

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



**“MODELO MATEMATICO PARA PREDECIR EL LANZAMIENTO DE
FRAGMENTOS DE ROCA EN MINERIA SUPERFICIAL”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:
CRISTHIAM DANIEL VILLENA ALEGRE**

**ASESOR:
ING. TITO LUIS PALOMINO FLORES**

LIMA – PERÚ

2013

DEDICATORIA

Dedico la presente a la persona que más admiro, mi querida abuela Esperanza Cuba Medina, quien desde lo alto me da fortaleza para superar la adversidad del día a día (Q.E.P.D.).

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Carlos Agreda Turriate quien fue colaborador y guía para el desarrollo de esta tesis.

A mi querida madre Yolanda Alegre Cuba, a mi tío Gustavo Alegre Cuba, por el apoyo incansable en busca de mi superación personal y profesional.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se describe el lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura, desde la zona del disparo y los factores que afectan la distancia de lanzamiento.

Los principales factores tales como: La velocidad inicial (V_i) de los fragmentos de roca y el ángulo (α) que forma la trayectoria del lanzamiento con la horizontal son muy bien enfatizados.

El rango de las velocidades iniciales que son asociadas con los accidentes y daños producidos tanto al personal como a las estructuras y equipo deben ser evitados.

También, se menciona que un diseño adecuado del disparo es fundamental para evitar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura. Así como también, el disparo debe ser adecuadamente implementado en el campo de acuerdo al diseño, etc.

Para realizar el presente trabajo de investigación se ha realizado una minuciosa revisión de los modelos matemáticos postulados por la SDEREFO (Lunderborg) y el A. Bauer et. al., que son los más adecuados para dar solución al impacto ambiental llamado: "Excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura".

Las causas, mitigación y control son muy bien enfatizadas.

Se mencionan, describen y discuten varias aplicaciones de campo.

ABSTRACT

This thesis discussed the path described by fly rock ejected from the blast and the throw distance.

A range of initial velocities that are associated with fly rock incidents are suggested. Proper blast design is essential to avoiding excessive fly rock.

The blast must be properly implemented according to design. A review of the mathematical models concern with this topic was carried out.

The mathematical model postulated by Lunderborg (1981) of the SDEREFO was analyzed, discussed and applied to several cases-study.

Also, the mathematical model of A. Bauer et. Al was analyzed y discussed and applied to several cases-study.

Fly rock causes, control and mitigation are analyzed and discussed.

The results of several cases study are analyzed, discussed and emphasized.

INDICE

	Página
INTRODUCCION	10
CAPÍTULO I – GENERALIDADES.	12
1.1 Introducción.	12
1.2 Objetivos Generales.	13
1.3 Objetivos Específicos.	13
1.4 Alcances.	14
CAPITULO II - LA MINERÍA DEL TERCER MILENIO.	15
2.1 Introducción.	15
2.2 Estructura básica de la eco-eficiencia.	17
2.3 Las mega tendencias del tercer milenio.	17
2.3.1 La economía de libre mercado.	17
2.3.2 La globalización.	18
2.3.3 Los impactos ambientales.	19
CAPITULO III - MÉTODOS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO.	21
3.1 Introducción.	21
3.2 Ataque mecánico.	22
3.3 Ataque físico-químico.	25
CAPITULO IV - MINERÍA LIMPIA Y SOSTENIBLE.	28
4.1 Introducción.	28
4.2 Aspecto técnico.	30
4.3 Aspecto económico.	31
4.4 Aspecto ambiental.	32
4.5 Aspecto social.	34
CAPÍTULO V - LA PARADOJA DE LA VOLADURA DE ROCAS.	36
5.1 Introducción.	36
5.2 Obtención de una buena fragmentación.	36
5.3 Protección de las áreas remanentes y/o circundantes al disparo.	39
5.4 Interpretación, análisis y discusión.	43
CAPÍTULO VI - LOS IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LA VOLADURA DE ROCAS.	44
6.1 Introducción.	44
6.2 Breve descripción de los principales impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas.	44
6.2.1 Vibraciones del macizo rocoso y presión de aire.	44
6.2.2 Polvo.	45
6.2.3 Gases tóxicos.	47
6.2.4 Presión de aire.	49
6.2.5 Ruido.	49

CAPITULO VII - LANZAMIENTO DE FRAGMENTOS DE ROCA.	52
7.1 Definición.	52
7.2 Formulación del problema.	53
7.3 Hipótesis.	53
7.4 Metodología de la investigación aplicada.	53
7.5 Justificación de la investigación.	55
7.6 Plan de trabajo.	56
7.6.1 Cronograma de actividades.	56
7.6.1.1. Descripción de Actividades	57
7.7 Causas.	58
7.7.1 Geo-estructurales.	58
7.7.2 Reflexión y refracción de ondas sísmicas producidas por la detonación de una carga explosiva comercial.	59
CAPITULO VIII - REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MODELOS MATEMÁTICOS POSTULADOS PARA CALCULAR LA DISTANCIA MÁXIMA DEL LANZAMIENTO DE FRAGMENTOS DE ROCA INDUCIDOS POR LA VOLADURA.	62
8.1 Introducción.	62
8.2 Modelo matemático postulado por Lunderborg y Persson de la SDEREFO	62
8.2.1 Desarrollo matemático de este modelo.	63
8.3 Modelo matemático de A. Bauer, et.al.	64
8.3.1 Introducción.	64
8.3.2 Descripción de la predicción del lanzamiento de fragmentos de roca.	66
8.3.2.1 Movimiento de un proyectil.	66
CAPITULO IX - MONITOREO DE LAS APLICACIONES DE CAMPO.	72
9.1 Introducción.	72
9.2 Caso-estudio solucionado usando el modelo matemático de la SDEREFO.	72
9.3 Lanzamiento de fragmentos de roca del frente de una cara libre.	73
9.4 Caso-estudio solucionado usando el modelo matemático de A. Bauer et. al.	76
CAPITULO X - INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	79
10.1 Introducción.	79
10.2 Resultados de los casos-estudio llevados a cabo en el campo por Lunderborg et.al.	79
10.3 Resultados de los casos-estudio llevados a cabo por A. Bauer et. al.	81
CAPITULO XI - MEDIDAS DE CONTROL, MITIGACIÓN Y PREVENCIÓN.	85
11.1 Introducción.	85
11.2 Diseño del disparo.	86
11.3 Implementación del disparo en el campo.	89
11.4 Efectos de la geología.	91
CONCLUSIONES	93

RECOMENDACIONES.	95
BIBLIOGRAFÍA.	97

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Cronograma de actividades.	56
Tabla 2: Muestra el resumen de los resultados obtenidos por A. Bauer y su equipo de trabajo, tomando en cuenta las condiciones de confinamiento.	78

INDICE DE FIGURAS.

	Página
Figura N° 2.1: Concepto de la eco-eficiencia.	17
Figura N° 3.1: Muestra los sistemas de perforación más usados en la industria minera.	24
Figura N° 3.2: Muestra dos perforadoras rotativas en minería superficial.	24
Figura N° 3.3: Muestra la clasificación de las mezclas explosivas comerciales usadas en la voladura de rocas.	26
Figura N° 3.4: Muestra un camión fábrica cargando los taladros para llevar a cabo la voladura de rocas.	27
Figura N° 3.5: Muestra la detonación de un disparo primario.	27
Figura N° 4.1: Muestra los factores que interactúan en el funcionamiento de una empresa de cualquier actividad económica.	30
Figura N° 4.2: Muestra la interrelación que debe existir entre ambos entes.	32
Figura N° 4.3: Muestra la interrelación entre el estado y la empresa.	35
Figura N° 5.1: Muestra los principales costos que conforman la rentabilidad de una empresa minera.	37
Figura N° 5.2: Muestra un banco cargado y conectado, listo para iniciar la voladura de rocas.	38
Figura N° 5.3: Muestra la fragmentación obtenida como resultado de la voladura de rocas.	38
Figura N° 5.4: Muestra el diseño de la malla de perforación y voladura de rocas en un banco.	40
Figura N° 5.5: Muestra un banco que ha sido disparado, listo para el carguío y acarreo en forma secuencial.	41
Figura N° 5.6: Muestra la detonación de un disparo primario.	41
Figura N° 5.7: Muestra los bancos con sobre fracturamiento, debido al mal diseño de las mallas de perforación y voladura.	42
Figura N° 5.8: Muestra la mala fragmentación obtenida como resultado de una voladura de rocas.	42
Figura N° 6.1: En la cual se puede observar el polvo producido por la voladura de rocas.	46
Figura N° 6.2: En la cual se observan los gases producidos por la voladura de rocas.	48
Figura N° 6.3: Se observa la simulación del efecto que causa el ruido producido por la voladura de rocas.	50
Figura N° 7.1: Muestra la refracción de ondas sísmicas.	60
Figura N° 7.2: Muestra la reflexión de ondas sísmicas.	61
Figura N° 8.1: Muestra todos los parámetros que Bauer et. al. tomaron en cuenta para desarrollar su modelo matemático.	70
Figura N° 9.1: Muestra la distancia de la proyección máxima en función de la carga específica.	73
Figura N° 9.2: Muestra las distancias de las proyecciones máximas del lanzamiento de fragmentos de roca (Lundborg 1981).	75
Figura N° 9.3: Muestra la dirección de los fragmentos de roca para una velocidad inicial de: $V_0 = 38$ m/seg. (Bauer et. al).	77
Figura N° 11.1: Muestra un taladro que es detonado con una mezcla explosiva	

comercial, la cara libre, el lanzamiento del burden y del taco. 87

INTRODUCCION

En el presente trabajo de investigación se enfatiza y resumen los principales modelos matemáticos más adecuados y de fácil aplicación en minería superficial para predecir el excesivo lanzamiento de fragmentos de rocas inducidos por la voladura. Como se sabe, el lanzamiento de fragmentos de roca (fly rock), es uno de los impactos ambientales inducidos por la operación minera unitaria de voladura de rocas.

En este trabajo de investigación se hace una revisión general de los impactos ambientales inducidos por la voladura, porque en este tercer milenio los ingenieros de minas deben egresar de las aulas universitarias bien preparados y capacitados para minimizar, mitigar y/o evitar todos los impactos ambientales, aplicando ciencia y tecnología moderna, la cual está disponible y a la mano con el uso de la informática; de tal manera, de minimizar los conflictos sociales que se generan equivocadamente por la falta de información a las comunidades aledañas a los proyectos mineros.

Por otro lado, en este trabajo de investigación se ha realizado una minuciosa revisión de los principales modelos matemáticos usados a nivel mundial para calcular y determinar la distancia crítica, y consecuentemente prevenir el excesivo lanzamiento de los fragmentos de rocas inducidos por la voladura. De dicha revisión

se llegó a la conclusión que los modelos más representativos para la determinación de la distancia crítica son los modelos matemáticos de la SDEREFO y de A. Bauer et. al. Finalmente se presentan varias aplicaciones de campo y se enfatiza que, cuando la velocidad inicial de los fragmentos de roca haga un ángulo de 45° con la horizontal, los fragmentos de roca describirán una parábola que alcancen una distancia máxima.

También, se mencionan y analizan las causas principales que originan el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca, y la metodología para minimizar dicho impacto ambiental. De tal manera, de tomar las medidas correctivas que se deben efectuar oportunamente para minimizar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca. Así mismo, cabe mencionar que hasta donde se conoce en el Perú desafortunadamente no se aplica ningún modelo matemático para predecir el excesivo lanzamiento de fragmentos de rocas, y el probable motivo es que no se lleven a cabo este tipo de investigaciones, sería porque no se cuenta con los equipos adecuados y la falta de motivación por la investigación entre universidad y empresa privada, etc.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

En este tercer milenio; se debe mencionar que existe ciencia y tecnología para alcanzar un desarrollo sostenible de la industria minero-metalúrgico, sin depredar el ambiente.

También, se debe tener en cuenta que sin minería no hay desarrollo sostenible en el Perú.

Como se sabe, minería sostenible es sinónimo de: "Crecimiento continuo del PBI, lo cual se traduce en empleo para todos, ya sean directos e indirectos, estabilidad de precios, etc."

Por otro lado, al hablar de minería se tiene que discutir necesariamente de la operación minera unitaria de voladura de rocas; con la cual se inicia toda operación minera, tanto subterránea como superficial.

También, se debe mencionar que la operación minera unitaria de perforación y voladura impacta al ambiente en sus tres estados: Solido (macizo rocoso), liquido (agua) y gaseoso (aire). Pero, también se debe enfatizar que a nivel mundial existen muchos investigadores identificando,

analizando y discutiendo los diversos impactos ambientales inducidos por la voladura; usando ciencia y tecnología para planificar estratégicamente ciertas medidas de precaución y/o protección adecuadas para minimizar, mitigar y/o evitar los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas.

1.2 Objetivo Generales

Los principales objetivos del presente trabajo de investigación son los siguientes:

- Dar a conocer y/o interesar a la comunidad minera nacional acerca de los diversos impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas.
- Promover la estandarización de la terminología y/o nomenclatura relacionada con el tema.
- Informar a las comunidades aledañas a las exploraciones donde se ubican yacimientos mineralizados, que usando ciencia y tecnología con responsabilidad socio-ambiental, si es posible, factible y viable llevar a cabo la explotación minera, protegiendo sus bienes y/o vidas.

1.3 Objetivos Específicos

- Dar a conocer los avances logrados a la fecha en la modelización de uno de los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas denominado: “Lanzamiento de fragmentos de rocas”. Impacto ambiental que produce mayores daños tanto personales como materiales.

- La revisión muy minuciosa y reportar los diversos modelos matemáticos desarrollados a la fecha, concernientes con el tema; y de ellos elegir y recomendar el más adecuado.
- Evitar daños personales y/o materiales a la zona circundante a la operación minera y sobre todo a las comunidades aledañas.

1.4 Alcances.

Los alcances de la presente investigación estarán en función directa de los datos de campo que se puedan conseguir, para que estos puedan ser usados en el modelo matemático elegido para calcular la distancia máxima alcanzada por los fragmentos de roca inducidos por la voladura de rocas.

CAPITULO II

LA MINERÍA DEL TERCER MILENIO

2.1 Introducción.

La mayoría de los investigadores a nivel mundial están de acuerdo que, la industria minera del tercer milenio debe ser una minería responsable, limpia y sostenible. Por lo cual, el reto del tercer milenio es usar ciencia y tecnología de última generación, de tal manera que la minería de este milenio sea una minería que optimice la producción y la productividad a un costo mínimo, con seguridad y sin depredar el ambiente.

En otras palabras, se puede afirmar que para obtener una minería responsable, limpia y sostenible se debe comenzar a usar en las operaciones mineras nacionales el nuevo concepto de eco-eficiencia; que a nivel mundial está dando muy buenos resultados, incrementando las rentabilidades de las diversas empresas mineras donde lo están aplicando.

Es decir, se debe desterrar el antiguo concepto de la minería convencional, la cual era: “Que lo único que preocupaba era la producción y la productividad, sin tener en cuenta la seguridad y la depredación del ambiente, y las buenas relaciones comunitarias, etc., etc.”

Se debe tener presente que, la minería sostenible implica una mejora continua en la calidad de vida de todos y cada uno de los involucrados en la industria minero-metalúrgica; teniendo en cuenta que la eco-eficiencia es producir bienes y servicios competitivos que deben satisfacer las necesidades humanas y que mejoren principalmente la calidad de vida; reduciendo y controlando los impactos ambientales inducidas por las operaciones mineras unitarias de la industria minero-metalúrgica.

Actualmente se podría decir que con el proceso de los grandes cambios, el Perú ingresó a una nueva era en la que el estado aplica instrumentos de gestión para alcanzar el desarrollo sostenible de la industria minera, aplicando los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) a empresas mineras en operación y también se obliga que a los nuevos proyectos deben realizar si o si el Estudios de Impacto Ambiental (EIA), audiencias públicas, títulos de concesión minera, Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) , Límites Máximos Permisibles (LMPs), Plan Ambiental de Cierre (PAC), entre otros, que coadyuven a garantizar una armónica relación con la protección al ambiente y el bienestar de las comunidades aledañas a las operaciones mineras.

2.2 Estructura básica de la eco-eficiencia.

La estructura de la referencia, se puede explicar con mayor claridad, usando la siguiente figura N° 2.1.

