



EXTRACCIÓN

"Sacando la materia prima"

Índice temático

I. Perforación	4
Perforación de rocas	4
¿Qué es la perforación?	4
Características de las rocas	4
Planos de perforación	6
Confección de planos y croquis.....	6
Lectura e interpretación de planos	6
Interpretación de programas.....	6
Perforación en minería subterránea	7
Rainura.....	7
Perforación en minería a rajo abierto	7
Operación y parámetros de perforación.....	7
Empuje	7
Revoluciones por minuto	8
Velocidad de penetración.....	8
Desgastes de elementos de perforación	8
Fluidos de perforación.....	10
Tipos de fluidos	10
Tipos de compresores	11
II. Tronaduras	12
Diseño de la tronadura	12
Planos de diseño	12
Chequeo de información del plano	12
Procedimientos de tronadura	13
Autorización de acceso.....	13
Cierre y señalización del lugar de trabajo.....	13
Primado y carguío de explosivos	13
Tronadura de adelanto	14
Amarre del disparo	15
Operación tapado de pozos	17
Tronadura	18
Control y evaluación de la tronadura.....	19
Fragmentación.....	19
Forma de la pila.....	19
Dilución	20
Daño	20
III. Explosivos	21
Funcionamiento de los explosivos	21
Calores producidos por diferentes compuestos químicos	22
Familias de explosivos	24
Explosivos mecánicos.....	24

Índice temático

Explosivos químicos	24
Explosivos nucleares	24
Altos explosivos y agentes de tronadura	24
Suspensiones	24
Dinamitas	24
Emulsion envasada.....	25
Nitrocarbonatos	25
Propiedades de los explosivos	26
Selección de un explosivo según características ambientales.....	26
Selección de un explosivo según características de desempeño.....	30
IV. Carguío y transporte	31
Sistemas de carguío y transporte	31
El carguío y sus funciones	32
Procedimiento	32
El transporte y sus funciones	32
Procedimientos operacionales.....	33
Procedimientos de carguío en minería a rajo abierto	33
Procedimientos de transporte en minería a rajo abierto.....	35
Evaluación económica de sistemas de carguío y transporte	36
Distribución porcentual del costo en minas chilenas de cobre a cielo abierto	37
Aspectos por considerar en la evaluación económica	37

I. PERFORACIÓN

1. Perforación de rocas

¿QUÉ ES LA PERFORACIÓN?

En general, se puede considerar la perforación de rocas como una combinación de las siguientes acciones:

- **Percusión:** corresponde a los impactos producidos por los golpes del pistón, los que a su vez originan ondas de choque que se transmiten a la broca a través del varillaje.
- **Rotación:** con el movimiento de rotación se hace girar la broca para que los impactos se produzcan sobre la roca en distintas posiciones.
- **Empuje:** corresponde a la fuerza necesaria para mantener en contacto la broca con la roca.
- **Barrido:** fluido de barrido que permite extraer el detrito del fondo de la perforación.

El proceso de perforación requiere de una fuente de energía, y de acuerdo con el tipo de energía que se utilice, se definen diferentes métodos de perforación de rocas. Por ejemplo, mecánicos, térmicos, hidráulicos, etcétera.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS

DUREZA

Oposición de una capa superficial a la penetración de otro cuerpo más duro. La dureza de una roca depende de la composición de los granos minerales constituyentes, de la porosidad de la roca, del grado de humedad, etcétera.

RESISTENCIA

La resistencia mecánica de una roca es la propiedad de oponerse a su destrucción frente a una carga exterior, estática o dinámica. Las rocas oponen una resistencia máxima a la compresión, y comúnmente la resistencia a la tracción no pasa del 10% al 15% de la resistencia a la compresión.

La resistencia de las rocas depende fundamentalmente de su composición mineralógica. Entre los minerales integrantes se destaca la presencia del cuarzo, que es el más sólido de los minerales. Las rocas con presencia de cuarzo presentan una resistencia a la compresión que supera los 500 MPa, mientras que la calcita tiene una resistencia a la compresión de 10 a 20 MPa. En general, y por este motivo, cuando existe una mayor presencia de cuarzo en una roca la resistencia a la compresión y tracción aumenta.

ELASTICIDAD

La mayoría de los minerales constituyentes de las rocas tienen un comportamiento elástico-frágil. Esta característica pasa por diferentes estados, hasta llegar a la destrucción cuando se supera el límite de resistencia, llamado límite de elasticidad.

PLASTICIDAD

Cuando en las rocas se supera el límite de la elasticidad, comienza la deformación plástica (es decir, la roca se deforma, pero no vuelve a su estado original). La plasticidad depende de la composición mineral de las rocas, y disminuye con el aumento del contenido de cuarzo, feldespato y otros minerales duros.

ABRACIDAD

Es la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante el proceso de rozamiento. Los factores que elevan la capacidad abrasiva de las rocas son:

La dureza de los granos constituyentes de las rocas. Por ejemplo, las rocas que contienen granos de cuarzo son sumamente abrasivas.

La forma de los granos. Los más angulosos son más abrasivos que los redondeados.

El tamaño de los granos.

La porosidad de la roca, que da lugar a superficies de contacto rugoso con concentraciones de tensiones locales.

TEXTURA

La textura de una roca se refiere a la estructura de los granos minerales constituyentes de ésta. Se manifiesta a través del tamaño de los granos, de la forma, de la porosidad, etcétera.

ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

Las propiedades estructurales de los macizos rocosos, como diaclasas y fallas con su rumbo y manteo, pliegues y otras, tienen una influencia directa en el rendimiento de los equipos de carguío, ya que pueden favorecer la fragmentación por fracturamiento preexistente y aumentar con ello el acondicionamiento para la carga.



2. Planos de perforación

Los planos de perforación son la guía para que el operador a cargo de la faena pueda realizar la tarea de perforación en forma correcta y segura. Para ello es necesario considerar aspectos de la confección de los planos o croquis y de la lectura e interpretación de los mismos.

CONFECCIÓN DE PLANOS Y CROQUIS

En la actualidad, la confección de planos de perforación es realizada en forma automática por los softwares de planificación minera (Vulcan, Datamine) o de tronadura (QED, Sabrex). La determinación de las coordenadas de cada perforación es definida por los sistemas de posicionamiento satelital (GPS), los cuales muestran la posición de cada una en forma remota, de manera que no necesiten los planos para identificarlas.

No obstante, para la confección de planos se necesita información, que generalmente es proporcionada por el departamento de topografía, lugar donde se lleva el control diario de todas las zonas existentes en la faena minera. Además, el personal de este departamento es responsable de identificar con señales (monos) las perforaciones en terreno y compartir esta información con los encargados de la explotación minera, como son los departamentos de geología, de operaciones mineras y de planificación de la mina.

LECTURA E INTERPRETACIÓN DE PLANOS

Para la interpretación y la lectura de los planos es necesario que éstos contengan la siguiente información:

- Identificación (numérica u otra) de cada perforación.
- Identificación de la zona por perforar (mineral, estéril, rampa).
- Identificación de zonas de la mina, como crestas, patas, rampas u otras instalaciones.
- Malla de perforación (burden, espaciamiento).
- Largo y diámetro de perforación.
- Coordenadas Norte y Este.
- Identificación de la máquina que realizará la perforación (Ej: DMM-2).
- Fecha del plano y de la tronadura y cantidad de perforaciones

INTERPRETACIÓN DE PROGRAMAS

Toda planificación de la operación perforación debe estar alineada con las operaciones involucradas en los programas de extracción, es decir, tronadura, carguío, transporte, procesamiento de minerales y disposición de materiales para el estéril. Por lo tanto, es necesario considerar un conjunto de parámetros para los programas de perforación; en particular:

DÍAS DE TRABAJO AL AÑO	DISPONIBILIDAD FÍSICA (%)
Utilización operativa (%)	Rendimiento de las perforadoras (m/año)
Metros perforados por año (m/año)	

Esta información, en conjunto con la cantidad de equipos (perforadoras) y los costos unitarios involucrados, permite cumplir los programas de producción en forma segura y eficiente.

3. Perforación en minería subterránea

Para confeccionar o interpretar un plano de perforación que se utilizará para realizar labores subterráneas de avance de galerías es necesario conocer la distribución de las perforaciones. Cabe destacar que los tiros perimetrales (coronas y cajas) deben tener un ángulo hacia afuera, evitando que la sección del túnel cambie a medida que se avanza. Este ángulo recibe el nombre de "ángulo de ajuste" y se define como:

$$\text{Ángulo de ajuste} = 0,1 \text{ m} + L \cdot \tan^2 \theta \text{ ---> donde L es el largo de perforación}$$

Es importante considerar este ajuste cuando la máquina perfora sobre los pozos marcados.

RAINURA

El diseño de la rainura define con relativa importancia el éxito o fracaso del disparo, ya que en este caso no existe una cara libre, a diferencia de las tronaduras a cielo abierto.

Es usual que uno o más tiros en la rainura queden vacíos, actuando como cara de alivio hacia la cual los otros pozos deberían canalizar la energía.

4. Perforación en minería a rajo abierto

En general, en el caso de la minería a rajo abierto (o a cielo abierto) es muy importante identificar la pata y cresta de los bancos que serán perforados con diferentes símbolos o colores. Además, es necesario señalar en el plano los posibles accesos de los equipos y las fuentes de alimentación en el caso de perforadoras que utilizan energía eléctrica.

5. Operación y parámetros de perforación

En el procedimiento de perforación es necesario considerar diferentes parámetros con el fin de realizar una operación óptima. Las variables internas que intervienen en la perforación son:

EMPUJE

El empuje aplicado sobre la broca o bit debe ser suficiente para sobrepasar la resistencia a la compresión que opone la roca, pero no debe ser excesivo, puesto que puede causar fallas en todo el sistema de perforación, como el "atascamiento" de las barras.

