal pillars between exploitation blocks.

This paper presents a small description of mine operation where this method is applied, as well as the more representatives indexes obtained during the works.

Keywords : Explotación minera, Sublevel Stoping, tunnels, marble, Cementos El Cairo S.A.

* Profesor Asistente - Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas – Medellín.

E-mail: jitobon@perseus.unalmed.edu.co

† Cementos El Cairo S.A. E-mail: jemonsalve@grupoargos.com

GENERALIDADES

Historia

La empresa Cementos El Cairo S.A. fue creada el 25 de abril de 1946. En 1950 la compañía inició la producción de cemento con una capacidad de 250 toneladas por día, obteniendo el material calcáreo de una cantera en el municipio de Montebello. Poco tiempo después se inició la explotación de la mina “El Toro” en el municipio de Abejorral, donde se utilizó como sistema de arranque voladuras en “zapas” (túneles de 1.5m de alto y hasta 50m de largo donde se hacían detonar hasta 50000 libras de sustancia explosiva para obtener la materia prima de seis u ocho meses), el cual fue mantenido por cerca de cuatro décadas. Posteriormente las zapas fueron sustituidas por la minería de bancos, que prevaleció hasta 1995, año en que se inició la explotación por minería subterránea.

Ubicación geográfica de la mina

La mina de caliza “el Toro” se encuentra ubicada en el municipio de Abejorral, sobre la margen izquierda del Río Buey, a 70 Km. al Sur de Medellín. La explotación minera cubre un área de 120Ha, se encuentra localizada entre las coordenadas E=841200, N=1140200 y E=842400, N=1139200 y comprendida entre las cotas 860 y 1350 m.s.n.m.

Transición de la minería a cielo abierto a subterránea

A finales de la década de los 80's, la empresa Cementos El Cairo S.A. entró en una severa crisis por la escasez de reservas explotables a cielo abierto, debido a la disposición estructural del yacimiento frente a las condiciones topográficas del área de explotación. La conformación de un fuerte talud como resultado de la actividad minera y la exigencia de grandes movimientos de estéril con muchas dificultades para su disposición, imposibilitaron la continuación de la minería a cielo abierto.

La existencia de una cantidad considerable de reservas probadas de mineral calcáreo (mármol) motivó el proyecto buscar una explotación económica de esta materia prima por un método alternativo al tradicional. Fue así como en 1992 se dio inicio al desarrollo de un primer bloque de mineral, comprendido entre las cotas 1140 y 1160, bajo la asesoría de la firma Geominas S.A., para aplicar el sistema de cámaras y pilares. Esta primera experiencia fue la transición de la minería a cielo abierto a subterránea y sirvió como escuela para la formación del personal técnico y de operarios de la mina. Con la intención de aumentar la recuperación minera, incrementar los volúmenes de producción y disminuir los costos de producción, se recurrió a la firma finlandesa Outokumpu para que asesorara a Cementos El Cairo S.A. y a Geominas S.A. en la optimización de la explotación de sus reservas disponibles.

En 1995 se inició el desarrollo del primer bloque de mineral, bajo el diseño propuesto por la firma Outokumpu, el cual correspondió al trazado para la explotación subterránea de la mina por el método de “Sublevel Stoping” (Realce por Subniveles).

GEOLOGÍA

Geología regional

La mina “EL TORO” de Cementos El Cairo S.A. se encuentra sobre el flanco occidental de la cordillera Central, enclavada geológicamente en el complejo polimetamórfico de la mencionada cordillera, esto hace alusión a que las rocas de esta área han sufrido varios eventos regionales y dinamotérmicos. Lo que hace que desde el punto de vista estructural sea un sector geológico bastante complejo.

Geología local

Esquistos Cuarzo-sericíticos (Pes): De color oscuro, con venas de cuarzo concordantes con S_1 , en su mineralogía predominan cuarzo, micas y plagioclasas y puede tener como accesorios grafito, clorita y limonita. Estructuralmente están replegados mostrando la ocurrencia de varios eventos metamórficos regionales (dos o tres) y por sus texturas se pueden deducir la existencia de eventos dinámicos a través de su historia geológica.

Esquistos Verdes (Pev): Compuestos esencialmente por hornblenda, diópsido, albita, cuarzo, clorita, wollastonita y magnetita.

El metamorfismo que afectó estas rocas no superó el bajo grado (Facies esquistos verdes) lo que es desventajoso para la minería subterránea ya que en los proyectos mineros y civiles de obras subterráneas se prefieren rocas de alto grado de metamorfismo por su resistencia, siempre y cuando no estén intensamente fracturadas.

Mármol (Pm): Se tiene un cuerpo alabeado tanto en el rumbo como en el buzamiento. El yacimiento tiene una disposición aproximada de $N-S \pm 20^\circ/60^\circ \pm 10^\circ W$. Macroscópicamente presentan gran variedad de colores: blanco, gris, verde, negro, rosado (según el contaminante) pero especialmente se encuentra bandeados, el bandeadamiento se puede deber a una distribución composicional o a un origen tectónico (segregación).

Hacia el piso geométrico del cuerpo es normal que se presenten grandes zonas de disolución de hasta 100m de diámetro y 150m de altura, llenas de arcilla y bloques apilados (Fig. 1). Esta es la zona de mayor infiltración y donde las fallas y diaclasas que allí se encuentran presentan rellenos arcillosos siendo sumamente perjudicial para la estabilidad de los túneles.

El cuerpo principal tiene cerca de 800m de longitud en el rumbo, 120m de potencia aparente en promedio y se ha comprobado una profundidad de 600m en la dirección del buzamiento hasta llegar a la cota 750msnm. Con base en los resultados obtenidos en las

campañas de exploración que se adelantan, se espera que haya una longitud similar por debajo de esta cota (Fig. 1).

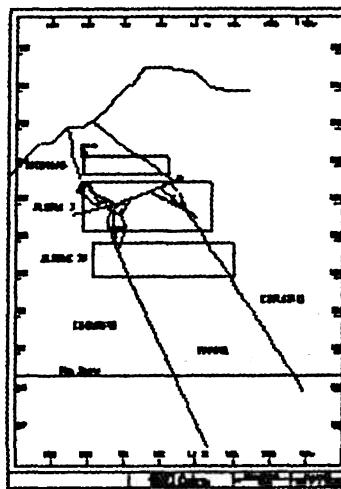


FIGURA 1. Perfil geológico del yacimiento

El mármol normalmente se encuentra fracturado con rellenos de limonita, grafito, calcita o cuarzo. Los dos últimos, desde el punto de vista de la estabilidad, son más convenientes, puesto que el grafito y la limonita actúan como lubricantes en las fracturas. Su textura es granoblástica y el tamaño de grano varía desde gruesogranular ($>3\text{mm}$) hasta finogranular ($<1\text{mm}$). En algunos sectores el mármol ha sufrido procesos de dolomitización donde se ha generado alrededor de un 8% de dolomita, lo cual es perjudicial porque el magnesio es un contaminante en la industria cementera, además, el proceso de dolomitización implica un micro fracturamiento que es desfavorable para la resistencia mecánica de la roca.

