

**UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MINAS
COPIAPO**



**DETERMINACION DE UN INDICE DE
ALTERACION EXPERIMENTAL PARA EL
CALCULO DE FACTOR DE CARGA**

**RICARDO SANTELICES REYES
ROBERTO SUAREZ NEIRA
2019**

**UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MINAS
COPIAPO**



**DETERMINACION DE UN INDICE DE
ALTERACION EXPERIMENTAL PARA EL
CALCULO DE FACTOR DE CARGA**

**“Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el Título de Ingeniero de Ejecución en Minas”**

**Profesor guía: Osvaldo Rojos Piffaut
Profesor tutor: Liver Rojas Barraza**

**RICARDO SANTELICES REYES
ROBERTO SUAREZ NEIRA
2019**

Resumen

En la pequeña y gran minería se aplica la utilización de explosivos para fracturar las rocas y poder obtener provecho de los minerales.

Se estudió diferentes fórmulas para calcular el factor de carga, se evidenció que ninguna de ellas hace referencia a la composición mineralógica de la roca. Como consecuencia, se realizó una serie de análisis de roca total por medio de la técnica de difracción de rayos X, con el propósito de conocer la composición mineralógica global de las muestras y ver si tiene influencia en el factor de carga utilizado en las tronaduras.

Con los datos obtenidos se planteó una ecuación que permite relacionar los minerales de alteración, generando un índice de alteración experimental.

El alcance de este modelo matemático empírico es que permite calcular el factor de carga equivalente en ANFO, según la zona de alteración hidrotermal correspondiente al macizo rocoso. Además, se demostró el potencial que tiene esta metodología, ya que depende de valores obtenidos en base a una técnica científica comprobada y no al criterio de las personas, debido a esto podría ser utilizada para el control de costos de explosivos. Y la justificación y respaldo en el cálculo de factores de carga equivalentes en ANFO.

A pesar de los excelentes resultados, aún es posible seguir mejorando para lograr un mayor ajuste de la ecuación. En este contexto, se hace necesario incrementar la cantidad de muestras y mejorar el control del terreno.

Se pudo concluir que la ecuación planteada para el cálculo del índice de alteración experimental cumple con el objetivo de relacionar de forma matemática los minerales que afectan la tenacidad del macizo rocoso.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por darme la oportunidad de volver abrir mi mente al conocimiento, a mi esposa e hijos por el apoyo otorgado durante estos años de estudio.

No puedo dejar de nombrar a Luis Miranda Carmona, mi gran mecenas.

Dedicatoria

Dedico este trabajo en pleno a mi esposa, la musa de todos mis grandes desafíos.

Ricardo Esteban Santelices Reyes.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado con todo mi cariño para mi familia; de manera especial a mi esposa; quienes han puesto toda su confianza para lograr un objetivo más en mi vida.

Roberto Nilson Suarez Neira.

Índice Temático

CAPITULO I: Introducción.....	1
1.1 Descripción y delimitación del problema.....	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivo específico	3
1.4 Alcance de la investigación.....	3
CAPITULO II: Marco teórico	4
2.1 Definiciones.....	4
2.1.1 Factor de carga o consumo específico de explosivos	4
2.1.2 Explosivos aluminizados.....	4
2.1.3 Explosivos primarios.....	5
2.1.4 Explosivos secundarios	5
2.1.5 Alteración Hidrotermal	5
2.1.6 Difracción de rayos X.....	6
2.1.7 Método de Rietveld	6
2.2 Propiedades físicas de los minerales	7
2.2.1 Morfología.....	7
2.2.2 Combinación de las caras	7

2.2.3 Las caras de un cristal (habito).....	7
2.2.4 Dureza	8
2.2.5 Exfoliación (crucero).....	10
2.2.6 Brillo	12
2.2.7 Color	12
2.2.8 Transparencia.....	14
2.3 Otras propiedades de los minerales.....	15
2.3.1 Cristales maclados.....	15
2.3.2 Solubilidad	16
2.3.3 Densidad o peso específico.....	16
2.3.4 Tenacidad.....	18
2.3.5 Propiedades magnéticas y eléctricas.....	18
2.3.6 Luminiscencia y fluorescencia	19
2.3.7 Piezoelectricidad.....	19
2.4 Alteración hidrotermal.	20
2.4.1 Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas	22
2.4.2 Productos típicos de reemplazo por alteración	23
2.4.3 Procesos debidos a la alteración hidrotermal	24

2.4.4 Clasificación de Alteración Hidrotermal	30
2.4.5 Localización de la mineralización hidrotermal	35
2.4.6 Paragénesis.....	36
2.4.7 Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal.....	38
Yacimientos Epitermales	41
2.5 Difracción de rayos X de especies Cristalinas	48
2.5.1 Determinación de estructuras cristalinas.....	50
2.5.2 Análisis cualitativo de fases	52
2.5.3 Análisis cuantitativo de fases.....	52
2.6 Método Rietveld	54
2.6.1 Reseña Histórica.....	54
2.6.2 Explicación básica del método	58
2.7 Propiedades de las rocas y de los macizos rocosos que afectan el diseño y resultado de las tronaduras	63
2.7.1 Propiedades de las rocas	63
2.7.2 Clasificación de las rocas según su facilidad a la fragmentación con explosivos en minas a cielo abierto.	65
2.7.3 Propiedades de los macizos rocosos.....	68
2.7.4 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura .	71

2.7.5 Índice de tronabilidad de Lilly	73
2.7.6 Método KUZ-RAM	76
2.7.7 Fórmula de Larsson	84
2.7.8 Fórmula de SVEDEFO (Swedish Detonic Research Foundation).....	84
2.8 Propiedades de los explosivos.....	85
2.8.1 Potencia y Energía.....	85
2.8.2 Velocidad de Detonación	86
2.8.3 Densidad.....	87
2.8.4 Presión de Detonación.....	87
2.8.5 Estabilidad	88
2.8.6 Resistencia al Agua	88
2.8.7 Sensibilidad	88
2.8.8 Transmisión de la detonación	89
2.8.9 Desensibilización	89
2.8.10 Resistencias a las bajas temperaturas	91
2.8.11 Humos.....	91
2.8.12 Iniciación y cebado de cargas.....	91
2.8.13 Tiempos de retardo y secuencias de encendido	91

2.9 Tipos de Explosivos	92
2.9.1 Agentes explosivos	92
2.9.2 Explosivos convencionales	95
2.10 Criterios de selección de explosivos	96
2.11 Parámetros controlables de las tronaduras	99
2.11.1 Parámetros geométricos	99
2.11.2 Fórmulas utilizadas en el diseño de una tronadura (método tradicional).....	100
2.11.3 Método de Ash (1963)	103
2.11.4 Método de Langefors (1963).....	104
2.11.5 Konya (1976).....	105
2.11 Explosivos utilizados	106
CAPITULO III: Desarrollo experimental	108
3.1 Equipo, Parámetros Instrumentales y Softwares utilizados en los Barridos por Difracción de Rayos X	109
3.1.1 Equipo Miniflex 600 de la marca Rigaku	109
3.1.2 Parámetros instrumentales utilizados en la investigación.....	112
3.1.3 Software PDXL.....	112
3.2 Resultados entregados por el laboratorio	113
3.3 Hipótesis para la obtención del Índice de alteración experimental	116

3.4 Discusión	120
3.4.1 Uso de los datos obtenidos para la generación de la curva de calibración	120
3.4.2 Comparación del modelo con muestras de otro tipo yacimiento y diferente método de explotación.	127
CAPITULO IV: Conclusiones	131
CAPITULO V: Bibliografía	133
ANEXO I. Protocolo toma de muestras	135
ANEXO II. Protocolos de tronadura Yacimiento Primera Región	137
ANEXO III. Medición de Partículas Yacimiento Primera Región.....	147
ANEXO IV. Protocolos de tronadura Yacimiento Tercera Región	149
ANEXO V. Tabla información pozos de tronadura según Protocolos de Carga	154
ANEXO VI. Protocolos de tronadura Yacimiento Segunda Región	155
ANEXO VII. Medición de Partículas Yacimiento Segunda Región.....	161
ANEXO VIII. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Primera Región	162
ANEXO IX. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Tercera Región.	165
ANEXO X. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Segunda Región.	172

Índice de Tablas.

Tabla 1.1. Parámetros geométricos en función de la resistencia de la roca.....	1
Tabla 1.2 Parámetros “Kb” dependen de la roca y del tipo de explosivo	1
Tabla 2.1 Propiedades físicas de los minerales, escala de dureza según Mohs.....	9
Tabla 2.2 Propiedades físicas de los minerales, brillos de los minerales.....	12
Tabla 2.3 Propiedades físicas de los minerales, el color de los minerales	13
Tabla 2.4 Propiedades físicas de los minerales, densidad de los minerales	17
Tabla 2.5 Alteración hidrotermal, productos típicos de reemplazo por alteración	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.6 Alteración Hidrotermal, transferencias de fluido	25
Tabla 2.7 Alteración Hidrotermal, comportamiento de elementos mayores.....	27
Tabla 2.8 Alteración Hidrotermal, clasificación de la alteración hidrotermal ...	30
Tabla 2.9 Alteración Hidrotermal, cuadro paragenético de los minerales	37
Tabla 2.10 Difracción de rayos X de especies Cristalinas, resumen de los resultados del análisis cuantitativo de fases efectuado	53
Tabla 2.11 Método de Rietveld, refinamiento de Rietveld de cerámica.....	62
Tabla 2.12 Propiedades de las rocas, clasificación de las rocas según su facilidad a la fragmentación con explosivos en minas a cielo abierto	64

Tabla 2.13 Propiedades de las rocas, tratamiento estadístico de los valores aportados por Cark (1966) para rocas con una densidad entre 2,6 y 3,4 t/m³	67
Tabla 2.14 Propiedades de los macizos rocosos, grado de transmisión de la energía según la naturaleza de las fracturas	69
Tabla 2.15 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, RQD (rock quality designation).....	72
Tabla 2.16 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, "Volumetric Joint Count, Jv"	73
Tabla 2.17 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, parámetros geomecánicos, para calcular el índice de tronabilidad de Lilly	75
Tabla 2.18 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, Las distintas orientaciones de los planos de diaclasas y sus respectivos ratings	76
Tabla 2.19 Propiedades de los explosivos, orden cronológico de aparición de los explosivos	94
Tabla 2.20 Parámetros controlables de las tronaduras, calculo altura del banco en función del tipo de roca.....	100
Tabla 2.21 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del taco	101
Tabla 2.22 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo de la sobreperforación en función del tipo de roca	101
Tabla 2.23 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del burden y espaciamiento en función del tipo de explosivo y tipo de roca	101

Tabla 2.24 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del parámetro KB en función del tipo de explosivo y tipo de roca	103
Tabla 3.1 Desarrollo experimental, cantidad de muestras por yacimiento	108
Tabla 3.2 Desarrollo experimental, Tabla resultados DRX de Pórfido Cuprífero Primera Región.....	113
Tabla 3.3 Desarrollo experimental, Tabla resultados DRX de Pórfido Cuprífero Tercera Región	114
Tabla 3.4 Desarrollo experimental, datos ordenados minerales de interés	117
Tabla 3.5 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración.....	119
Tabla 3.6 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración y Factor de Carga.....	121
Tabla 3.7 Desarrollo experimental, Tabla de cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales	124
Tabla 3.8 Desarrollo experimental, cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales con datos refinados	126
Tabla 3.9 Desarrollo experimental, tabla resultados DRX de Yacimiento Epidermal Segunda Región.....	128
Tabla 3.10 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración.....	129
Tabla 3.11 Desarrollo experimental, Tabla de cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales	130

Índice de Gráficos.

Grafico 3.1. Desarrollo experimental, porcentaje de muestras por yacimiento	109
Grafico 3.2. Desarrollo experimental, Composición Mineralógica Global Pórfido Cuprífero de la Primera Región	113
Grafico 3.3. Desarrollo experimental, Composición mineralógica Global Pórfido Cuprífero Tercera Región	115
Grafico 3.4. Desarrollo experimental, Gráfica comparativa de la suma de micas y arcillas considerados en el sistema.....	118
Grafico 3.5. Desarrollo experimental, Gráfica datos ordenados según Índice de Alteración.....	120
Grafico 3.6. Desarrollo experimental, Gráfica Factor de Carga Equivalente en ANFO v/s Índice Alteración	122
Grafico 3.7 Desarrollo experimental, Gráfica Factor de Carga Equivalente en ANFO v/s Índice Alteración con datos refinados	125
Grafico 3.8 Desarrollo experimental, comportamiento Factor de Carga Real v/s Factor de Carga Calculado	127
Grafico 3.9 Desarrollo experimental, Composición Mineralógica Global Yacimiento Epitermal.....	128
Grafico 3.10 Desarrollo experimental, grafico Índice de Alteración Experimental, Yacimiento Epitermal.....	129
Grafico 3.11 Desarrollo experimental, grafico comparación datos FC Real v/s FC Calculado	130

Índice de Figuras.