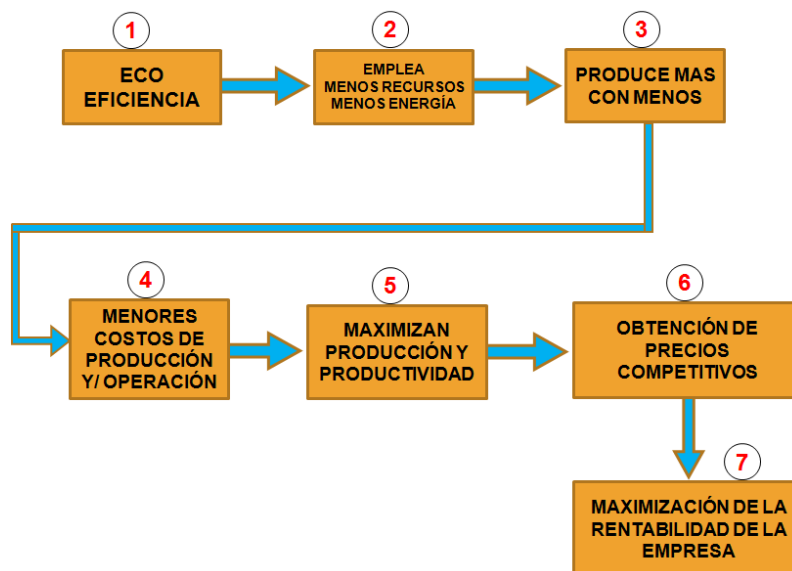


Figura N° 2.1 concepto de la eco-eficiencia.

2.3 Las mega tendencias del tercer milenio

Como se sabe, este tercer milenio está caracterizado por las tres mega-tendencias, las cuales se describen a continuación:

2.3.1 La economía de libre mercado

La economía de libre mercado ha obligado a todos los inmersos en la industria minero-metalúrgica a llevar a cabo una serie de investigaciones de todas y cada una de las operaciones mineras metalúrgicas que componen el ciclo total del complejo minero metalúrgico.

Estas investigaciones han tenido como objetivo principal maximizar producción y productividad en todas y cada una de las operaciones

minero-metalúrgicas, de tal manera, de minimizar costos operacionales; y por tanto, ser competitivos en los precios de venta; teniendo siempre presente que la compañía que no investiga en este tercer milenio no será competitiva y por ende tendrá que salir del mercado. Es por eso que desde este punto de vista, la economía de libre mercado debe ser tomada en cuenta.

2.3.2 La globalización

La otra característica de este tercer milenio es la globalización, la cual es un fenómeno extraordinario, porque permite un gran intercambio económico, tecnológico, social, cultural y sobre todo de información en segundos, que permite especialmente conocer acerca de todas las investigaciones que se están llevando a cabo a nivel mundial en cualquier rama del saber humano. Se puede decir que es un proceso dinámico y que ha logrado abrir las puertas a la revolución de la informática. Es decir la globalización es un fenómeno moderno que puede ser analizado desde diversos ángulos o puntos de vista. A grandes rasgos, podría decirse que la globalización consiste en la integración cultural, económica, capitalista y de información de las diversas sociedades del mundo. Los principales e importantes avances que se dieron en materia de ciencia y tecnología y aplicados principalmente a los medios de comunicación masiva y del transporte, hicieron que las fronteras entre los distintos países se hagan menos evidentes y las relaciones entre los habitantes de estos más cercanos. También, los mercados promueven la eficiencia por medio de la competencia y la división del

trabajo, es decir, la especialización, que permite a las personas y a las economías centrarse en lo que mejor saben hacer. La innovación continua del ser humano permite que por la globalización, sea posible beneficiarse de mercados cada vez más vastos en todo el mundo y tener mayor acceso a los flujos de capital, la tecnología y a la información en tiempo record a una velocidad impresionante.

2.3.3 Los impactos ambientales

La fundamental característica de gran preocupación de este tercer milenio son los impactos ambientales producidos por el hombre. Impactos que tienen consecuencias presentes y en las futuras generaciones, las cuales deben ser tratadas con responsabilidad; para ello, se han creado foros internacionales que son presididos por los presidentes de cada país interesados en tender puentes y crear alternativas para remediar estos impactos ambientales.

La minimización de los impactos negativos al ambiente es un factor importante en los estudios de cualquier proyecto que se quiera llevar a cabo. Con esto se puede lograr que los efectos secundarios sean menos negativos. Es posible alcanzar resultados de preservación del ambiente al minimizar el impacto negativo de una acción del hombre.

También es importante que el ser humano cumpla la interrelación naturaleza-hombre, respetando la biodiversidad. Como afirma la sustentabilidad, la protección del ambiente no sólo es una

preocupación para las futuras generaciones, sino debe ser una preocupación de todos en la actualidad.

Definición de Impacto ambiental: Es cualquier cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas causadas por cualquier forma de materia o energía resultante directa o indirectamente de las actividades del hombre.

Entonces, la industria extractiva de la minería no puede ser una excepción. Por tanto, se debe enfatizar que la industria minero-metalúrgica impacta al ambiente, pero aplicando ciencia y tecnología se puede mitigar y muchas veces evitar estos impactos ambientales. Por tanto, en el presente trabajo de investigación, se mencionan los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas; que es la primera operación minera unitaria con la cual se inicia la explotación minera ya sea subterránea o superficial.

De todos los impactos ambientales mencionados anteriormente, se analizará, investigará y mencionarán las causas y las medidas de mitigación, minimización y/o control del impacto ambiental denominado: "Lanzamiento de fragmentos de roca".

CAPITULO III

MÉTODOS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO

3.1 Introducción

De acuerdo a la historia y a los vestigios encontrados para así demostrarlo, el hombre ha sido minero desde los albores de la humanidad, así se puede corroborar a través de los fragmentos de rocas o minerales más o menos trabajados para su uso como herramientas o armas. Posteriormente continuó con los metales, extrayendo los minerales desde la corteza terrestre.

Tal como las diversas culturas lo demuestran con los objetos metálicos encontrados que inclusive ya intervenía el uso de la metalurgia. Claro, que el avance de esta industria extractiva era insipiente y la producción en menor escala; es por ello, que a nivel mundial se conoce que los métodos para atacar al macizo rocoso, son los siguientes:

- Fuego
- Energía eléctrica
- Hidráulica
- Mecánica
- Físico-química, etc.

En la actualidad la industria extractiva de la minería ha crecido y seguirá creciendo vertiginosamente, debido al uso de los metales en las diferentes aleaciones y fabricaciones de bienes muebles; es decir la población mundial crece y consume deprisa, lo cual no sería "en principio" un problema, si no fuera porque los recursos minerales y energéticos son "finitos". Esto puede dar una visión rápida de la importancia de los metales y minerales industriales con respecto al valor de otras actividades económicas tradicionales. Entonces se puede enfatizar que, los aspectos mineros, económicos, y políticos están íntimamente ligados, funcionando como un trinomio.

Por tanto, para satisfacer la demanda del mercado por los metales es indispensable el uso de las mezclas explosivas comerciales y los accesorios de voladura para extraerlos de la corteza terrestre, funcionando de esta manera los accesorios de voladura y la mezcla explosivas como un binomio, porque para lograr una adecuada fragmentación los accesorios de voladura no pueden funcionar sin la mezclas explosivas comerciales o viceversa. Cabe enfatizar que también existe el ataque mecánico al macizo rocoso a través de los equipos denominadas perforadoras y otros equipos que mayormente son usados en obras civiles, tales como las "Tunnel Boring Machine" (TBM).

3.2 Ataque mecánico

Este ataque mecánico en la industria minera es a través de los equipos de perforación, los cuales a través del diseño de las mallas de perforación y voladura, el operario o perforista, perfora los taladros, para que

posteriormente sean cargados con mezclas explosivas comerciales, tanto para minería subterránea y/o superficial.

Cuando se refiere a las tuneladoras (T.B.M), proviene del inglés "Tunnel Boring Machine". Estos equipos son usados en macizos rocosos especiales blandos o menos competentes según la clasificación de la caracterización geomecánica; y se usa con mayor frecuencia para hacer obras civiles como los túneles para los diversos usos como viales, hidráulicos, etc.

La TBM, es una máquina capaz de excavar túneles de sección completa, y a la vez coloca el sistema de sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva, de acuerdo al macizo rocoso. La excavación se realiza normalmente mediante un cabezal giratorio equipado con elementos de corte, también existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabezal giratorio. El empuje necesario para avanzar se consigue mediante un sistema perimetral que se apoya en el último anillo de sostenimiento colocado.

Este método se da a través de máquinas tuneladoras o topos (TBM) y las máquinas de ataque puntual, rozadoras o martillos de impacto. En la excavación mecánica la energía utilizada se concentra en los accesorios y/o dispositivos denominados: Picas, cortadores de disco, cortadores de botones, etc.; los cuales impactan directamente con el macizo rocoso, de modo que esta resistencia que ofrecen las maquinas tuneladoras debe ser mayor que la resistencia de la roca para lograr fracturarla en forma de lascas. Cuando se trata de minería, el ataque mecánico es a través de las máquinas perforadoras, que en minería subterránea las máquinas perforadoras

perforan dando soplos y/o impactos, mientras que en minería superficial son las perforadoras rotativas, las cuales perforan usando el pull – down, rpm presión de aire, etc.

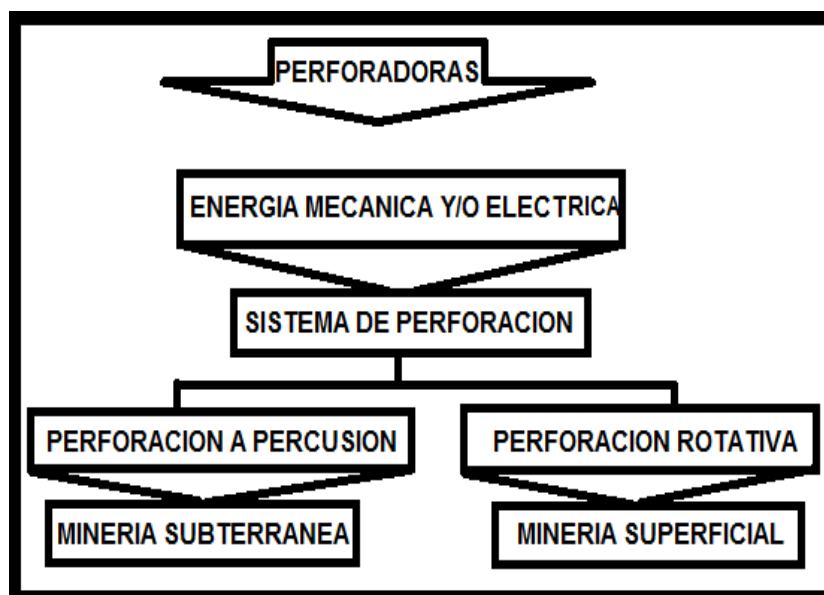


Figura N° 3.1: Muestra los sistemas de perforación más usados en la industria minera.



Figura N° 3.2: Muestra dos perforadoras rotativas usadas en minería superficial.

3.3 Ataque físico-químico

El avance logrado por la humanidad, se debe a la investigación y desarrollo de la ingeniería de explosivos. Porque, sin la energía físico-química producida por estos, no se podría extraer ni los recursos minerales desde la corteza terrestre, ni ejecutar ninguna obra subterránea en general, desde el punto de vista técnico-económico.

Cuando hablamos de mezclas explosivas comerciales, se debe enfatizar que según la historia se inició con la pólvora negra, que es la más antigua utilizada como explosivo, presumiblemente desarrollada por los chinos, posteriormente Ascanio Sobrero inventó la nitroglicerina, siendo esta uno de los ingredientes de la dinamita inventada por Alfred Nobel, y así se continuo hasta llegar a los agentes de voladura y a las mezclas explosivas comerciales de la última generación como es la emulsión y el heavy AN/FO, cabe mencionar a sus inventores y sin ánimos de “admiración” a los Drs. Alan Bauer, Melvin Cook, R. Clay, Farnaman, etc. y las reconocidas fábricas de explosivos que continúan haciendo variaciones en los ingredientes para obtener otros derivados de mezclas explosivas, tales como las emulsiones gasificables, el plasma, etc.

Cabe enfatizar que el binomio accesorio de voladura de rocas y las mezclas explosivas comerciales, es indispensable para su funcionamiento adecuado.

La perforación y la voladura de rocas operaciones mineras unitarias binomiales, es la más importante y fundamental operación minera unitaria en el ciclo total de minado, tanto para la minería subterránea como superficial.

Es por ello que los especialistas en esta materia enfatizan que la adecuada selección de la mezcla explosiva comercial está en función de la caracterización geomecánica del macizo rocoso, por su aleatoriedad en sus propiedades físico-mecánicas. Porque de estas variables depende el adecuado resultado de la voladura de rocas, que es la fragmentación; si no se obtuviera una adecuada fragmentación los costos operacionales de las sub siguientes operaciones mineras unitarias se incrementarían, y por ende se reducirá la rentabilidad de la empresa minera.

En general, para este tercer milenio se sugiere a las compañías mineras utilizar las mezclas explosivas comerciales de la última generación y como principal accesorio de voladura el nonel o los fulminantes electrónicos para mayor precisión en la secuencia de salida de los disparos primarios.



Figura 3.3: Muestra la clasificación de las mezclas explosivas comerciales usadas en la voladura de rocas.



Fuente: International Society of Explosives Engineers

Figura N° 3.4: Muestra un camión fábrica cargando los taladros para llevar a cabo la voladura de rocas.



Figura N° 3.5: Muestra la detonación de un disparo primario.

CAPITULO IV

MINERÍA LIMPIA Y SOSTENIBLE

4.1 Introducción

En este tercer milenio, todas las compañías minero metalúrgicas a nivel mundial están obligadas a practicar una minería responsable, limpia y sostenible; donde los líderes mundiales acordaron la creación de un conjunto de objetivos de Desarrollo Sostenible que sean universales, los mismos que modificarían el ámbito en el que se desenvuelva la política económica en el futuro, con el fin de salvaguardar nuestro sistema de soporte vital. Esto es fácil decir. Pero ¿por dónde se debe empezar?

Desarrollo sostenible: Un nuevo concepto. Durante casi 3 décadas, se ha definido el desarrollo sostenible como el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus necesidades.

Las políticas relacionadas han reflejado el punto de vista que indica que el desarrollo sostenible se apoya sobre tres pilares iguales.

Pero, ya no se puede mantener esta visión. Tal como lo indica el proyecto (draft report) sobre cambio climático del Programa de Investigación sobre el Cambio Global de Estados Unidos.

Por tanto, se necesita un nuevo enfoque, en lugar de columnas separadas de desarrollo sostenible, se debe ver la economía como una ciencia al servicio de la sociedad, la que a su vez se desarrolla dentro de un ambiente natural y seguro. Por lo cual, se debe redefinir el desarrollo sostenible como: "El desarrollo que satisface las necesidades del presente, y que al mismo tiempo salvaguarda el sistema de soporte vital de la tierra, del cual depende el bienestar de las generaciones actuales y futuras"

Como se sabe, el Perú por su naturaleza es un país mineralizado, y para desarrollar un proyecto minero de esta envergadura de todas maneras esta industria minero-metalúrgica impacta el ambiente. Pero, se debe mencionar que el reto de este tercer milenio es practicar una minería responsable, limpia y no depredar el ambiente, para lo cual si se tiene empresas mineras legalmente constituidas y formales comprometidas con el cuidado del ambiente. Sin lugar a dudas, la minería en el Perú ha logrado tal posicionamiento gracias al arduo trabajo de peruanos y sus líderes inmersos en este rubro (socios capitalistas), las instituciones privadas y públicas que intervienen en el desarrollo de esta gran industria extractiva, como ente multiplicador. Este esfuerzo debe ser coordinado y sostenible; Solo así el Perú seguirá creciendo, y con él todos los peruanos crecerán y mejoraran su calidad de vida.