Stock del Buey (Jsb): Es una roca granítica de color grisáceo, se le observan con facilidad cristales de cuarzo, feldespatos y micas. Regionalmente es una granodiorita que intruye a los esquistos y al mármol.

Desde el punto de vista operativo este intrusivo es perjudicial por provocar un mayor desgaste de las herramientas y la maquinaria de perforación, químicamente le proporciona cuarzo al mármol en cantidades excesivamente altas; por su estructura cristalina es poco reactivo y muy difícil de quemar en el proceso de clinkerización, pero mejora la estabilidad de las bóvedas por ser más resistente, menos fracturado al ser más joven y proporcionar cuarzo como relleno para las fracturas.

Además de estas rocas en el área se encuentran depósitos cuaternarios del tipo aluviales (Qal) y coluviales (Qdp).

Geología Estructural

Eventos Regionales: En los esquistos claramente se pueden apreciar dos eventos (S_1 y S_2), pero en algunas muestras se aprecia un incipiente tercer evento (S_3), lo anterior genera

diferentes direcciones de esquistosidades y bandeamientos. S_1 y S_2 están en la facies de esquistos verdes lo que quiere decir que no sobrepasaron las condiciones de bajo grado de metamorfismo. Un gran plegamiento regional es definido por las esquistosidades S_1 y S_2 así:

S_1 $N16^\circ \pm 26^\circ W/42^\circ \pm 3^\circ W$, $N18^\circ \pm 5^\circ W/70^\circ \pm 5^\circ E$

S_2 $N88^\circ \pm 15^\circ W/40^\circ \pm 8^\circ S$

Eventos Dinamotérmicos: A partir del análisis de secciones delgadas de esquistos, mármol y granito se puede concluir que hay varios metamorfismos dinamotérmico sobreimpuestos a los eventos tectónicos regionales, lo cual produce múltiples direcciones de fracturamiento. Todo esto indica que al menos se tienen tres eventos metamórficos que generaron esquistosidades, diaclasas, fallas y fracturas, todas superficies de debilidad en las rocas.

Estructuras de ruptura generadas: Considerando únicamente tres eventos tectónicos y con la información recopilada en campo se ha podido establecer un sistema de diaclasamiento con tres familias (nueve direcciones diferentes).

Familia 1: $N32^\circ \pm 19^\circ W/64^\circ \pm 14^\circ W$

$N45^\circ \pm 15^\circ E/56^\circ \pm 13^\circ E$

$N40^\circ \pm 20^\circ W/60^\circ \pm 17^\circ E$

Familia 2: $N60^\circ \pm 20^\circ E/86^\circ \pm 11^\circ N$

$N70^\circ \pm 17^\circ E/86^\circ \pm 13^\circ S$

$N08^\circ \pm 10^\circ E/71^\circ \pm 11^\circ W$

Familia 3: $N12^\circ \pm 11^\circ E/70^\circ \pm 13^\circ E$

$N68^\circ \pm 10^\circ E/56^\circ \pm 11^\circ N$

$N80^\circ \pm 18^\circ W/46^\circ \pm 12^\circ N$

En el mármol además de las anteriores familias se ha podido identificar otra:

$N-S \pm 07^\circ/52^\circ \pm 11^\circ W$

$N26^\circ \pm 07^\circ W/48^\circ \pm 12^\circ W$

$E-W \pm 11^\circ/68^\circ \pm 14^\circ N$

A partir de un análisis geostadístico se obtienen los siguientes sistemas de fallamiento:

Primer sistema: $N30^\circ \pm 17^\circ E/52^\circ \pm 15^\circ E$. Este sistema de fallamiento controla los diques de granito y los filones de cuarzo.

Segundo sistema: $N45^\circ \pm 35^\circ E/50^\circ \pm 35^\circ E$, $NS \pm 12^\circ/52^\circ \pm 15^\circ W$ y $NS \pm 15^\circ/58^\circ \pm 20^\circ E$. De carácter normales.

Tercer sistema: $EW \pm 10^\circ/50^\circ \pm 20^\circ S$ y $EW \pm 15^\circ/70^\circ \pm 20^\circ N$. Inversas.

Además, se han encontrado diferentes fracturas irregulares que no corresponden a una de estas tendencias específicas, como ejemplo se tienen las cavernas naturales, con una disposición promedio de N45°W/60°W.

Todo lo anterior evidencia el alto grado de complejidad estructural que afecta el yacimiento de material calcáreo que explota Cementos El Cairo S.A. lo cual puede generar grandes problemas de estabilidad tanto en los pilares como en los techos de las cámaras de explotación.

Esfuerzos Tectónicos

Empleando técnicas de geología estructural moderna y la teoría de Mohr, se pudo deducir que los esfuerzos tectónicos residuales se han distribuido a lo largo de la historia geológica bajo las orientaciones principales de N-S y E-W y que los actuales son N45°W. Esto es de suma importancia para la orientación de las cámaras ya que los estudiosos de la mecánica de rocas plantean que los ejes de los túneles deben ser paralelos al vector resultante de esta sumatoria, para favorecer la distribución de los esfuerzos a lo largo de los pilares.

Clasificación del macizo rocoso

Para clasificar el macizo rocoso se emplearon los índices Q (Barton) y el RMR (Bieniawski). A partir del estudio de núcleos de perforación con taladro de diamante, se obtuvieron valores entre 8.4 y 27.4 para el Q. En el RMR se encontraron valores entre 60 y 80, clasificando la roca como tipo II, correspondiendo a una roca buena.

El "Rock Quality Designation" (RQD) muestra que la roca es buena ya que en promedio se tienen RQDs entre 75 y 80%.

Por todo lo anterior, se puede concluir que la roca tiene una muy buena capacidad de autosoporte.

Parámetros de diseño

Para el diseño de la mina se consideró una resistencia a la compresión para el mármol del orden de 60Mpa y para el esquisto oscila entre 25 y 55Mpa.