En el caso de la perforación de rocas duras, el empuje elevado sobre la roca puede producir roturas en los insertos (botones) y disminuir la vida útil de los cojinetes (triconos), pero no necesariamente aumentará la longitud de perforación.

REVOLUCIONES POR MINUTO

La velocidad con que se va penetrando la roca (velocidad de penetración) es directamente proporcional a las revoluciones por minuto, en una proporción algo menor que la unidad, hasta el límite impuesto por la evacuación de detritos.

En el caso de la perforación rotativa con triconos, las velocidades de rotación varían desde 60 a 120 RPM, y el límite de velocidad de rotación queda determinado por el desgaste en los cojinetes, el que también tiene relación con el empuje y evacuación de detritos (barrido).

VELOCIDAD DE PENETRACIÓN

La velocidad con que se penetra la roca (perforación) depende de muchos factores externos (por ejemplo factores geológicos), tales como las propiedades físicas de la roca y la resistencia a la compresión. Si bien es difícil determinar la velocidad de penetración, ésta define un conjunto de parámetros de rendimiento de la operación minera. Existen dos procedimientos para determinar la velocidad de penetración:

Realizar ensayos reales con rocas representativas y perforarlas. En función de los resultados obtenidos, se determina un conjunto de parámetros de diseño, como el tipo de bit o tricono recomendado, el empuje requerido y la duración de los aceros de perforación.

Calcular la velocidad de penetración a partir de la resistencia a la compresión de la roca, utilizando fórmulas empíricas que relacionan el avance del bit o tricono por cada revolución.

Una vez determinada la velocidad de penetración (m/h), es posible calcular la velocidad media de perforación, en cuyo cálculo se incluyen los tiempos que el equipo no está trabajando y la disponibilidad mecánica.

DESGASTE DE ELEMENTOS DE PERFORACIÓN

En todo procedimiento de perforación es muy relevante llevar al máximo la vida útil de todos los componentes. Considerando que ella está influida tanto por agentes externos como por internos, es importante considerar las siguientes recomendaciones:

Desgaste uniforme de las barras de perforación: Esto se consigue alternando sistemáticamente las posiciones de las barras en la columna, de modo que si en una perforación la barra A está en el primer lugar (al lado del bit), en la siguiente perforación tendría que ser la última, y así sucesivamente. De esta forma, cada barra que es sometida a un esfuerzo fuerte y prolongado "descansará" en la siguiente perforación.

Incorporación de barras extras: Si la profundidad de los tiros son de "n" barras, se debe tener "n+1" o "n+2" barras. Con esto se consigue prolongar la vida útil del conjunto de barras más allá de la fatiga o fractura prematura de uno de sus elementos. Esto es muy importante, ya que no es recomendable mezclar componentes nuevos con los antiguos en la operación.

Uso de caballetes o bastidores para la ubicación de las barras: Situados cerca de la perforadora, permiten mantener las barras en posiciones determinadas de acuerdo con el orden en que se van empleando, haciendo posible además una correcta mantención.

Con el propósito de poder registrar el desempeño de los componentes y determinar posibles fallas, es conveniente llevar el control del metraje y del rendimiento de los componentes.

Considerando las recomendaciones anteriores, es importante cuidar los siguientes aspectos, especialmente cuando se trata de una perforación manual:

Buen apriete de las conexiones: Todas las conexiones deben estar siempre bien apretadas, puesto que con esto se evitan desplazamientos que originan desgastes prematuros y dificultades en la transmisión de energía.

Buena alineación de la perforadora respecto de la perforación (el tiro): Esta medida evita el desgaste por roce contra las paredes, las flexiones innecesarias que disminuyen la vida útil de las barras, la desviación en las perforaciones, etcétera.

Cuidado en la empatadura: se debe iniciar la perforación con poca presión y avance. Una vez efectuada la empatadura, ejercer el empuje necesario para perforar.

Calentamientos por baja presión de avance: es recomendable evitar calentamientos por baja presión de avance y las flexiones por exceso de avance.

Barrido continuo: el barrido debe ser continuo e intenso en caso de presencia de rocas fracturadas, las que pueden "atascar" las barras.

Uso de herramientas correctas: se requiere el uso de las herramientas adecuadas para los desacoplamiento, evitando daños innecesarios, como el "hincamiento" de los dientes de una llave inglesa, lo que puede fracturar la barra.

Almacenamiento de barras: es imprescindible guardar las barras en lugares adecuados, de manera de evitar la corrosión, que acorta la vida útil.

6. Fluidos de perforación

El objetivo principal que se persigue al utilizar fluidos de perforación es poder evacuar desde el fondo de la perforación los detritos o el material molido producto del vencimiento de la resistencia de la roca.

Además, considerando las temperaturas a que se exponen los aceros cuando se realiza la perforación, los fluidos (especialmente el agua) cumplen la misión de enfriar (bajar la temperatura), aumentando de esta forma la vida útil del acero.

TIPOS DE FLUIDOS

EL FLUIDO BARREDOR

Consiste principalmente en agua o un flujo de aire, según sean las circunstancias en que se esté perforando y la disponibilidad de agua en la faena.

La extracción de detritos requiere de una energía mínima suministrada por la velocidad adquirida por el medio barredor. La experiencia indica que eso se consigue con flujos de agua de 0,4 a 1 m/s y de 15 a 30 m/s en el caso de usarse aire. Ambos fluidos (agua o aire) son eficientes en la extracción de los detritos; sin embargo, el uso de agua tiende a disminuir la velocidad de penetración hasta en 10% en algunas ocasiones.

La situación más adversa es aquella en que el espacio anular tiene su mayor magnitud. En este caso, la velocidad óptima del flujo barredor depende de una serie de factores, como la densidad de la roca y el tamaño de los detritos.

EL AGUA COMO FLUIDO

Presenta ventajas y desventajas, las que se muestran a continuación:

Ventajas

Excelente medio para controlar el polvo, lo que adquiere especial relevancia en lugares confinados (galerías).

Excelente refrigerante de barras y brocas, debido a su gran capacidad de eliminar el calor por convección, impidiendo los sobrecalentamientos, que pueden llegar a afectar las cualidades del acero y la vida útil de éstos.

Desventajas

Congelamiento: con temperaturas bajo 0 °C, requiere la utilización de fluidos anticongelantes.

Disponibilidad de agua, lo que se puede traducir en altos costos por el transporte y habilitación en lugares donde no existe el recurso en forma permanente.

EL AIRE COMO FLUIDO

El aire como fluido presenta ventajas y desventajas, las que se muestran a continuación:

Ventajas	Desventajas
Sin restricciones de temperatura ambiental.	Mayor velocidad de penetración.
Sin costo de transporte, requiriéndose sólo de equipos que lo impulsen a través de conductos de pequeño diámetro hacia el fondo de la perforación.	Su uso se restringe a lugares abiertos debido a la alta contaminación producto del elevado desprendimiento de polvo al interior de las perforaciones, lo que se hace extremadamente crítico en presencia de rocas con contenido de sílice.

AIRE COMPRIMIDO

Es el fluido que se ha venido utilizando como fuente de energía en la perforación tanto en equipos manuales como mecanizados. Además, el aire comprimido se usa frecuentemente como elemento de barrido de los detritos, sobre todo en minería a cielo abierto. El uso de aire comprimido requiere de la selección de **compresores**, que son las unidades que lo generan. La selección de un compresor tiene especial relevancia, ya que esta decisión repercute considerablemente en el costo del metro perforado y es relevante en el precio de adquisición de una perforadora, con un porcentaje de entre 15% a 50% del costo total de adquisición.

En la selección de los compresores, además de considerar el modelo o tipo, existen dos características básicas de atender, que son el caudal de aire suministrado y la presión de salida de aire.

TIPOS DE COMPRESORES

En la actualidad existen dos tipos de compresores: dinámicos y de desplazamiento.

En los compresores dinámicos, el aumento de presión de aire se consigue mediante la aceleración del aire con un elemento de rotación y la acción posterior de un difusor. A este grupo pertenecen los compresores centrífugos y axiales, que son los más adecuados para grandes caudales y bajas presiones.

En los compresores de desplazamiento utilizados por los equipos de perforación, la elevación de presión de aire se consigue confinando el gas en un espacio cerrado, cuyo volumen se reduce con el movimiento de uno o varios elementos.

Los compresores más empleados en faenas de perforación son los de pistón cuando éstas tienen un carácter de estacionario, y los de tornillo y paletas cuando se trata de compresores portátiles, tanto si están montados sobre la unidad de perforación o remolcados por ésta.

II. TRONADURA

1. Diseño de la tronadura

El diseño del proceso de tronadura debe considerar ciertos aspectos fundamentales que permitan una correcta operación y el cumplimiento de los programas de extracción de corto plazo de manera segura, oportuna y eficiente.

Para la minería a gran escala, tanto la operación de carguío de explosivos como la administración de polvorines son realizadas por empresas externas, lo que obliga a contar con los canales de comunicación adecuados.

PLANOS DE DISEÑO

Todo diseño de tronadura debe ser entregado en un plano, en el que se deben indicar a lo menos los siguientes elementos:

- Sector por tronar, identificando el número de la tronadura, el banco, el tipo de material (si se trata de mineral o estéril) y el tipo de roca, indicando sus propiedades básicas (densidad, presencia de agua, etc.).
- Tipos de explosivos que se deben utilizar y tiempos de retardo por pozo.
- Secuencia de encendido (tiempos de retardo y dirección de amarre).
- Identificación de todos los pozos por cargar, de acuerdo con códigos establecidos o numeración correlativa.
- Día y hora de la tronadura.
- Diámetro de perforación.
- Nombre del jefe de tronadura.