Figura 2.1 Propiedades físicas de los minerales, el habito la forma	8
Figura 2.2. Propiedades físicas de los minerales, densidad.	17
Figura 2.3. Asociaciones minerales de ocurrencia común (basado en Meyer y Hemley, 1967.....	31
Figura 2.4. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (tomado de Corbett y Leach, 1998).	34
Figura 2.5. Alteración Hidrotermal, fases post-magmáticas.....	37
Figura 2.6. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento hipotermal.....	39
Figura 2.7. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento mesotermiales.	41
Figura 2.8. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento epitermal.	43
Figura 2.9. Difracción de rayos X de especies Cristalinas, ley de Bragg.	48
Figura 2.10. Difracción de rayos X de especies Cristalinas, ilustra un caso de identificación cuali- y cuantitativa de fases en una mezcla polifásica natural. ...	53
Figura 2.11. Método de Rietveld, refinamiento de Rietveld de una cerámica piezoeléctrica.	63
Figura 2.12. Propiedades de las rocas, módulo de Young.	66

Figura 2.13. Propiedades de los macizos rocosos, tipos de litologías a encontrar.	68
Figura 2.14. Propiedades de los macizos rocosos, tipos de tensiones de campo..	70
Figura 2.15. Propiedades de los explosivos, Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación (Ash, 1977).	86
Figura 2.16. Propiedades de los explosivos, velocidad de detonación del ANFO en función de la densidad.	90
Figura 2.17. Propiedades de los explosivos, diagrama ANFO pesado.	94
Figura 2.18. Parámetros controlables de las tronaduras, parámetros geométricos.	100
Figura 3.1. Desarrollo experimental, equipo MiniFlex 600.	110
Figura 3.2. Desarrollo experimental, óptica integrada al software.	111
Figura 3.3. Desarrollo experimental, óptica integrada al equipo para alta resolución.	111
Figura 3.4. Desarrollo experimental, parámetros instrumentales utilizados en el software.	112

CAPITULO I: Introducción.

1.1 Descripción y delimitación del problema.

La literatura actual plantea que para el diseño de pozos de tronadura se aplican factores expresados con la letra K que clasifican el tipo de roca a fragmentar, ejemplo de esto es la fórmula propuesta por ASH en 1963.

Donde la variable K_b depende de la clase de roca y tipo de explosivo empleado.

Tabla 0.1. Parámetros geométricos en función de la resistencia de la roca

VARIABLE DE DISEÑO	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70-120	Dura 120-180	Muy Dura > 180
PIEDRA - B	39 D	37 D	35 D	33 D
ESPACIAMIENTO - S	51 D	47 D	43 D	38 D
RETACADO - T	35 D	34 D	32 D	30 D
SOBREPERFORACION - J	10 D	11 D	12 D	12 D

$$B(\text{pies}) = \frac{k_b \times D(\text{pulg})}{12}$$

Tabla 0.2 Parámetros “Kb” dependen de la roca y del tipo de explosivo

TIPO DE EXPLOSIVO	CLASE DE ROCA		
	BLANDA	MEDIA	DURA
● Baja densidad (0,8 a 0,9 g/cm ³) y baja potencia	30	25	20
● Densidad media (1,0 a 1,2 g/cm ³) y potencia media	35	30	25
● Alta densidad (1,3 a 1,6 g/cm ³) y alta potencia	40	35	30

En el caso de la tabla anterior publicada en el manual de perforación y voladura de rocas de López Jimeno, capítulo 20 página 221, no es posible diferenciar una unidad litológica de ambiente potásico de una correspondiente a la alteración Argílica avanzada, solo se puede diferenciar los parámetros blanda, media, dura y muy dura.

Por esta razón, surge la inquietud de plantear la pregunta ¿Cómo relacionar los minerales que se forman en las diferentes fases de alteración con factores de carga equivalentes en ANFO conocido?

Se piensa que al relacionar la información mineralógica contenida en la matriz de la roca volcánica se podrá realizar un mejor ajuste en la fase empírica de modelamiento de las tronaduras y así satisfacer las necesidades de la industria en el costo y manejo de explosivos.

Por otra parte, la utilización del mismo material del cual se obtienen los valores de leyes, se podrá obtener mejor y mayor información para otras etapas del proceso minero.

Para el desarrollo de la solución a esta problemática se utilizará la técnica de difracción de rayos X y se analizarán muestras de diferentes tipos de yacimientos del norte de Chile, que cuentan con información de terreno en cuanto a consumo de explosivos por tonelada de roca.

1.2 Objetivo General

Generar una técnica que permita estimar por medio del contenido de minerales de alteración en rocas de origen volcánico, un índice que permita evidenciar la dependencia de la carga explosiva al grado de alteración hidrotermal de un macizo rocoso.

Validar la metodología de difracción de rayos X como herramienta científica de apoyo a los análisis mineralógicos de gangas.

1.3 Objetivo específico

Obtener un índice relacionado a los minerales de alteración hidrotermal que permita por medio de curva de calibración obtener valores de factores de carga en ANFO equivalente.

1.4 Alcance de la investigación

Determinar la relación entre los minerales que afectan a la tenacidad de la roca a fin de calcular un índice de alteración experimental que permita realizar aproximaciones de factores de carga en Anfo equivalente.

CAPITULO II: Marco teórico

2.1 Definiciones

2.1.1 Factor de carga o consumo específico de explosivos

En el manual de tronadura de ENAEX, pagina 7 se define como “el término usado para describir la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca, El término tiene por eso las unidades de kg/m³ o Grs explosivos/ton.

Algunos también toman en cuenta la potencia en peso de explosivo para expresar el peso de explosivo como equivalente a la potencia en peso equivalente al ANFO, o sea, $W_{teff} = W_t * \text{potencia en peso relativa}$. Otros usuarios prefieren usar un término inverso del factor de la carga, para describir el peso de roca quebrada por unidad de peso de explosivo (ton/kg)”.

Dado por la siguiente formula:

$$F_c = \frac{\text{Cantidad de explosivo utilizado en Kg}}{\text{Total M3 rotos cubicados}}$$

2.1.2 Explosivos aluminizados

Son explosivos compuestos a los cuales se les agrega aluminio en polvo de diferente granulometría, para potenciar la energía efectiva del explosivo, en virtud del alto calor por formación del óxido de aluminio que se produce durante la reacción de detonación. El aluminio disminuye el volumen de gas producido, al atrapar oxígeno. Además, actúa como combustible y su uso debe estar acompañado por la reducción de otro componente combustible (por ej., petróleo).

El aluminio aumenta la performance al elevar la temperatura de reacción (la presión peak de pozo) y la velocidad de desplazamiento del burden. A los explosivos a granel se les añade un 10 % de aluminio en polvo, este elemento no aumenta la velocidad de detonación y hasta puede reducirla. La granulometría del aluminio en polvo es el factor más influyente para su efectividad, al potenciar la performance del explosivo. Las partículas finas reaccionan más rápido y tienen mayor impacto que las gruesas.

2.1.3 Explosivos primarios

Son explosivos que detonan por ignición simple de medios tales como chispas, llamas, impacto, y otras fuentes primarias de calor. Se denominan así aquellos que contienen los detonadores, cordón detonante e iniciadores.

2.1.4 Explosivos secundarios

son aquellos en que la detonación es iniciada por impacto de la detonación de un explosivo inicial (primario). Esta reacción se presenta en todos los explosivos usados en tronadura de rocas.

Materiales insensibles tales como nitrato de amonio se clasifican como **explosivos terciarios**.

2.1.5 Alteración Hidrotermal

Son los cambios en mineralogía y textura de las rocas encajonantes circundantes a las estructuras mineralizadas. La alteración hidrotermal sirve como guía del mineral y para indicar el carácter de las soluciones asociadas (pH, etc.). es la conversión de un ensamble de minerales primarios a otros más estable, apropiado a las condiciones de temperatura, presión y composición de los fluidos hidrotermales.

La alteración hidrotermal puede ocurrir antes, durante o después de la deposición de los minerales metálicos. Se conocen los siguientes tipos de alteraciones hidrotermales:

Potásica, albitica, silicificada, sericitizada, argilizada, propilitizada, cloritización, zeolitización, alunitización, listvenitización, dolomitización, serpentización, adularización, piritización y hematización (tabla 2.6, Rose y Burt 1979, Utada 1980).

2.1.6 Difracción de rayos X

“Es una técnica ampliamente aplicada para la caracterización de materiales cristalinos. El método ha sido tradicionalmente usado para análisis cualitativo, cuantitativo de fases y para la determinación de la estructura cristalina *“Publicación (Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas Susana Petrick Casagrande a, Ronald Castillo Blanco)*

2.1.7 Método de Rietveld

“El método de Rietveld consiste en ajustar teóricamente los parámetros estructurales o parámetros de red, deslizamientos atómicos, anisotropía, tensiones de la red, etc., así como experimentales, que dependen de las condiciones de experimentación, al perfil completo del difractograma en polvo suponiendo que el difractograma es la suma de un número de reflexiones de Bragg centradas en sus posiciones angulares respectivas. Luego los parámetros escogidos van siendo ajustados en un proceso iterativo hasta que se alcanza una condición de convergencia con los valores de las intensidades experimentales y el modelo teórico.

En la determinación de la estructura cristalina el método de Rietveld juega un papel importante debido a su capacidad de determinar con mayor precisión los parámetros cristalinos de la muestra.” *Publicación (Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas Susana Petrick Casagrande a, Ronald Castillo Blanco).*

2.2 Propiedades físicas de los minerales

2.2.1 Morfología

Se distingue la combinación de las caras del mineral/cristal y el hábito del mineral/cristal.

2.2.2 Combinación de las caras

La combinación de las caras del cristal significa el conjunto de todas las caras del cristal o bien la forma cristalina, la cual depende de la simetría del cristal. Por ejemplo la galena (PbS) y la halita (NaCl), que pertenecen al sistema cúbico pueden cristalizar como cubos, además la galena puede cristalizar en una combinación de cubo y octaedro, granate cristaliza en la forma romboédrica, en la forma iso-tetraédrica o en una combinación de dichas dos formas.

2.2.3 Las caras de un cristal (hábito)

Cuando los cristales crecen sin interferencias, adoptan formas relacionadas con su estructura interna. El hábito se refiere a las proporciones de las caras de un cristal. Existen varias formas del hábito:

- Acicular: como pelo, como aguja.
- Columnar: alargado en una dirección y semejante a las columnas.

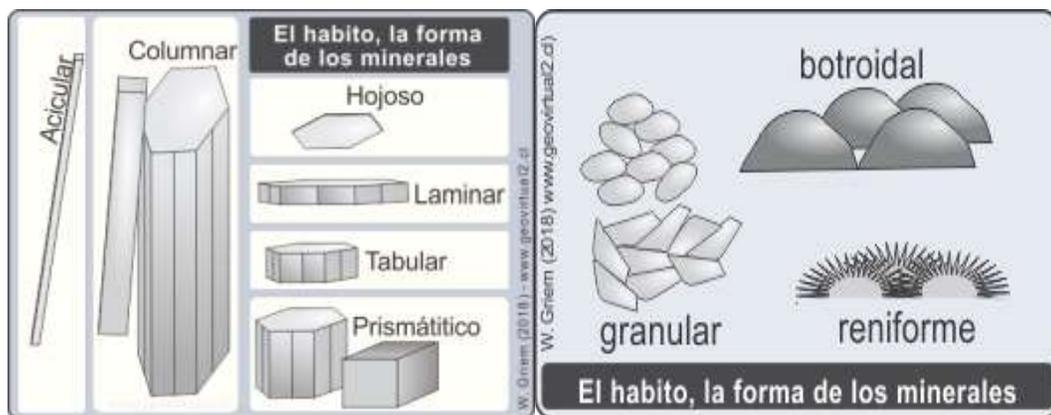
Ejemplo: cristales de corindón.

- Prismático: alargado en una dirección. Ejemplo: cristales de andalucita.
- Tabular: alargado en dos direcciones. Ejemplo: cristales de baritina.
- Laminar: alargado en una dirección y con bordes finos. Ejemplo: cristales de

hornblenda.