Utilizando los resultados promedios del Q se calculó el Span máximo que no necesita soporte, mediante la fórmula:

$$\text{Span} = 2 * \text{ESR} * Q^{0.4}$$

Donde:

ESR (Excavation Support Ratio) = 3 – 5 para excavaciones temporales.
 $Q = 17$ (valor promedio)

El valor obtenido para el Span sin soporte está entre 18 y 30m dependiendo del valor de ESR seleccionado. Para el diseño de la mina Outokompu seleccionó un ancho de 20m para las cámaras.

Monitoreo de deformaciones

Durante la ejecución del desarrollo se inicio una campaña de evaluación sistemática de la convergencia o la divergencia en las excavaciones mediante extensometría realizada con un extensómetro de cinta, la cual no mostró deformaciones superiores a los dos milímetros (Fig. 2).

Pensando en evaluar los pilares propiamente dichos, durante la etapa de explotación se inició un programa de monitoreo sistemático con extensómetros de barras localizados a 3, 5 y 7m dentro del pilar y con estaciones cada 25m a lo largo de la cámara de explotación. Hasta la fecha no se han detectado deformaciones superiores a los dos milímetros; esto es muy importante porque de acuerdo con estudios de mecánica de rocas efectuados, las deformaciones máximas posibles son del orden de los doce milímetros para estas rocas.

Control Calidad Química

Para fines prácticos, la calidad del mármol se ha dividido en dos grupos denominados “caliza alta” y “caliza rebajada”, de acuerdo con el título del carbonato de calcio, así; “caliza alta” por encima del 80% y “caliza rebajada” entre 60 y 80%. Para este control se realizan muestreos durante todas las etapas mineras. En la exploración los núcleos recuperados en las perforaciones con taladro de diamante son partidos longitudinalmente y una de las mitades es llevada al laboratorio químico. Durante el desarrollo, en el avance de los túneles, se toman muestras cuarteadas de los lodos obtenidos de la perforación con los jumbos. Otro método empleado es el muestreo de canal en las paredes de los túneles cada dos metros. En la explotación, de las perforaciones de producción con los fandriles, se toma una muestra compuesta por los lodos que resultan de la perforación de los abanicos para obtener un promedio de su calidad.

Toda la información recopilada es modelada en tres dimensiones mediante los softwares de GEOSTAT.

RESERVAS Y PLANEAMIENTO

Reservas: Cementos el Cairo S.A. cuenta en la actualidad con 43.1 millones de toneladas de Reservas Probadas y con 44.3 millones de toneladas de Reservas Probables.

Estación No. 27

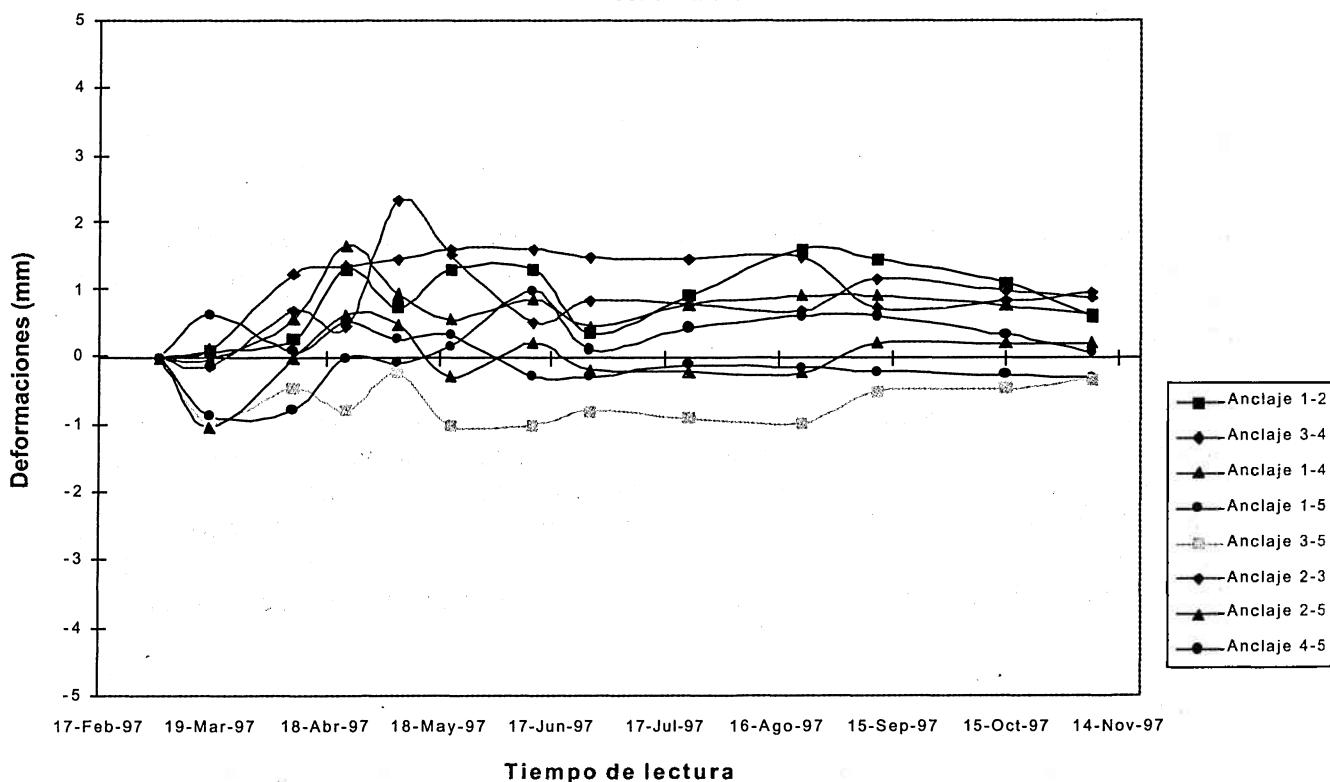


FIGURA 2. Extensometría de cinta

Planeamiento a largo plazo: Con base en el método minero propuesto, en las reservas probadas y en la geometría del yacimiento, la mina se ha modulado hasta la cota 860, con lozas entre bloques de 16m de espesor, garantizando así el suministro de materia prima a la fábrica hasta el año 2021 a una tasa de producción de 660.000 ton/año (Fig.3). Los siguientes son los bloques planeados:

- Bloque I: (cotas 1063 - 1130). Producirá 2.4MT
- Bloque II: (cotas 1002 - 1047). Producirá 2.5MT
- Bloque III: (cotas.931 - 986) Producirá 5.4MT
- Bloque IV: (cotas.860 - 915) Producirá 5.4MT.