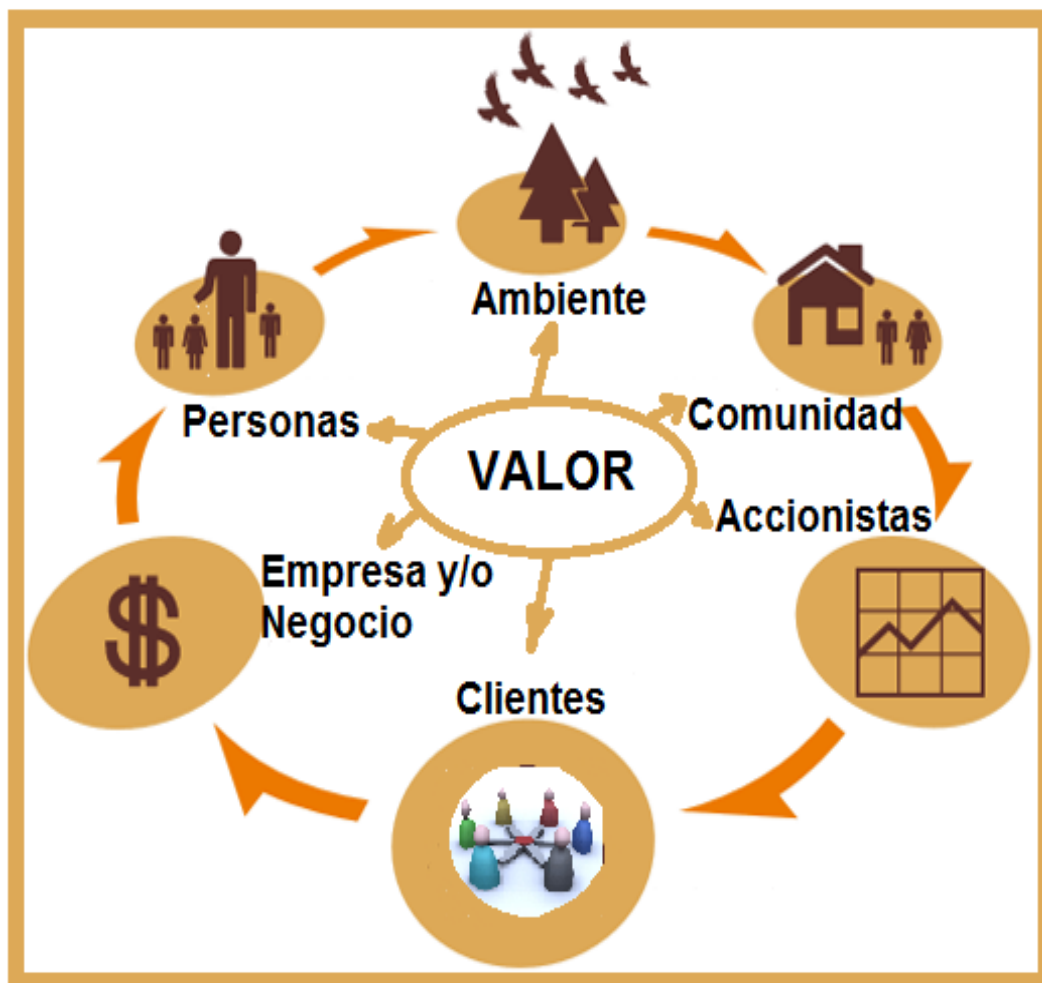


Figura N° 4.1: Muestra los factores que interactúan en el funcionamiento de una empresa de cualquier actividad económica.

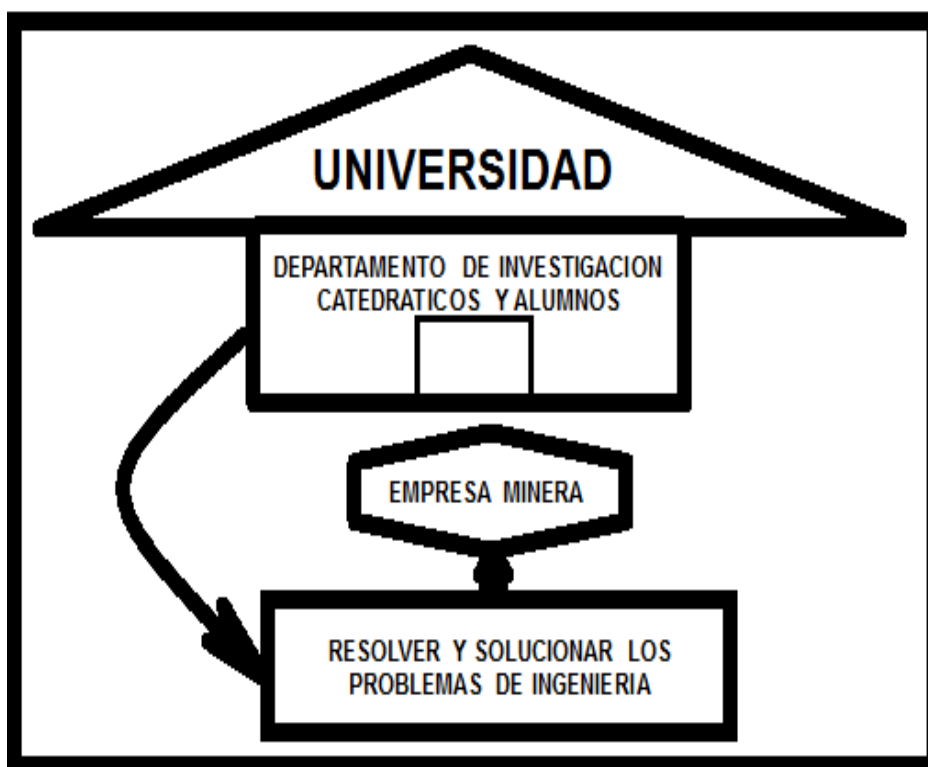
4.2 Aspecto técnico.

En este contexto, se debe usar toda la ciencia y la tecnología a la fecha para extraer los minerales de la corteza terrestre minimizando, mitigando y/o evitando la depredación del ambiente, para ello, se debe fomentar la importación de tecnología y capacitar al personal en todos los niveles; promoviendo e impulsando la inversión minera, con políticas claras, posibles y factibles.

4.3 Aspecto económico

En este aspecto se debe aplicar los diversos modelos matemáticos existentes a nivel mundial para maximizar la producción y productividad, minimizando de esta manera los costos operacionales y por consiguiente maximizando la rentabilidad de las diversas empresas mineras; para ello las universidades deben hacer convenios con las empresas mineras para realizar las investigaciones aplicadas e implementarlas en el campo, logrando la universidad el objetivo de resolver y solucionar los problemas de ingeniería en conjunto con los catedráticos y alumnos.

La empresa minera lograra de esta manera reducir sus costos en asesorías externas, que muchas veces se contrata profesionales del extranjero, enfatizando que en el Perú si hay profesionales que también pueden asesorar y solucionar problemas de la ingeniería geológica, minera y metalúrgica.



Fuente: Cristhiam Daniel Villena Alegre

Figura N° 4.2: Muestra la interrelación que debe existir entre ambos entes.

4.4 Aspecto ambiental

En este tercer milenio, no se puede permitir que ninguna explotación minero-metalúrgica deprede el ambiente; para lo cual se debe cumplir con las diversas normativas internacionales que existen a la fecha.

La actividad minera produce prosperidad en las zonas donde se lleva a cabo, pero indudablemente tiene un impacto ambiental. Por lo que, la operación de una mina representa un impacto ambiental que debe ser controlado, minimizado y/o evitado. Sin embargo, impactos aun a menor escala pueden crear conflictos por el uso de la tierra y oposición a la explotación minera por grupos ambientalistas; sobre todo en países

desarrollados más poblados quienes tienen ciertos intereses, llevando al error a las comunidades oponiéndose a la minería, sin embargo estos grupos opositores usan la tecnología y bienes que son hechos de los metales que han sido procesados y extraídos desde la corteza terrestre por la industria minera.

La solución de conflictos puede involucrar pagos de compensaciones, derechos de concesión y eventualmente el costo de rehabilitar zonas explotadas y el cierre de mina. En algunos países el riesgo político constituye una barrera para la inversión minera, mientras que en otros el riesgo ambiental constituye una barrera tanto o más importante. Es por eso que la Comisión Mundial del Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en 1987, propuso el "Desarrollo Sustentable", un enlace entre economía y ecología, como la única solución práctica para el crecimiento económico sin dañar o depredar el ambiente. Es decir las compañías mineras con respaldo del estado tienen la responsabilidad ambiental de devolver el área explotada lo más cercanamente posible al estado previo a la minería o proveer otro uso al terreno explotado que pudo resultar de su trabajo minero, como transformar un tajo minero en una laguna para la navegación y/o recreación o usar desmontes para la industria de la construcción, o presentar y ejecutar otras alternativas posibles y factibles para la comunidad afectada.

Una de las medidas sería el reciclaje y sustitución y tecnología de nuevos materiales que jugarán un rol en reducir el impacto de explotaciones mineras en el ambiente, pero en el futuro inmediato se debe cuidar que exista un creciente sentido de responsabilidad de todos aquellos involucrados en la industria minera.

Es decir “promover el desarrollo, implementación y armonización de prácticas ambientales adecuadas y políticas y prácticas de salud que aseguren la producción, uso y reciclaje y disposición de metales sin depredar el ambiente”.

4.5 Aspecto social

La minería del tercer milenio debe trabajar con responsabilidad ambiental y social.

En el aspecto social, se debe tener en cuenta que las ganancias que se obtiene de la minería deben servir para desarrollar las zonas aledañas a las operaciones mineras; otorgando oportunidades de trabajo a los comuneros y desarrollando sus comunidades como construyendo escuelas, hospitales, bibliotecas, pistas, capacitando tanto en el sector agrícola y ganadero, etc., etc.

La minería es una actividad extractiva, y es conocida como un ente multiplicador, por el efecto de dar trabajo a casi todas las especialidades del saber humano, desde el nivel obrero al profesional. Pero, los recursos mineros no son renovables; entonces para evitar los conflictos sociales de las comunidades y otros organismos con interés se debe involucrar a la comunidad desde la etapa de exploración hasta el cierre del proyecto minero. A medida que se va desarrollando el proyecto minero capacitar a la comunidad en sus programas de interés y al mismo tiempo ir ganando la confianza y cambiando la opinión de los comuneros respecto a hacer minería responsable, limpia y sustentable con hechos u obras reales que

beneficien la comunidad en el presente y futuro, de tal manera de asegurar la conservación ambiental y justicia social.



Figura N° 4.3: Muestra la interrelación entre el estado y la empresa.

CAPÍTULO V

LA PARADOJA DE LA VOLADURA DE ROCAS

5.1 Introducción

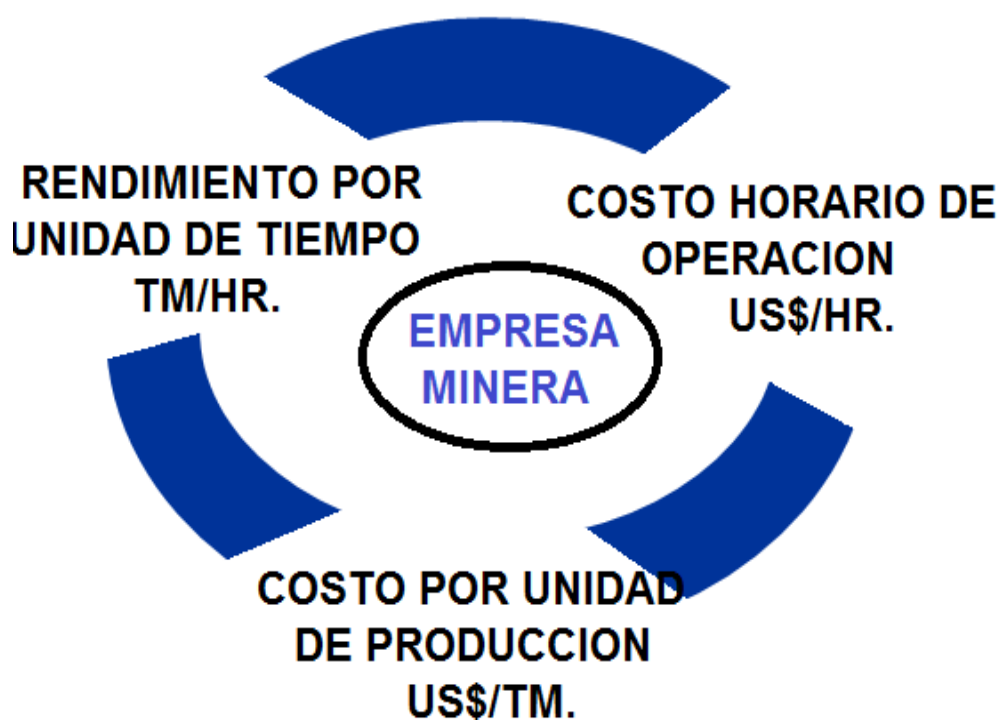
En este tercer milenio; la operación minera unitaria de la voladura de rocas; se debe considerar como una ciencia estocástica, dinámica, algorítmica, adiabática y energética.

5.2 Obtención de una buena fragmentación

Todo lo mencionado anteriormente tiene como único y principal objetivo; obtener una buena fragmentación en términos de granulometría y uniformidad de esta. Porque, solo así se minimizaran los costos de carguío, acarreo, chancado primario, secundario, terciario, molienda, etc., etc. En US\$/TM explotada; y por lo tanto, se maximizara la rentabilidad de las empresas mineras.

Entonces, se debe enfatizar que la fragmentación del macizo rocoso, como resultado de la voladura de rocas, tiene un impacto fundamental en la rentabilidad de la empresa minera, para lograr este objetivo se requiere de una adecuada fragmentación para maximizar los procesos posteriores. Por

tanto, la perforación y la voladura son operaciones binomiales, siendo las primeras operaciones del ciclo minero-metalúrgico, y los resultados condicionan en gran medida los rendimientos y los costos de las operaciones mineras subsiguientes, entonces, para lograr incrementar la rentabilidad de la empresa minera en la cadena de valor, la clave está en las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura.



Fuente: Cristhiam Daniel Villena Alegre

Figura N° 5.1: Muestra los principales costos que conforman la rentabilidad de una empresa minera.

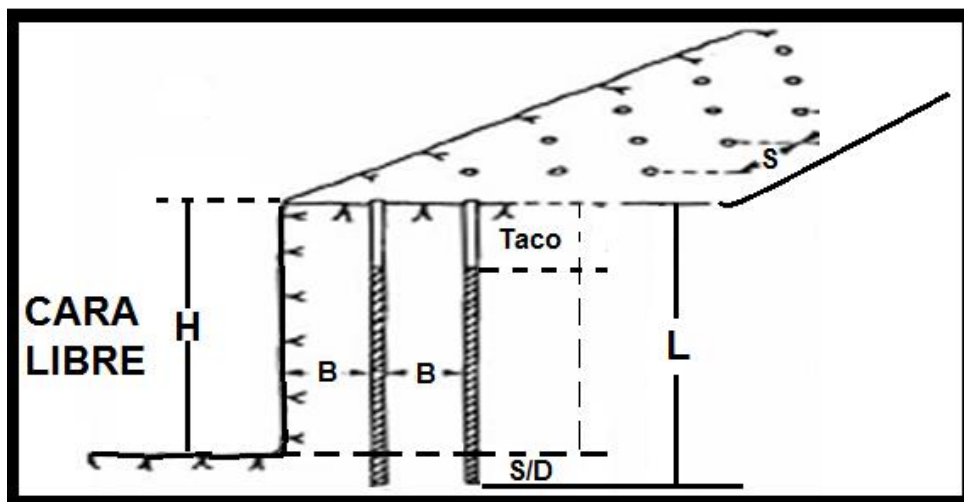


Figura N° 5.2: Muestra un banco cargado y conectado, listo para iniciar la voladura de rocas.



Fuente: Cementos Pacasmayo

Figura N° 5.3: Muestra la fragmentación obtenida como resultado de la voladura de rocas.

5.3 Protección de las áreas remanentes y/o circundantes al disparo.

De acuerdo a lo mencionado en el acápite anterior, como resultado de la voladura de rocas se requiere obtener una buena fragmentación; pero al mismo tiempo se debe preservar las áreas circundantes y/o remanentes al disparo primario.

Es importante, que en el diseño de mallas de perforación y voladura se prevea que en la última fila de los taladros se cargue menor mezcla explosiva usando uno de los modelos de la voladura controlada, de tal manera de proteger el área circundante al disparo y los equipos y estructuras cercanas al área de influencia del disparo primario.