- Hojoso: similar a las hojas, que fácilmente se separa en hojas. Ejemplo: moscovita.
- Botroidal: grupo de masas globulares, por ejemplo grupo de masas esferoidales de malaquita.
- Reniforme: fibras radiadas, que terminan en superficies redondeadas. Ejemplo: hematita.
- Granular: formado por un agregado de granos.
- Masivo: compacta, irregular, sin ningún hábito.

Figura 2.1 Propiedades físicas de los minerales, el hábito la forma



2.2.4 Dureza

Se llama dureza al grado de resistencia que opone un mineral a la deformación mecánica.

Un método útil y semi-cuantitativo para la determinación de la dureza de un mineral fue introducido por el químico alemán Mohs. El creó una escala de dureza de 10 niveles. Para cada nivel existe un mineral representativo y muy común. El mineral del nivel superior perteneciendo a esta escala puede rayar todos los minerales de los niveles inferiores de esta escala.

La dureza de un mineral desconocido puede averiguarse rayando entre sí una cara fresca del mineral desconocido con los minerales de la escala de Mohs. El mineral más duro es capaz de rayar el mineral más blando. Los minerales de la escala de Mohs que rayan el mineral desconocido son más duros que este, los minerales que son rayados por el mineral desconocido son menos duros. Por tanto, la dureza del mineral desconocido se estrecha entre el nivel superior del mineral que puede rayarlo y el nivel inferior del mineral que es rayado por este mineral. Con cierta experiencia y algunos medios auxiliares simples se puede conocer rápidamente la dureza de forma aproximada.

Los minerales que pertenecen a la escala de Mohs son los siguientes:

Tabla 0.1 Propiedades físicas de los minerales, escala de dureza según Mohs

Escala de dureza según MOHS		
Dureza	Mineral	Comparación
1	Talco	La uña lo raya con facilidad
2	Yeso	La uña lo raya
3	Calcita	La punta de un cuchillo lo raya con facilidad
4	Fluorita	La punta de un cuchillo lo raya
5	Apatito	La punta de un cuchillo lo raya con dificultad
6	Feldespato Potásico	Un trozo de vidrio lo raya con dificultad, Feldespato no raya el martillo geológico
7	Cuarzo	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despide chispas. Cuarzo raya el martillo geológico
8	Topacio	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despide chispas
9	Corindón	Puede rayar un trozo de vidrio con facilidad.
10	Diamante	Puede rayar un trozo de vidrio con alta facilidad

www.geovirtual2.cl

La dureza de un mineral depende de su composición química y también de la disposición de sus átomos. Cuanto más grande son las fuerzas de enlace, mayor será la dureza del mineral.

Grafito y diamante por ejemplo son de la misma composición química, solamente se constituyen de átomos de carbono C. Grafito tiene una dureza según Mohs de 1, mientras que diamante tiene una dureza según Mohs de 10. En la estructura del diamante cada átomo de carbono - que tiene 4 electrones en su capa más exterior, puede alcanzar la configuración de ocho electrones compartiendo un par de los mismos con 4 átomos de carbono adyacentes, los cuales ocupan las esquinas de una unidad estructural de forma tetraédrica. El enlace covalente entre los átomos de carbono se repite formando una estructura continua, dentro de lo cual la energía de los enlaces covalentes se concentra en la proximidad de los electrones compartidos, lo que determina la dureza excepcional del diamante. En la estructura del grafito, los átomos de carbono se presentan en capas compuestas por anillos hexagonales de átomos, de modo que cada átomo tiene 3 que lo rodean. Las capas de átomos del grafito están separadas una distancia relativamente grande, 3.41\AA , y quedan átomos dispuestos en forma alternada, exactamente por encima de los átomos de la capa adyacente. La causa de la poca dureza del grafito es que los enlaces entre las capas de átomos son muy débiles, mientras que los átomos en el interior de las capas están dispuestos mucho más próximos que en la estructura del diamante.

2.2.5 Exfoliación (crucero)

Los cuerpos cristalinos pueden exfoliarse en superficies lisas a lo largo de determinadas direcciones, mediante la influencia de fuerzas mecánicas externas, por ejemplo mediante de la presión o de golpes de un martillo. Esta llamativa exfoliación (crucero) depende del orden interno existente en los cristales. Los planos de exfoliación o bien de clivaje son la consecuencia del arreglo interno de los átomos y representan las direcciones en que los enlaces que unen a los átomos son relativamente débiles. La superficie de exfoliación corresponde siempre a caras cristalinas sencillas.

Mientras mayor es el contraste entre la fuerza de los enlaces que unen a los átomos en las direcciones paralelas al plano de exfoliación (cruce) y la debilidad de los enlaces que unen a los átomos en las direcciones perpendiculares a los planos de exfoliación (cruce), mayor será la tendencia del mineral a romperse a lo largo de este plano.

Las exfoliaciones se distinguen a grandes rasgos como sigue:

- Exfoliación completa en 2 direcciones: mica, clorita, talco.

- Exfoliación buena en dos direcciones: feldespato potásico según dos superficies perpendiculares entre sí, hornblenda con exfoliación prismática

- Exfoliación buena en tres direcciones: Calcita según el romboedro - Generalmente en todas las formas cristalinas de calcita pueden reconocerse planos de cruce en tres diferentes orientaciones. Estos planos de cruce se intersecan formando ángulos de 75° y de 105° de cuales resulta la forma romboédrica típica de la calcita. Baritina BaSO_4 ocurre en cristales tabulares que tienen con frecuencia dos caras perpendiculares a la cara mayor que convergen formando bordes agudos.

- Exfoliación clara en dos direcciones: piroxeno.

- Exfoliación poco clara: olivino.

- Exfoliación ausente: cuarzo con su fractura concoidea. En el cuarzo los átomos están dispuestos con tal regularidad que los enlaces entre los mismos son muy similares en todas direcciones. En consecuencia, no existe tendencia a que el mineral se rompa según un plano particular, y en los cristales de cuarzo se desarrollan fracturas concoideas.

Una medida para determinar la calidad de la exfoliación es, entre otras, el brillo existente sobre las superficies de exfoliado, que es el responsable de las superficies lisas reflejantes que se observan en los frentes de las aristas.

2.2.6 Brillo

Es una propiedad compleja que describe el aspecto que presenta la superficie de un mineral cuando se refleja la luz, por tanto, depende de la intensidad de la reflexión.

Tabla 0.2 Propiedades físicas de los minerales, brillos de los minerales

Brillo de los minerales		
Brillo o lustre	Ejemplos / Descripción	
Metálico	pirita, magnetita, hematita, grafito	
semimetálico	uraninita (pechblenda, UO ₂), goethita	
No metálico	Adamantino	brillante: diamante, rutilo, el brillo más intenso
	Resinoso	como la resina, p.ej. esfalerita. Brillo intenso
	Vítreo	cuarzo, olivino, nefelina, en las caras cristalinas, siderita
	Oleoso	olivino.
	Graso	grasoso al tacto: cuarzo, nefelina de brillo gris graso.
	Perlado	como el brillo de las perlas, p.ej. talco, biotita, siderita
	Sedoso	como el brillo de seda: yeso de estructura fibrosa, sericita, goethita
	Mate, terroso	como el brillo de la tiza

www.geovirtual2.cl - W. Griem (2002)

2.2.7 Color

Respecto al color se distinguen dos grupos de minerales:

- Los minerales idiocromáticos.

- Los minerales alocromáticos.

Se llama idiocromáticos a los minerales que tienen colores característicos relacionados con su composición.

En este caso el color es útil como medio de identificación.

Minerales idiocromáticos con colores distintos son, por ejemplo:

Tabla 0.3 Propiedades físicas de los minerales, el color de los minerales

Mineral	Color	
Magnetita	negro	
Hematita	rojo	
Epidota	verde	
Clorita	verde	
Lapislázuli	azul oscuro	
Turquesa	azul característico	
Malaquita	verde brillante	
Cobre nativo	rojo cobrizo	

Los minerales que presentan un rango de colores dependiendo de la presencia de impurezas o de inclusiones se llaman alocromáticos.

A los minerales alocromáticos pertenecen, por ejemplo:

Feldespatos Potásicos cuyo color varía de incoloro a blanco pasando por color carne hasta rojo intenso o incluso verde.

Cuarzo puro es incoloro.

La presencia de varias inclusiones líquidas le da un color blanco lechoso.

Amatista es de color púrpura característico que probablemente es debido a impurezas de Fe^{3+} y Ti^{3+} y la irradiación radioactiva.

Corindón: Corindón puro es incoloro.

Corindón portando cromo como elemento traza es de color rojo y se lo llama rubí.

El zafiro es una variedad transparente de corindón de varios colores. Por la existencia de minerales alocromáticos el color es un medio problemático para identificar un mineral.

El color de la raya es debido por trozos del cristal molidos muy finos, colocados sobre una base blanca, como p.ej. un trozo de porcelana facilita el que separamos si nos encontramos ante un mineral de color propio o ajeno.

El color de la raya del feldespato potásico siempre será blanca igualmente si es producido por un feldespato potásico incoloro, de color carne o verde. El color de la raya tiene importancia en la identificación de las menas. El color de la raya de Magnetita es negra, de Hematita es rojo cereza, de goethita es de color café.

2.2.8 Transparencia

La transparencia de un mineral depende de su grosor, aquí se usan el termino con muestras de mano "normales" es decir de un tamaño mayor de 2 - 3 ms. Minerales opacos son minerales no transparentes, es decir la luz no traspasa la muestra en ninguna forma.

Ejemplo: Magnetita, pirita, jaspe.

Minerales traslucidos o semitransparente transmiten la luz, pero no son completamente transparente. Un buen ejemplo es el cuarzo lechoso. Minerales transparentes se caracterizan por una visibilidad relativamente clara interna del mineral. Los ejemplos son cuarzo, calcita de Islandia, diamante etc.

Cabe mencionar que modificaciones del mismo mineral pueden ser transparente o semitransparente.

2.3 Otras propiedades de los minerales

2.3.1 Cristales maclados

Algunos cristales están formados por dos o más partes en las cuales la celosía (*Kristallgitter alem.*) tiene orientaciones diferentes que están relacionadas en forma geométrica. Los cristales compuestos de este tipo se conocen como cristales maclados.

Hay varios tipos de maclas, por ejemplo, maclas simples, maclados de contacto, maclas de interpenetración, maclas paralelas, maclado normal.

Se llaman maclas simples a los cristales compuestos de dos partes individuales, que tienen una relación estructural definida. Si las dos partes de una macla simple están separadas por una superficie definida, ésta se describe como maclado de contacto.

Macla de interpenetración se refiere a los cristales unidos por un plano de composición - superficie a lo largo de la cual los dos individuos están unidos - irregular, por ejemplo. ortoclasa.

2.3.2 Solubilidad

La solubilidad depende de la composición del mineral.

Sobre todo se usan una dilución frío de ácido clorhídrico HCl para distinguir Calcita de puro CaCO_3 (carbonato de calcio) de otros minerales parecidos de una cantidad menor de CaCO_3 o sin CaCO_3 . La reacción es la siguiente: $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (dióxido de carbono diluido en agua) + CaCl_2 y H_2CO_3 se descompone en H_2O y dióxido de carbono CO_2 (gas). Burbujas de CO_2 se producen por esta reacción. Se observa la efervescencia de la dilución de ácido clorhídrico cuando se libera el dióxido de carbono. La concentración de la dilución de HCl tiene que ser 5%. Para la aplicación de la dilución de HCl se necesitan un plano fresco de fractura de una roca.

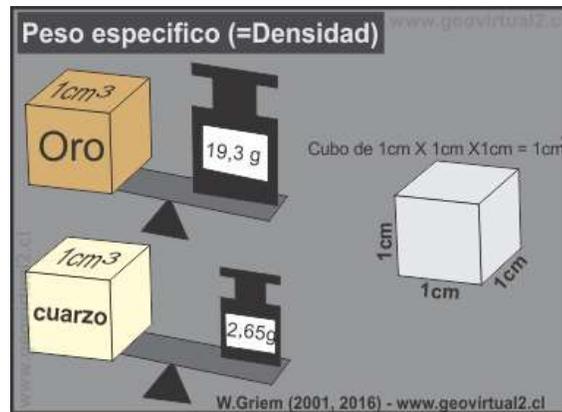
Sabor y olor: Algunos minerales tienen un sabor fuerte. Pero no se recomienda este método, algunos minerales son venenoso o contienen sustancias peligrosas como mercurio o arsénico. Algunos ejemplos de minerales con sabor característico:

Halita: sabor sal, Silvinita: Sabor sal picante, Chalcantita: Sabor asqueroso. Un olor característico tiene azufre y algunos sulfatos, además el lapislázuli en conjunto con HCl. Algunos minerales se pegan a la lengua como Crisocola o Turquesa.