ITEM	ACTIVIDAD	ANOS	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024				
	DESARROLLO																																	
1	Bloque 1 (ml)	1.5	7776																															
2	Bloque 2 (ml)	5.0	1100	2100	3100	1710																												
3	Bloque 3 (ml)	6.6				1300	2100	3100	3100	3100	3100	3100																						
4	Bloque 4 (ml)	6.5																																
	EXPLOTACIÓN																																	
5	Bloque Geominas	1.0	100																															
6	La Lanza y Open Pit	6	100	80	80	80	80	80	80																									
7	Bloque 1	8.0	100	130	160	180	190	170	170	180	180	180	180																					
8	Bloque 2	10.0		40	110	110		200	200	130	130	800	320																					
9	Bloque 3	12.0						100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100			
10	Bloque 4	9.0																																
11	Otro (Corrector)																																	
	TOTAL (Tons.x 000)		600	880	880	660	880	680	860	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	621				

FIGURA 3. Planeación a largo plazo

MINERÍA

Método de Explotación

El método minero corresponde a un ‘Sublevel Stoping’, el cual es aplicado en sentido perpendicular al rumbo del cuerpo mineral, para conformar cámaras de 20 metros de ancho, 65 metros de altura y longitudes entre 80 y 120 metros dependiendo de la potencia del yacimiento, separadas por pilares de 10 m de espesor, para una recuperación del 54% de las reservas. La capacidad de la mina es de 60.000 toneladas de mármol por mes, siendo el transporte del mineral el factor que controla esta cifra. El primer bloque explotado por este método se encuentra ubicado entre las cotas 1063 y 1128. Los subniveles de explotación se encuentran en las cotas 1115 y 1090 y el de transporte se encuentra sobre la cota 1063. Las guías de acceso a cada uno de ellos se encuentran ubicadas en estéril, conservando una separación de 20 m con respecto al piso del cuerpo calcáreo (Fig. 4).

Desarrollo

El desarrollo de la mina se hace por la modalidad de contrato con terceros, el cual es celebrado por cantidad de obra a precios unitarios reajustables periódicamente y adjudicado por licitación privada. Las operaciones propias de esta actividad se ejecutan bajo la interventoría de Cementos El Cairo S.A. Actualmente el contrato para el desarrollo de la mina se encuentra adjudicado a la firma Geominas S.A.

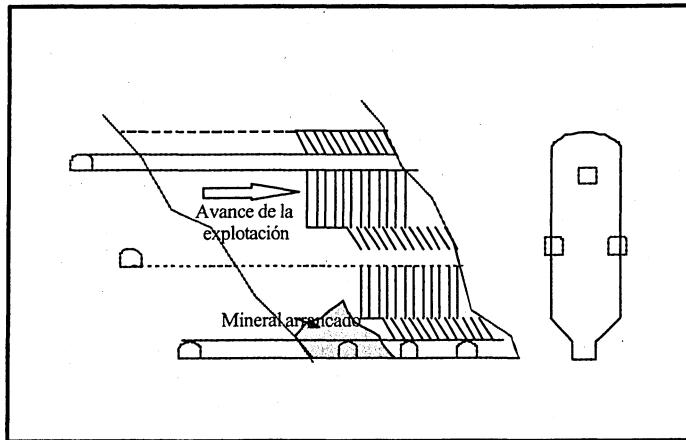


FIGURA 4. Corte típico de una cámara de explotación.

Las obras contratadas corresponden a la apertura de guías en esquisto y cruzadas en mármol. La perforación para el desarrollo se hace con Jumbos de 2 brazos, con los cuales se han alcanzado avances mensuales hasta de 440 m lineales. Las secciones comunes de los túneles de desarrollo son 20 m² para las guías y vías de transporte y de 18 m² para las cruzadas. El patrón típico de perforación para las labores de desarrollo corresponde a un corte Canadiense con 42 barrenos, de los cuales dos se dejan sin cargar (Fig. 5).

La relación existente entre las toneladas de mineral a extraer por cada metro de túnel desarrollado es de 300ton/m.

Cada nivel desarrollado para el bloque de explotación se caracteriza por la existencia de una guía, una vía circunvalar y las cruzadas de explotación (Fig. 6).

La rezaga del material volado se hace con volquetas Terex R25 y cargadores Volvo L-180.

La mano de obra dedicada al desarrollo está constituida por 32 hombres repartidos entre personal de ingeniería, mineros, mecánicos y servicios generales. En la tabla 1 se presentan los principales índices definidos en la obra.

Debido a las características del macizo rocoso, durante el desarrollo es preciso fortificar algunas labores, recurriendo a la instalación de arcos de acero en los portales de los túneles, en zonas de transición de roca alterada a roca fresca y en el paso de fallas o de pequeñas cavernas. Además se ha empleado concreto lanzado en húmedo, utilizando fibra en reemplazo de la malla convencional, para mejorar la respuesta de la roca en áreas muy fracturadas o en zonas de falla donde la roca se encuentra muy alterada. En sectores de confluencia de fallas o de discontinuidades importantes donde se presente la conformación de bloques, ha sido útil la instalación de pernos para la fijación de estos o para mejorar la capacidad autososteniente de la roca.

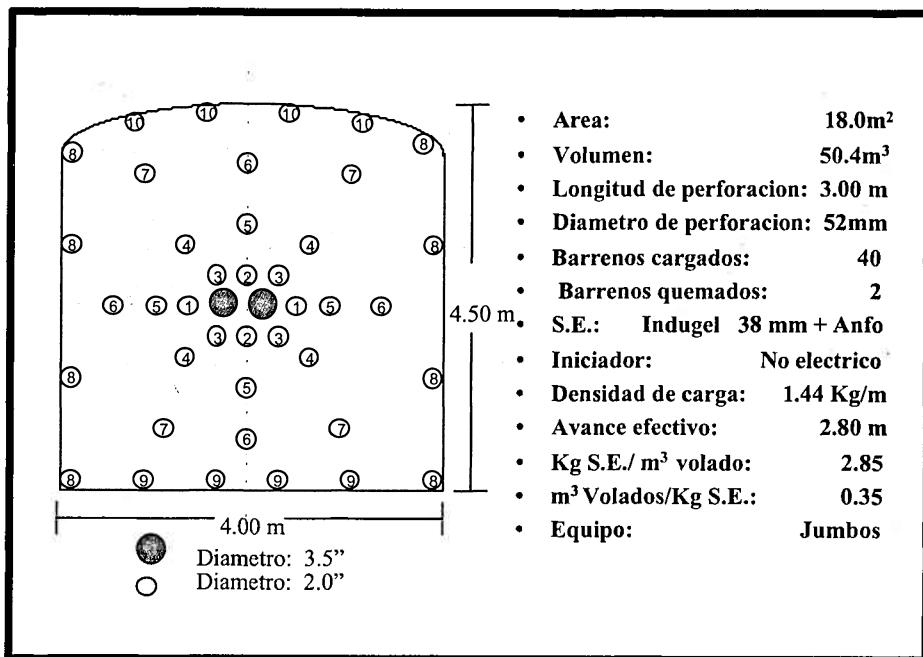


FIGURA 5. Franqueo típico para labores de desarrollo.