Por otro lado, en cualquier operación minera, ya sea ésta subterránea o superficial, uno de los factores más importantes y a la vez más preocupante para las empresas mineras y todos los involucrados en la minería en general, es no tener incidentes ni accidentes, en el peor de los casos mantener los niveles más bajos de accidentabilidad, debido a los costos que asume la empresa minera y sobre todo la familia, que no hay dinero en el mundo que pague la vida de una persona, es por ello muy importante que por más conocimientos y confianza que se tenga del trabajo dentro de la operación minera de voladura de rocas, siempre se debe estar alerta, porque en voladura de rocas los errores y excesos de confianza se pagan, inclusive hasta con la vida.

Debido a que una mala voladura causa daños a la roca circundante e induce a grandes movimientos a lo largo de los planos de deslizamiento, es importante el uso de modelos matemáticos de la voladura controlada,

particularmente en los macizos rocosos formados por bloques con el propósito de proteger al macizo rocoso circundante y obtener paredes lisas o firmes y prevenir así movimientos críticos a lo largo de los planos de deslizamiento.

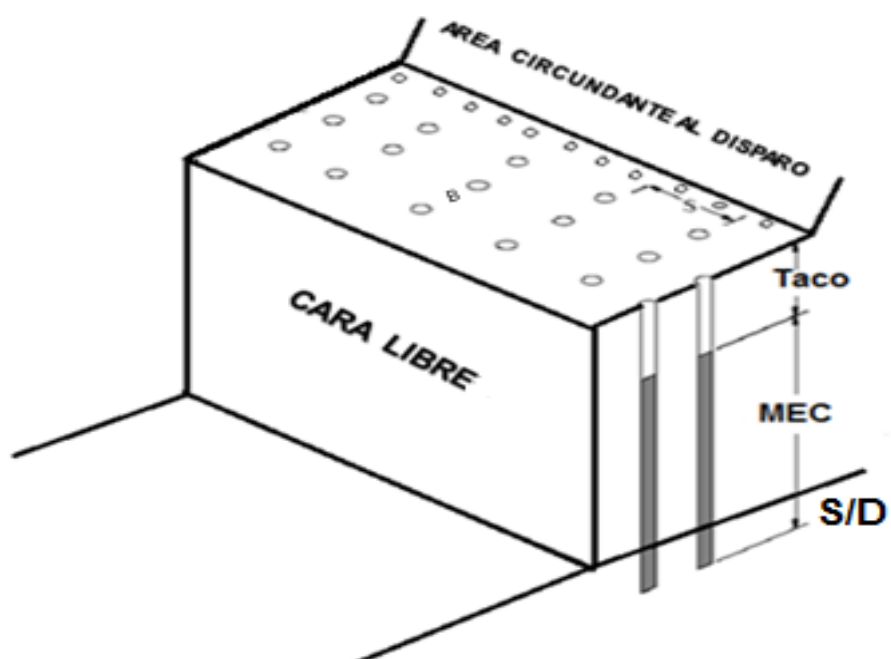


Figura N° 5.4: Muestra el diseño de la malla de perforación y voladura de rocas en un banco.

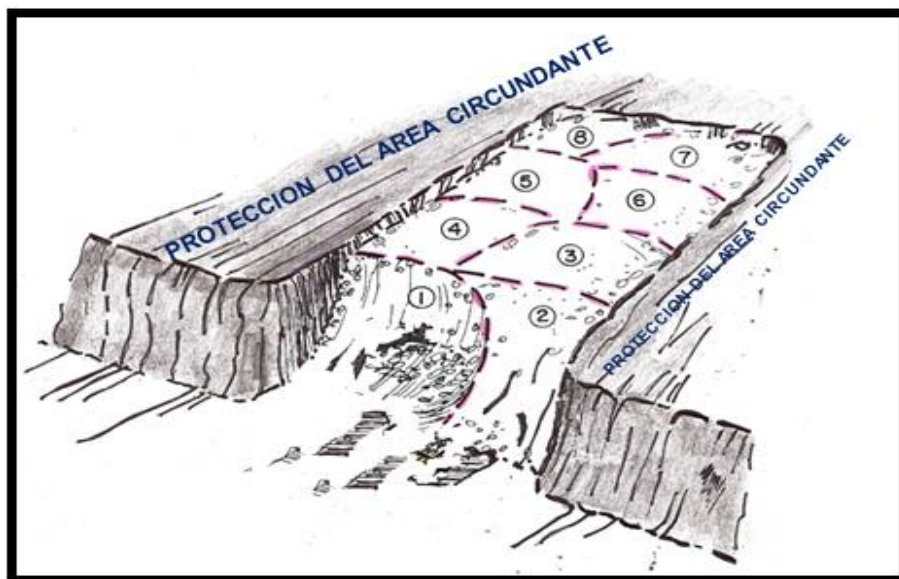


Figura N° 5.5: Muestra un banco que ha sido disparado, listo para el carguío y acarreo en forma secuencial.



Figura N° 5.6: Muestra la detonación de un disparo primario.



Figura N° 5.7: Muestra los bancos con sobre fracturamiento, debido al mal diseño de las mallas de perforación y voladura.



Fuente: Mina Chuquicamata de Chile

Figura N° 5.8: Muestra la mala fragmentación obtenida como resultado de una voladura de rocas.

5.4 Interpretación, análisis y discusión

De acuerdo a las figuras mostradas anteriormente se puede mencionar que los resultados obtenidos en el disparo anterior no son los adecuados por lo siguiente.

- Fragmentación no adecuada (Varios bancos).
- El disparo primario ha producido sobre-fracturamiento hacia atrás, etc., etc.

CAPÍTULO VI

LOS IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LA VOLADURA DE ROCAS

6.1 Introducción

A la fecha y a nivel mundial los siguientes impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas han sido identificados y reportados:

- Lanzamientos de fragmentos de roca (fly rock)
- Vibraciones del macizo rocoso
- Presión de aire
- Ruido
- Polvo
- Gases tóxicos
- Subsidiencias, etc., etc.

6.2 Breve descripción de los principales impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas.

6.2.1 Vibraciones del macizo rocoso y presión de aire. Son causas potenciales de daños personales y a la propiedad.

Por otro lado, el lanzamiento de fragmentos de roca, vibraciones del macizo rocoso y presión de aire; todos estos impactos ambientales

significan una pérdida de la energía producida por la detonación de una mezcla explosiva comercial, cargada dentro de un taladro.

6.2.2 Polvo.

Una gran cantidad de polvo puede ser producido cuando en un disparo primario no se ha usado los retardos adecuadamente.

Respecto a la salud tanto humana y de la flora y fauna las características del polvo producido por la voladura de rocas que afectan a ésta son fundamentalmente la composición y granulometría.

La composición afecta porque determinados minerales contienen metales que a su vez pueden tener efectos tóxicos. Por otro lado, la granulometría es muy importante, porque las partículas de polvo de tamaño inferior a 10 micras (las denominadas PM10) entran en el sistema respiratorio alcanzando los pulmones, donde pueden quedar acumuladas y generar graves daños al sistema respiratorio.

Las partículas menores de 2.5 micras (denominadas PM2.5) son aún más peligrosas, ya que se mantienen en suspensión en el aire, lo que permite que se desplacen a largas distancias.

El polvo emitido en la industria minera tanto subterránea como superficial tiene su origen en la fragmentación de la roca producido por la voladura; respecto a la minería subterránea, se emitirá a la atmósfera a partir de uno o varios puntos definidos como en las chimeneas de ventilación y los pozos de circulación de aire. Si

procede de explotaciones a cielo abierto, provendrá de todo un frente de explotación, más o menos extenso. En cualquier caso, es prácticamente imposible evitar su emisión, pero si se puede controlar.

Solo en la minería subterránea podría evitarse su salida, mediante filtros en los puntos de salida. Desafortunadamente tales filtros tienden a ser evitados para favorecer la rapidez de la limpieza del polvo generado en el interior de la mina durante la voladura.

La composición de este polvo será la misma que la de la roca fragmentada, o también se produce en el carguío y acarreo del material. Respecto al carguío y acarreo puede ser más sencillo su control, simplemente mediante el regado de los frentes de carga durante el proceso.



Figura N° 6.1: En la cual se puede observar el polvo producido por la voladura de rocas.

6.2.3 Gases tóxicos.

Los gases venenosos que se generan en una voladura de rocas son óxidos nitrosos (NO, N₂O) y/o monóxidos de carbono (CO), y estos son producidos generalmente por la reacción química incompleta de los ingredientes de la mezcla explosiva comercial; y por lo tanto, el balance de oxígeno de dicha mezcla explosiva no tiende a cero.

Es decir $OB \approx 0$; y como consecuencia el calor de explosión (Q_3) de la mezcla explosiva disminuye. Estos gases pueden ser considerados tóxicos a niveles de:

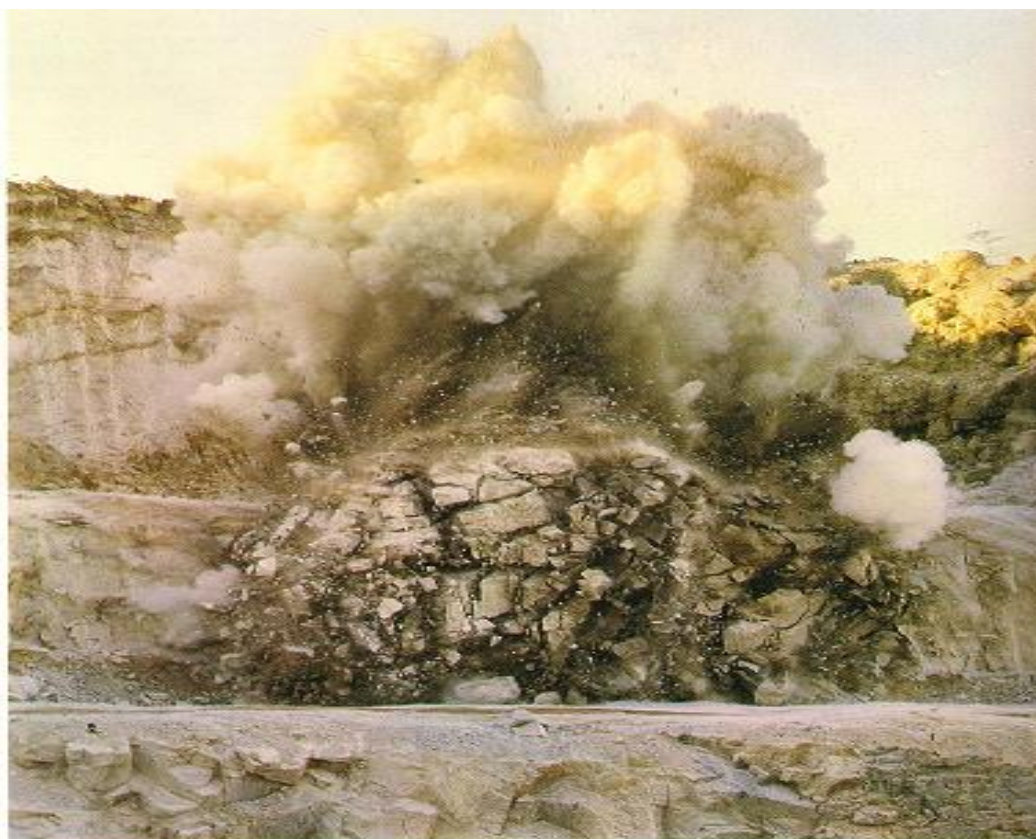
Óxidos nitrosos: (NO, N ₂ O)	5ppm
Monóxido de carbono (CO)	50ppm
Dióxido de carbono (CO ₂)	5000ppm

Por otro lado, durante la detonación de un disparo primario para explotar los yacimientos mineralizados se produce la emisión de gases, bien porque estén contenidos en aquellos minerales que se exploten (como es el caso del grisú en el carbón), o porque se produzca una descomposición del mineral que libere esos gases durante el proceso metalúrgico.

Los gases nocivos producidos por la voladura de rocas, en cuanto a su implicancia sobre la seguridad y salud del personal es importante mencionar que estos según su naturaleza pueden ser: inocuos, irritantes, nocivos o tóxicos, y generan los siguientes riesgos:

- Asfixia, por anoxia, al desplazar al aire.
- Intoxicación, envenenamiento y muerte, según sus características letales.

Estos efectos están condicionados por el tiempo de exposición de la persona y por el nivel de concentración de los gases en el ambiente, que determinan el grado de intoxicación, calificándolo desde leve, notable, severo, grave hasta mortal.



Fuente: International Society of Explosives Engineers

Figura N° 6.2: En la cual se observan los gases producidos por la voladura de rocas.

6.2.4 Presión de aire.

Dicha presión es un impulso que viaja a través de la atmosfera. La mayor cantidad de presión de aire producida por la voladura de rocas tiene una frecuencia de 20 Hertz.

Muchas veces la presión de aire puede causar la vibración de una estructura, etc., etc.

6.2.5 Ruido.

El ruido por la detonación de un disparo primario en minería superficial tiene niveles superiores al de una voladura subterránea, es por ello de suma importancia usar los dispositivos de protección auditiva y el uso de estos son indispensables a partir de ciertos niveles de intensidad acústica. Por tanto, el ruido producido por la voladura de rocas afecta más a los propios trabajadores, ya que la lejanía de las operaciones mineras con respecto a las comunidades aledañas y a los pueblos, hace que desde éstos los ruidos sean imperceptibles o que lleguen muy amortiguados por la distancia.

Al respecto se debe mencionar que el Consejo Nacional del Ambiente se encuentra desarrollando una normativa asociada al tema de ruido, la cual está en la etapa de revisión. En ausencia de una normativa oficial del Perú. En la actualidad se están utilizando estándares internacionales para evaluar los niveles de ruido proyectados y observados. Las normas internacionales se basan en

los procedimientos establecidos en la norma ISO 1996: "Description and Measurement of Environmental Noise".

Por otro lado, se sabe que el nivel de aceleración está definido por la siguiente expresión matemática:

$$N_a = 20 * \text{Log} \left(\frac{a}{a_{ref}} \right) \dots (db) \rightarrow (1)$$

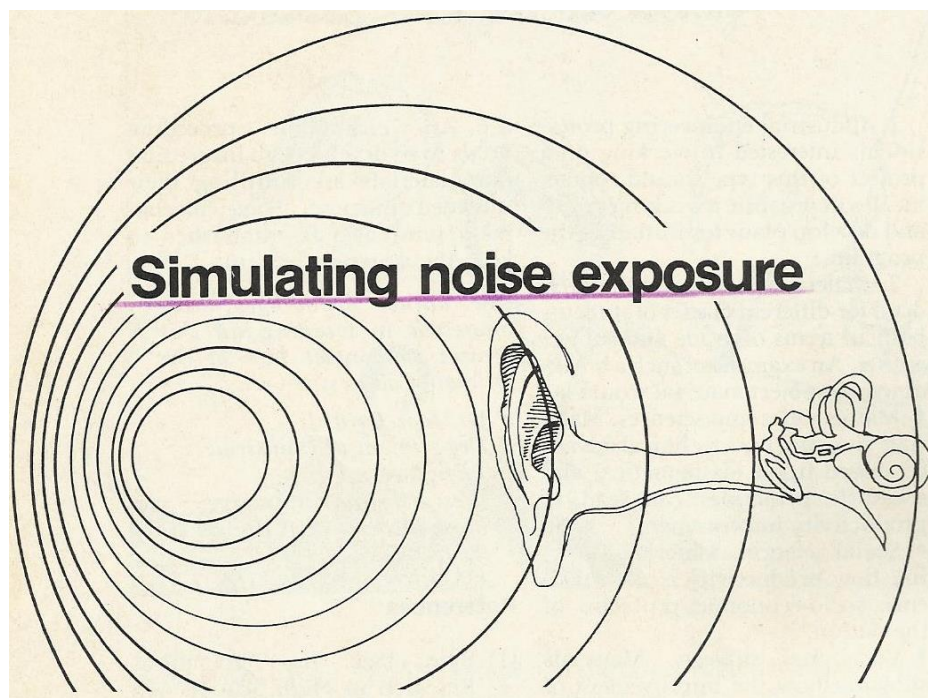
Dónde:

N_a : Nivel de aceleración (db)

a : Aceleración medida (m/seg²)

a_{ref} : Aceleración referencial

$a_{ref} = 10^{-6}$ (m/seg²), etc., etc.