2.3.3 Densidad o peso específico

Cada mineral tiene un peso definido por centímetro cúbico; este peso característico se describe generalmente comparándolo con el peso de un volumen igual de agua; el número de masa resultante es lo que se llama “peso específico” o “densidad” del mineral.

Figura 2.2. Propiedades físicas de los minerales, densidad.



El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que la constituyen y con la proximidad o el apretamiento en que estén arreglados en la estructura cristalina. La mayoría de los minerales que forman rocas tienen un peso específico de alrededor de $2,7 \text{ g/cm}^3$, aunque el peso específico medio de los minerales metálicos es aproximadamente de 5 g/cm^3 . Los minerales pesados son los que tienen un peso específico más grande que $2,9 \text{ g/cm}^3$, por ejemplo, circón, pirita, piroxeno, granate.

Tabla 0.4 Propiedades físicas de los minerales, densidad de los minerales

Densidad de algunos minerales	
Densidad en g/cm^3	Mineral
2,65	Cuarzo
2,5	Feldespato
2,6 - 2,8	Plagioclasa
4,47	Baritina
4,9	Magnetita
5,0 - 5,2	Pirita
19,3	Oro

2.3.4 Tenacidad

Comportamiento del mineral bajo fuerzas. Se observa como el mineral se comporta físicamente sí se aplica una fuerza al mineral. En la práctica se puede diferenciar:

- Frágil: El mineral que se rompe o pulveriza con facilidad. Ejemplos: cuarzo y el azufre. Es la forma "normal" como responden minerales a un ataque de fuerzas.
- Maleable: Minerales que se puede deformar con las manos en láminas o planchas (con un poco de calor). Ejemplos: oro, plata, platino, cobre, estaño.
- Dúctil: El mineral puede ser deformado a hilos o alambres delgados. Ejemplos: oro, plata y cobre. No es muy útil en el reconocimiento de minerales del día a día.
- Flexible: El mineral se dobla fácilmente pero no vuelve a su estado inicial. Ejemplos: yeso y talco (difícil observar esto en estos minerales).
- Elástico: Mineral que puede ser doblado y, una vez deja de recibir presión, vuelve a su forma original. Ejemplo: la mica, biotita, moscovita etc. Prácticamente útil es el uso del rayador con la lupa: Se aplica con la punta del rayador una fuerza al mineral y se observa cómo se comporta el mineral: a) Pasa nada, salen trocitos: Mineral frágil, b) Se forma un cráter de ataque que se mantiene: Maleable (oro), c) Se forma un cráter que desaparece después: Elástico

2.3.5 Propiedades magnéticas y eléctricas

Todos los minerales están afectados por un campo magnético. Los minerales que son atraídos ligeramente por un imán se llaman paramagnéticos, los minerales que son repelidos ligeramente por un imán se llaman diamagnéticos. Magnetita Fe_3O_4 y pirrotina Fe_{1-n}S son los únicos minerales magnéticos comunes.

Los minerales tienen diferente capacidad para conducir la corriente eléctrica. Los cristales de metales nativos y muchos sulfuros son buenos conductores, minerales como micas son buenos aislantes dado que no conducen la electricidad.

2.3.6 Luminiscencia y fluorescencia

Luminiscencia se denomina la emisión de luz por un mineral, que no es el resultado de incandescencia. Se la observa entre otros en minerales que contienen iones extraños llamados activadores.

Fluorescencia: Los minerales fluorescentes se hacen luminiscentes cuando están expuestos a la acción de los rayos ultravioleta, X o catódicos. Si la luminiscencia continua después de haber sido cortado la excitación se llama al fenómeno fosforescencia y al mineral con tal característica mineral fosforescente.

Las fluoritas de color intenso son minerales fosforescentes, que muestran luminiscencia al ser expuestos a los rayos ultravioleta.

2.3.7 Piezoelectricidad

Se observa en minerales con ejes polares (sin centro de simetría) como en el cuarzo, por ejemplo. Debido a la polaridad de la estructura cristalina al suministrar energía, como calor o presión, al mineral se genera una carga eléctrica en los dos extremos del eje polar de un mineral y dirigido en sentido opuesto. En la turmalina el eje polar es el c. En el cuarzo los ejes polares son los ejes a. El cuarzo piezoeléctrico se emplea por ejemplo en el geófono piezoeléctrico, donde un movimiento vertical de la Tierra ejerce una presión a un cristal de cuarzo y se produce una carga eléctrica. Un otro ejemplo es la "aguja" de un tocadiscos. Un zafiro piezoeléctrico genera una pequeña carga eléctrica a causa de su deformación (movimiento) sufrido arriba de la pista del

disco. La información (la música) del disco es representada por un sin número de cambios morfológicos adentro de la pista del disco. El cristal piezoeléctrico se deforma de acuerdo de estos cambios en la superficie y esto se puede amplificar como sonido.

2.4 Alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, en la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido. En efecto, la temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la litología. Ej., La asociación mineralógica: cuarzo, albita, feldespato-K, clorita, epidota férrica, illita, calcita y pirita, se ha encontrado en basaltos en Islandia, areniscas en Imperial Valley, riolitas en Nueva Zelanda y andesitas en Indonesia. Esa asociación de minerales de alteración se ha producido en el rango de temperatura de 250°-280°C.

La susceptibilidad a la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, smectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla.

En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales, a saber:

Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita = plagioclasas

El cuarzo es resistente a la alteración hidrotermal y no es afectado hasta temperaturas de 300°C, pero hay evidencias de recristalización del cuarzo a mayores temperaturas. Es relativamente frecuente que en rocas alteradas intensamente cuya textura original ha sido completamente obliterada, se preserven cristales de cuarzo primarios.

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente obliterada por la alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo que involucra la recristalización de la roca a nuevos minerales más estables bajo las condiciones hidrotermales. La característica distintiva de la alteración hidrotermal es la importancia del fluido hidrotermal en transferir constituyentes y calor. En efecto, la alteración hidrotermal involucra la circulación de volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes atravesando las rocas permeables debido a la presencia de fisuras o poros interconectados. El fluido tiende a estar considerablemente fuera de equilibrio termodinámico con las rocas adyacentes y esto genera las modificaciones en la composición mineralógica original de las rocas, puesto que los componentes en solución y de los minerales sólidos se intercambian para lograr un equilibrio termodinámico.

El transporte de materiales involucrados en la alteración de las rocas puede ocurrir por infiltración o por difusión (transporte por difusión de especies químicas a través de fluidos estancados en los poros de las rocas) o por una combinación de ambos procesos. Si la evidencia geológica muestra que los materiales o componentes químicos se movieron a gran distancia el medio de transporte dominante probablemente fue la

infiltración. En sistemas hidrotermales la difusión e infiltración ocurren simultáneamente

2.4.1 Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas

a) Temperatura y la diferencia de temperatura (Δt°) entre la roca y el fluido que la invade: mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.

b) Composición del fluido; sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.

c) Permeabilidad de la roca: Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.

d) Duración de la interacción agua/roca y variaciones de la razón agua/roca. Mientras mayor volumen de aguas calientes circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.

e) Composición de la roca: la proporción de minerales, es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.

f) Presión: este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales.

Los dos factores iniciales temperatura y composición del fluido hidrotermal son lejos los más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración. Esto es relevante porque las asociaciones de minerales hidrotermales nos dan indicios de las condiciones en que se formaron depósitos minerales de origen hidrotermal.

La intensidad de la alteración corresponde a un término objetivo que se refiere a la extensión en que una roca ha sido alterada, mientras que el grado de alteración es un término subjetivo que requiere una interpretación basada en la mineralogía de alteración. Sin embargo, se han propuesto los términos pervasividad para indicar la intensidad de la alteración y extensividad para indicar la distribución espacial de la alteración hidrotermal. Estos últimos términos fueron propuestos para cuantificar porcentualmente la intensidad y extensión de alteración hidrotermal. Sin embargo, en la práctica nunca se generalizó su uso en tal sentido, pero el término pervasivo se utiliza corrientemente para referirse a que tan penetrativa es la alteración de las rocas. Una alteración pervasiva se refiere a aquella en que una roca está completamente alterada en todo su volumen, en contraposición a alteraciones poco pervasivas donde la alteración se limita a las vecindades de las fracturas por donde circuló el fluido, pero las partes masivas de las rocas están inalteradas.

2.4.2 Productos típicos de reemplazo por alteración

Aunque como se indicó anteriormente dependiendo de la intensidad de la alteración la mineralogía final hidrotermal puede no ser influenciada por la composición mineralógica inicial de la roca. La composición de algunos minerales proporciona los componentes para ciertos minerales hidrotermales, a saber:

Tabla 0.5 Alteración hidrotermal, productos típicos de reemplazo por alteración

Vidrio Volcánico	Zeolitas (Ej. mordenita, laumontita), cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas (Ej. Montmorillonita)
Magnetita/ilmenita/titanomagnetita	Pirita, leucoxeno, esfena, pirrotina, hematita
Piroxena/anfíbola/olivino/calcita/biotita	Clorita, illita, cuarzo, pirita, anhidrita
Plagioclasa cálcica, biotita	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita
Plagioclasa cálcica	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, montmorillonita, epidota
Ortodclasa/sanidina	Adularia

2.4.3 Procesos debidos a la alteración hidrotermal

Deposición directa: muchos minerales se depositan directamente a partir de soluciones hidrotermales. Para poder hacerlo es obvio que la roca debe tener pasajes para que el fluido pueda moverse dentro de ellas. Ej. diaclasas, fallas, fracturas hidráulicas, discordancias, zonas brechosas, huecos, poros y fisuras.

El cuarzo, calcita y anhidrita forman fácilmente venillas y relleno de huecos en las rocas, pero también se ha observado localmente clorita, illita, adularia, pirita, pirrotina, hematita, wairakita, fluorita, laumontita, mordenita, prehnita y epidota que deben haberse depositado directamente de un fluido hidrotermal.

Reemplazo: Muchos minerales de las rocas son inestables en un ambiente hidrotermal y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos metaestables en las nuevas condiciones. La velocidad del reemplazo es muy variable y depende de la permeabilidad de la roca.

Lixiviación: Algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales al atravesarlas, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada. En ciertas condiciones, como por ejemplo donde se condensa vapor acidificado por oxidación de H_2S , la solución

ácida resultante (por la presencia de H_2SO_4) ataca las rocas disolviendo minerales primarios, pero sin reemplazar los huecos resultantes que se producen. Esto puede en casos extremos resultar en una masa porosa de cuarzo residual.

La alteración hidrotermal y mineralización concomitante son el resultado de un proceso irreversible de intercambio químico entre una solución acuosa y rocas adyacentes. Ciertos componentes son extraídos selectivamente de las rocas de caja y son agregados al fluido y otros componentes (incluyendo metales de mena) son selectivamente incorporados por las rocas (o forman una cubierta sobre ellas) y son removidos del fluido hidrotermal. El resultado de este proceso depende de las condiciones físicas en la interfase fluido-roca y en las cantidades relativas de fluido y roca involucradas en el proceso de intercambio químico (razón agua/roca). Solo la roca alterada es el resultado visible del proceso, porque el fluido es removido del sistema, a excepción de posibles inclusiones fluidas en los minerales precipitados.

Algunos tipos de alteración involucran solo una transferencia en un sentido del fluido a la roca o viceversa, a saber:

Tabla 0.5 Alteración Hidrotermal, transferencias de fluido

Ganancia o pérdida de	
Hidratación / deshidratación,	H_2O
Carbonatación / decarbonatación,	CO_2
Oxidación / reducción,	O_2
Sulfuración / reducción	S_2

Estos procesos están controlados por: presión, fugacidad, concentración, actividad o potencial químico de los componentes involucrados. La precipitación o disolución de un mineral también es un proceso en un sentido y el parámetro controlador es la solubilidad.