CHEQUEO DE INFORMACIÓN DEL PLANO

Toda esta información debe ser verificada y chequeada en terreno, ya que es posible que ocurran situaciones como las que se señalan a continuación.

Puede ocurrir que:

- El número de pozos señalados en el plano sea menor que el número de pozos perforados en terreno.
- La profundidad de los pozos sea diferente a la profundidad planificada.
- La disposición geométrica en el terreno sea diferente a la del plano.
- Otros aspectos relacionados con la seguridad en la operación que no sean advertidos.

En tal sentido, cualquier anomalía debe ser siempre informada al supervisor o jefe de tronadura de la mina.

2. Procedimientos de tronadura

En el uso de productos explosivos y accesorios para realizar labores de tronadura siempre se debe velar por cumplir con todas las reglamentaciones vigentes de seguridad y procedimientos operacionales.

Para las tronaduras se distinguen las siguientes etapas:

AUTORIZACIÓN DE ACCESO

Al ingresar a una malla de perforación para proceder al carguío de explosivos se deberá contar siempre con la autorización de algún supervisor de la mina. Esta autorización debe ser comunicada personalmente o por radio. Es importante consultar siempre por riesgos adicionales, como las condiciones del entorno (clima) o cambios en las operaciones mineras, con el fin de asegurar el correcto trabajo.

CIERRE Y SEÑALIZACIÓN DEL LUGAR DE TRABAJO

La primera acción consiste en verificar el área, asegurándose de que no exista ningún impedimento para la carga normal de explosivos. Delimitar siempre el área con conos y letreros. Además, es importante impedir el acceso a toda persona ajena a la operación de carga de explosivos. El personal adjunto debe solicitar autorización; por ejemplo, muestreros, topógrafos, etc.

PRIMADO Y CARGUÍO DE EXPLOSIVOS

El primado consiste en introducir uno o más detonadores en un explosivo de alto poder. Para primar es necesario contar con los siguientes componentes:

- **Booster:** Explosivo de alto poder detonante, que posee la energía necesaria para iniciar toda la columna explosiva.
- **Sistema de iniciación no eléctrico:** Está compuesto por un detonador de un tiempo predeterminado y un tubo de un largo suficiente para conectar las diferentes líneas de iniciación.

Antes de comenzar

Verificación del área: Antes de comenzar la operación carguío de explosivos se debe inspeccionar el área para verificar que todo esté en regla. En caso contrario, por ningún motivo se descargarán los explosivos y accesorios en el área y se comunicará de inmediato la condición anómala al supervisor de tronadura. Una vez realizada la verificación se darán a conocer al personal involucrado en la operación todas las especificaciones pertinentes y el sector en que se puede primar y cargar, ya que puede tratarse de una tronadura de adelanto.

Profundidad de los pozos: Antes de primar se deberá chequear la profundidad de todos los pozos del disparo, dejando en cada uno de ellos una tarjeta de identificación en que se indique la profundidad y cantidad de explosivo del pozo. De existir pozos cortos (profundidad menor a la de diseño), se identificarán con un "mono" (pila de piedras, una sobre otra) y se comunicará al supervisor o encargado del carguío de explosivos, quien a su vez comunicará la situación al supervisor de la mina. Si es necesario perforar un pozo lateral o reparar un pozo corto, se dejará el espacio suficiente y debidamente señalado para el ingreso de una perforadora al sector, respetando lo indicado en los procedimientos internos de la mina.

Distribución de accesorios: Confirmadas las medidas de los pozos, se procederá al reparto de los accesorios y boosters, teniendo presente que ningún accesorio de tronadura podrá ser tirado al suelo. Éstos serán depositados con mucha precaución en el piso, a un costado de cada pozo.

Primado: El primado de los tiros consiste en introducir el o los detonadores al interior de un explosivo, lo que tiene lugar una vez realizadas las verificaciones pertinentes. Teniendo especial cuidado en que los detonadores queden dentro del booster, se bajará la prima por el centro del pozo, evitando los roces, y ubicándola a la profundidad programada.

Los tubos no eléctricos deberán quedar amarrados en la parte central de un coligüe que será ubicado en la boca del pozo. Si existe necesidad de dejar accesorios en el piso, éstos deberán quedar en un lugar debidamente señalado y protegido del tránsito de vehículos que se desplazan en el disparo.

Carguío: El supervisor dispondrá la ubicación de los camiones fábrica (camiones que transportan las materias primas que se mezclan en las proporciones definidas para cargarlas en la misma perforación) con el fin de iniciar el carguío del explosivo en la perforación e indicará claramente la cantidad de explosivo por tiro, contemplando las indicaciones señaladas en el plano de amarre y la dirección de carguío.

Una vez que los pozos han sido cargados, éstos deberán ser tapados adecuadamente para asegurar el debido confinamiento de la carga. Para tal efecto, se empleará el mismo detritus (material alrededor de cada pozo producto de la perforación), evitando la caída de piedras que en su trayectoria pudieran cortar el tubo nonel. Para el tapado de los tiros se emplearán los equipos tapahoyos, que introducen el detritus en la perforación.

Terminado el carguío, se solicitará al jefe de tronadura que dé la autorización para amarrar el disparo y los pasos por seguir.

TRONADURA DE ADELANTO

Una tronadura de adelanto es un proceso que se realiza anticipadamente, con la intención, por lo general, de tronar al otro día. En caso de una tronadura de adelanto se debe considerar lo siguiente:

No se primará la corrida de pozos que da hacia el material tronado; además, se dejará una corrida de pozos en todo el contorno del área de carguío, exceptuando la cara libre (que da hacia el frente de carguío), que puede ser primada y cargada previa autorización del supervisor de tronadura de la mina.

Si se trata de un disparo durante la noche, se dejarán espacios expeditos para el tránsito de personal y de vehículos de la mina que requieren atender equipos que deban permanecer en el área por necesidad operacional, especialmente las perforadoras, evitando así que estos vehículos ingresen al área cargada durante la noche.

De tratarse de un disparo normal que se va a tronar durante el día, se deberá dejar sin primar (o sin preparar los cebos) la corrida de pozos que da al material tronado, situación que puede ser autorizada por el supervisor de la mina que esté a cargo,

dependiendo de la posición de la pala que está atacando el frente de carguío. La asignación de los retardos o el tiempo que demora en detonar cada pozo será entregada al personal por el supervisor o capataz que se encuentre en el disparo. Cualquier duda respecto de la ubicación deberá ser consultada a ellos.

Si existe explosivo fuera de los pozos o en el lugar de resguardo, no se deberá dejar nunca un área sin personal; será responsabilidad de todo el personal velar porque esta medida se cumpla siempre.

El operador deberá chequear continuamente la densidad del explosivo.

El supervisor o capataz chequeará los tacos mediante huincha, según el programa de carguío de pozos.

AMARRE DEL DISPARO

El amarre de disparo consiste en realizar todas las conexiones, de acuerdo con una secuencia y tiempos de iniciación establecida en la etapa de diseño. El amarre de un disparo se realiza sólo cuando lo confirme el supervisor de tronadura que esté de turno; nunca podrá quedar amarrado un disparo de un día para otro (excepto en situaciones debidamente justificadas e informadas).

Se comenzará con el amarre dentro del área de disparo que se encuentra ya tapado (pozos cargados y tapados), por la cual no deben circular camiones fábrica y/o camionetas con accesorios.

Consideraciones del amarre del disparo

Si por fuerza mayor no se quema el disparo en el día, y ya se hubiese realizado la labor de amarre, se procederá a retirar todos los accesorios de la superficie, los que deberán ser eliminados posteriormente. En caso de existir recorte y de que éste hubiese quedado instalado, se dejará debidamente señalado, comunicando esta situación al supervisor de tronadura de la mina.

En caso de que un disparo haya sido amarrado para ser quemado a la hora programada y, por fuerza mayor, éste no se trona, se dejará una persona con un equipo de comunicación custodiando el área, siempre y cuando el disparo haya sido postergado para más tarde en el mismo día. Si no es así, se procederá como indica el párrafo anterior.

En el caso de usarse cordón detonante, éste se colocará en un portacarrete para su distribución. Se debe tirar de un extremo del cordón, mientras se mantiene fijo el carrete en el piso con el rollo de cordón en el otro extremo. Al llegar con el cordón al extremo opuesto del portacarrete, se dejará un chicote de unos 50 cm para amarrar la línea troncal.

Los conectores "J" (perros de amarre) se amarrarán desde este extremo hacia el carrete, de manera de no dejar líneas tensas que pudiesen cortarse durante la detonación. Al momento de amarrar el conector "J" al cordón detonante, se podrá retirar el coligüe que estaba en el pozo con los dos tubos detonadores. Esta operación no podrá efectuarse antes, ya que las líneas no eléctricas podrían ser arrastradas por una eventual caída del detritus en el pozo, al quedar éste con un bolsón de aire durante el tapado.

Es necesario tener la precaución de que el perro de amarre y el cordón queden en ángulo recto (90°), para así evitar cualquier corte provocado por la onda de detonación. De igual forma, el contacto "J" debe quedar unido al detritus o cutting cuando ya está amarrado el cordón detonante para no cortar los tubos no eléctricos que van al pozo y, además, mantener el ángulo recto entre el cordón y los tubos.

La misma precaución se deberá tomar al conectar la línea troncal, debiendo quedar siempre en ángulo recto.

Una vez que se encuentre amarrado todo el sistema de disparo se procederá a colocar los conectores de superficie. Éstos se ubicarán en la línea troncal, entre las filas, en el extremo opuesto a la entrada del fuego, siguiendo la línea troncal de manera de evitar cualquier corte durante la detonación.

Si en el disparo existiese recorte, se colocará un retardo de un segundo en el punto de iniciación del primario para atrasar la salida de este último respecto del recorte.