Fuente: International Society of Explosives Engineers

Figura N° 6.3: Se observa la simulación del efecto que causa el ruido producido por la voladura de rocas.

El presente trabajo de investigación tratara solamente del lanzamiento de fragmentos de roca. Se sugiere que se hagan futuras investigaciones para todos y cada uno de los impactos ambientales mencionados anteriormente.

CAPITULO VII

LANZAMIENTO DE FRAGMENTOS DE ROCA.

7.1 Definición

Existen varias definiciones, tales como:

Lanzamiento de fragmentos de roca puede ser definido como un excesivo y/o indeseable proyección de fragmentos de roca o escombros provenientes del disparo primario en minería superficial.

También, es definido como el impacto ambiental más peligroso inducido por la voladura de rocas.

Otros investigadores lo definen como un riesgo potencial que puede causar la muerte, lesiones muy graves y daños a las propiedades aledañas a la zona del disparo.

También, puede ser definido como el lanzamiento excesivo de los fragmentos de roca que sobrepasan los límites de las propiedades donde se llevan a cabo las operaciones mineras, etc., etc.

Por otro lado, todos los investigadores están de acuerdo que el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca han causado a nivel mundial muchos

accidentes fatales, daños al equipo minero, daños a las diversas estructuras, etc., etc.

7.2 Formulación del problema.

Las proyecciones excesivas del lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la operación minera unitaria de voladura de rocas en minería superficial deben ser calculadas, monitoreadas, controladas y/o evitadas.

7.3 Hipótesis

Para dar solución al problema planteado y/o formulado se hará una revisión general de todos los modelos matemáticos planteados a nivel mundial relacionados con este tópico, y luego se elegirá el modelo matemático más adecuado que proporcione resultados confiables desde el punto de vista técnico-económicamente factible y viable.

7.4 Metodología de la investigación aplicada.

La metodología de la investigación de la referencia será en primer lugar llevando a cabo el desarrollo matemático para calcular las distancias del lanzamiento de fragmentos de roca inducido por la voladura que pueden estar en un rango entre cero, para un disparo bien controlado hasta aproximadamente 1609.347m para un disparo mal confinado en roca competente.

Por otro lado, todos los investigadores están de acuerdo que el control del lanzamiento de fragmentos de roca está gobernado por la velocidad inicial

producida por el disparo y el rango que puede ser relacionado a esta proyección por la siguiente formula de la balística.

$$Rango : R = \frac{V^2}{g} Sen 2\alpha \rightarrow (1)$$

Dónde:

R: Rango (m)

V: Velocidad superficial (m/seg)

g: 9.8 m/seg².

α : El Angulo formado entre la normal hacia el taladro y la horizontal.

Respecto a macizos rocosos fracturados, la formula anterior dará resultados aceptables. También, se debe mencionar que varios investigadores han demostrado que para un taladro que es iniciado y que tiene una elevación cero; en este caso el rango será máximo cuando $\alpha = 45^\circ$.

Para el caso que se inicien varios taladros en forma secuencial y diferentes valores de α , y dichos taladros tengan una altura H con respecto al piso del banco; en este caso la envolvente es una parábola; y entonces el rango estará representado por una envolvente parabólica, y se representa por la siguiente expresión matemática:

$$R^2 = \frac{2V_1^2}{g} \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right) \rightarrow (2)$$

Dónde:

R: Rango (m)

V_1 : Velocidad inicial (m/seg.)

H: Altura del banco (m)

$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$.

Donde se puede apreciar que si los burdens son muy pequeños (mal calculados), se producirá un incremento sustancial de los rangos.

La velocidad inicial (M/sec.) puede ser planteada versus el burden escalado ($B/W^{1/2}$) (ft/Lbs^{1/2})

Donde B es el burden en pies y W es el peso de la mezcla explosiva comercial (peso/pie) por retardo.

Entonces, los diferentes rangos pueden ser calculados para diferentes valores de $B/W^{1/2}$ y H.

Luego, los valores obtenidos pueden ser usados para recomendar distancias seguras que deben ser usadas en las diferentes operaciones mineras superficiales.

7.5 Justificación de la investigación.

Por los accidentes fatales reportados tanto a nivel nacional como internacional, y los daños causados a estructuras como plantas, oficinas, talleres, etc., causados por el lanzamiento de fragmentos de roca inducido

por la voladura, está más que suficiente justificado llevar a cabo la presente investigación.

7.6 Plan de trabajo.

Para llevar a cabo la presente investigación el plan de trabajo se ha realizado de la siguiente forma:

7.6.1 Cronograma de actividades.

El cronograma de actividades de la referencia se muestra en la siguiente tabla I.

Tabla 1. Cronograma de actividades.

Actividades	Meses					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						

7.6.1.1 Descripción de actividades.

1. Revisión de toda la información relacionada con el tema de tesis, especialmente de los modelos matemáticos postulados a nivel mundial para calcular la distancia máxima alcanzada por los fragmentos de roca inducidos por la voladura. También, hacer una revisión estadística de los accidentes fatales y los daños causados a las diferentes estructuras, tales como: Plantas, talleres, oficinas, etc. Causados por este impacto ambiental producido por la voladura de rocas.

2. Identificación, análisis e interpretación del modelo matemático más adecuado, para ser usado para calcular la distancia máxima permisible que puedan alcanzar los fragmentos de roca mencionados anteriormente.

3 y 4 Desarrollo matemático del proceso de lanzamiento de fragmentos de roca; lo cual implica considerar aspectos de la balística interna; la cual estudia las etapas iniciales del lanzamiento dentro del macizo rocoso durante el cual el fragmento de roca obtiene una velocidad máxima de proyección, la balística externa comprende el estudio del proceso del lanzamiento referente a la última etapa; lo que representa la proyección de fragmentos de roca propiamente dichos.

Identificación, análisis y discusión de las posibles causas del excesivo lanzamiento de fragmentos de roca, que la mayoría de investigadores están de acuerdo que son las siguientes:

- Geo-estructurales
- Reflexión y refracción de ondas sísmicas
- Mal diseño de las mallas de perforación y voladura
- Altas concentraciones de carga
- Inadecuada selección de la mezcla explosiva comercial usada
- Inadecuadas conexiones y secuencia de salida
- Uso de retardos no adecuados
- De iniciación, etc., etc.

5. Monitoreos de las aplicaciones de campo usando el modelo matemático seleccionado.

6. Interpretación, análisis, evaluación y discusión de resultados.

- Medidas de control, mitigación y prevención.
- Conclusiones, recomendaciones y bibliografía.
- Elaboración de la tesis, etc., etc.

7.7 Causas.

Las causas del excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducido por la voladura entre otras son las siguientes:

7.7.1 Geo-estructurales.

La mayoría de investigadores a nivel mundial están de acuerdo que la disminución de la resistencia del macizo rocoso debido a la presencia de fallas geológicas, zonas de contactos y/o presencia de diaclasas,

rugosidades, etc., es una de las principales causas del excesivo lanzamiento de fragmentos de roca.

Por otro lado, aunque las estructuras geológicas sean similares dentro de la zona del disparo, se sabe que las estructuras geológicas dentro del macizo rocoso varían en forma aleatoria.

7.7.2 Reflexión y refracción de ondas sísmicas producidas por la detonación de una carga explosiva comercial.

Por lo general, en los macizos rocosos donde se llevan a cabo las operaciones mineras unitarias de voladura de rocas en minería superficial, no son homogéneos y están constituidos por estratos de diferentes composiciones litológicas, espesores, densidades, etc.; es por esta razón que los frentes de ondas sísmicas generadas por las voladuras se rigen en este caso por las leyes básicas de la reflexión y refracción, ley de Snell y los principios de Huy Gens. Estos principios por lo menos contribuirán en la práctica para poder clarificar la información usada para la evaluación y la confiabilidad de los métodos que se emplean para evaluar los resultados obtenidos.

REFRACCION DE ONDAS SISMICAS

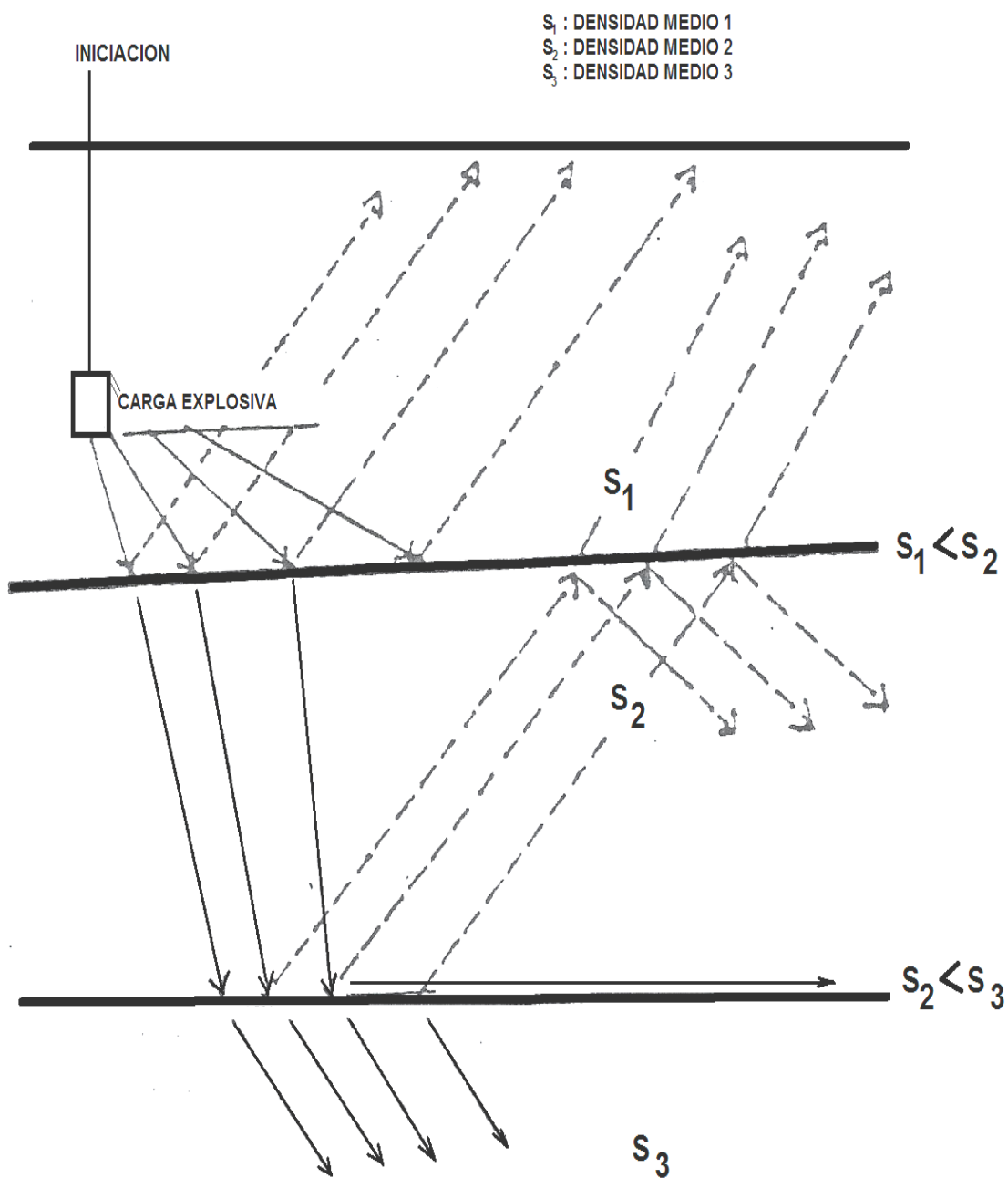


Figura N° 7.1: Muestra la refracción de ondas sísmicas.

REFLEXION DE ONDAS SISMICAS

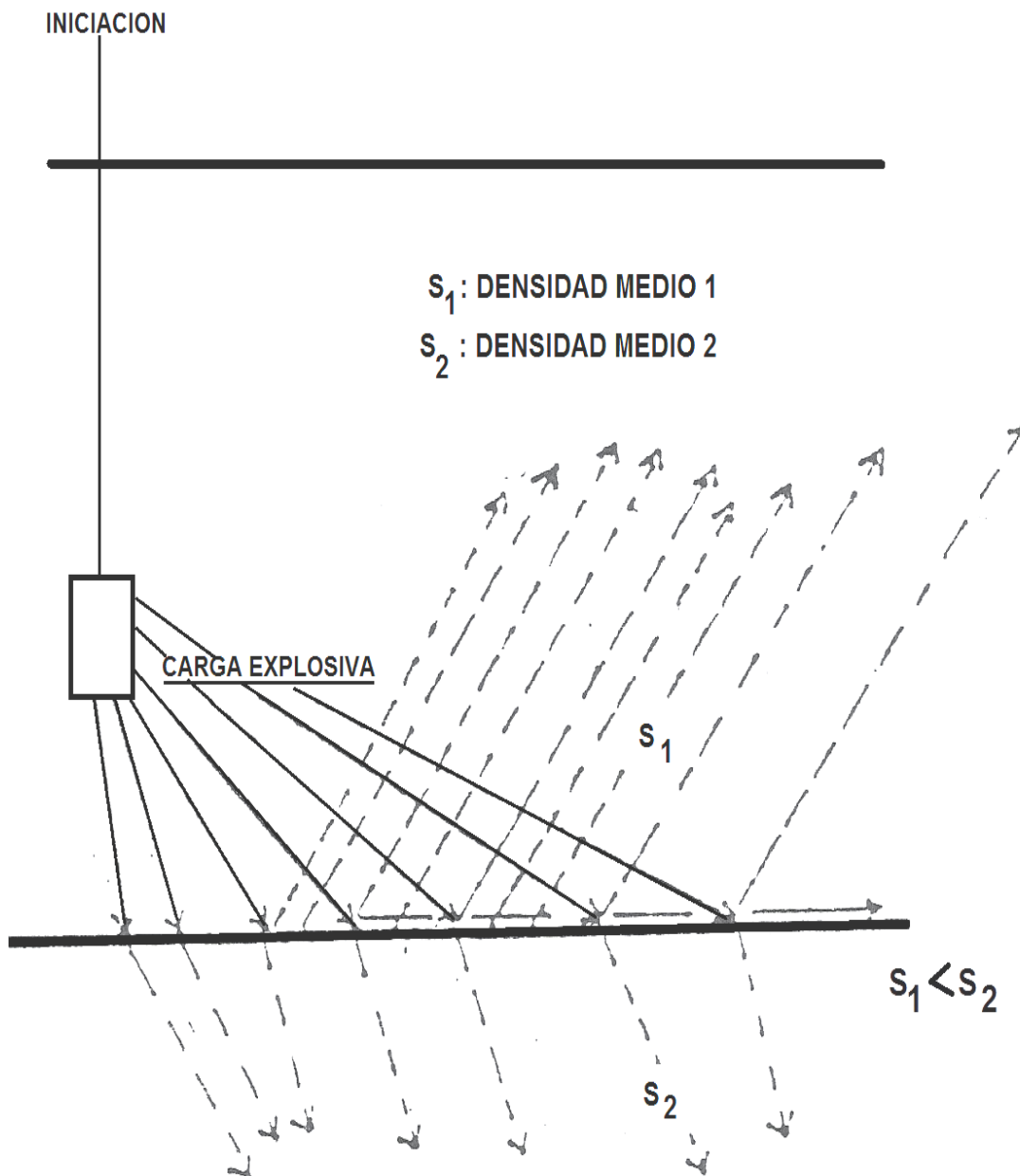


Figura N° 7.2: Muestra la reflexión de ondas sísmicas.

CAPITULO VIII

REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MODELOS MATEMÁTICOS POSTULADOS PARA CALCULAR LA DISTANCIA MÁXIMA DEL LANZAMIENTO DE FRAGMENTOS DE ROCA INDUCIDOS POR LA VOLADURA.

8.1 Introducción

Como este impacto ambiental producido por la voladura de rocas es sumamente peligroso, y puede causar daños personales hasta la muerte, así como daños a las estructuras de las diversas instalaciones de las compañías mineras, entonces varios investigadores a nivel mundial han postulado una serie de modelos matemáticos para calcular la distancia máxima mencionada anteriormente.