Las reacciones de intercambio iónico son importantes en los procesos de alteración. Ej. el intercambio de Mg^{2+} por Ca^{2+} (intercambio catiónico); Las reacciones de intercambio iónico también se conocen como cambio de base y corresponden a una reacción por la cual cationes adsorbidos en la superficie de un sólido, tal como un mineral de arcilla o zeolita son reemplazados por cationes en la solución circundante. El intercambio de cationes Ca^{2+} y Na^{+} de plagioclasas por K^{+} para originar feldespato potásico corresponde a este tipo de reacción y caracteriza a la alteración potásica. El intercambio de cationes metálicos de los minerales de una roca por H^{+} corresponde a un caso especial, conocido como hidrólisis y es muy importante en la mayoría de los tipos de alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal produce cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad (aumento o disminución), porosidad, permeabilidad (aumento o disminución), susceptibilidad magnética (usualmente disminuye, pero puede aumentar cuando se deposita magnetita hidrotermal) y resistividad (usualmente decrece porque los sulfuros metálicos permiten el paso de corrientes eléctricas, pero masas silíceas producto de alteración pueden ser más resistivas). Simultáneamente con esos cambios físicos pueden ocurrir eventos relacionados o sin relación como fallamiento y formación de diaclasas/fracturas que afectan el proceso de alteración.

El reemplazo, lixiviación y depositación de minerales también causa cambios químicos cuya extensión y naturaleza varía mucho, pero los cuales son obviamente función de la mineralogía.

El comportamiento típico de los elementos mayores durante la alteración hidrotermal en rocas volcánicas reaccionando con un fluido caliente son los siguientes:

Tabla 0.6 Alteración Hidrotermal, comportamiento de elementos mayores

SiO ₂	Agregado	Cuarzo, cristobalita, silicatos.
TiO ₂	No cambia	Esfena, leucoxeno.
Al ₂ O ₃	Agregado y removido	Muchos silicatos, algunos óxidos.
Fe ₂ O ₃ y FeO	Agregado y removido	Cloritas, pirita, pirrotita, siderita, epidota, hematita.
MnO	No cambia	
MgO	Removido	Clorita, biotita.
CaO	Agregado y removido	Calcita, wairakita, epidota, prehnita, anhidrita, montmorillonita, esfena, fluorita, zeolitas, wollastonita.
Na ₂ O	Agregado y removido	Albita
K ₂ O	Agregado	Adularia, illita, alunita, biotita.
CO ₂	Agregado	Calcita, siderita.
S, SO ₃	Agregado	Anhidrita, alunita, pirita, pirrotina, baritina.
H ₂ O	Agregado	Todas las arcillas, epidota, prehnita, zeolitas, diasporo, pirofilita, anfíbolos.
P ₂ O ₅	No cambia o agregado	Apatita.
Cl	Removido	Halita.
F	Agregado o no cambia	Fluorita.

Elemento mayor cambio mineral hidrotermal en el que se incorpora reacciones de hidrólisis.

La estabilidad de feldspatos, micas y arcillas en procesos de alteración hidrotermal es comúnmente controlada por hidrólisis, en la cual K⁺, Na⁺, Ca²⁺, y otros cationes se transfieren de minerales a la solución y el H⁺ se incorpora en las fases sólidas remanentes. Esto ha sido denominado metasomatismo de hidrógeno (Hemley and Jones, 1964).

La hidrólisis es una reacción de descomposición que involucra la participación de agua. En geología corresponde a la reacción entre minerales silicatados ya sea con agua pura o con una solución acuosa, en la cual los iones H⁺ y OH⁻ son consumidos selectivamente.

2.4.4 Clasificación de Alteración Hidrotermal

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y texturas en distintas rocas. Esto hace que sea complicado tener un criterio uniforme para la clasificación de tipos de alteración. Los autores de mapeos y de estudios de alteración generalmente han simplificado sus observaciones clasificando las rocas alteradas en grupos.

El método más simple es mediante la utilización del mineral más abundante y más obvio en la roca alterada. De ahí derivan denominaciones como:

Tabla 0.7 Alteración Hidrotermal, clasificación de la alteración hidrotermal

Denominación	Presencia dominante de
Silicificación	sílice o cuarzo
Sericitización	sericita
Argilización	minerales de arcilla
Cloritización	clorita
Epidotización	epidota
Actinolitización	actinolita Etc.

Aunque esta nomenclatura simple se emplea comúnmente, en realidad los minerales de alteración no se presentan individualmente, sino que forman ciertos grupos o asociaciones de minerales de alteración.

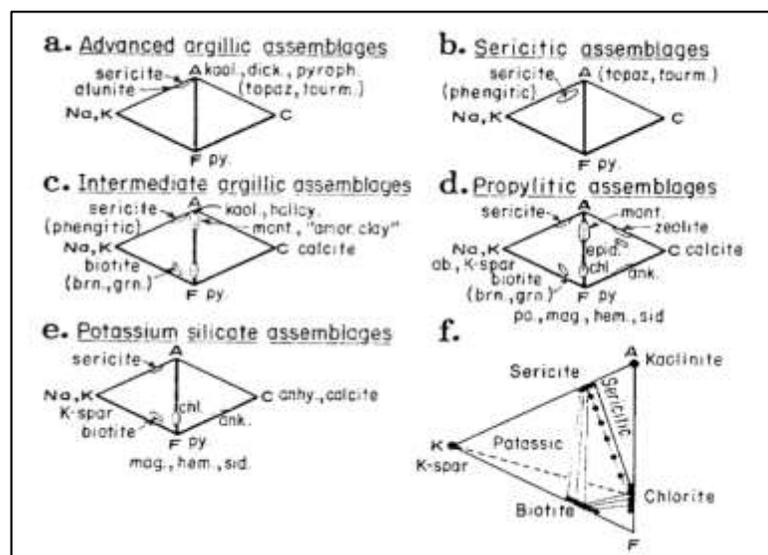
Otra aproximación al problema de clasificar alteraciones hidrotermales es basarse en los cambios químicos dominantes durante la alteración. Un ejemplo de esto son los términos: metasomatismo de hidrógeno, metasomatismo potásico o metasomatismo de flúor. Sin embargo, esta clasificación no es muy práctica debido a que son varios los elementos que son introducidos o removidos de las rocas en distintas proporciones, lo que complica este tipo de clasificación en detalle.

Es más práctico clasificar las alteraciones hidrotermales por la asociación de minerales de alteración presentes en las rocas. Una asociación de minerales de alteración refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo que tomó para lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido.

Se requiere una observación detallada de los minerales y sus texturas para identificar la asociación de minerales correcta. Por otra parte, existe una variedad de términos para designar tipos de alteración basados en este criterio que han usado diferentes autores. Ej. alteración argílica intermedia y avanzada, propilítica, biotita-ortoclasa.

No siempre los términos para tipos de alteración han sido utilizados con un criterio uniforme por distintos autores. Por ejemplo, el término alteración fílica fue originalmente propuesto por Burnham (1962) para incluir alteraciones que produzcan filosilicatos, tanto alteraciones sericíticas, como biotíticas. Sin embargo, Lowell y Gilbert (1970) y otros autores en adelante han usado el término alteración fílica a rocas con alteración sericítica o cuarzo-sericítica.

Figura 2.3. Asociaciones minerales de ocurrencia común (basado en Meyer y Hemley, 1967)



Meyer y Hemley (1967) clasificaron la alteración hidrotermal en los tipos: propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica.

Propilítica:

Presencia de epidota y/o clorita y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis o tierras alcalinas; H₂O, CO₂ y S pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal.

Argílica Intermedia:

Importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, smectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.

Sericítica o cuarzo-sericítica:

Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración.

Argílica avanzada:

Gran parte de los minerales de las rocas transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo). En casos

extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica” en inglés).

Potásica:

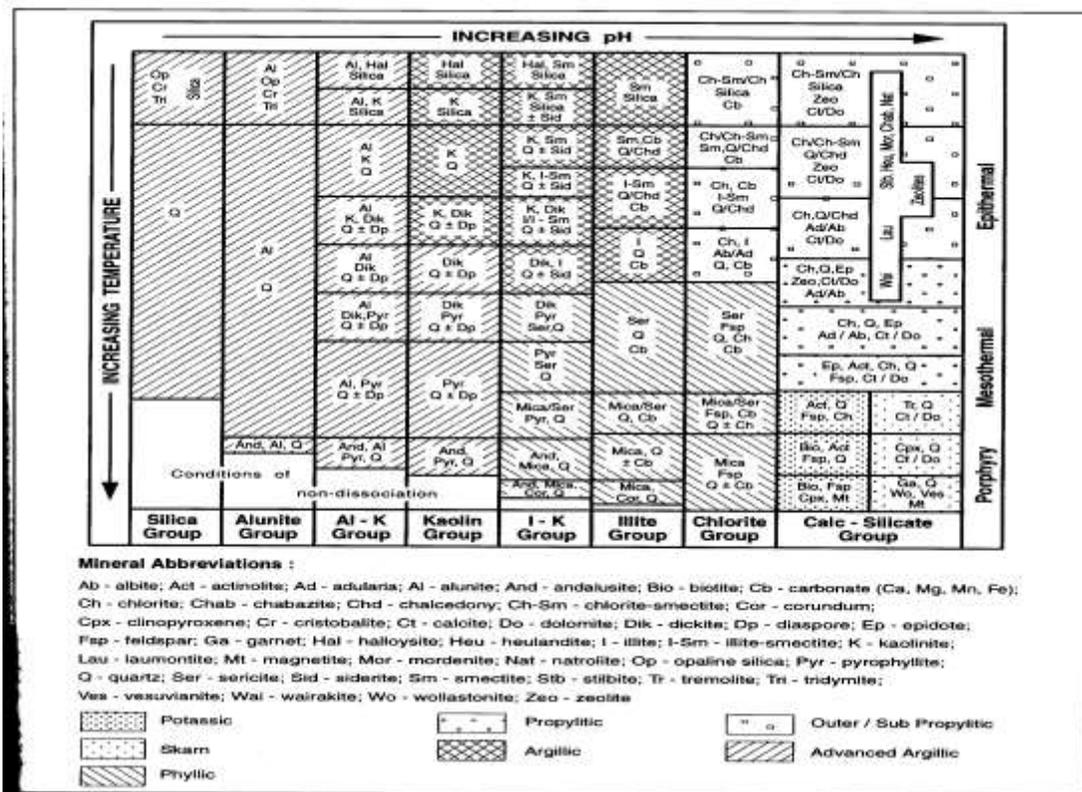
Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C). Por esta razón, frecuentemente se refiere a la alteración potásica como tardimagmática y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones intrusivos.

Carten (1986) definió la alteración sodico-cálcica en las zonas de raíz del pórfido cuprífero Yerrington (Nevada, USA), la que se caracteriza por una asociación de actinolita, albitaoligoclasa-andesina, epidota, magnetita, clorita, cuarzo, escapolita. Esta alteración ocurre en la porción profunda de pórfidos cupríferos y se desarrolla en forma simultánea con la alteración potásica a niveles más altos. En muchos estudios los minerales que la caracterizan la alteración sodico-cálcica se atribuían indistintamente a una alteración propilítica “de alta temperatura” y/o a alteración potásica.

Además, existe la alteración tipo skarn, la cual corresponde a la transformación de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) a minerales calcosilicatados en zonas adyacentes a intrusivos. Se caracteriza por la presencia de granates (andradita y grosularita), wollastonita, epidota, diópsido, idocrasa, clorita, actinolita. En los casos que los carbonatos son magnésicos (dolomitas) la asociación incluye: forsterita, serpentina, talco, tremolita, clorita. Skarn es un término de origen sueco para designar rocas calcáreas metamorizadas, pero su uso se ha generalizado para depósitos minerales relacionados a fenómenos de metamorfismo de contacto y metasomatismo

ligados a intrusiones que cortan secuencias de rocas carbonatadas. Es un tipo especial de alteración en la que la litología original es determinante en la asociación mineral resultante. La alteración tipo greisen caracterizada por la asociación: muscovita, feldespato, cuarzo, topacio y/o turmalina. Se asocia a facies neumatolíticas de rocas graníticas y ocurre a temperaturas mayores de 250°C, generalmente en las porciones apicales o cúpulas de batolitos graníticos, donde se atribuye a la acumulación de volátiles provenientes del magma o por incorporación de fluidos provenientes de la deshidratación de las rocas intrusivas.

Figura 2.4. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (tomado de Corbett y Leach, 1998).



2.4.5 Localización de la mineralización hidrotermal

La causa de la localización de los yacimientos hidrotermales varía en cada distrito y puede ser debida a uno o más factores que hayan actuado conjuntamente, depende el carácter químico y físico de la roca huésped y de los rasgos estructurales, de la intrusión y de la profundidad de su formación, de los cambios que experimenten las aberturas de las rocas.