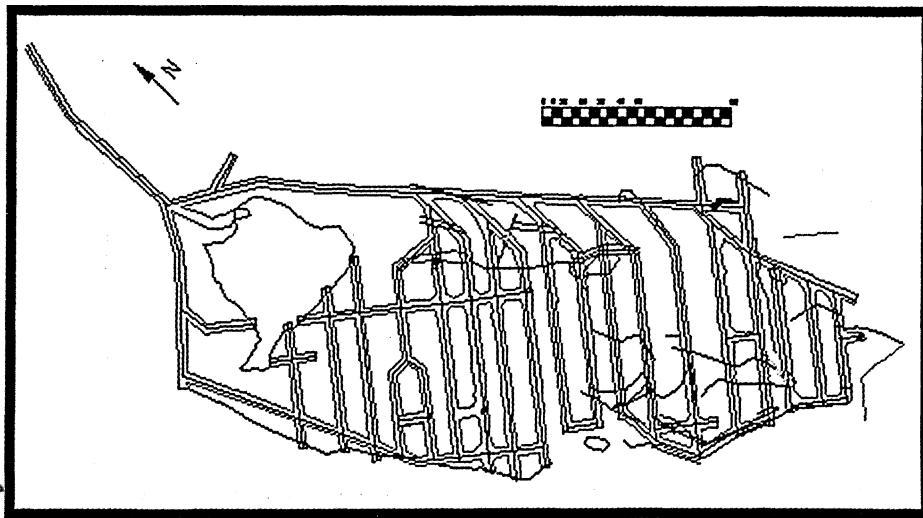


FIGURA 6. Trazado base del nivel 1090 - Bloque 1.

Preparación

Se consideran labores de preparación aquellas que permiten adecuar las reservas desarrolladas para su explotación final. Se destacan entre éstas la apertura de tambores y la adecuación de caras libres.

TABLA 1. Índices característicos del desarrollo. Fuente: Geominas S.A.

Descripción	Unidad	Valor
Rendimiento Hombre - turno	$\text{m}^3/\text{H-T}$	4.06
Rendimiento de brocas en perforación.	Un/m	0.0035
Rendimiento en perforación	m/T	348
Consumo de explosivo	$\text{Kg. } / \text{m}^3$	2.85
Rendimiento en la rezaga	Ton/T	350
Avance por voladura	m	2.80
Eficiencia en el avance	%	93.3

Apertura de tambores: Se utiliza para su perforación el Fandrill, el cual realiza barrenos largos desde los niveles 1090 y 1115 (Fig. 7).

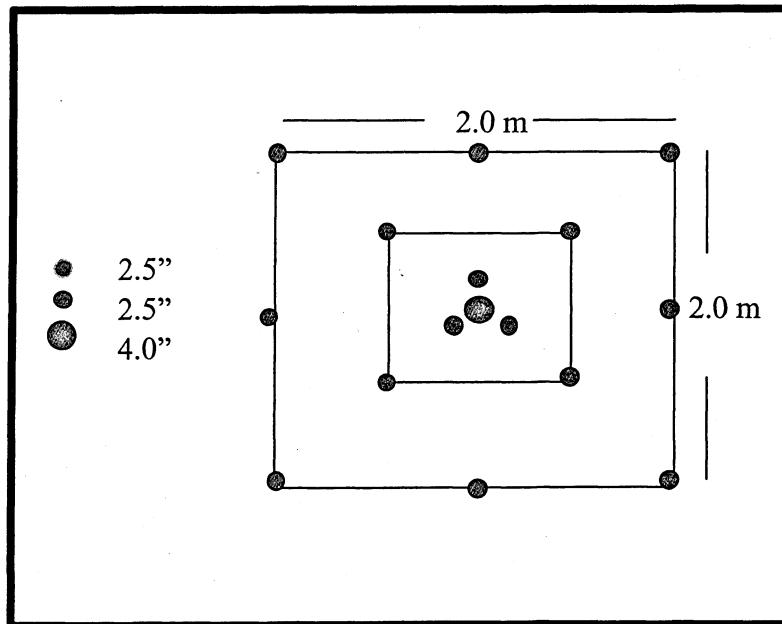


FIGURA 7. Patrón de perforación para tambores.

El cargue de explosivos para las voladuras se hace por gravedad cuando se avanzan los tambores desde los niveles inferiores hasta el nivel 1115; para realizar la porción de tambor que está por encima del nivel 1115, es preciso utilizar anfo inyectado y emplear andamios para alcanzar el frente de avance. En la tabla 2 se presentan los principales índices alcanzados en esta labor.

TABLA 2. Índices para la apertura de tambores.

Descripción	Unidad	Valor
Metros perforados entre niveles	m	336
Metros realizados por turno	m	4
Metros avanzados por H - T	m	2
Kg. S.E. por metro avanzado	Kg.	56
Ton. Preparadas/m tambor	ton/m	5600

Adecuación de caras libres: Consiste en la apertura del frente de explotación para el “Sublevel Stoping”, es la zona de menor resistencia para el trabajo de los explosivos al momento de iniciar la explotación. Para la apertura de esta, se emplean igualmente barrenos largos perforados con el Fandrill, los cuales son ubicados inicialmente en la periferia del tambor; posteriormente, cuando éste se ha ampliado lo suficiente, los barrenos se alinean en forma de banco para continuar con la preparación de la cara libre. Las perforaciones son verticales, con una longitud de 10m cada una. Del nivel inferior se perfora hacia arriba, de los otros 2 subniveles se barrena en ambos sentidos, hacia arriba y hacia abajo, para disminuir los problemas causados por las desviaciones de los barrenos.

Después de tener perforada completamente la cara libre, se procede al ensanche de ésta mediante una secuencia de voladuras ordenada y secuencial que permita avanzar con este procedimiento en forma de escalón invertido, teniendo más adelantado el frente de la cara libre en el nivel inferior. En la figura 8 se muestra esquemáticamente la secuencia para la apertura de una cara libre.