8.2 Modelo matemático postulado por Lunderborg y Persson de la SDEREFO.

Los investigadores mencionados anteriormente en el año 2005 postularon este modelo que justamente sirve para calcular la máxima distancia alcanzada por un fragmento de roca originado en el momento de la detonación de una mezcla explosiva comercial cargada dentro de un taladro, y este modelo es el siguiente.

$$V_i = \frac{10BH\phi(2600)}{F_z - \rho_r} \rightarrow (1)$$

Dónde:

V_i : Velocidad inicial (m/seg.)

$BH\phi$: Diámetro del taladro (pulg.)

F_z : Tamaño de los fragmentos de roca (m)

ρ_r : Densidad de la roca (Kg/m^3)

Por otro lado, usando el modelo matemático anterior y algunas fórmulas de la balística, y sobre todo teniendo en cuenta que $V_i \times F_z \times \rho_r$ dependen del diámetro del taladro ($BH\phi$), dedujeron que para calcular los alcances máximos de las proyecciones, se puede usar la siguiente expresión matemática:

$$R_{Max} = 260(BH\phi)^{2/3} \rightarrow (2)$$

El diámetro de los fragmentos de roca puede ser calculado usando la siguiente expresión matemática:

$$F_z = 0.1(BH\phi)^{2/3} \rightarrow (3)$$

8.2.1 Desarrollo matemático de este modelo.

El desarrollo de la referencia tomando en cuenta los conceptos básicos de la balística interna y externa, y empleando los datos de campo que se muestran en la figura N° 9.1, se desarrolló dicho modelo matemático.

8.3 Modelo matemático de A. Bauer, Et.Al.

8.3.1 Introducción

Para evitar confusiones, este investigador y su equipo de trabajo define al término lanzamiento de fragmentos de roca, de la siguiente manera:

Existen dos zonas del lanzamiento de fragmentos de roca, las cuales pueden ser denominadas:

- Normales y,
- Excesivas.

Las zonas normales se refieren a las áreas o zonas donde el lanzamiento de fragmentos de roca se espera que ocurran. Esta zona es la zona desde la cual el personal debe ser evacuado antes de la voladura, y la cual debe ser protegida durante el disparo.

La zona de excesivo lanzamiento de fragmentos de roca es el área más lejana a la zona protegida, donde normalmente dichos fragmentos de roca no deben llegar.

Los fragmentos de roca que llegan hasta esta área es el resultado de prácticas de voladura inadecuadas y/o estructuras geológicas no detectadas; lo que ocasionara la proyección de fragmentos de roca a excesivas distancias que no han sido planificadas.

Justamente, de este tipo de lanzamiento de fragmentos de roca se trata la presente investigación, de lo contrario el presente trabajo de investigación no tendría razón de ser.

Se debe mencionar que en 1988 "The mine safety and health administration" publicó un reporte donde se mencionaba acerca de 19 accidentes fatales. También, se debe mencionar que "The MSHA" reportó y describió accidentes fatales y daños al equipo minero, tanto en zonas normales como en zonas excesivas donde los disparos primarios se llevaron a cabo.

Fletcher et al en 1978 y 1984 reportó que ocurrieron 45 accidentes producidos por el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca solamente en minería superficial, lo que resultó en lesiones y/o muertes.

Las zonas normales de lanzamientos de fragmentos de roca pueden ser pre determinadas, teniendo criterios muy claros de diseño y observando los resultados de la voladura en el área donde se llevan a cabo las operaciones mineras superficiales.

El lanzamiento de fragmentos de roca que alcancen zonas superiores a las zonas normales no deben producirse, si el disparo primario es adecuadamente diseñado e implementado, y las estructuras geológicas son muy bien conocidas, interpretadas y entendidas, previamente al disparo primario.

8.3.2 Descripción de la predicción del lanzamiento de fragmentos de roca.

8.3.2.1 Movimiento de un proyectil.

Estos investigadores opinan que, en primer lugar se debe examinar los parámetros que afectan la ruta que siguen fragmentos de roca que son lanzados en el momento que es iniciado un disparo primario en minería superficial.

Para esta interpretación, el punto de partida es tomado en el momento cuando el macizo rocoso justo ha sido fragmentado y comienzan a ser lanzados fuera de la zona del disparo. Los fragmentos de roca viajarán de acuerdo a los principios del movimiento de elementos lanzados por un proyectil describiendo una ruta parabólica.

Para desarrollar este modelo matemático se asumió que un fragmento se mueve libremente y que no inter-actúa con otros fragmentos de roca, los cuales podrían alterar su velocidad y su trayectoria, y reducir las distancias de lanzamiento. Similar al caso del movimiento de un elemento arrojado por un proyectil, la proyección de los fragmentos de roca es descrita por la velocidad inicial (V_i) de los fragmentos y el ángulo al cual estos salen de la cara libre o de la parte superior del disparo.

Por otro lado, para fragmentos de roca lanzados a distancias por encima del piso, la altura de los fragmentos de roca por encima del piso también afectaran la distancia lanzada y la altura máxima que

los fragmentos de roca alcanzaran. Según los investigadores Alan Bauer y su equipo de trabajo, dos expresiones matemáticas deben ser derivadas para calcular la distancia alcanzada por los fragmentos de roca inducidos por la voladura.

Estos investigadores consideran que la resistencia del aire, la dirección del viento y su velocidad para fines prácticos no deben ser tomadas en cuenta. Estas aseveraciones son muy razonables dado que los fragmentos de roca normalmente alcanzan distancias menores a 9,5m y máximo estas distancias se incrementan unos pocos cientos de metros.

Las expresiones matemáticas que estos investigadores propusieron, fueron las siguientes:

$$R_1 = \frac{V_0^2 \text{Sen } 2\theta}{g} \rightarrow (1)$$

$$R_2 = V_0 \text{Cos } \theta \left[\frac{V_0 \text{Sen } \theta \sqrt{(V_0 \text{Sen } \theta)^2 + 2gH}}{g} \right] \rightarrow (2)$$

Dónde:

R_1 : Distancia alcanzada por los fragmentos de roca a lo largo de una línea horizontal a la flexación original de la roca en la cara libre del banco.

R_2 : Distancia total alcanzada por un fragmento de roca lanzado desde el disparo tomando en cuenta su altura por encima del piso del pit.

V_0 : Velocidad inicial de los fragmentos de roca.

θ : Angulo de partida con respecto a la horizontal

g : Constante de la gravedad, 9.8 m/seg².

Por lo tanto, la distancia horizontal alcanzada por los fragmentos de roca depende principalmente de la velocidad inicial (V_0) de los fragmentos de roca y del ángulo por encima de la horizontal a la cual dichos fragmentos de roca son lanzados. Se ha demostrado que la distancia máxima a ser alcanzada para un ángulo de 45° y se debe asumir que para una velocidad inicial dada (V_0), algunos fragmentos de roca serán lanzados formando este ángulo con la horizontal.

El peso de los fragmentos de roca no entra directamente en estas ecuaciones. Sin embargo, para una fuerza aplicada cualquiera, los fragmentos de roca más pequeños tendrán una aceleración mayor desde que la aceleración es equivalente a la fuerza aplicada dividida entre la masa de los fragmentos de roca.

Por esta razón, sería posible encontrar fragmentos de roca más pequeños a distancias mayores de la ubicación del disparo. También, estos investigadores postularon que la altura máxima a la cual el lanzamiento de los fragmentos de roca se elevara, puede también ser calculada usando las siguientes expresiones matemáticas:

$$h_1 = \frac{V_0^2 \text{ Sen}^2 \theta}{2g} \rightarrow \quad (3)$$

$$h_2 = \frac{V_0^2 \text{Sen}^2 \theta}{2g} + H \rightarrow \quad (4)$$

Dónde:

h_1 : Altura máxima a lo largo del rango R_1 (M)

h_2 : Altura máxima a lo largo del rango R_2 (M).

Por otro lado, para calcular la altura hasta la cual los fragmentos de roca han sido lanzados en cualquier punto de la trayectoria que siguen dichos fragmentos, la siguiente expresión matemática puede ser usada.

$$h_1 = R_1 \left[\text{Tan} \theta - \frac{0.5 g R_1}{V_0^2 \text{Cos}^2 \theta} \right] \rightarrow \quad (5)$$

Dónde:

h_1 : La altura alcanzada a cualquier distancia horizontal dada, medida y con relación a la elevación de los fragmentos de roca.

R_1 : La distancia horizontal a lo largo de la trayectoria que describen los fragmentos de roca.

Finalmente, el tiempo que uno de los fragmentos de roca tomara para proyectarse a una cierta distancia horizontal dada, puede ser calculada usando la siguiente expresión matemática:

$$t = \frac{X}{V_0 \cos \theta} \rightarrow \quad (6)$$

Donde

t: El tiempo total de proyección (Seg.)

X: La distancia horizontal alcanzada.

Estos investigadores para desarrollar su modelo matemático usaron los conceptos que se muestran en la siguiente figura N° 8.1.

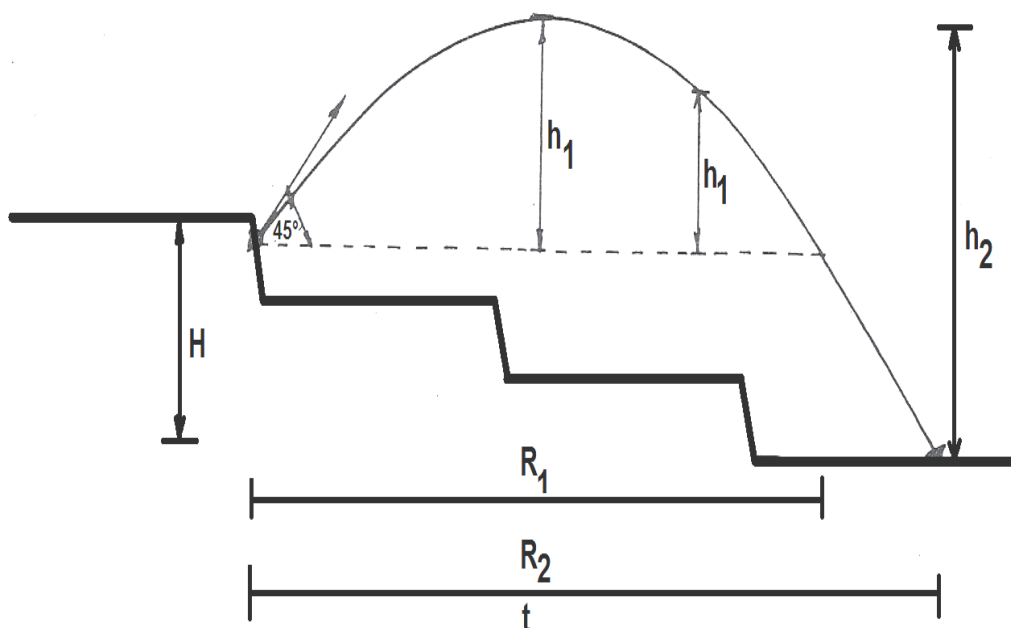


Figura N° 8.1: Muestra todos los parámetros que Bauer et. al., tomaron en cuenta para desarrollar su modelo matemático.

Por otro lado, en el caso de bancos angostos en minería superficial o canteras los fragmentos de roca pueden continuar cayendo por debajo del piso de dichas operaciones mineras superficiales.

Se debe mencionar que haciendo una búsqueda muy minuciosa, se debe mencionar que existen otros modelos matemáticos postulados para calcular la proyección máxima de los fragmentos de roca inducidos por la voladura, pero, para desarrollar el presente trabajo de tesis solamente se usara los modelos descritos y explicados anteriormente.

CAPITULO IX

MONITOREO DE LAS APLICACIONES DE CAMPO.

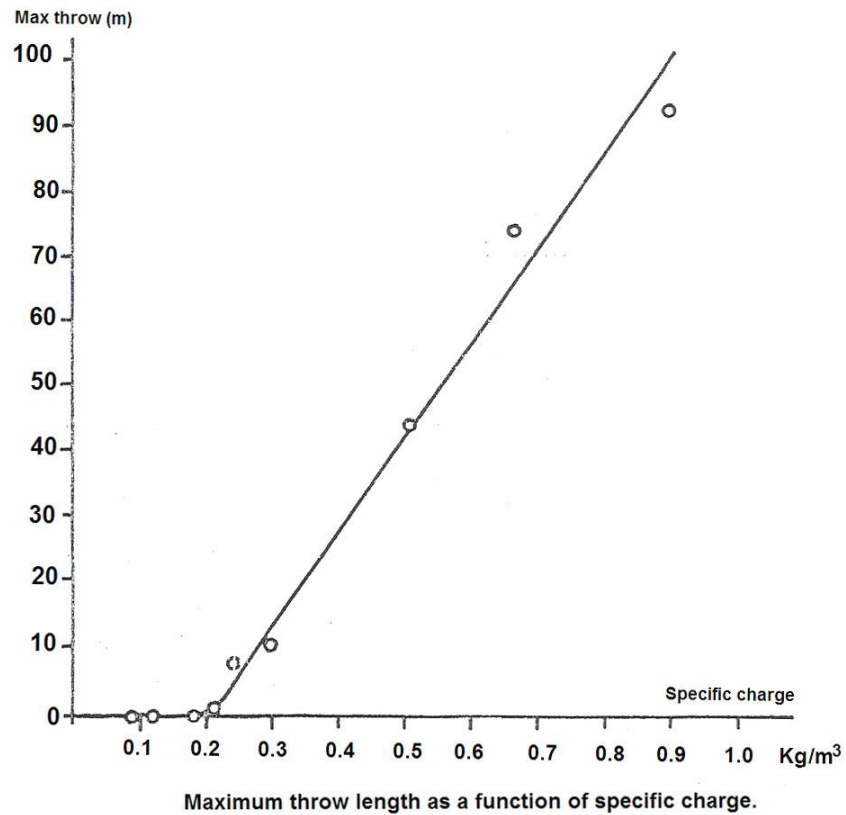
9.1 Introducción.

El monitoreo de las diversas aplicaciones de la referencia y/o caso estudio para operaciones mineras superficiales se presentan tomando en cuenta, el modelo matemático que se usó para dar solución a dichos casos-estudio.

9.2 Caso-estudio solucionados usando el modelo matemático de la SDEREF0.

Los investigadores de la SDEREF0 entre los cuales se pueden mencionar a: Ladegard, Persen, Persson and Holmberg condujeron una serie de casos-estudio en voladura de bancos. Estos investigadores usaron cámaras fotográficas de alta velocidad para estudiar el movimiento de los fragmentos de roca. Después de cada disparo, las distancias desde cada disparo y los ángulos que formaban los fragmentos de roca con la horizontal fueron determinados.

Las máximas distancias que fueron determinadas en estos disparos de los casos-estudio son ploteados versus las cargas específicas, como se muestra en la siguiente figura 9.1.



Fuente: Swedish Detonic Research Foundation

Figura N° 9.1: Muestra la distancia de la proyección máxima en función de la carga específica.

9.3 Lanzamiento de fragmentos de roca del frente de una cara libre.

Lundborg en 1981 desarrollo una fórmula para predecir el lanzamiento de fragmentos de roca y el tamaño de dichos fragmentos.

Dicho modelo matemático, es el resultado de una serie de casos-estudio llevados a cabo experimentalmente.