La mayoría de las soluciones hidrotermales son de origen magmática, puede determinar la localización del mineral. Estas pueden formarse en cualquier clase de roca huésped. Por ejemplo, las rocas carbonatadas permiten la formación de aberturas para la solución, es necesaria la permeabilidad, esta puede proporcionar el espacio poroso originario, las fisuras en los planos de foliación de los minerales, las brechas, juntas, fracturas, fallas y otros factores.

la visibilidad, los planos de exfoliación de los minerales, las brechas las juntas, las pequeñas fracturas y otros factores. La influencia de la roca huésped en la localización del mineral puede ser química o física o ambas cosas.

- Los rasgos estructurales son muy importantes en la localización de depósitos minerales.
- Las fisuras sirven como emplazamiento y de conductos para el desplazamiento de los fluidos minerales.
- La intersección de fisuras con rocas favorables, se utiliza en la búsqueda de depósitos de sustitución.
- Las fisuras múltiples y las zonas de cizallamiento localizan los depósitos minerales de un modo parecido a las fisuras.
- Las intersecciones fisurales son emplazamientos particularmente favorables a la deposición de mineral.

- Los plegamientos de arrastre fueron importantes localizadores para depósitos de sustitución. Las brechas son emplazamientos muy favorables, para los depósitos de relleno de cavidades, como para los de sustitución.
- Los rasgos debidos a sedimentación, como planos de estratificación, laminación o capas permeables continuas o capas impermeables suprayacentes, influyen en la localización de los minerales.

2.4.6 Paragénesis

La formación de los depósitos minerales de afinidad magmática, los minerales se forman según una secuencia ordenada, y esta disposición se denomina Paragénesis. Es muy sencilla en los depósitos magmáticos y metasomáticos de contacto, en los que minerales de ganga son primero, los óxidos vienen después y los sulfuros se presentan al último. En los depósitos que rellenan cavidades el mineral está dispuesto en capas sucesivas (denominado crustificación) depositándose una capa más joven encima de una más vieja, en algunos depósitos pueden hallarse presentes ocho o diez minerales o repetirse los mismos en una sola secuencia mineral.

Entre los minerales más comunes de los yacimientos de menas, generalmente la secuencia comienza con cuarzo, seguido de sulfuros o arseniuros de hierro, blenda, enargita, calcopirita, bornita, galena, oro, y minerales argentíferos complejos. Los últimos minerales se encuentran posados en cristales anteriores en las porciones centrales, no rellenas del yacimiento y denominadas drusas. La causa de estas secuencias minerales en los rellenos de cavidades se considera debida, generalmente, a disminución de la solubilidad de los minerales en solución, a consecuencia de un descenso de temperatura y de presión, es decir, los minerales más solubles permanecen más tiempo en solución y los menos solubles son los primeros en precipitarse. En los yacimientos de reemplazamiento sulfuroso se trata de solubilidad relativa, en el cual el mineral sustituido es más soluble que el que se deposita, de lo contrario no se produciría

la sustitución. El pH de las soluciones es un factor, determinante ya que los distintos minerales pueden ser depositados en condiciones alcalinas o neutras.

Figura 2.5. Alteración Hidrotermal, fases post-magmáticas.

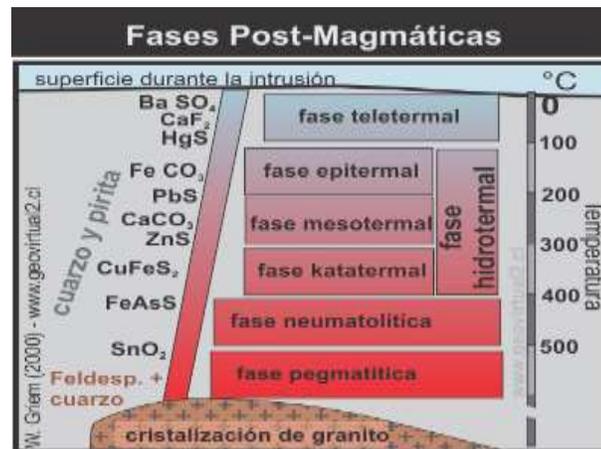


Tabla 0.8 Alteración Hidrotermal, cuadro paragenético de los minerales

	FORMACIONES						
	MAGMATICA	PEGMATITICA	NEUMATOLITICA	Epitermal	Sulfuros	HIDROTHERMAL	
Pt	Nativo, Sperrylita						
Cr	Crocoita, Cr-argentea						
Ni	Pentlandita, Forssmanita						Arsenuros de Ni
Fe	Piritita, Pirita, Magnetita, Hematita						
Mo							
W							
Ti	Perovskita, titanita, brookita, Ti-sulfuros, titanita, brookita						
Nb,Ta							
Zr,Th							
Li							
Be							
Sn							
Ge							
Co							
V							
Cu							
Zn							
Pb							
Bi(U)							
Au							
Ag							
As							
Sb							
Te							
Se							
Ba							
Sr							
Hg							
CO2							
P							
Cl							
B							
S							

2.4.7 Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal

Yacimientos Hipotermales o Katatermales

Los yacimientos hipotermales se forman a temperaturas y presiones altas en zonas en donde no existe conexión con la superficie. El rango general de temperatura determinada por métodos de geometría oscila entre 300° y 600° C son comunes las estructuras y texturas indicativas de reemplazamiento, la mayoría de las menas hipotermales son de grano grueso.

Los minerales de menas más comunes en la zona hipotermal son: oro, wolfranita, casiterita, bismutina, uraninita, y los arseniuros de cobalto y níquel, pueden estar en pequeñas cantidades de fluorita, baritina, magnetita, ilmenita y especularita; la piritita es el sulfuro más común de todas las zonas minerales, es abundante en los yacimientos hipotermales.

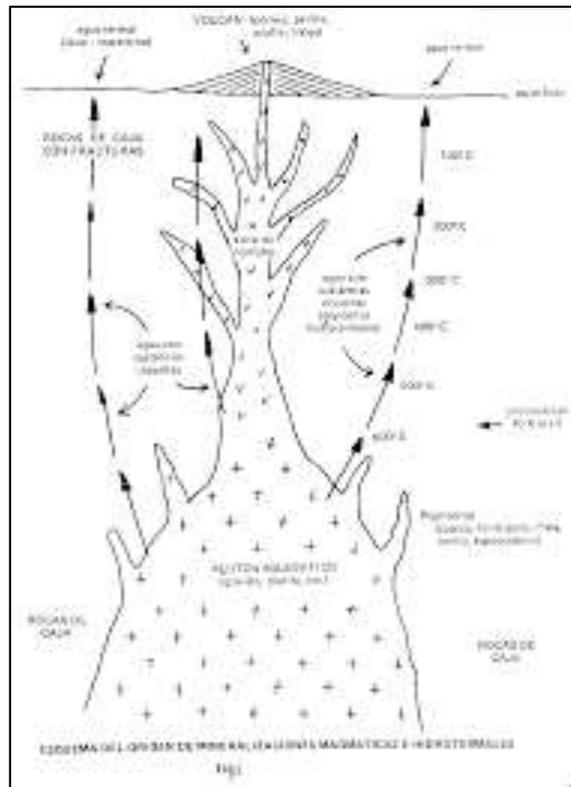
Muchos minerales de la zona ígnea metamórfica continúan sin interrupción en la zona hipotermal. Los minerales de ganga y productos de alteración son los siguientes: en la roca encajonante se presenta la turmalina negra, flogopita, moscovita, biotita, zinnwaldita, topacio, apatito, silimanita, hedenbergita, horblenda, tremolita, actinolita, las espínelas, cromita, y los feldespatos, estos minerales son característicos de los yacimientos ígneos metamórficos, pero también se encuentran en filones hipotermales, pueden estar presentes los granates como cristales individuales.

Los minerales de alteración generalmente van desde variedades de alta temperatura especies mesotermales típicas.

Las menas de la zona hipotermal se depositan a profundidades considerables y han sido llevadas a la superficie a través de procesos orogénicos y erosión. Consecuentemente, estas menas son más abundantes en las rocas metamórficas y en

rocas de los períodos geológicos más antiguos. Generalmente están cerca de masas de rocas ígneas plutónicas, aunque algunos grandes yacimientos pueden no estar ligados genéticamente con plutones particulares determinados.

Figura 2.6. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento hipotermal.



Yacimientos Mesotermales

Los yacimientos mesotermales se forman a temperaturas y presiones moderadas, según la clasificación de Lindgren, las menas se depositan alrededor de 200° y 300°C a partir de soluciones que probablemente tienen al menos una pequeña conexión con la superficie.

La zona Mesothermal tiene características tanto en la zona hipothermal como epithermal es una zona intermedia. Aunque la mayoría de los yacimientos mesotermiales muestran abundantes fenómenos de reemplazamiento, las texturas no son definitivas puesto que comúnmente están presentes algunas drusas y relleno de cavidades.

Las menas aparecen en muchos medios y en numerosas formas, la roca huésped puede ser ígnea, metamórfica, o más generalmente sedimentaria. Los yacimientos diseminados de cobre o porfíricos, se consideran mesotermiales. Los filones o chimeneas son comunes y los mantos son cuerpos irregulares de reemplazamiento pueden desarrollarse donde cortan a las rocas carbonatadas.

Los filones desarrollan generalmente estructuras bandeadas que se disponen paralelas a las paredes y se forman por reemplazamiento parcial de la roca huésped a lo largo de fisuras repetidamente abiertas, los productos más abundantes de los yacimientos mesotermiales son: cobre, plomo, zinc, molibdeno, plata, oro, entre los minerales más característicos están la calcopirita, enargita, bornita, tetraedrita tennantita, esfalerita, galena, calcosina, así como otros minerales menos frecuentes, los minerales de ganga incluyen cuarzo, pirita, y carbonatos; un yacimiento típico de cobre – plomo-cinc puede incluir todos estos minerales y otros.

Extensas zonas de alteración rodean muchos yacimientos mesotermiales, los productos de alteración incluyen sericita, cuarzo, calcita, dolomita, pirita, ortosa, clorita, y minerales arcillosos.

Lindgren, señaló que los yacimientos mesotermiales no contienen granate, topacio, piroxenos, anfíboles, o turmalina, que son minerales de alta temperatura, ni zeolitas que son estables en temperaturas bajas.

Muchos yacimientos mesotermales están estrechamente relacionados con rocas ígneas, tanto espacialmente como genéticamente; en otros no está muy clara existe una amplia variedad de yacimientos mesotermales. (ver a Parck o Bateman).

Figura 2.7. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento mesotermales.



Yacimientos Epitermales

Los yacimientos epitermales son productos de origen hidrotermal formados a profundidades someras y a bajas temperaturas. La depositación tiene lugar normalmente dentro de los 900m. de la superficie, en el rango de temperaturas de 50° y 200°C. La mayoría están en forma de rellenos de filón, fisuras irregulares ramificadas, stockworks o chimeneas de brecha. El reemplazamiento se conoce en muchas de las menas, pero son más frecuentes los rellenos de espacios abiertos y algunos yacimientos son la forma dominante de emplazamiento. Las cavidades de drusas, estructuras en peine, crustificaciones y el bandeado simétrico son generalmente observables. Las fisuras tienen una conexión directa con la superficie permitiendo que

los fluidos mineralizantes fluyan con relativa facilidad, de hecho, algunas termales y fumarolas son probablemente expresiones superficiales de sistemas epitermales subyacentes. Las texturas coloformales son también características de la zona epidermal, reflejando las temperaturas moderadas y la libre circulación.

Algunos yacimientos pueden estar directamente relacionados con cuerpos intrusivos de asentamiento profundo, pero esta condición sola es demostrable bajo condiciones especiales de erosión. Muchos yacimientos epitermales no tienen ninguna asociación observable con rocas intrusivas. La mayoría de las menas están en áreas de vulcanismo terciario o cerca de ellas especialmente próximas a los cuellos volcánicos y otras estructuras que comunican con los materiales de origen infrayacente. Puesto que estos yacimientos se forman cerca de la superficie, son más abundantes en rocas jóvenes, aunque, por otra parte, podrían haber sido eliminados ordinariamente por erosión. El medio volcánico engendra aguas calientes a profundidad en diversas minas de mercurio de California.