Se deberá tener precaución de dirigir el fulminante o detonador en el sentido correcto respecto de la entrada del fuego, iniciándose en el tubo y propagándose al detonador. Un error en este punto puede dejar sin detonar toda la tronadura primaria.

Si es una tronadura extensa (desquinche), se colocarán retardos de un segundo en la línea de fuego ubicadas cada siete corridas de producción, evitando que todo el recorte salga instantáneamente y que alguna piedra proyectada en altura pudiera cortar el cordón en superficie. Se colocará un segundo retardo paralelo a éstos, cumpliendo únicamente con el objetivo de asegurar la continuación de la detonación por si alguno falla.

Una vez instalados todos los retardos, se procederá a chequear el amarre de todo el disparo, responsabilidad que debe cumplir el capataz y/o supervisor que está a cargo del área.

De iniciarse el disparo en el centro del recorte, se debe tener la precaución de dirigir correctamente los fulminantes en el sentido de la detonación, de modo de evitar cualquier interrupción en la onda de detonación.

Cuando exista certeza de que no llegará personal ajeno a la tronadura, se procederá a retirar los letreros y conos que delimitan el área de carguío y de tronadura.

De no existir capacidad en la camioneta para guardar conos y letreros, se dejarán a resguardo de la tronadura, siendo retirados posteriormente.

Se procederá posteriormente a conectar el tubo de 500 a 1000 m, según sea el requerimiento del disparo, chequeando además que el tubo y fulminante no presenten ninguna anomalía.

En la conexión del fulminante con el cordón detonante se deberá utilizar una huincha adhesiva para asegurar el conector, de manera de evitar que éste se suelte al salir con la línea para ubicarse en un lugar protegido y seguro. Para efectuar esta medida se deberá tener la certeza de que no hay personal ajeno atrás del disparo y que toda el área fue despejada, información que deberá ser entregada por el supervisor de la mina a cargo del disparo.

Siempre se deberá disponer de al menos un tubo adicional de reemplazo de 500 o 1.000 m, de manera de cambiarlo inmediatamente en caso de una falla que no se hubiese detectado con anterioridad. Además, se deberá disponer de dos percutores de pie o chispero con sus respectivos fulminantes, que permitirán iniciar los tubos de 500 o 1.000 m.

OPERACIÓN TAPADO DE POZOS

El tapado de pozos es una operación que se realiza con el propósito de confinar las cargas explosivas para así poder aprovechar la liberación de energía en la fragmentación y desplazamiento de la roca. Es importante considerar los siguientes aspectos operacionales:

Como acción previa al tapado, se deberá soltar la amarra del tubo no eléctrico del coligüe y sujetarlo con la mano en forma segura; en lo posible, dar una o más vueltas con el tubo alrededor de la mano.

- El ayudante deberá tomar una posición estable y segura; es decir, de frente al equipo, de tal forma de mantener una visión total de la operación.
- El tapado de pozos adyacentes a un material tronado o a la cara libre es un caso especial, en el que el ataque al pozo deberá hacerse en forma diagonal, de manera que el operador no dé la espalda al borde del banco o a material poco estable. En este caso, durante el tapado, el ayudante deberá mantener las líneas descendentes del pozo en forma medianamente tensa. Además, deberá tener una completa comunicación con el operador para indicarle los pasos por seguir.
- El tapado de hoyos se realizará con el detritus de la perforación.
- El operador y ayudante seleccionarán dicho material, asegurándose de que no existan colpas de gran tamaño, las cuales podrían producir cortes en las líneas descendentes.
- Los pozos que presenten dificultad para el tapado con el equipo deberán ser tapados con palas de bronce.
- Si algún pozo no presenta detritus para ser tapado, el operador deberá trasladar material sobrante de pozos ya tapados, tomando la precaución de no pasar a llevar las líneas de dicho pozo.
- Al término del tapado de un pozo, se procederá a verificar el estado de las líneas, tensándolas suavemente para asegurarse de no haber producido cortes de alguna de ellas, que no hayan sido detectados durante el tapado.
- Realizada la acción del punto anterior, se amarrarán las líneas al coligüe, teniendo el cuidado de dejar los conectores "J" entre el amarre y el pozo. Esto último favorece la operación de amarre.

TRONADURA

- **Antes de la tronadura:** Siempre se debe realizar la revisión de amarre según el plano y verificar todas las conexiones. Esta operación es recomendable que sea realizada por las personas más experimentadas, que deben observar con atención y chequear todo el disparo.

Debido a los riesgos asociados durante el inicio del disparo, es necesario definir una zona o área de seguridad que determine la evacuación tanto de equipos como de personas. Además, todos los posibles accesos al área de tronadura deben restringirse mediante la disposición de personas y equipos necesarios (loros), los que estarán en contacto permanente vía radio con el jefe de turno de la mina y el encargado de tronadura.

- **Inicio de la tronadura:** Corresponde al inicio del disparo por parte de personal especializado. Es muy importante tener presente que toda esta información (día, hora y sector) debe ser conocida por todo personal que transite y trabaje en la mina; por lo tanto, se debe contar con letreros que indiquen esta información en los lugares de mayor tráfico.

Cuando se inicie el disparo, se debe considerar en forma muy especial lo siguiente:

- Chequear que la zona sea evacuada por todo el personal, y que los equipos se encuentren a distancias seguras de posibles proyecciones de roca.
 - Utilizar sistemas de aviso mediante sirenas y comunicaciones radiales.
 - Disparar desde lugares seguros, previamente definidos.
 - Realizar el disparo de acuerdo con la autorización del encargado de la tronadura.
-
- **Chequeo de la tronadura:** Es la etapa final de la tronadura, en la que se debe tener siempre presente:
 - Regresar al área de tronadura una vez disipados los humos y gases.
 - Revisar completamente la zona tronada en caso de cualquier anomalía (TQ), verificar y avisar.
 - En minas a rajo abierto nunca se debe realizar un disparo sin luz natural (la ley lo impide).
 - Avisar que la tronadura se realizó sin novedades y que se pueden iniciar las operaciones mineras.

3. Control y evaluación de la tronadura

Desde un punto de vista técnico, y en general, los aspectos que se evalúan en toda tronadura son la fragmentación del mineral, la forma de la pila, la dilución del mineral y el daño que se pueda haber producido.

Para evaluar es fundamental conocer el objetivo global que persigue la operación de tronadura realizada y sus prioridades, ya que en algunos casos será necesario privilegiar ciertos aspectos por sobre otros. Por ejemplo, cuando se efectúan tronaduras cercanas a las paredes del rajo, el daño es más relevante que la fragmentación reflejada en el tamaño y distribución del material mineralizado.

FRAGMENTACIÓN

Por definición, la tronadura consiste en el uso de explosivos para la reducción de tamaño, por lo que la fragmentación es uno de los principales objetivos en todo proceso de tronadura. El grado de éxito de la fragmentación tiene relación directa con la eficiencia y calidad de los procesos que se desarrollarán posteriormente, como son el carguío, transporte y procesamiento del mineral y el vaciado en botaderos del estéril o lastre.

Cuando se evalúa la fragmentación es importante determinar el tamaño promedio de la roca y su distribución (porcentaje de material fino y grueso). Esta evaluación debe hacerse tomando en consideración el equipo de carguío y transporte que será utilizado y, particularmente, las dimensiones del balde (carguío) y la tolva del camión (transporte). Con la evaluación de estas variables se determinará si será necesario utilizar una tronadura secundaria o de reducción para poder efectuar el transporte del material.

En síntesis, para evaluar la fragmentación se debe considerar lo siguiente:

- Equipos de carguío y transporte.
- Medición del tamaño medio del material fragmentado (en forma manual o con fotografías).
- Distribución de tamaños existente (cantidad de material fino y grueso). Para poder controlar la fragmentación, es necesario considerar:
- Aspectos del entorno, en especial las características de la roca, presencia de agua y tendencia estructural.
- Variables de diseño, en especial las relacionadas con el tipo de explosivo, diámetro de perforación, burden y tiempos entre pozos, tiempos entre filas y secuencia de encendido.

FORMA DE LA PILA

La fragmentación de las rocas mediante explosivos debe considerar adicionalmente un correcto desplazamiento del material para la formación de la pila que permita que el equipo de carguío pueda realizar su labor de manera segura y eficiente. Es por ello que una parte importante del control y de la evaluación de la tronadura sea determinar la forma que tiene la pila y su relación directa con el carguío y el transporte.

En síntesis, para evaluar la forma de pila se debe considerar:

- Equipos de carguío y transporte.
- Necesidad de pilas extendidas o más apretadas.
- Distribución de tamaños existente.

Para poder controlar la forma de pila es necesario considerar:

- El rendimiento de los equipos de carguío y transporte.
- Las variables de diseño, en especial las relacionadas con los tiempos de retardo, secuencia y caras libres existentes.
- La secuencia de encendido y tiempos de retardo.

DILUCIÓN

La dilución se refiere a la mezcla de mineral con material estéril. Esta característica tiene una incidencia importante en los resultados de recuperación metalúrgica y programas de producción de la mina. Desde el punto de vista de la tronadura, la dilución es relevante para los efectos de la planificación, disposición y ejecución de disparos que consideren diferentes materiales.

En síntesis, para evaluar la dilución se debe considerar:

- Capacidad de selección del equipo de carguío.
- Tipo de mena.
- Disposición en el disparo pre y post tronadura.

DAÑO

El daño se refiere a toda consecuencia no deseada causada por efecto de la fragmentación de rocas. En particular, se refiere a alteraciones tanto en la infraestructura (equipos, oficinas) como en taludes, bermas, caminos, rampas e incluso alteraciones graves en el medio ambiente, como es la excesiva generación de polvos y gases.