De acuerdo a este investigador, usando un factor de carga de:

$L.F > 0.2 \text{ Kg/m}^3$, el máximo lanzamiento de fragmentos de roca se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_{Max} = 143 d (q - 0.2) \rightarrow (1)$$

Dónde:

L_{max} = Lanzamiento de fragmentos de roca (m)

q : Carga específica o factor de carga (Kg/m^3)

d : Diámetro del taladro (pulgadas)

Por otro lado, el tamaño de los fragmentos de roca lanzados puede ser determinado por:

$$\phi = 0.1 d^{2/3} \rightarrow (2)$$

Dónde:

ϕ : Diámetro del fragmento de roca (m)

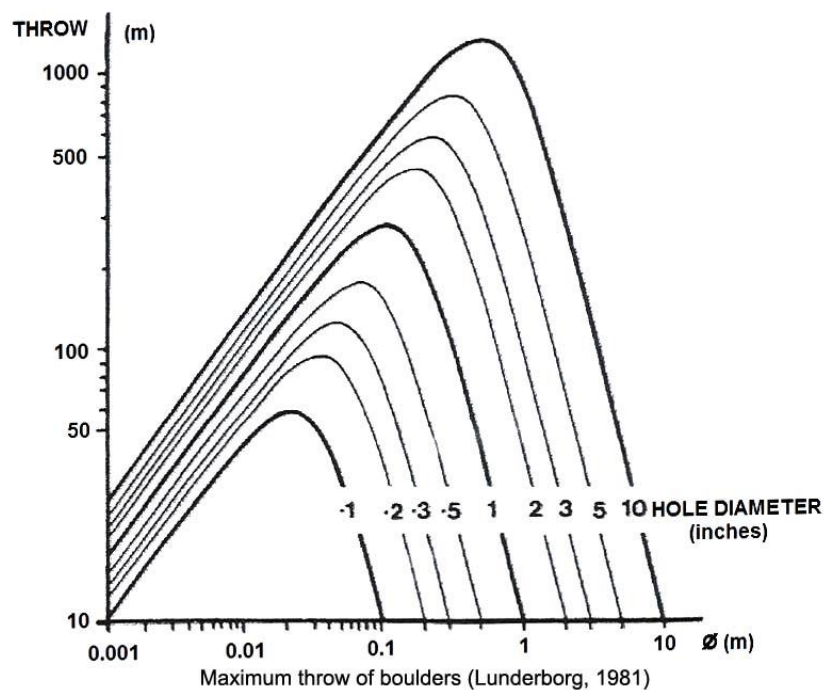
d: Diámetro del taladro (pulgadas)

Este investigador introduce los conceptos de aerodinámica (forma del fragmentos, suavidad de este y resistencia del aire, etc., etc.).

Luego, concluye que la máxima distancia del lanzamiento de los fragmentos de roca estará dada por la siguiente expresión matemática:

$$L_{Max} = 260 d^{2/3} (1)$$

Todos los resultados de los estudios de campo realizados por este investigador se muestran en la figura 9.2.



Fuente: Swedish Detonic Research Foundation

Figura N° 9.2: Muestra las distancias de las proyecciones máximas del lanzamiento de fragmentos de roca (Lunderborg 1981).

Se puede apreciar, que las investigaciones de campo de Lunderborg sirven para demostrar que la distancia que un fragmento de roca puede ser proyectado de cualquier operación minera de voladura de rocas en minería superficial; para lo cual se debe tener presente la importancia que tiene llevar a cabo un control muy estricto en todos los procedimientos y las etapas del diseño de los disparos primarios; carguío de los taladros; para lo cual se puede usar las curvas mostradas en la figura anterior, para determinar zonas seguras teniendo en cuenta los parámetros que se muestran en la figura anterior.

9.4 Caso-estudio solucionados usando el modelo matemático de A. Bauer Et. Al.

La metodología usada por este investigador y su equipo de trabajo ha demostrado que es muy útil porque combina la teoría de la proyección general para determinar la distancia máxima alcanzada por el lanzamiento de los fragmentos de roca. Esta teoría está basada en las condiciones específicas de confinamiento.

Se sabe, que se han llevado a cabo recientes investigaciones y estas han confirmado la validez del modelo matemático postulado por A. Bauer et. al., como se dijo anteriormente el modelo matemático postulado por estos investigadores para calcular la máxima proyección horizontal de los fragmentos de roca inducidos por la voladura, hasta un punto de la misma elevación está dada por la siguiente expresión matemática:

$$L_{Max} = \frac{V_0^2 \text{Sen } 2\theta_0}{g} \rightarrow \quad (2)$$

Dónde:

L_{max} : Distancia horizontal máxima alcanzada (m)

V_0 : Velocidad inicial (m/seg.)

θ_0 : Angulo inicial (grados)

g : Constante gravitacional (9.8 m/seg²)

Se puede apreciar que:

La distancia del lanzamiento de fragmentos de roca será máxima cuando:

$2\theta_0 = 90^\circ$, o se tendrá que $\theta_0 = 45^\circ$, y por lo tanto:

$$L_{Max} = \frac{V_0^2}{g} \rightarrow \quad (3)$$

Por otro lado, si el macizo rocoso comienza a levantarse, en ese caso la proyección del lanzamiento de fragmentos de roca será menor.

Pero, si el macizo rocoso está ubicado por debajo del lanzamiento in-situ, en este caso las proyecciones serán mayores.

Los datos y los resultados del caso-estudio llevado a cabo por A. Bauer et al, se muestran en la siguiente figura.

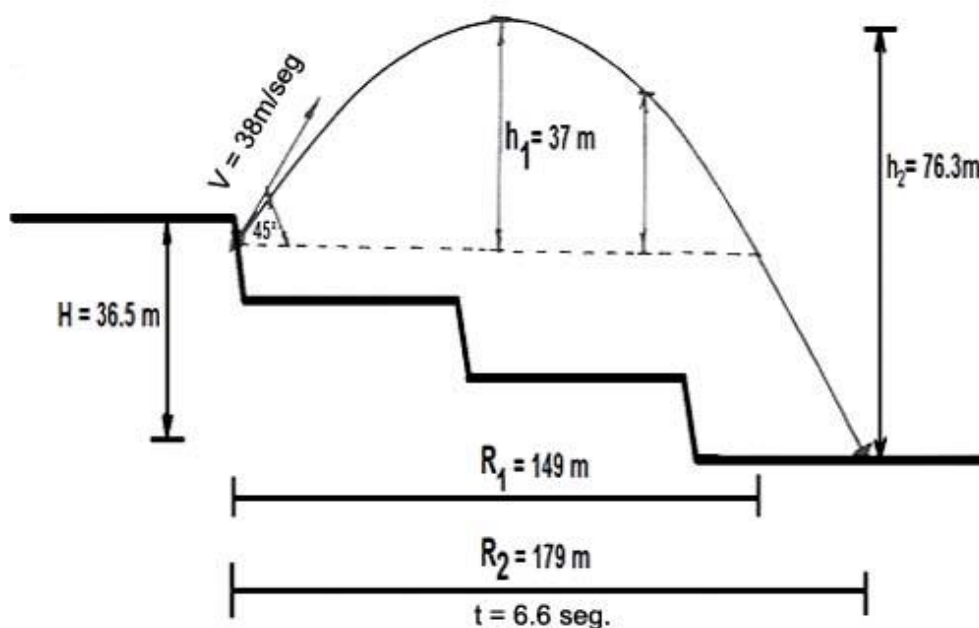


Figura N° 9.3: Muestra la dirección de los fragmentos de roca para una velocidad inicial de: $V_0 = 38 \text{ m/seg.}$ (Bauer et. al)

Se debe mencionar que existen modelos matemáticos más sofisticados, pero se cree que para propósitos prácticos de las operaciones de voladura de rocas en minería superficial los dos modelos matemáticos explicados

anteriormente son los suficientemente confiables para la presente investigación.

Los resultados de los diversos casos-estudio llevados a cabo, por estos investigadores se muestran en la tabla N° II.

Tabla 2: Muestra el resumen de los resultados obtenidos por A. Bauer y su equipo de trabajo, tomando en cuenta las condiciones de confinamiento.

Tipo de roca	Diámetro del taladro	Burden	Burden real	Factor de carga	Taco	Profundidad del taladro	Lanzamiento máximo	Factor
	(mm)	(m)	(m)	(kg/m ³)	(m)	(m)	(m)	K
1	102	3.0	2.6	11	5.0	16.5	140	27
2	89	2.8	1.43	8.1	3.0	17.5	440	27
3	203	5.0		35.6	1.6	2.2	295	13.5

Los resultados mostrados en la tabla anterior indican que usando dicho modelo, se obtienen resultados confiables.

Así por ejemplo, para un factor $K = 13.5$ se obtuvo una proyección de lanzamiento de 295m en rocas suaves, y para $K = 27$, se obtuvieron proyecciones de 140m y 440m respectivamente para rocas competentes y duras, etc., etc.

Por otro lado, se debe mencionar que a nivel nacional no se ha podido encontrar ningún modelo matemático desarrollado y aplicado para calcular las distancias máximas del lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura de rocas en minería superficial.

CAPITULO X

INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

10.1 Introducción

Interpretando y analizando los resultados de los diferentes casos-estudio solucionados usando, tanto por el modelo matemático de la SDEREFO como el de Bauer et. al.; se puede afirmar lo siguiente:

10.2 Resultados de los casos-estudio llevados a cabo en el campo por Lunderborg et. al.

Los investigadores de la referencia en 1973, 1974, 1975 y 1984 dieron como resultados que la máxima proyección del lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura (L_{Max}) en función del diámetro del taladro (d) y la carga específica (q) se muestra en la figura N° 10.1.

Por otro lado, Lunderborg et al en 1981 llevaron a cabo una serie de simulaciones con la ayuda de la computadora, de las cuales obtuvieron que las proyecciones máximas de los fragmentos de roca podían ser determinadas teniendo en cuenta una gravedad específica de 2.6 y dedujeron las siguientes relaciones matemáticas:

$$L_{Max} = 260D^{2/3} \rightarrow \quad (1)$$

$$\phi = 0.1(D)^{2/3} \rightarrow \quad (2)$$

Dónde:

D: Diámetro del taladro (pulgadas)

ϕ : Diámetro del fragmento de roca (m)

Entonces, de acuerdo a los estudios de campo que llevaron a cabo obtuvieron los siguientes resultados.

$$L_{Max} = 260(10)^{2/3} = 1\ 207m$$

$$\therefore L_{Max} = 1\ 207m$$

El diámetro del fragmento de roca que se obtuvo en ese caso-estudio fue:

$$\phi = 0.1(10)^{2/3} = 0.5m$$

$$\therefore \phi \approx 0.5m$$

Por otro lado, se debe mencionar que los resultados de los diferentes casos-estudio que llevaron a cabo los investigadores de la SDERFO usando el modelo matemático de simulación, se muestra en la figura N° 9.2.

Evaluando y analizando el modelo matemático de la SDERFO, se puede apreciar que es un modelo matemático fácil de aplicar para calcular la

máxima proyección alcanzada por los fragmentos de roca inducidos por la voladura.

Pero, se podría mencionar que para obtener un grado de confiabilidad aceptable de los resultados obtenidos se tendría que llevar a cabo una serie de simulaciones de las diferentes aplicaciones de campo.

También, se puede apreciar que en la figura N° 10.1 con una carga específica de $q = 0.2 \text{ Kg/m}^3$, no habrá ninguna proyección de fragmentos de roca, etc., etc.

Se debe mencionar que Lunderborg demostró que a distancias mayores a rangos entre 200 – 300 m, el tamaño y forma del fragmento de roca tienen mucha importancia en las máximas proyecciones ya que estos factores son muy significativos, ya que dichos factores influirían en las máximas proyecciones que los fragmentos de roca alcanzarán.

10.3 Resultados de los casos-estudio llevados a cabo por A. Bauer Et.Al.

El modelo matemático de la referencia para calcular la distancia máxima del lanzamiento de los fragmentos inducidos por la voladura toma en cuenta la teoría de la trayectoria general, que se basa en las condiciones del confinamiento específico.

Se debe mencionar que el modelo matemático postulado por Bauer et. al., es el más usado a nivel mundial; para calcular en forma sencilla y con un alto grado de confiabilidad las proyecciones de los fragmentos de roca inducidos por la voladura.

Por otro lado, analizando los resultados obtenidos usando este modelo matemático, si el fragmento de roca se levanta desde el piso del banco la proyección alcanzada por dicho fragmento será menor.

También, si el fragmento de roca desciende por debajo del piso del banco; la proyección alcanzada por dicho fragmento será mayor, tal como se muestra en la figura N° 9.2.

Se debe afirmar que, existen algunos modelos matemáticos más complejos para determinar las proyecciones de los fragmentos de roca a varios puntos de diferentes elevaciones, pero usando el modelo de Bauer et. al., se obtienen resultados con el suficiente grado de confiabilidad para determinar las proyecciones de los fragmentos de roca inducidos por la voladura.

También, se debe enfatizar que la teoría general de las proyecciones no toma en cuenta factores tales como: Formas y dimensiones de los fragmentos, densidad de los fragmentos, resistencia del aire y la velocidad del viento; pero de acuerdo a la metodología usada se tiene resultados confiables.

Bauer et. al., introducen el concepto de que las proyecciones de los fragmentos de roca son función de la velocidad inicial de la cara libre y el burden escalado, este viene hacer el burden dividido entre la raíz cuadrada del peso de la mezcla explosiva comercial por unidad de longitud ($m/Kg^{1/2}$).

Para disparos de producción los rangos normales de las velocidades iniciales de las caras libres están entre 10 a 30 m/seg.

Por otro lado, con rangos de las velocidades iniciales de 100 m/seg. se han reportado varios accidentes personales, daños al equipo minero, lo mismo que a algunas instalaciones ubicadas en los complejos minero-metalúrgicos.

En general, se debe afirmar que con velocidades iniciales menores a 30.5 m/seg., no se presentaran problemas relacionados a las excesivas proyecciones de los fragmentos de roca inducidos por la voladura.

A esta velocidad inicial, se ha demostrado que los fragmentos de roca viajaran 95m antes de retornar a su elevación inicial.

En la mayoría de las minas a tajo abierto las zonas protegidas o seguras determinadas usando los modelos matemáticos expuestos en el presente trabajo de investigación serán mayores que la distancia mencionada anteriormente.

Las distancias de evacuación para el personal de 91.5m se cree que no son adecuadas, y por lo tanto, no son recomendadas.

Al respecto, los investigadores Fletcher and D' Awdrea han discutido un caso donde los fragmentos de roca fueron lanzados a una distancia mayor a 1,143m.

Por otro lado, Fischer reporto un caso en el cual los fragmentos de roca viajaron 762m, en este caso, para un ángulo de $\alpha = 45^\circ$ una velocidad inicial de 85 m/seg., fue requerida para que los fragmentos de roca retornen a su elevación original.

Finalmente, se puede aseverar que las altas velocidades resultan generalmente de algunos problemas originados en el diseño de los disparos y/o las implementaciones de campo, porque en circunstancias normales las velocidades iniciales de los fragmentos son menores a 30.5 m/seg., etc., etc.

CAPITULO XI

MEDIDAS DE CONTROL, MITIGACIÓN Y PREVENCIÓN.

11.1 Introducción

En primer lugar se debe mencionar que los excesivos lanzamientos de fragmentos de roca inducidos por la voladura, deben ser evitados.

Se debe tener en cuenta que al producirse el lanzamiento de fragmentos de roca, estos pueden resultar dañando los equipos mineros, estructuras de las instalaciones del complejo minero-metalúrgico, animales y especialmente a personas, terminando como incidentes o hasta muertes lamentables, lo cual sería una calamidad desde el punto de vista de seguridad para las relaciones públicas y comunitarias en general. Sabiendo, que no hay dinero en el mundo que repare a sus familias la muerte de una persona.

Por lo tanto, la velocidad de los fragmentos de roca lanzados desde el área de la voladura debe ser mantenida por debajo de un valor límite, para asegurar que no se presentara ningún problema con relación a este impacto ambiental.

Esto significa que la operación minera de voladura de rocas en cuanto a minería superficial o en algunas otras construcciones civiles donde se usan

mezclas explosivas comerciales para hacer voladura de rocas, deben ser efectuadas de una manera correcta, cuidadosa y sobre todo previniendo cualquier incidente; esto quiere decir que un control de calidad total y un planeamiento estratégico en todos los procesos que conlleva realizar esta operación de voladura de rocas es fundamental y lo más importante para proteger la vida de las personas, etc.

Un diseño adecuado del disparo y una apropiada implementación de este en las áreas de trabajo son dos conceptos claves y fundamentales para poder controlar las velocidades iniciales de los fragmentos de roca. Mantener a dichos fragmentos dentro de los límites normales y permisibles de la zona de trabajo.

Un tercer parámetro, muy importante es conocer la geología del macizo rocoso, donde se va a llevar a cabo el disparo, de tal manera de poder ajustar el factor de carga para evitar colocar energía en zonas donde esta será no adecuadamente confinada y sobre todo no necesaria.