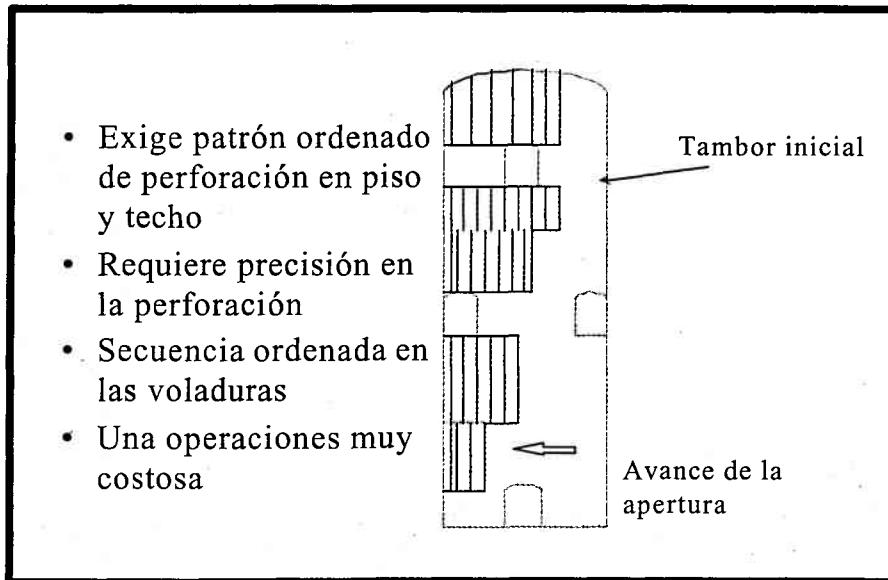


FIGURA 8. Secuencia de apertura de cara libre

EXPLOTACIÓN

Para la perforación de producción se utilizan los fandrill, con los cuales se han alcanzado hasta 260 m de perforación en un turno de 10 horas. Estos equipos son máquina eléctro-hidráulicas marca Tamrock, que permiten la perforación radial de barrenos hasta de 36 m de longitud, con diámetros que van desde 64 hasta 100 mm.

El arranque del mineral se hace a partir de la voladura de abanicos perforados desde los diferentes subniveles. Estos abanicos consisten en una serie de perforaciones largas de 64 mm de diámetro, con longitudes que van desde 5 hasta 21 metros, separados entre si 2 metros (burden) y con un espaciamiento máximo en el fondo de los barrenos de 2,5 metros. Por experiencia, el burden y el espaciamiento se han definido en función de la calidad de la roca, ya que debido al alto grado de fracturamiento, con medidas superiores se empiezan a presentar sobretamaños en exceso. Los abanicos perforados desde el subnivel 1090 son muy importantes porque permiten perfilar mejor los pilares, por tal motivo, el diseño de éstos se ha modificado de tal forma que los barrenos laterales alcancen una máxima longitud sin ir en detrimento de la posterior operación de cargue y de la calidad de la perforación en términos de las posibles desviaciones (Fig. 9).

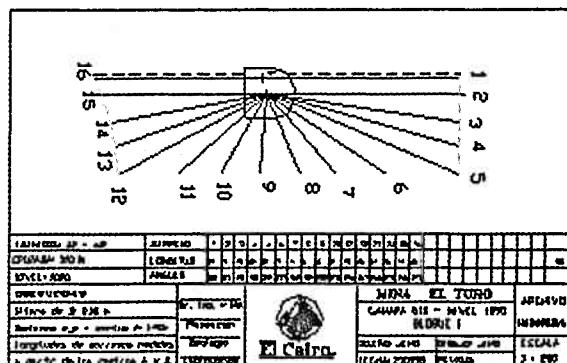
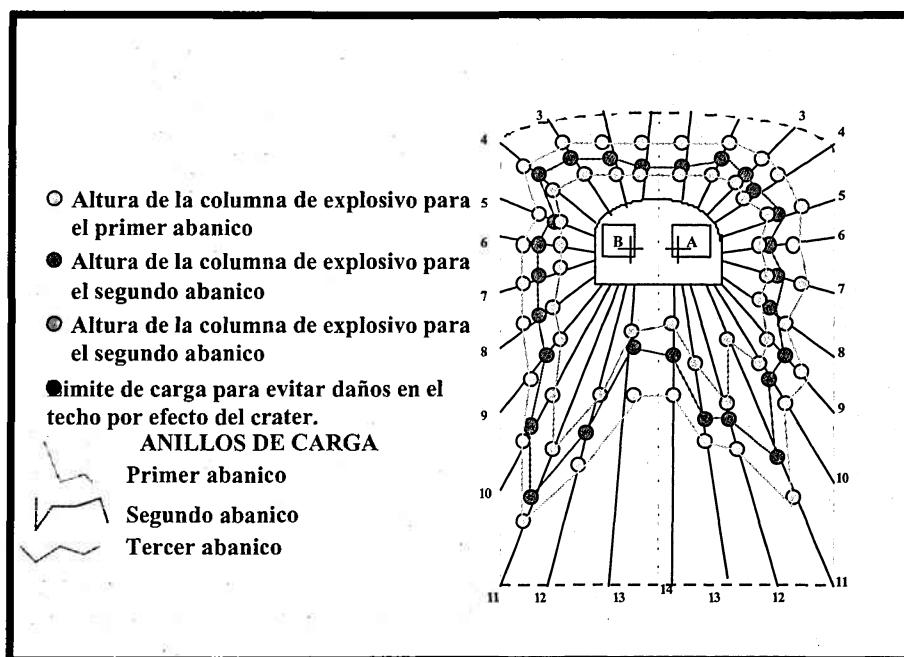


FIGURA 9. Abanico típico del nivel 1090

Para el cargue de barrenos se utiliza como agente de voladura el ANFO cebado con INDUGEL de 44 mm, el cual es iniciado con detonadores no eléctricos del tipo EZ-det o Tec-S, con tiempos de retardo de 700 ms para fondo y 25 ms para superficie, los cuales tienen longitudes de 7.3, 9, 12, 18 o 30 metros, según sea la profundidad del barreno que se carga. Los barrenos ubicados en el piso se cargan aprovechando la gravedad y los barrenos laterales y de techo son cargados mediante el uso de una inyectora de anfo neumática, marca Dux. Las columnas de explosivo en cada barreno son de diferentes longitudes para evitar altas concentraciones de éste en los alrededores de los subniveles y gran desperdicio del mismo. Generalmente se hacen voladuras simultáneas de tres abanicos, los cuales son conectados entre sí mediante el uso de conectores unidireccionales de 100 ms, dispuestos de tal manera que entre cada abanico se logre un retardo de 125 ms. En la figura 10 se presenta un esquema de la distribución de la carga explosiva para la voladura de un grupo de tres abanicos. En la tabla 3 se presentan algunos índices estándar para la explotación de la mina.