Para evaluar el daño de la tronadura se deberán realizar:

- Inspecciones visuales a elementos que no se deseen alterar.
- Cuantificaciones del daño a través de criterios visuales y/o numéricos.

Para controlar el daño posible de una tronadura es necesario considerar la aplicación de técnicas de tronadura controlada, en especial precorte y filas amortiguadas, así como el uso de mayores distancias de despeje de equipos y máquinas y la revisión de variables de diseño de la tronadura, en especial el burden y tipo de explosivo.

III. EXPLOSIVOS

1. Funcionamiento de los explosivos

Los explosivos químicos son materiales que tienen reacciones químicas muy rápidas en las que se liberan productos gaseosos y energía.

El poder del explosivo queda determinado por reacciones químicas muy rápidas que liberan productos gaseosos y energía. Los gases liberados en estas reacciones, en condiciones de alta presión, liberan fuerzas sobre las paredes de la zona de perforación, lo que provoca la fractura y el desplazamiento de la roca.

Los componentes de los explosivos que generan estos gases se llaman elementos básicos o ingredientes. Existen diferentes **tipos de ingredientes** con funciones específicas.

Los elementos básicos o ingredientes que producen trabajo directamente en las tronaduras son aquellos que al reaccionar generan gases tales como el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno.

Para obtener el máximo de energía en una reacción explosiva es necesario que los elementos se **oxiden** completamente y se formen los siguientes productos:

- El carbono (C) debe reaccionar para formar bióxido de carbono (CO₂).
- El hidrógeno (H) debe reaccionar para formar agua (H₂O).
- El nitrógeno, sólido o líquido (N), debe reaccionar para formar nitrógeno gaseoso (NO₂).

La energía que se libera en una reacción se mide en función de las calorías que se generan a partir de la reacción del compuesto químico.



CALORES PRODUCIDOS POR DIFERENTES COMPUESTOS QUÍMICOS

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Qp o Qr (kcal/mol)
Diésel	CH ₂	14,0	-7
Nitrometano	CH ₃ O ₂ N	61,0	- 21,3
Nitroglicerina	C ₃ H ₅ O ₉ N ₃	22,1	82,7
PETN	C ₅ H ₈ O ₁₂ N ₄	316,1	-123,0
TNT	C ₇ H ₅ O ₆ N ₃	227,1	-13,0
Monóxido de carbono	CO	28,0	-26,4
Bióxido de carbono	CO ₂	44,0	-94,1
Agua	H ₂ O	18,0	-57,8
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	80,1	-87,3
Aluminio	Al	27,0	0,0
Carbono	C	12,0	0,0
Nitrógeno	N	14,0	0,0
Monóxido de nitrógeno	NO	30,0	+ 21,6
Bióxido de nitrógeno	NO ₂	46,0	+ 8,1

El signo (-) indica una reacción exotérmica o liberación de energía

El signo (+) indica que es una reacción endérgica o que absorbe energía del ambiente o requiere que se entregue energía para que la reacción tenga lugar.

Es importante destacar que los compuestos químicos utilizados en la fabricación de explosivos son aquellos que generan reacciones exotérmicas, es decir, liberan energía cuando reaccionan.

Si sólo ocurren las reacciones ideales de los componentes de un explosivo (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), se utilizarán los átomos de oxígeno que sean necesarios, es decir, no sobra ni falta ningún átomo de oxígeno en la reacción. Así, la temperatura generada en una tronadura es mayor si al combinarse el carbono con el oxígeno se genera bióxido de carbono que si se genera monóxido de carbono, pues el bióxido es la forma en que el explosivo tiene balance de oxígeno y produce la máxima cantidad de energía. Cabe destacar que el hecho de balancear oxígeno significa que todo el oxígeno presente en los productos se consume y, por consecuencia, libera la mayor cantidad de energía.

Ejemplo:

En el siguiente ejemplo veremos el caso de una mezcla de ingredientes explosivos cuya reacción da como resultado diferentes balances de oxígeno. Tomemos un explosivo con dos ingredientes: **nitrato de amonio (NH₄NO₃)** y **diésel (CH₂)**.

BALANCE DE O₂ NEGATIVO

Si agregamos diésel en exceso a la mezcla, la reacción explosiva tendrá balance de oxígeno negativo. Esto significa que faltarán moléculas de oxígeno para combinarse totalmente con el carbono y el hidrógeno y formar los productos finales deseados, que para el caso del Anfo serían: **3N₂ + 7H₂O + CO₂**

En cambio, quedará carbono libre que se liberará en forma de monóxido de carbono.

BALANCE DE O₂ POSITIVO

Si agregamos poco combustible o diésel a la mezcla, habrá oxígeno en exceso, el que puede reaccionar con el carbono y el hidrógeno. A esto se le llama reacción con balance de oxígeno positivo. En este caso, el nitrógeno reacciona formando óxidos de nitrógeno, lo que reduce la energía de la reacción.

BALANCE DE O₂ EN EQUILIBRIO

Para el caso de balance de oxígeno, veamos la reacción ideal del compuesto de nitrato de amonio y petróleo diésel (ANFO), que es el explosivo de mayor uso en minería. Sus características nos permiten entender la reacción química entre elementos oxidantes (NH₄NO₃) y combustibles (CH₂).

Utilizando conocimientos básicos de balance de ecuaciones y la tabla de calores de formación, podemos hacer lo siguiente:

Ecuación balanceada:



Calor de formación de reactantes:

$$Q_r = 3 \times (-87,3 \text{ kcal}) + (-7 \text{ kcal}) = -268,9 \text{ kcal}$$

Calor de formación de productos

$$Q_p = (-94,1) + 7 \times (-57,8 \text{ kcal}) + 3 \times (0 \text{ kcal}) = -498,7 \text{ kcal}$$

Calor de explosión

$$Q_e = Q_p - Q_r = -498,7 \text{ kcal} - (-268,9 \text{ kcal}) = -229,8 \text{ kcal}$$

Peso Molecular del ANFO

$$PM = 3 \text{ mol} \times (80,1 \text{ g/mol}) + 1 \text{ mol} + (14 \text{ g/mol}) = 254,3 \text{ g}$$

Energía liberada por kilo de ANFO

$$\frac{Q_e}{PM} = \left(\frac{-229,8 \text{ kcal}}{254,3 \text{ g}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) = -907,3 \text{ kcal/kg}$$

En síntesis, el ANFO libera 907,3 kcal de energía por kilo de explosivo. Con esta energía liberada es posible cumplir los objetivos de tronadura, es decir, poder fragmentar la roca.

2. Familias de explosivos

Los productos explosivos químicos que se utilizan en tronadura se dividen en tres categorías. Tal como se ve en el esquema, hay tres grandes tipos de explosivos: mecánicos, químicos y nucleares.

EXPLOSIVOS MECÁNICOS

Los explosivos mecánicos son los que utilizan principalmente la energía mecánica para fragmentar la roca. Ya no se usan en minería, y sus funciones se restringen a labores puntuales y/o obras civiles con requerimientos de explosivos menores.

EXPLOSIVOS QUÍMICOS

En minería se usan los explosivos químicos, que son la mezcla de elementos combustibles y oxidantes en que generalmente el oxígeno es el elemento oxidante.

EXPLOSIVOS NUCLEARES

Los explosivos nucleares utilizan la energía nuclear para fragmentar la roca. Dadas las características propias de los elementos nucleares que se emplean como fuente de energía y los riesgos asociados a la implementación de este tipo de tecnología, tanto para las personas como para el medio ambiente, actualmente no se usan en la minería.

ALTOS EXPLOSIVOS Y AGENTES DE TRONADURA

De acuerdo con el tipo de energía que se libera, los explosivos químicos se clasifican en altos explosivos y agentes de tronadura. Ambos liberan energía de choque y energía de gas.

Los altos explosivos detonan por medio de un detonador, a diferencia de los agentes de tronadura, que necesitan otro producto explosivo -como la dinamita- para detonar confiablemente.

En el caso de los agentes de tronadura, la energía de gas se libera al final de la reacción, y en mayor proporción cuando ésta tiene lugar bajo condiciones de confinamiento. Esto significa que se alcanza a proporciones cercanas al 80% o 90% de la energía que se utiliza para fragmentar y mover la roca.

SUSPENSIONES

Un alto explosivo tipo suspensión es una mezcla de nitratos de amonio, sensibilizadores, combustibles, aluminio y cantidades variables de agua. A las emulsiones, de cierta manera, también se les relaciona con esta familia de explosivos, pero, por definición, corresponden a un sistema que contiene al menos dos fases líquidas inmiscibles entre sí, una de las cuales está dispersa en la otra en forma de pequeñas gotas o celdillas.

DINAMITAS

Las dinamitas son altos explosivos que tienen como componente principal la nitroglicerina. Estos productos tienen una densidad de 1,6 g/cc y pueden desarrollar velocidades de detonación de 7.000 m/s. Al ser la nitroglicerina altamente sensible al choque, la fricción y el calor, es necesario mezclarla con elementos inertes para así poder manipularlas.

Las dinamitas, a su vez, se dividen en dos grupos: las dinamitas granuladas, que utilizan la nitroglicerina como base explosiva, y las dinamitas gelatinas, que son una mezcla de nitroglicerina y nitrocelulosa, lo que les permite tener una alta resistencia al agua.

EMULSION ENVASADA

El líquido que se encuentra en forma de gotas se reconoce como fase dispersa y el que las rodea se denomina fase continua, y su tipo o constitución define el comportamiento y características de la emulsión.

Debido a la in-miscibilidad de las fases, se requiere un agente que les confiera estabilidad suficiente, a fin de mantener sus propiedades en el tiempo. Este agente se conoce como "emulsificante", y tiene como principal función reducir la tensión superficial entre las fases de emulsión y promover la formación de una capa protectora entre éstas.