11.2 Diseño del disparo

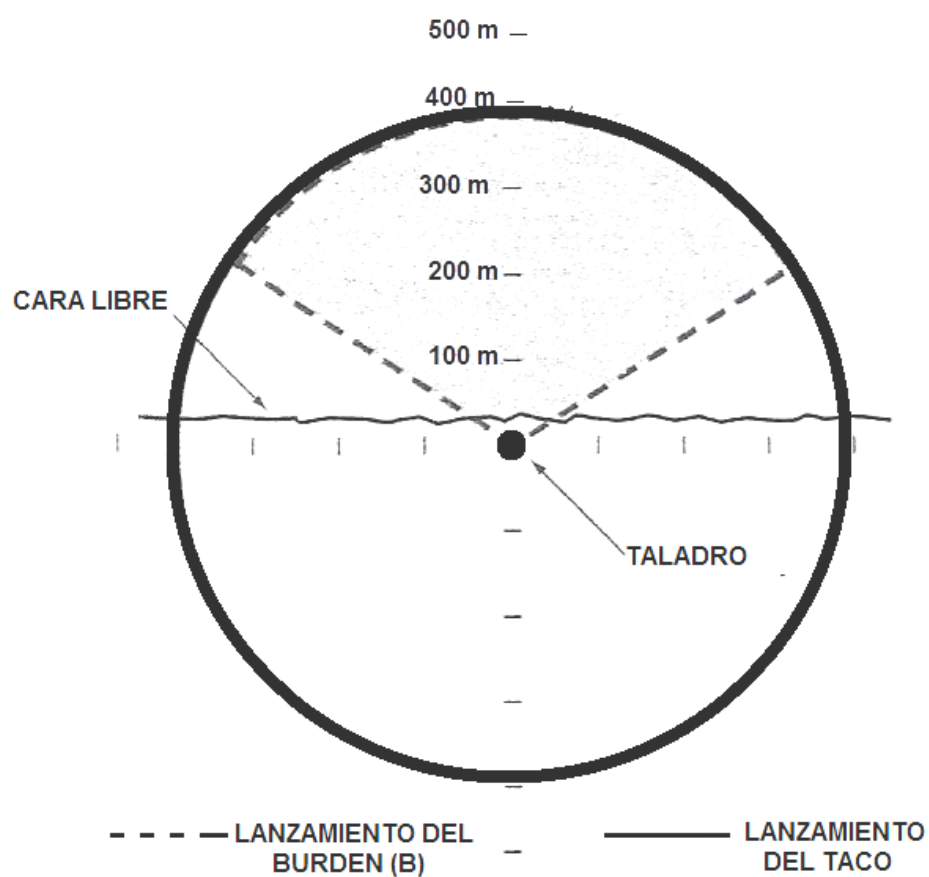
Si el diseño del disparo no es el adecuado; esto conllevará al excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura.

Una de las maneras de evitar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca será teniendo mucho cuidado en todos y cada uno de los elementos de los que consta la operación minera de voladura de rocas.

La iniciación y la secuencia de detonación con los tiempos de retardo, debe ser cuidadosamente chequeada, sobre todo en voladuras de bancos

en minería superficial, con el propósito de maximizar la eficiencia en la voladura de rocas y minimizar los impactos negativos que produce esta operación minera unitaria, especialmente la proyección del lanzamiento de fragmentos de rocas.

Entonces, se puede enfatizar que el control del excesivo lanzamiento de fragmentos de roca debe comenzar en el diseño del disparo.



Fuente: International Society of Explosives Engineers

Figura N° 11.1: Muestra un taladro que es detonado con una mezcla explosiva comercial, la cara libre, el lanzamiento del burden y del taco.

Es por lo tanto, fundamental que las mallas de perforación y voladura (B x S) sean diseñadas adecuadamente para el tipo de macizo rocoso, y para el tipo de mezcla explosiva comercial a ser usada en el disparo primario correspondiente.

Se sabe que, si el burden (B) no es el adecuado la presión de detonación (P_2) generará gases a altas presiones.

En este caso la detonación de la mezcla explosiva comercial producirá menor energía a ser transmitida al macizo rocoso, y por tanto la fragmentación no será la requerida como consecuencia de lo mencionado anteriormente se producirá un excesivo lanzamiento de fragmentos de roca.

Por otro lado, si el burden (B) y el espaciamiento (S) no son diseñados adecuadamente, se podría tener un disparo sobre confinado como consecuencia de esta situación, los vectores de la velocidad serán orientados en una dirección vertical, y consecuentemente el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca se incrementara.

También, se sabe que el espaciamiento (S) nunca debe ser menor que el burden (B).

El burden (B) diseñado adecuadamente permitirá una profundidad de carga escalada que debe ser consistente con el tipo de roca que se está disparando.

Por todo lo mencionado anteriormente, los diseños de un disparo que incorporan un burden (B) que permite un burden escalado significativamente

menor que un burden (B) optimo, para un tipo de roca dado, y para una mezcla explosiva comercial dada.

La probabilidad del incremento de excesivos lanzamientos de roca será muy considerable.

Se debe tener en cuenta que la energía calculada para efectuar un disparo primario, debe ser la necesaria para fragmentar el macizo rocoso, donde se efectúa el disparo primario. En otras palabras el factor de carga (L. F) debe ser muy bien calculado. Porque si el factor de carga (L. F) es muy alto, la probabilidad del incremento del excesivo lanzamiento de fragmentos de roca es mayor.

Por otro lado, las alturas de banco deben ser las adecuadas, para los tamaños de los taladros y las mallas de perforación y voladura a ser usadas.

11.3 Implementación del disparo en el campo.

Se debe tener en cuenta que si el diseño de los disparos ha sido el adecuado, es fundamental que el personal de perforación y voladura implemente el disparo en el campo en forma correcta; de lo contrario no se podrá evitar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura.

La preparación del disparo en el campo comienza con una perforación adecuada y no se debe perforar la sobre perforación en demasía (S/D), evitando desviaciones en los taladros y con la malla de perforación y voladura (B x S) adecuada, usando los modelos matemáticos postulados por

diversos investigadores especialmente para minería a tajo abierto, tales como: Lagenfor's, Pearse, etc., etc.

Por otro lado, el uso de un material adecuado para el taco, es muy importante para poder controlar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca, lo mismo que la longitud adecuada del taco, el control de la dimensión del burden de la primera fila de un disparo es muy importante, si se quiere controlar el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura. Así mismo, se deben hacer algunos ajustes, cuando se está diseñando un disparo primario, porque pueden presentarse algunas irregularidades en la cara libre del banco.

La cara libre del banco debe tener un ángulo menor a 90° , esto podría resultar debido a las estructuras geológicas, fracturamiento hacia atrás o la sobre excavación de la pala. Porque debido al ángulo de la cara libre las concentraciones de las mezclas explosivas comerciales van disminuyendo desde el piso del banco hasta la cresta del mismo.

Por otro lado, una vez que un disparo ha sido diseñado para usar retardos de milisegundos, es imperativo que las conexiones y su implementación en el campo sean efectuadas adecuadamente por el equipo de voladura.

Es muy importante que el jefe del equipo de voladura chequee todo el área del disparo para asegurarse que la secuencia de salida ha sido conectada adecuadamente, evitando los tiros cortados.

Las condiciones de pisos altos deben ser evitados; los disparos de los pisos altos han conducido muchas veces a la generación de accidentes

fatales, tanto en minería superficial como en canteras. Lo más importante para evitar pisos altos es hacer un buen diseño del disparo y una adecuada implementación en el campo.

11.4 Efectos de la geología

En relación a los efectos de la referencia, se debe mencionar que los principales problemas como consecuencia de la geología son macizos rocosos alterados y la presencia de mantos y/o cavidades, contactos abiertos o planos de deslizamiento pueden también presentar ciertos problemas.

En ciertas zonas pueden existir mantos alterados y contactos abiertos, estas condiciones aleatorias del macizo rocoso proveerán direcciones a lo largo, de los cuales los gases inducidos por la detonación de una mezcla explosiva comercial pueden ser expulsados violentamente, lo mismo que aceleran las velocidades de los fragmentos de roca; lo que resultara en mayores distancias de las proyecciones.

Finalmente, se debe mencionar que por más que se ponga mucho cuidado para mapear e incorporar los aspectos geológicos dentro del diseño del disparo, y su respectiva implementación en el campo; aun esto puede ocurrir que condiciones geológicas adversas pueden presentarse en el banco y estas aún no han sido identificadas, porque el macizo rocoso entre si es totalmente aleatorio.

Por lo tanto, la zona evacuada y protegida antes del disparo no debe ubicarse muy cercanamente a la zona normal hasta donde podrían

proyectarse los fragmentos de roca. Siempre se debe calcular y establecer un factor de seguridad en el campo para tomar en cuenta el factor de la incertidumbre.

CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se arriban después de realizar el presente trabajo de investigación son las siguientes:

1. la velocidad inicial (V_i) y el ángulo formado con la horizontal (θ) son los parámetros principales que gobiernan el excesivo lanzamientos de los fragmentos de roca inducidos por la voladura.
2. El ángulo que induce un lanzamiento máximo de los fragmentos de roca es 45° , y se debe suponer que algunos fragmentos de roca periódicamente alcanzaran este ángulo.
3. El macizo rocoso es material no homogéneo que siempre será afectado por las estructuras geológicas. Por lo tanto, será muy difícil calcular las velocidades iniciales exactas (v_i) en cualquier macizo rocoso.

La mayoría de los problemas provocados por el excesivo lanzamiento de los fragmentos de roca están relacionados con proyecciones con velocidades iniciales en un rango de: 30.5 m/seg. a 61 m/seg. Sin embargo, se ha reportado fragmentos de roca con velocidades iniciales (V_i) en exceso de 91.5 m/seg.

4. Se debe mencionar que las principales causas del excesivo lanzamiento de los fragmentos de roca inducidos por la voladura son: Burden y espaciamiento (B x S), el burden de la primera fila de los taladros, las condiciones geológicas del área del disparo, la altura de taco, la exactitud en la perforación, el sobre fracturamiento y las rocas sueltas en la parte superior del banco, el material usado para el taco, excesiva concentración de la mezcla explosiva comercial, las inadecuadas prácticas de carguío de los taladros, la exactitud de los retardos, las conexiones y la secuencia de salida, así como también las condiciones geológicas adversas que no han sido detectadas a tiempo, etc.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones son las siguientes:

1. Todo lo relacionado con la perforación y el carguío de los taladros deben ser efectuados con mucho cuidado y por personal entrenado, capacitado y actualizado; de tal manera, de tener la suficiente confiabilidad de que cada disparo sea cargado, conectado e iniciado de acuerdo a lo diseñado.
2. Cualquier error que pueda conducir a un excesivo lanzamiento de los fragmentos de roca debe ser reportado, e inmediatamente se deben hacer los ajustes necesarios para evitar cualquier incidente que estas situaciones puedan producir.
3. Todo el personal que trabaje en el departamento de perforación y voladura de rocas siempre debe tener en cuenta que cualquier error en el diseño, implementación en el campo, perforación, carguío, conexiones e iniciación afectara no solamente su seguridad, sino también la seguridad de todo el personal y las estructuras que pertenecen a la empresa minero metalúrgica; y tal vez hasta las comunidades aledañas al área de la operación minera.

4. Se debe llevar a cabo un control de calidad total de la operación minera de voladura de rocas, si se quiere evitar accidentes fatales y/o daños a las instalaciones de la compañía.
5. Se ha reportado que los fragmentos de roca que son proyectados a mayores distancias provienen de la región del taco de los diferentes taladros que componen un disparo primario, por lo tanto, dicho elemento debe ser calculado, diseñado y cargado con el mayor cuidado posible.
6. El proceso físico de la proyección de fragmentos de roca inducidos por la voladura, involucra dos campos altamente complejos y aleatorios por la cantidad y naturaleza de las variables que interactúan: La balística interior y la balística exterior; por lo cual se debe seguir investigando, desarrollando, probando e implementando modelos matemáticos para este impacto ambiental negativo, y se deben usar modelos de simulación, relacionados con el excesivo lanzamiento de los fragmentos de roca inducidos por la voladura, tendientes a la minimización y control de los efectos de los mismos.
7. El tamaño de los fragmentos de roca, su distribución en el espacio y su contundencia como agente impactante en el ambiente por acción de las proyecciones, está directamente relacionado con los niveles de fragmentación resultante de una operación de voladura de rocas; por lo que, en la medida en que se implemente y mejoren la aplicación de las metodologías de voladura de rocas, predicción y control de los fragmentos de roca se estará a la vez controlando y minimizando los efectos de dichas proyecciones.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Bauer, A, Burchell S. L & Crosby W A, 1982: "Use of high speed photography in open pit blasting", Mining resource Engineering Ltd, Kingston, Ontario, Canada.
2. Workman J. L & Calder P. N; 1994: Flyrock prediction and control in surface mine blasting" in the Proceedings of the 20th Conference ISEE, Austin, Texas, USA.
3. Stojadinovic, S., Pantovic, R. and Zikic, M. 2011. Prediction of flyrock trajectories for forensic applications using ballistic flight equations, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48(2011):1086-1094.
4. Verkis, H. 2011. Flyrock: A continuing blast safety threat, 37th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique of ISEE, Feb. 6-9, San Diego, 1: 10p.
5. Amini, H., Gholami, R., Monjezi, M., Torabi, S.R. & Zadhesh, J. (2012). Evaluation of flyrock phenomenon due to blasting operation by support vector machine, Neural Computing and Applications, 21: 2077-2085.
6. Bajpayee, T. Rehak, T. Mowrey, G. Ingram, D. (2002). A Summary of Fatal Accidents Due to Flyrock and Lack of Blast Area Security in Surface Mining, 1989 to 1999. Proc. of the 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique of ISEE, Feb. 10-13, Las Vegas, 2:105-118.
7. Davies P.A. (1995). Risk based approach to setting of flyrock 'Danger Zones' for blasting sites, Trans. Inst. Min and Met., May – August 1995: 96-100.
8. Bergeron, M.: "Controles des roches volantes a la mine Jeffrey SEQ", 1986.
9. Roth, J.: " A model for the determination of flayrock range as a function of shot conditions". Bureau of mines, open file report, 77-81.
10. Tamrock: Handbook on surface drilling and blasting, 1984.
11. Lundborg , N. (1974). The hazards of fly rock in rock blasting, Swedish Detonic Research Foundation, Report DS1974:12p.
12. Lundborg, N., Persson, N., Ladegaard –Pedersen, A. and Holmberg, R. and Holmberg, R. (1975). Keeping the lid on flyrock in open pit blasting. Eng. Min. Journal: pp.95-100.

13. McKenzie, C.K. (2009). Flyrock range & fragment size prediction, 35th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique of ISEE, Feb. 8-11, Denver, 2: 17p.
14. Mohamad, E.T., Armaghani, D.J., Noorani, S.A., Saad, R., Alvi, S.V. and Abad, N.K. (2013). Prediction of flyrock in boulder blasting using artificial neural network, EJGE, 17(2012):2585-2595.
15. Raina, A.K., Soni, A.K. and Murthy, V.M.S.R. 2012. Spatial distribution of flyrock using EDA: An insight from concrete model tests, Proc. the 10th Intl. Symp. Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast10, New Delhi, India, 26-29, Nov., 563-570.
16. Rehak, T.R., Bajpayee, T.S., Mowrey, G.L., Ingram and D.K. (2001). Flyrock issues in blasting. 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique of ISEE, Jan. 28-31, Orlando, 165–175.
17. Richards, A.B. & Moore, A.J. 2004. Flyrock control—By chance or design. Proc. 30th ISEE Conference on Explosives and Blasting Technique, New Orleans, Louisiana, 1–4 February. Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers.
18. Little, T.N. 2007. Flyrock Risk. Proc. Explo 2007, Wollongong, Australia, 3–4 September, pp. 35–43. Carlton, VIC: AusIMM.
19. Gibson, M.F.L. & St George, J.D. 2001. Implications of flyrock associated with blasting in urban areas. Proc. 34th Annual Conf. AusIMM NZ Branch, Auckland.
20. Rehak TR, Bajpayee TS, Mowrey GL, and Ingram DK [2001]. Flyrock issues in blasting. In: Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Vol I, Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers, pp. 165-175.