TABLA 3. Índices estándar para la explotación en la mina.

Descripción	Unidad	Valor
Ton. / H - T en explotación	Ton/H-T	96.00
Ton por H - T total mina	Ton/H-T	21.00
Kg. S.E. por ton arrancada	Kg. S.E./ton	0.22
Ton mármol por m perforado	Ton/m perf.	7.22
Consumo específico brocas	Un / m	0.00143
Consumo específico barras	Un / m	0.002
Consumo específico Shank	Un / m	0.00067
Metros de cable por tonelada	m/ton	0.0107

**FIGURA 10.** Distribución de la carga para la voladura de tres abanicos

Con la ayuda de un sismógrafo marca White, se ha venido haciendo un seguimiento sistemático a las voladuras desde diferentes construcciones aledañas a la mina, para tratar de identificar los efectos que sobre éstas puedan ocasionar, encontrando siempre valores de velocidad de partícula y frecuencia dentro de los rangos permitidos por las normas que se han utilizado como patrón (US Bureau of Mines). En la tabla 4 se presentan algunos valores registrados durante el monitoreo de las voladuras.

El avance de la explotación a lo largo de los tres subniveles es ascendente, es decir, el frente de explotación del nivel inferior o "undercut" debe estar siempre más adelantado que

el del subnivel intermedio y éste a su vez, debe estar más adelante que el del superior; lo anterior favorece la seguridad del personal y mejora el trabajo del explosivo al momento de la voladura por tener dos grandes caras libres, una frontal y otra inferior.

TABLA 4. Valores típicos monitoreados durante voladuras de producción

		Componentes de la onda		
Evento	Fecha	Radial mm/s Hz	Vertical mm/s Hz	Transversal mm/s Hz
Vol-15	23-4-98	0.381	0.508	0.381
		31.0	46.5	39.3
Vol-16	24-4-98	0.508	0.254	0.254
		32.0	48.7	46.5
Vol-17	24-4-98	0.254	0.254	0.127
		22.7	85.3	0.0
Vol-18	28-4-98	0.762	1.905	0.508
		36.5	56.8	32.0
Vol-19	28-4-98	0.508	0.508	0.635
		23.2	32.0	34.1

Después de efectuar las voladuras, el mineral arrancado cae al nivel inferior, donde se almacena para ser posteriormente extraído.

La rezaga o retirada del material depositado en el “undercut” o nivel inferior de la cámara de explotación se hace a partir de una cruzada contigua, desde donde un cargador extrae el mineral a través de un conjunto de ‘Draw Points’ (túneles que cortan los pilares para comunicar dos cámaras). Cada vez que el cargador ataca la carga, esta se desliza hacia el “Draw Point”, permitiendo que la operación de rezaga sea rápida. Este procedimiento se puede hacer de esta manera hasta que la pila del mineral depositado en la cámara alcanza su ángulo de reposo y no se da más el deslizamiento del material hacia los puntos de cargue, en este momento, por seguridad para el operador del cargador, es preciso utilizar el sistema de control remoto del equipo para extraer el mineral restante que queda dentro de la cámara.

Fortificación

El diseño de la mina contempla la conformación de pilares de 10 m de espesor, 65 m de altura y hasta 120 m de longitud. Estas dimensiones y el grado de fracturación de la roca, hacen que los pilares requieran un tratamiento especial, basado principalmente en la prevención del desprendimiento de bloques. Es fundamental la información brindada por la cartografía geotécnica, mediante la cual se pueden definir en cortes perpendiculares al eje de las cámaras los bloques potenciales o las discontinuidades críticas que pueden aparecer

en los pilares. Una vez definidos estos criterios, se procede a diseñar una serie de perforaciones desde cada uno de los diferentes subniveles para coser estas zonas de debilidad. Para esta operación se utiliza cable con alma de acero tipo torón de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 7 hilos. Después de perforados los barrenos para fortificación e introducido el torón, se procede a la inyección de una lechada de agua cemento al 0.4, adicionándole un aditivo fluidificante y otro expansor. La fortificación de los pilares se hace de manera consecutiva mediante el análisis de los cortes geológicos transversales de las cámaras que se efectúan cada tres metros. Adicionalmente a este tipo de refuerzo que obedece a la existencia de discontinuidades en el macizo, se tiene una labor de fortificación sistemática para la zona de tensión del pilar, que consiste en la colocación de cables a partir de las cruzadas del nivel 1090 a ambos lados de este con una disposición tal que cubra su zona media (Fig. 11).

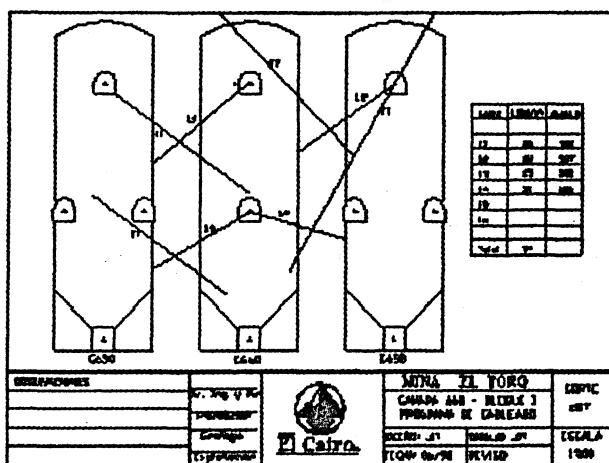


FIGURA 11. Fortificación de pilares con cables

Ventilación

Para el cálculo de los requerimientos de aire en la mina se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: número de hombres bajo tierra, cantidad de aire necesaria para diluir los gases de las voladuras en 30 minutos y caudal de aire necesario para admitir el trabajo de equipos diesel en la mina. Después de analizar estos criterios, prevaleció el de la cantidad de aire necesaria para admitir el trabajo de equipos diesel en la mina, el cual exige $3366\text{m}^3/\text{min}$ de aire por minuto. Actualmente la mina cuenta con un flujo de aire de $3660\text{ m}^3/\text{min}$ que es movido por un ventilador principal de aspas regulables.

El circuito de ventilación consta de un retorno principal de ventilación ubicado en el nivel superior del actual bloque de explotación (1115) y dos ramales de ingreso de aire por los niveles 1063 y 1090. El aire es conducido hasta el fondo de la mina mediante un conjunto de cortinas reguladoras que permiten controlarlo y dirigirlo de acuerdo con las necesidades (Fig. 12).