NITROCARBONATOS

Los nitrocarbonatos se denominan también "agentes de tronadura secos". Son los explosivos más utilizados en minería, concentrando aproximadamente el 80% del uso a través del producto comercial denominado "ANFO", que está formado por 94% de nitrato de amonio y 6% de petróleo.

Estos productos explosivos tienen la ventaja de ser más seguros en su manipulación y uso, e incluso permiten que los componentes sean mezclados en los mismos lugares de trabajo. De esta forma se obtiene una mayor eficiencia, dada la automatización relacionada con el carguío de explosivos y los menores costos asociados. Esto es muy importante, ya que se han podido realizar tronaduras de gran envergadura, cumpliendo los programas de producción de la gran minería. En tal sentido, la incorporación de camiones fábrica con carguío automatizado de explosivos ha permitido cumplir estos objetivos.

La principal materia prima de estos productos explosivos es el nitrato de amonio, el que viene en forma de "prill" o perlas que tienen una dimensión de entre 1 a 3 mm de diámetro. Estas perlas o prills tienen una resistencia al agua y porosidad nula, lo que les permite unirse de mejor forma con el petróleo para formar el ANFO.

3. Propiedades de los explosivos

Es importante conocer las características físicas y químicas de los explosivos, porque sólo así es posible seleccionarlos para las operaciones mineras.

Actualmente, existe una amplia gama de explosivos disponible para diferentes usos. La selección de un explosivo para una tarea en particular se basa en dos criterios principales: las características del ambiente donde se desarrollará la tronadura y las características que permiten que el procedimiento se lleve a cabo en la forma esperada.

SELECCIÓN DE UN EXPLOSIVO SEGÚN CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

En la selección de un explosivo es importante considerar las características del ambiente, ya que lo fundamental es que éste funcione segura y confiablemente bajo las condiciones ambientales donde se va a usar. Los factores por considerar para seleccionar el explosivo adecuado son:

LA SENSIBILIDAD

Es la característica de un explosivo de propagar la reacción a todo lo largo de la carga. Conforme a la **sensibilidad** del explosivo se puede definir y controlar el diámetro mínimo para usos prácticos.

Una forma de determinar la sensibilidad es definiendo el "diámetro crítico" de un explosivo. Éste corresponde al diámetro mínimo en que un compuesto explosivo detona confiablemente. Puede variar bastante de un compuesto a otro y **depende del diámetro de perforación**.

La sensibilidad mide también la capacidad del explosivo para propagar la reacción de cartucho a cartucho, asumiendo que el diámetro es superior al diámetro crítico. Se puede expresar como la distancia máxima de separación (en centímetros) entre un cartucho cebado y uno sin cebar donde la transferencia de la detonación ocurrirá.

El diámetro de perforación definido para un proyecto específico determina el diámetro máximo de la carga de columna, el que debe ser mayor al diámetro crítico del explosivo por usar en ese pozo."

Por lo tanto, seleccionar con anticipación ciertos diámetros de perforación permite eliminar desde un comienzo algunos productos explosivos.

RESISTENCIA A LA TEMPERATURA

Las temperaturas extremas de almacenamiento pueden afectar el desempeño de los productos explosivos. A altas temperaturas de almacenamiento, es decir, a más de 32,2 °C, muchos compuestos se descomponen lentamente o cambian sus propiedades.

LA SENSIBILIDAD

La fórmula química del nitrato de amonio es NH_4NO_3 . En relación con su peso, aporta más volumen de gas en la detonación que cualquier otro explosivo. En estado puro, el nitrato de amonio (NA) es casi inerte y su composición por peso es de 60% de oxígeno, 33% de nitrógeno y 7% de hidrógeno. Al agregar el diesel, la reacción con balance de oxígeno ideal para el NA es:



Dos características hacen a este compuesto impredecible y peligroso. El nitrato de amonio es soluble en agua y si no tiene un recubrimiento repelente a ella, puede absorberla de la humedad ambiente y disolverse lentamente. Por esta razón, las pequeñas esferas o perlas tienen un recubrimiento protector de arena silícea pulverizada, que ofrece alguna protección contra el agua. La segunda y más importante característica es un fenómeno llamado ciclado, que es la habilidad de un material para cambiar la forma de sus cristales con las variaciones de la temperatura.

El nitrato de amonio tendrá una de las siguientes cinco formas de cristales, dependiendo de la temperatura:

Rango de temperatura (° C)	Tipo de cristales
Sobre 125	Isométricos
84,4 a 125	Tetraedrales
32,2 a 84,4	Ortorrómicos
-18 a 32,2	Pseudotetraedrales
Menor a -18	Tetraedrales

El fenómeno del ciclado puede afectar seriamente tanto el almacenamiento como el desempeño de cualquier explosivo que contenga nitrato de amonio. La mayoría de las dinamitas, tanto las a base de nitroglicerina como las permisibles, contienen algún porcentaje de nitrato de amonio, mientras que los agentes explosivos se componen casi en su totalidad de este compuesto.

Las temperaturas a las cuales ocurre el ciclado en condiciones normales son -18 °C y $32,2\text{ °C}$. Esto significa que los productos que se almacenan durante el invierno y por períodos largos durante el verano, sobre todo en áreas de clima extremo, sufrirán diferentes grados de ciclado. En el verano, en un polvorín con poca ventilación o en un silo de almacenamiento con exposición directa al sol, la temperatura de ciclado puede alcanzarse con facilidad. El efecto del ciclado en el nitrato de amonio cuando éste se encuentra aislado de la humedad ambiente es que las perlas se rompen en partículas cada vez más finas.

Las consecuencias por efecto del ciclado pueden ser mayores, ya que la calidad del producto (nitrato de amonio) se pierde por aglomeración de prills o poca

capacidad de absorber el petróleo, lo que implica que la reacción química no libera la cantidad de energía necesaria para el fracturamiento. Además, en estos casos lo más probable es que se generen gases no deseados, dado que la reacción química no es la correcta.

RESISTENCIA AL AGUA

Es fundamental conocer la resistencia al agua de un explosivo. Esta es la habilidad que éste tiene para soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño. Los productos explosivos tienen dos tipos de resistencia al agua:

Resistencia interna, que es dada por la composición misma del explosivo. Por ejemplo, algunas emulsiones pueden ser bombeadas directamente al pozo lleno de agua, desplazándola hacia arriba pero sin mezclarse con ella ni mostrar deterioro si se disparan en un tiempo razonable.

Resistencia externa, que es dada por el envoltorio o cartucho dentro del que se coloca el material. Por ejemplo, el ANFO no tiene resistencia al agua interna, pero al colocarlo dentro de una manga plástica, puede mantenerse seco y se desempeña satisfactoriamente. En este caso, es la manga la que le provee la resistencia al agua que viene del exterior.

Los fabricantes de explosivos pueden describir la resistencia al agua de los explosivos de dos formas: usando términos cualitativos como excelente, buena, regular o mala, y en casos en que las condiciones de agua son severas, de acuerdo con el tiempo de exposición a ella, usando números del 1 al 4.

De acuerdo con las descripciones cualitativas, si hay agua en las operaciones de tronadura, específicamente en las perforaciones, se puede seleccionar un explosivo catalogado como "regular", el que se debe disparar lo más pronto posible después de cargado.

Si el explosivo va a estar en contacto con el agua un tiempo considerable, por ejemplo 8 horas, se seleccionan explosivos catalogados como "bueno".

Si las condiciones de agua son severas y el tiempo de exposición es significativo (tiempos mayores a 8 horas), un responsable de tronaduras prudente debe seleccionar un explosivo con una excelente resistencia al agua. Los explosivos con mala resistencia al agua no deben usarse en pozos húmedos.

Este es el método más comúnmente utilizado en las hojas técnicas de los fabricantes.

Utilizando los rangos numéricos de la resistencia al agua se tienen las siguientes clases que indican la tolerancia del explosivo al agua:

Clase	Resistencia al deterioro (horas)	Ejemplo
1	72	Amongelatina
2	48	Emulsión envasada sensibilizada
3	24	Ortorrómicos
4	12	Pseudotetraedrales

En general, el precio de un explosivo está directamente relacionado con la resistencia al agua.

La habilidad para permanecer sin cambios ante presiones estáticas altas se conoce como tolerancia a la presión de agua. Algunos compuestos explosivos se densifican y desensibilizan con las presiones hidrostáticas que se dan en pozos muy profundos. Una combinación de otros factores como clima frío y cebos pequeños también contribuye al fracaso de una tronadura.

VAPORES

Los vapores de explosivos corresponden a gases liberados a la atmósfera como producto de la detonación.

Las clases de vapores de un explosivo se miden de acuerdo con la cantidad de gases tóxicos producidos en el proceso de detonación, dentro de los cuales los principales son el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno.

El color de estos vapores entrega información acerca de la tronadura. Por ejemplo, si el color de los vapores luego de una tronadura es café rojizo o amarillo, puede indicar que la detonación ha sido poco eficiente, posiblemente a causa del deterioro del explosivo por el agua. Esta situación se puede remediar si se utiliza un explosivo con mayor resistencia al agua o si se usa un empaque externo de mejores características.

Aunque la mayoría de los agentes explosivos están cercanos al balance de oxígeno, reduciendo al mínimo los vapores y optimizando la liberación de energía, siempre se generan vapores.

Problemas de vapores (humos rojos) que indican posible deterioro del explosivo. En las operaciones de superficie, especialmente en cortes muy profundos o zanjas, la producción de vapores y su retención pueden ser peligrosas para el personal asignado a este trabajo.