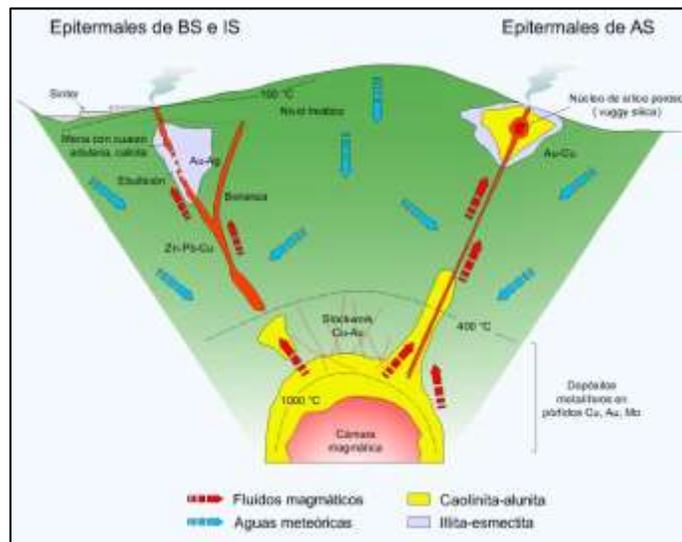
Las rocas regionales cerca de los filones epitermales normalmente están muy alteradas; una porosidad alta permite a los fluidos asociados atravesar las rocas encajonantes grandes distancias y un diferencial de temperaturas favorable estimula las reacciones entre la roca huésped y las soluciones que lo atraviesan.

Como resultado de la alteración de la roca, es extensa y visible los principales productos de alteración son: clorita, sericita, alunita, zeolitas, arcillas, adularia, sílice y pirita, la clorita es el mineral de alteración normal, como intermedio con las rocas volcánicas máficas la propilitización es el proceso dominante, siendo la propilita un agregado de clorita, pirita, epidota, sericita, carbonatos y albita secundarios; la sílice y la pirita de los halos de alteración hidrotermal son generalmente de grano fino.

Los minerales de ganga en los filones hidrotermales incluyen cuarzo, calcedonia, adularia, calcita, dolomita, rodocrosita, baritina, y fluorita. Los minerales hipotermales típicos, tales como turmalina, topacio y granate están ausentes.

Los minerales de mena característicos de los yacimientos epitermales incluyen los sulfoantimoniuros y sulfoarceñiuros de plata (polibasita, stephanita, pearcita, pirargirita, proustita y otros), los telururos de oro y plata (petzita, $[(Ag, Au)_2 Te]$, Silvanita $[(Au, Ag)Te_2]$, Krennerita $[(Au, Ag)Te_2]$, calaverita $(AuTe_2)$, hesita (Ag_2Te) y otros), estibina, acantita, cinabrio y mercurio nativo y electro (la aleación natural de oro y plata), fueron depositadas en condiciones epitermales. Otros minerales de bonanza epitermales contienen telururos de oro y sulfuros, sulfosales y seleniuros de plata.

Figura 2.8. Clasificación de Yacimientos según el origen Hidrotermal, yacimiento epitermal.



Yacimientos Teletermales

Algunos yacimientos minerales se forman por fluidos hidrotermales que han emigrado tan lejos de su origen que perdieron la mayor parte de su potencial para reaccionar químicamente con las rocas circundantes. Estas fases terminales del sistema hidrotermal canalizado se denominan fluidos Teletermales (del griego, tele: lejos). La zona teletermal es un medio somero donde las temperaturas y las presiones son bajas donde las características de los minerales son similares, tanto si se precipitaron de aguas meteóricas descendentes como fluidos hidrotermales ascendentes diluidos por aguas subterráneas más frías.

La mineralogía de las menas Teletermales es simple, incluyen minerales como: esfalerita pobre en hierro y galena pobre en plata, calcopirita, pirita, marcasita, calcosina, y cantidades menores de otros sulfuros. El cobre nativo se deposita en zona termal y los minerales a óxido son prácticamente nulos en cuanto la variedad.

Muchos yacimientos de fluorita y baritina, han alcanzado a veces las dos últimas proporciones económicas. En algunos distritos, la galena, esfalerita, baritina, y fluorita se encuentran juntos en cantidades explotables. La alteración precede a la depositación del mineral, reduce el grado de correlación entre zonas blanqueadas y los cuerpos minerales.

Una característica de los yacimientos Teletermales es la falta de efectos asociados de alteración en la roca encajonante. En contraste con la amplia alteración de la roca encajonante de la zona epitermal, la zona teletermal no exhibe ninguna alteración o solamente silicificación, piritización, y carbonitización mínima. La sílice criptocristalina puede remplazar a la caliza próxima a las menas, y los cristales de las menas esparcidos pueden definir a una zona de hierro reducido a sedimentos clásticos, pero el halo de alteración raramente es lo suficientemente visible para ser una buena guía de la mena. No obstante, la argilitización de sedimentos porosos puede blanquear

efectivamente amplias zonas cerca de los yacimientos teletermales, y si bien la alteración precede a la deposición del mineral, reduce el grado de correlación entre zonas blanqueadas y los cuerpos minerales.

La mayor parte de los yacimientos Teletermales son estratiformes. La ausencia de una diagnosis característica ha dado a discrepancias sobre su origen. Ohle (1970) resumió seis métodos y que a continuación se mencionan:

- Depositación singenética de bajo grado y dispersa, con concentración posterior por Metamorfismo.
- Depositación singenética dispersa, con concentración posterior por aguas subterráneas de flujo artesiano.
- Depositación singenética dispersa, con concentración posterior ascendentes.
- Depositación a partir de fluidos ígneos por transporte hidrotermal o gaseoso, como vapor Metálico.
- Depositación a partir de aguas connatas de cuencas que fueron removidas hacia arriba por compactación u otro tipo de descarga.

Las texturas y estructuras no son diagnostico ya que las menas se depositan tanto por reemplazamiento como relleno de espacios abiertos y los minerales pueden variar desde afaníticos o de grano muy grueso.

Los yacimientos Teletermales son probables que sean estructuralmente simples. Se formaron a grandes distancias de los posibles centros magmáticos y normalmente lejos de áreas de fuertes actividades tectónicas. Son posibles tres tipos genéticos: singenéticos, diagenéticos y epigenéticos.

La circulación de los fluidos y deposición de las menas fue controlada por todos los tipos de permeabilidad. La mayoría de las menas están en capas tendidas que muestran

poca o ninguna evidencia de deposición a partir de fluidos ascendentes. Su aspecto y carácter general y se puede interpretar como productos de procesos meteórico o sedimentarios.

Yacimientos Xenotermales.

Los plutones intrusionados a profundidades someras expelen fluidos de alta temperatura en medios de baja presión. Bajo estas condiciones, los gradientes de temperatura y presión son excepcionalmente acusados, originando que los fluidos minerales sufran un rápido enfriamiento y pérdidas repentinas de presión durante su ascenso. Como resultado, los minerales de mena se depositan solamente en una corta distancia y en una paragénesis confusa.

Los minerales más tempranos en formarse son variedades de alta temperatura, pero el rápido enfriamiento a temperaturas cercanas a la superficie requiere de deposición de minerales típicos de baja temperatura durante los estados finales de actividad hidrotermal. Además, la mayoría de los minerales de alta temperatura no están en equilibrio con las fases más frías y son así atacados y alterados durante la mineralización posterior.

Por lo tanto, las indicaciones de presión y temperatura pueden ser complejas y confusas. La deposición conjunta de menas de alta y de baja temperatura se forman los denominados yacimientos Xenotermales (del griego, xeno: extraño, anormal). Esta categoría fue introducida por Buddinton (1935) como una adición necesaria a la clasificación de Lindgren.

Dependiendo de lo repentino que disminuya la temperatura y presión al ascender los fluidos mineralizantes hacia la superficie, los minerales de alta y baja temperatura pueden ser bien descargados juntos o bien distribuidos a lo largo de una zona

determinada. La descarga tiene lugar cuando los minerales que ordinariamente no se encuentran juntos son precipitados prácticamente simultáneos.

En algunos yacimientos Xenotermiales los minerales más superficiales aparecen junto con los minerales más profundos de temperatura más alta, pero la secuencia de deposición es similar a la Paragénesis normal de los minerales filonianos. Este tipo de yacimiento se conoce como solapados o telescopiamiento, ya que cada zona se solapa con la siguiente. El solapamiento y la descarga caracterizan a los yacimientos Xenotermiales.

La mayoría de los yacimientos Xenotermiales están asociados con rocas volcánicas y tobáceas de edad relativamente reciente, aunque también se encuentran a profundidades someras en rocas de todos tipos y edades. Los yacimientos forman generalmente filones compuestos, desarrollados por reaperturas periódicas de las fisuras y de posición de minerales de temperatura progresivamente más bajas.

Los solapados muestran una gradación sencilla en el espacio desde minerales de alta, intermedia y baja temperatura. Las texturas de fisuras abiertas tienden a predominar sobre las texturas de reemplazamiento puesto que los sistemas son penetrantes y no hay tiempo suficiente para que tengan lugar la mayor parte de las reacciones de reemplazamiento. Las rocas huéspedes están típicamente fracturadas, rotas o cizalladas, y los minerales hidrotermales son generalmente de grano fino.

La mineralogía de los yacimientos Xenotermiales es normalmente compleja debido a los amplios límites de las temperaturas involucradas. Los minerales típicos de alta temperatura, tales como la casiterita, wolframita, magnetita, especularita, sheelita, y molibdenita, aparecen como minerales característicos de medios a baja temperatura, tales como sulfosales de plata. Además, cualquiera de los minerales comunes de yacimientos mesotermiales puede estar presentes en los conjuntos Xenotermiales.

Los minerales de ganga incluyen asociaciones variadas tales como ortosa, turmalina, topacio, augita, diópsido, flogopita, calcedonia, apatito, y alunita; Pero el berilo, turmalinas alcalinas espodumena y otros minerales de alta presión no se forman en los medios Xenotermales.

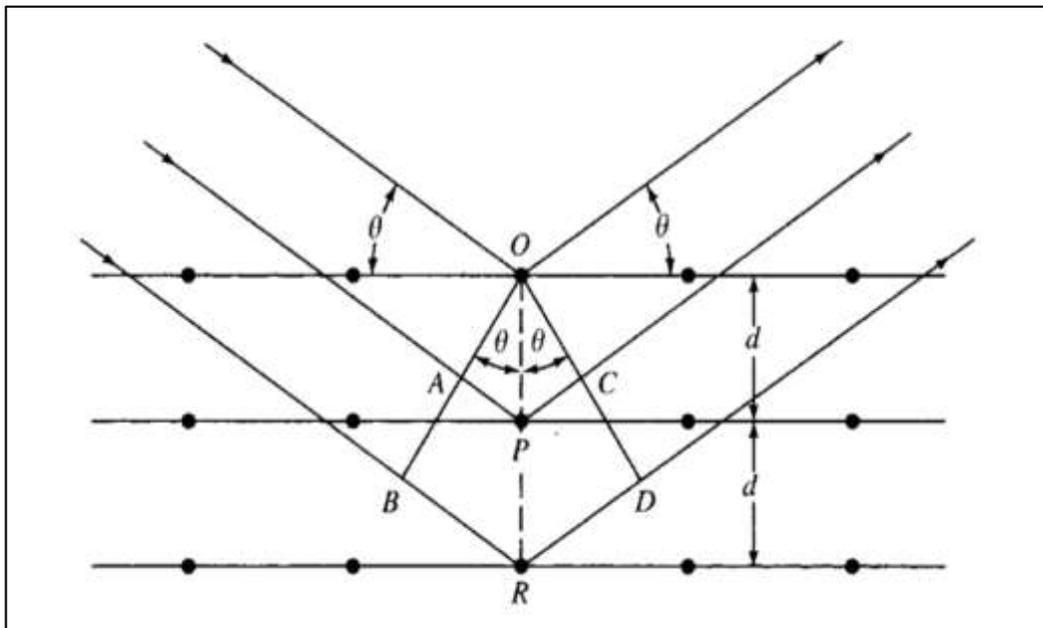
2.5 Difracción de rayos X de especies Cristalinas

Cuando un haz de rayos X choca contra la superficie de un cristal forma un ángulo, una parte del haz es dispersada por la capa de átomos de la superficie.

Esta porción del haz penetra en la segunda capa de átomos y vuelve, queda una fracción dispersada que pasa a la tercera capa y así sucesivamente.

Este es un efecto acumulativo de dispersión producida por los centros del cristal.

Figura 2.9. Difracción de rayos X de especies Cristalinas, ley de Bragg.



Para que ocurra la difracción se requiere:

1. El espaciado entre las capas de átomos sean aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la radiación.
2. Los centros de dispersión estén distribuidos en el espacio de una manera regular.