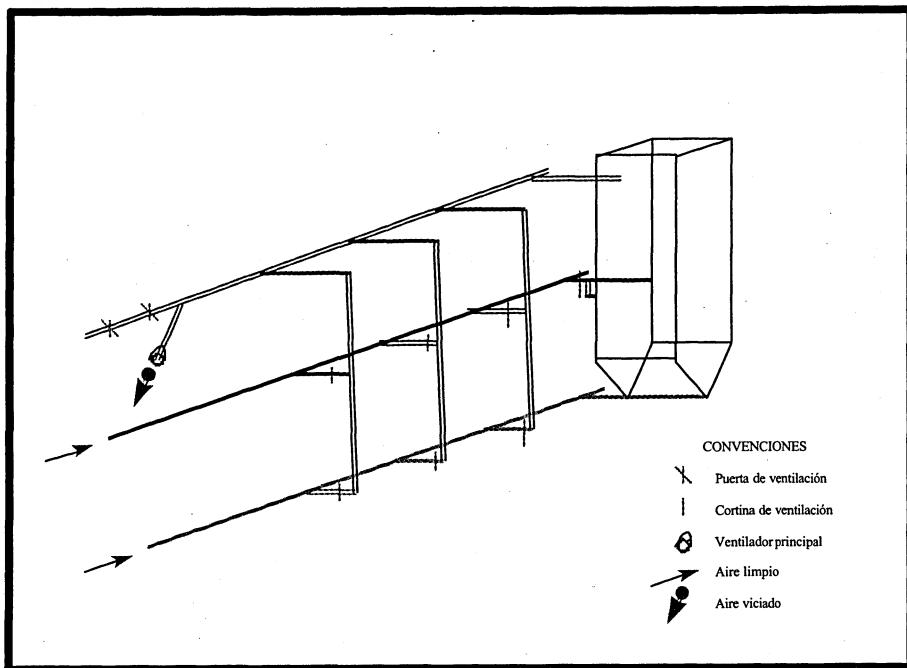


FIGURA 12. Esquema del circuito de ventilación.

Costos directos de explotación

El Costo total de producción de una tonelada de mármol en la mina de caliza “El Toro” se discrimina porcentualmente de acuerdo con las cifras reportadas en la tabla 5. Los valores del desarrollo globalizan todos los costos que se generan en esta operación, mientras que los costos de explotación se desglosan en más detalle.

Equipamiento

Para el normal funcionamiento de la mina se cuenta con un conjunto de equipos utilizados en las diferentes operaciones de ésta, muchos de los cuales hacen parte de los que antiguamente se desempeñaban en la explotación a cielo abierto. En la tabla 6 se presenta un listado de estos equipos.

Salud Ocupacional

Se ha venido trabajando con el modelo “Cero Accidentes” de SURATEP S.A, desde 1997. Al evaluar el resultado de dicho año frente a años anteriores, se encontró una disminución en la accidentalidad del 24% y una disminución en la severidad de los accidentes del 76%, medido este último parámetro en términos del ausentismo por accidentes de trabajo.

Expectativas al futuro

Para continuar con el proceso de mejoramiento continuo se tienen las siguientes expectativas: Monitoreo remoto de deformación en pilares, Trituración subterránea y transporte en banda del mineral triturado, Optimización de mezclas de materias primas, Utilización de equipos de bajo perfil (LHD), Exploración de reservas para 30 años más.

TABLA 5. Costos porcentuales de la explotación

ITEM	% COSTO TOTAL
Desarrollo	52.00
Explotación	
Perforación	
Materiales	3.60
Mano de Obra	2.93
Voladura	
Materiales	7.89
Mano de Obra	0.72
Preparación	
Tambores	0.72
Caras libres	1.31
Fortificación	2.68
Cargue y Transporte	4.63
Mantenimiento y Repuestos.	23.52
TOTAL	100.00

TABLA 6. Descripción de equipos

Cantidad	Descripción	Marca
4	Jumbos 2 Brazos	Tamrock Otros
2	Fandrill Solo HS-600	Tamrock
4	Cargador L-180	Volvo
1	Inyectora de ANFO	Dux
6	Volquetas R-25	Terex

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, E y GENS, A. Instrumentación de obras. Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona, 1989. 646p.
- BIENIAWSKI, Z. T. Rock mechanics design in mining and tunneling. 1ra ed. Rotterdam, 1984. 272p.
- CEMENTOS EL CAIRO S.A. Informe de exploración licencia 8648. Departamento de Geología, 1995.
- Informes anuales de la mina de los años 1996, 1997, 1998, 1999. Departamento de Geología.
- GARCIA R., Oseas; RESTREPO B., Oscar y ROLDAN, Jorge. Estudio geotécnico minero para la cantera de abejorral de Cementos El Cairo S.A. Medellín, 1991. Trabajo Dirigido de Grado de Ingeniería de Minas y Metalurgia e Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. 460p.
- GEOMINAS S.A. Estudio regional para calizas en el departamento de Antioquia. 1978. (Inédito)
- Informe geotécnico: Mármol de la cantera abejorral. 1993. (Inédito).
- GIL E., Fabio. Petrogénesis y microtectónica de las metamorfitas del distrito minero de Abejorral. 1996. Informe interno Cementos El Cairo S. A.
- HOEK, E y BROWN, E. T. Excavaciones subterráneas en roca. México: McGraw Hill, 1985. 634p.
- KUMMINS, Arthur. Mining engineering handbook. New York: Chairman, 1973. Vol. 1.
- LAFARGE CONSULTANTS LTD. Geological review and development scheme investigation for de Abejorral Quarry. Mtreal, 1980. 38p. (Inédito)
- McKINSTRY, H. E. Geología de minas. Barcelona: Omega, 1962. 671p.
- MONTOYA M., Juan. Análisis de las respuestas geomecánicas de un macizo rocoso ante la redistribución de esfuerzos debido a una apertura múltiple. Mina de Caliza "El Toro" Cementos El Cairo S. A. Medellín, 1998. Trabajo Dirigido de Grado de Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- OUTOKUMPU MINIG SERVICES. Preliminary underground mine layout of Cantera Abejorral limestone deposit. 1994. 23p. (Inédito).
- SURATEP S.A. Modelo Cero Accidentes. 1997
- TOBON, J. I. Replanteamiento informe final de exploración y plan de trabajo e inversiones (PTI) de la concesión 8649. 2000. Informe interno Cementos El Cairo S. A.