Algunas condiciones de tronadura pueden producir vapores tóxicos incluso cuando el explosivo esté balanceado de oxígeno. Estas pueden ser un insuficiente diámetro de la carga, inadecuada resistencia al agua, deficiente cebado (primado) y pérdida prematura del confinamiento.

El dióxido de carbono no es estrictamente un gas venenoso, pero su producción en grandes cantidades ha causado muchas muertes en tronaduras en áreas confinadas. El CO₂ detiene el funcionamiento de los músculos con movimiento involuntario del cuerpo, por ejemplo, el corazón y pulmones. Una concentración del 158% o más en volumen, puede provocar muerte por asfixia.

Como el dióxido de carbono tiene densidad de 1,53 g/cc, tiende a estancarse en los sitios más bajos de la excavación o donde haya poco movimiento. Una solución práctica al problema es usar aire comprimido para diluir cualquier alta concentración posible.

SELECCIÓN DE UN EXPLOSIVO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO

Para seleccionar un explosivo, éste debe ser el que resulte más eficiente y económico para producir los resultados finales deseados. Para ello se deben considerar los siguientes factores:

FLAMABILIDAD

La flamabilidad es un aspecto importante desde el punto de vista del almacenamiento, transporte y uso, ya que hay materiales que explotan debido sólo a una chispa, mientras otros pueden ser quemados sin llegar a explotar.

Por esta razón, hay explosivos que siendo muy económicos, han perdido mercado. Durante las dos últimas décadas, los productos explosivos, en general, se han vuelto menos flamables. Sin embargo, hay que evitar la sensación de falsa seguridad, y tratar a todos los compuestos explosivos como altamente flamables.

SENSITIVIDAD

Los explosivos requieren muy poca energía para detonar. Se dice que son de alta **sensitividad** y viceversa. Por ejemplo, el fulminante estándar número 8 hará detonar la dinamita que requieren algunas emulsiones encartuchadas, pero es importante destacar que un fulminante por sí solo no inicia la reacción del ANFO u otros agentes de tronadura. Para detonar confiablemente se utilizan cebos con un fulminante.

VELOCIDAD DE DETONACIÓN

La velocidad de detonación (VOD) es la velocidad a la que ocurre la reacción química entre el combustible y el oxidante, y se genera a lo largo de la columna del explosivo. Tiene un rango de 1.500 a 7.500 m/s para los explosivos de uso industrial. La VOD puede utilizarse como una herramienta que determina la eficiencia de una reacción explosiva.

PRESIÓN DE DETONACIÓN

Esta es resultado casi instantáneo del movimiento de la onda de choque a través del explosivo. La presión de detonación está relacionada con la densidad del explosivo y la velocidad de detonación, siendo esta última un factor relevante en la presión de detonación liberada por el explosivo.

DENSIDAD

Este parámetro es muy importante, ya que los explosivos se compran, almacenan y utilizan en base al peso. La densidad se expresa normalmente como gravedad específica, que relaciona la densidad del explosivo con la densidad del agua, y determina el peso de explosivo que puede cargarse dentro de una perforación.

La densidad de un explosivo se usa comúnmente como herramienta para calcular la presión de detonación y los parámetros de diseño de las tronaduras (burden, espaciamento). Por ejemplo, se utiliza la llamada densidad de carga, que corresponde al peso de explosivo, para una longitud de carga y un diámetro determinados. En términos generales, se puede decir que a mayor densidad, mayor es la energía liberada que tiene el producto.

POTENCIA

El término potencia se refiere al contenido de energía de un explosivo, que, a su vez, es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer trabajo de fragmentación de la roca. La potencia ha sido clasificada por varios fabricantes sobre la base de un peso o volumen, y comúnmente se le llama potencia en peso y potencia en volumen.

COHESIVIDAD

La cohesividad se define como la habilidad de un explosivo para mantener su forma original. Hay ocasiones en que el explosivo debe mantener su forma original y otras en que debe fluir libremente. Por ejemplo, cuando se hacen tronaduras en rocas muy fragmentadas y agrietadas, definitivamente se debe utilizar un explosivo que no fluya hacia las grietas, sobrecargando el pozo. Por el contrario, en otras aplicaciones, tales como el cargado a granel, los explosivos deben fluir fácilmente y no atascarse en la perforación ni formar huecos en la columna explosiva.

III. CARGUÍO Y TRANSPORTE

1. Sistemas de carguío y transporte

El carguío y el transporte constituyen las acciones que definen la principal operación en una faena minera. Estos son responsables del movimiento del mineral o estéril que ha sido fragmentado en un proceso de tronadura.



EL CARGUÍO Y SUS FUNCIONES

El carguío consiste en la carga de material mineralizado del yacimiento para conducirlo a los posibles destinos, ya sea el chancado, stock de mineral o botaderos de estéril.

PROCEDIMIENTO

La operación de carguío involucra el desarrollo de una serie de funciones que aseguran que el proceso se lleve a cabo con normalidad y eficiencia.

Planificación de la mina: Esta etapa del proceso de la explotación minera se ocupa de definir los sectores de carga, las direcciones de carguío y el destino de los materiales de acuerdo con leyes de clasificación y tonelajes definidas previamente.

Operación de la mina: La operación es la función que se responsabiliza del manejo y organización de los equipos de carga en la mina, así como de supervisar el entorno, especialmente en lo referido a frentes de carga, posición de equipos de carguío y nivel de pisos.

Jefe de operaciones: La operación minera está a cargo de un jefe de operaciones, quien asigna los equipos y operadores en los turnos respectivos. En faenas a gran escala es apoyado por un sistema de despacho (dispatch), que controla de una forma global la producción, complementado por un proceso de optimización continua a través de sistemas computacionales interconectados, presentes en todos los equipos.

Operador del equipo de carguío: Es la persona que está directamente a cargo de la operación de carga de su equipo. Además, es responsable de definir la posición de los camiones para la carga y de evitar que la carga caiga en forma brusca sobre la tolva del camión, lo que puede dañar el equipo de transporte y/o al operador de éste.

Topografía: Mediante esta función se definen las diferentes zonas de trabajo, en cuanto a control del nivel de pisos y frentes de carguío. Asimismo, el equipo de topografía es responsable de marcar y/o validar las zonas mineralizadas para su posterior destino, tanto por medio de conexión radial como por envío de datos hacia los sistemas de despacho (dispatch).

Equipos auxiliares: Los equipos auxiliares se encargan de mantener en buen estado las zonas de carguío y transporte, especialmente el nivel de pisos, de acuerdo con instrucciones del Jefe de operaciones y/o el operador del equipo de carguío. Por lo tanto, la interacción con estos responsables es permanente, no sólo para la correcta operación de carguío, sino también para vigilar y evaluar la presencia de elementos del entorno, como cables eléctricos de la pala y sistemas de "pasacable".

EL TRANSPORTE Y SUS FUNCIONES

El transporte consiste en el traslado de material mineralizado y/o estéril desde el yacimiento hacia los posibles destinos, ya sea el chancado, stock de mineral o botaderos de estéril.

Las funciones involucradas en el proceso de transporte son las siguientes:

Planificación de la mina: Está a cargo de la definición de las rutas de transporte y del destino de los materiales de acuerdo con leyes de clasificación y tonelajes definidas previamente.

Operación de la mina: Función responsable de los equipos de transporte en la mina, así como de supervisar el entorno relacionado con la operación, ya sea en el sector de carga, en la ruta y/o en las zonas de descarga. La operación minera está a cargo de:

- **Un jefe de operaciones**, quien asigna equipos y operadores en los turnos respectivos. En faenas a gran escala es apoyado por un sistema de despacho (dispatch), que controla de una forma global la producción, complementado por un proceso de optimización continua a través de sistemas computacionales interconectados, presentes en todos los equipos.
- **Operador del equipo de transporte**, quien está directamente a cargo de la operación de transporte y de su equipo, el cual debe revisar siempre antes y después de la jornada de trabajo (turno).

Topografía: En particular para la operación de transporte, esta función se encarga de las áreas de trabajo en cuanto al control del nivel de pisos en toda la ruta de los camiones.

Equipos auxiliares: Esta sección está a cargo de mantener en buen estado las zonas de carguío y transporte, especialmente el nivel de pisos, de acuerdo con las instrucciones del Jefe de operaciones y/o el operador del equipo de transporte.

2. Procedimientos operacionales

Para una operación segura, eficiente y ambientalmente limpia, los procedimientos operacionales y/o de procesos de mejoramiento continuo de carguío y transporte deben ser conocidos y aceptados por todas las personas relacionadas directa o indirectamente con la operación minera.

PROCEDIMIENTOS DE CARGUÍO EN MINERÍA A RAJO ABIERTO

Los procedimientos de carguío en la minería a rajo abierto se vinculan, en general, al manejo de palas electromecánicas y/o cargadores frontales.

PALAS ELECTROMECAÑICAS

A continuación se presentan los aspectos básicos propios de una correcta operación. No obstante, existen condiciones particulares para cada faena minera, de acuerdo con las características del entorno (alta cordillera) o geometría de la explotación.

ANTES DEL CARGUÍO

Todo equipo de transporte, auxiliar o camionetas, que se acerque al equipo de carguío debe disminuir su velocidad y avisar, vía radio, de su presencia al operador de la pala. El operador de la pala debe estar siempre preocupado de tener a la vista los equipos que circulan alrededor.

Los camiones que esperan el turno para ser cargados deben estar dispuestos de acuerdo con instrucciones del Jefe de operaciones. El operador de la pala avisará al camión el lugar y disposición para estacionar, tomando como referencia el balde de la pala y/o las orugas. Previo a la carga, el camión debe estar en posición neutra y con el freno de estacionamiento activado.

DURANTE EL CARGUÍO

El operador de la pala debe descargar el material de manera de no dañar la tolva del camión. Por lo tanto, es importante no tirar la carga ni dejarla caer en forma brusca.

Es necesario, también, que el operador de la pala no cargue rocas de tamaño mayor (bolones) que puedan impedir un correcto carguío y, además, dañar las tolvas de los camiones y de los chancadores al llegar a la planta.

En caso de existir material grueso, es recomendable cargar primero el material fino. Es importante evitar que el balde o su tapa toquen al camión durante la carga, ya que movimientos bruscos pueden dañar la tolva u otros elementos del camión o a las personas.

Una vez finalizado el carguío, el operador de la pala debe avisar al operador del camión para que salga del área. Este aviso se realiza mediante comunicación radial, bocinas u otros medios previamente establecidos.

CARGADORES FRONTALES

A continuación se presentan los aspectos básicos propios de una correcta operación de cargadores frontales. No obstante, existen condiciones particulares para cada faena minera, de acuerdo con las características del entorno (alta cordillera) o geometría de la explotación.

Es conveniente considerar que en algunas faenas se prefiere el cargador frontal para la extracción de mineral, ya que permite una mayor selectividad.

ANTES DEL CARGUÍO

Todo equipo de transporte, auxiliar o camionetas, que se acerque al equipo de carguío debe avisar, vía radio, al operador del cargador y disminuir la velocidad. El operador del cargador debe estar siempre preocupado de tener a la vista los equipos que circulan alrededor.

En relación con los camiones que esperan el turno para ser cargados, éstos deben estar dispuestos de acuerdo con instrucciones del Jefe de operaciones.

El operador del cargador avisa al camión el lugar y disposición para estacionar, tomando como referencia el balde de la pala y/o las orugas. . Previo a la carga, el camión debe estar en posición neutra y con el freno de estacionamiento activado.

Cabe destacar que el cargador frontal no debe ser utilizado como tractor para labores de nivelación de pisos u otra propia de un equipo auxiliar.

DURANTE EL CARGUÍO

El operador de la pala debe descargar el material de manera de no dañar la tolva del camión; por lo tanto, es importante no tirar la carga ni dejarla caer en forma brusca.

El operador del cargador no debe cargar rocas de un tamaño mayor al del balde (bolones), que puedan impedir un correcto carguío y, además, dañar las tolvas de los camiones y los chancadores al llegar a la planta.

En caso de existir material grueso, es recomendable cargar primero el material fino a objeto de formar una capa de protección.

Es importante evitar que el balde o cualquier parte del cargador frontal tengan contacto con algún sector del camión, para así evitar posibles daños a los equipos o a las personas.

Una vez finalizado el carguío, el operador del cargador debe avisar al operador del camión para que salga del área. Este aviso se realiza mediante comunicación radial, bocinas u otros medios previamente establecidos.

PROCEDIMIENTOS DE TRANSPORTE EN MINERÍA A RAJO ABIERTO

Los equipos de transporte en la minería a rajo abierto corresponden a camiones de alto tonelaje, con capacidades de hasta 330 toneladas de carga de material.

CARGADORES FRONTALES

SALIDA DEL CARGUÍO

Cuando el carguío está completo, el camión debe desactivar los frenos de carga y poner marcha hacia adelante, saliendo de la zona de carguío con precaución, siguiendo las rutas definidas y en la dirección previamente establecida de acuerdo con la carga que lleva. Si la carga es mineral, se dirigirá a la planta de chancado; si es stock de baja ley o si es estéril, se dirigirá al botadero indicado.

DURANTE EL TRANSPORTE

Es importante que todo el transporte sea realizado cuidando no botar carga en el camino, sobre todo en rutas con pendiente. En caso de haber elementos extraños en la ruta, por ejemplo, rocas, se debe avisar de inmediato para la limpieza de la vía. De igual forma se procede en el caso de encontrar grietas en el camino.

DESCARGA DE MATERIALES

Esta etapa corresponde al vaciado de los camiones en diferentes puntos, los que pueden corresponder a chancado primario, botaderos y stock.

Si se trata de descarga en el chancado

primario, el camión debe llegar hasta la zona de vaciado o buzón del chancador en forma aculatada. Por ello, el operador debe tener la seguridad de que no existe ningún elemento que le impida realizar su labor. Estos obstáculos pueden ser equipos y/o personas que se encuentren desarrollando labores de mantención o la presencia de rocas de un tamaño tal que puedan dañar elementos del camión. Hay casos en que se utilizan semáforos para regular la descarga del camión, los que deben ser siempre respetados.

En el caso de que la altura del stock pile sea mayor a la estimada, el operador del camión debe tener conocimiento inmediato, a objeto de no seguir descargando. Esta información es comunicada generalmente vía radio.

Si existen camiones en espera, éstos deben estacionarse preferentemente en "fila india", dejando una distancia equivalente a un camión entre los vehículos, de forma que todo camión en espera pueda maniobrar de manera segura.

Al momento de aculatarse, el operador del camión debe hacer girar en 180 grados su equipo y retroceder teniendo siempre a la vista la zona de descarga y la distancia desde las ruedas a las respectivas señales de detención.

Si se trata de descarga en botaderos de stock o

estéril, siempre el operador verificará la existencia de un lomo de material. Éste debe tener una altura aproximada de media rueda de camión (1,80 m aproximadamente) y ser capaz de retener la rueda del camión. También servirá como punto de referencia, aunque por ningún motivo el camión debe apoyarse en él.

Al momento de llegar al botadero en la zona de descarga, el camión debe girar para aculatarse, teniendo a la vista el lomo de material, así como cualquier elemento que impida una correcta descarga. Estos obstáculos pueden ser bolones, suelos agrietados, escarchas, etc. En ese caso, el conductor debe avisar al jefe de operación de la mina para que disponga de equipos auxiliares de limpieza. Al retroceder, el operador debe estar siempre atento a ambos espejos y aculatarse hasta llegar en forma perpendicular a la berma de seguridad. En el caso de haber más de un camión descargando, debe existir una distancia entre vehículos de a lo menos el ancho del camión.

Nunca se debe circular frente al camión que está descargando, así como tampoco abandonar la cabina del camión cuando se está realizando esta operación. Si se descarga de noche, debe haber luminarias en la zona de botaderos que señalicen el área, de manera que los camiones puedan trabajar en forma segura. Nunca debe descargarse sin una iluminación adecuada.

3. Evaluación económica de sistemas de carguío y transporte

En una operación minera, las etapas de carguío y transporte son las más relevantes desde un punto de vista de costos asociados a la adquisición (inversión) y operación.

En el caso de minas a cielo abierto, significan más del 50% del costo total de extracción. Por lo tanto, cualquier iniciativa tendiente a optimizar los costos de carguío y transporte puede derivar en una mejor gestión de la operación minera.

DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL COSTO EN MINAS CHILENAS DE COBRE A CIELO ABIERTO

La evaluación económica de los equipos de carguío y transporte es el instrumento para definir los planes de acción en lo que respecta a la adquisición de los equipos de carguío, transporte y equipos auxiliares, considerando variables económicas que determinen si se hace mediante la inversión o arriendo de los equipos.

ASPECTOS POR CONSIDERAR EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA

COSTO DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPO O INVERSIÓN

Ya sea mediante una compra directa o arriendo por uso del equipo (no existe inversión, transformándose en un costo de arrendamiento).

En cuanto al costo de adquisición, deben incluirse aspectos contables relacionados con la inversión en equipos mineros, en particular la "depreciación", esto es, la disminución en el valor del equipo debido al uso y deterioro de éste.

COSTOS ASOCIADOS A INTERESES, SEGUROS E IMPUESTOS

De acuerdo con las condiciones de adquisición de los equipos, será necesario en algunos casos pagar intereses por el préstamo; cubrir seguros en caso de daños en los equipos, y cancelar impuestos, dependiendo si la máquina se adquiere fuera de Chile.

COSTO DE OPERACIÓN

Esto es, el costo asociado al funcionamiento de los equipos. Estos son, principalmente:

Insumos

- Combustibles y energía
- Lubricantes (aceites y grasas)
- Filtros (de aire, gas-oil y aceite)
- Material de desgaste (dientes, cuchillas, puntas de riper, etc.)

Reparaciones

- Neumáticos o tren de rodaje
- Operador (sueldo)

En la siguiente tabla se muestran a modo de referencia los principales costos aproximados asociados a este ítem:

Costos	Valor
Combustible (petróleo)	0,30 US \$/L
Energía (eléctrica)	0,03 US/Kwh
Operador	20 US \$/h
Lubricantes	1,8 US \$/h

ÍNDICES ASOCIADOS A LA OPTIMIZACIÓN DEL CARGUÍO Y TRANSPORTE

Una de las métricas de mayor relevancia en la gestión y administración de los procesos de carguío y transporte es el costo unitario expresado en dólares (US\$) por tonelada de material (cargado o transportado). Todas las minas poseen indicadores de US\$/t y es una permanente preocupación controlar que estos costos no sufran mayores cambios, o sean reducidos.

Antes de poder determinar el costo unitario (US\$/t), es muy importante conocer previamente un conjunto de indicadores de eficiencia de los equipos de carguío y transporte que se describen a continuación:

Tabla resumen de tiempos en una faena minera

1. Tiempo Operativo W = Efectivas + demoras	5. Tiempo no Operable (Dow) TNO = M+F
2. Tiempo en Reserva S = Reservas programadas + Reservas no programadas	6. Tiempo Total TT = (TO+TNO) = (W+S+M+F)
3. Tiempo en mantenimiento M = Mantenimiento Programado + Mantenimiento no Programado	7. Disponibilidad Física (%) DF = (W+S)/(W+S+M+F)
4. Tiempo ajeno al mantenimiento F = accidentes + otros	8. Uso de la disp. Física (%) UD = W/(W+S)

Fuente: Darko Louit. Centro de Minería PUC.