En la ley de Bragg un haz estrecho de radiación choca contra la superficie de un cristal la dispersión tiene lugar como consecuencia de la interacción de la radiación con los átomos localizados en O, P y R. si tenemos una distancia: formando un ángulo θ .

$$AP + Pc = n\lambda$$

Por ello la radiación dispersada estará en fase en OCD y el cristal parecerá reflejar la radiación X.

$$AP = PC = d \text{ Sen}\theta$$

Teniendo como consideración la ecuación anterior, se pueden escribir las condiciones para que tenga lugar la interferencia constructiva del haz que forma un ángulo θ con la superficie del cristal.

$$n\lambda = 2d \text{ Sen}\theta \text{ (ecuacion general de Bragg)}$$

Los rayos X son reflejados por el cristal solo si el ángulo de incidencia satisface:

$$\text{Sen}\theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

Todos los demás ángulos, dan lugar a interferencias destructivas.

2.5.1 Determinación de estructuras cristalinas

Desde un punto de vista de ciencia básica, el esclarecimiento de estructuras cristalinas hasta el nivel de conocer todas las posiciones atómicas en una celda elemental es la principal aplicación de la difracción de rayos X. El estudio difractométrico de un cristal nuevo pasa por dos etapas: la determinación de la forma, simetría y dimensiones de la celda elemental y la investigación de las posiciones atómicas.

La geometría de la celda elemental se resuelve con base en la medición de las posiciones angulares de los picos de difracción. El grado de dificultad de esta tarea puede ser bajo o medio. Las posiciones atómicas se descifran a partir del análisis de las intensidades de los picos de difracción. Esta tarea puede ser muy difícil. Tanto, que para ella se ha reservado del nombre de análisis estructural.

La ecuación básica del análisis estructural difractométrico es nuestra (III.15), enfocada en la definición del factor de estructura (III.12). Las posiciones atómicas rk determinan el factor de estructura F y éste a su vez determina la intensidad de los picos I . La medición del conjunto de las I en un patrón debe conducir, entonces, al conocimiento de las posiciones rk . Hay dificultades importantes en este camino. Primero, nuestras fórmulas no dan las rk a partir de las I de manera explícita o “despejada”, sino a través de unos exponentes adentro de unas sumas que pueden ser complicadas. Más importante y fundamental es el llamado problema de la fase, que presentamos en seguida.

La magnitud que se mide en un experimento de difracción es la intensidad de los picos.

La medición de la intensidad conduce al conocimiento del módulo al cuadrado del factor de estructura $|F|^2$, y no al factor de estructura en sí. El factor de estructura es un número complejo, determinado unívocamente por su módulo y su fase. Esta última

magnitud no se puede medir por difracción y esto implica la imposibilidad de un despeje unívoco de las rk en la ecuación (III.12). Este es el problema de la fase.

Un corolario importante del problema de la fase es la llamada *Ley de Friedel*. Esta establece que las determinaciones estructurales basadas únicamente en mediciones de difracción “normal” siempre darán por resultado estructuras cristalinas centrosimétricas. Un cristal enantiomórfico, medido en un difractómetro de rayos X, se verá como centrosimétrico. Naturalmente, los cristalógrafos han elaborado técnicas para esclarecer satisfactoriamente hasta las más complicadas estructuras y se las han agenciado para resolver el problema de la fase por medio de recursos diversos. Algunas de las técnicas que se emplean con este propósito son las siguientes:

- Medición de efectos ópticos como la rotación del plano de polarización de la luz. Este fenómeno distingue los cristales céntricos de los no-céntricos.
- Dispersión anómala. Si la radiación incidente es cercana a una resonancia electrónica en la muestra, se rompe la Ley de Friedel.
- La estructura investigada tiene que cumplir las leyes de la cristalografía. Esto introduce ligaduras para las posiciones atómicas permisibles.
- Métodos matemáticos avanzados, *teoría de la implicación*. sumas que pueden ser complicadas. Más importante y fundamental es el llamado *problema de la fase*, que presentamos en seguida.

Las técnicas más poderosas de análisis estructural se basan en la investigación de monocristales. Se tienen difractómetros especializados con este fin y se dispone de programas de cómputo y bases de datos poderosos asociados a esta actividad. Los métodos policristalinos poseen la desventaja del traslape de picos asociados a planos cristalográficos con orientación diferente, pero distancia interplanar parecida o igual.

La técnica policristalina que mejor permite enfrentar este problema es el *Método de Rietveld*.

2.5.2 Análisis cualitativo de fases

El patrón de polvos de una fase cristalina es su huella digital. Salvo las excepciones que veremos, existe una relación biunívoca entre patrón y sustancia. De aquí que se haya sistematizado el conjunto de los patrones de las sustancias conocidas para su identificación.

Esta tarea la lleva actualmente el llamado Centro Internacional para Datos de Difracción (*International Center for Diffraction Data®*, *ICDD®*, <http://www.icdd.com/>). La cantidad de sustancias recogidas en el llamado Powder Diffraction File (PDF) es del orden de 100,000. La información se encuentra en forma de tarjetas escritas, en bandas magnéticas y en discos ópticos para ser procesada por computadoras personales. Se tienen procedimientos manuales y automatizados para la identificación sistematizada de materiales.

La limitación de este análisis está dada por la existencia de fases que poseen celdas elementales prácticamente iguales, ocupadas por átomos de número atómico similar. Por ejemplo, las espinelas de hierro sustituidas parcialmente por níquel o cromo producen todas patrones de difracción prácticamente indistinguibles. En casos como éste debe complementarse la investigación con otra técnica, como puede ser algún método de análisis elemental.

2.5.3 Análisis cuantitativo de fases

Si el patrón estudiado fue producido por una mezcla de fases, entonces los picos de cada fase tendrán intensidades proporcionales a las respectivas concentraciones. Esto es utilizado para realizar determinaciones cuantitativas de las concentraciones

presentes. Los métodos elaborados con este propósito poseen actualmente complejidad y automatización elevadas. Se tienen programas de computadora que calculan la superposición de los patrones de las fases puras, con cada patrón multiplicado por un factor de "peso" proporcional a la concentración, de modo que el patrón suma (teórico) se ajuste al patrón experimental según un criterio de mínimos cuadrados. De estos cálculos se obtienen las concentraciones buscadas.

Figura 2.10. Difracción de rayos X de especies Cristalinas, ilustra un caso de identificación cuali- y cuantitativa de fases en una mezcla polifásica natural.

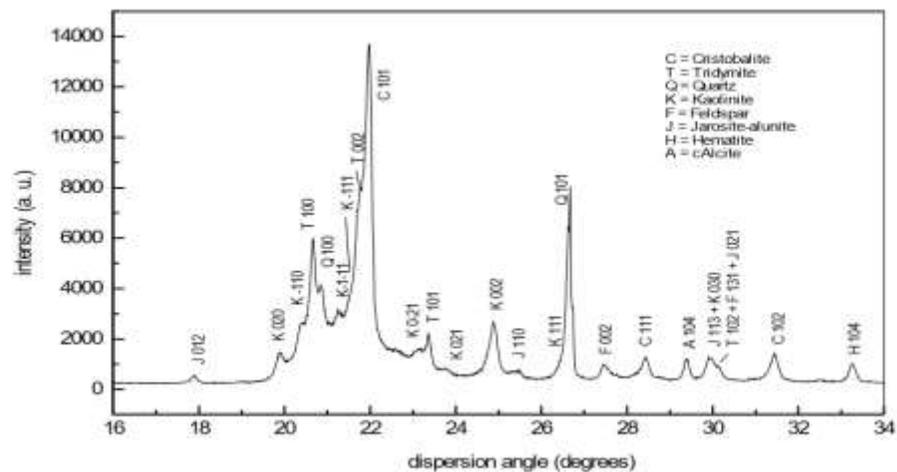


Tabla 0.9 Difracción de rayos X de especies Cristalinas, resumen de los resultados del análisis cuantitativo de fases efectuado

FASE	C	T	Q	K	F	J	H	A	Amorfo
FRACCION EN PESO	25(2)	8(1)	13(1)	14(1)	2(.5)	4(.7)	1(.3)	1(.3)	32(3)

2.6 Método Rietveld

2.6.1 Reseña Histórica

Hugo Rietveld inventó su hoy famoso método en la segunda mitad de los 60's. En aquella época las técnicas policristalinas de difracción (rayos X, neutrones) se consideraban incomparablemente inferiores a las de monocristales, especialmente si el problema a resolver era la determinación de una estructura cristalina hasta el nivel de encontrar las posiciones atómicas en la celda elemental.

Hoy día los métodos monocristalinos siguen siendo la herramienta principal del Análisis Estructural Cristalográfico, particularmente en la investigación de estructuras de baja simetría y/o elevada complejidad. Pero el Método de Rietveld ha proporcionado a la alternativa policristalina nuevas e importantes posibilidades, que están produciendo un incuestionable florecimiento de la difracción policristalina. La difracción de policristales, *a lo Rietveld*, conduce en la actualidad a un nivel muy elevado de detalle en la interpretación cuantitativa de los patrones de difracción que se obtienen en un difractor de polvos. Esta interpretación incluye la identificación cualitativa y el análisis cuantitativo de fases, la medición precisa de parámetros reticulares, la evaluación de la textura, la caracterización de imperfecciones tales como microdeformaciones y/o tamaño pequeño del cristalito y el refinamiento de las posiciones y ocupaciones de los lugares asociados a los átomos de las estructuras cristalinas investigadas. En el caso de difracción de neutrones, es posible el estudio de fenómenos de orden magnético en policristales.

El método de Rietveld es una técnica de *refinamiento*, es decir, se necesita un *modelo inicial* para comenzar el trabajo. ¿De dónde se obtiene la estructura modelo? Generalmente de los métodos monocristalinos. El método policristalino de Rietveld no suplanta al de monocristales; lo complementa. En el difractor de monocristales se determina la estructura de un cristal prácticamente ideal de una fase dada y con la

técnica policristalina se investigan características específicas de muestras reales que se apartan en cierta medida de la estructura modelo. Se tiene todo un abanico de casos solubles por Rietveld, desde la muestra casi igual al cristal ideal hasta estructuras complicadas que solo poseen un esqueleto básico común con el modelo.

La gran desventaja de los métodos policristalinos es que en ellos se superponen los picos de difracción que corresponden a diferentes familias de planos cuyas distancias interplanares son iguales o aproximadamente iguales. En el difractómetro de monocristales estas reflexiones se miden individualmente y esto permite la evaluación del módulo del factor de estructura de cada reflexión por separado.

Todos los métodos de análisis estructural anteriores a Rietveld tomaban como magnitudes centrales de la medición las *intensidades integrales* de los picos de difracción. Dada la proporcionalidad que existe entre esta intensidad integral y el módulo al cuadrado del factor de estructura $I \propto |F_{hkl}|^2$, el problema del análisis estructural consistía (y consiste, fuera del refinamiento de Rietveld) en hallar las posiciones atómicas a partir de la colección de $|F_{hkl}|^2$. El hecho de que no se mida el número complejo F , sino su módulo, produce importantes complicaciones de cálculo, que se manifiestan en el famoso *problema de la fase*. La solución de este problema requiere inspiración y transpiración en cada nuevo cristal que se descifra.

El análisis estructural por métodos policristalinos, en los 60's, se orientaba a obtener ventajas de las computadoras que comenzaban a emplearse con intensidad creciente en investigaciones. La idea era separar numéricamente los picos individuales que formaban los diferentes grupos de reflexiones parcialmente superpuestas que formaban un patrón de difracción. Se proponía una forma Gaussiana o Lorentziana a los picos y se refinaban los parámetros geométricos de las campanas de manera que el paquete de picos calculado y el experimental resultasen aproximadamente iguales. Se aplicaban mínimos cuadrados para optimizar el ajuste. Por este camino, a partir de un patrón con

picos parcialmente superpuestos, se obtenía la colección de intensidades integrales de los picos separados con ayuda de la computadora. Esta colección de $|F_{hkl}|^2$ se procesaba casi como si viniese de un experimento monocristalino.

Hugo Rietveld (n. Holanda, 1932) defendió su tesis de doctorado en la Universidad del Oeste de Australia, en 1964, en un tema de difracción monocristalina de rayos X y neutrones. Más tarde se unió a un grupo de difracción de neutrones en la hoy llamada Fundación Holandesa de Investigaciones Energéticas. Este grupo recién había construido un difractómetro neutrónico de polvos. La opción de policristales había sido seleccionada porque no resultaba realizable preparar monocristales en la mayoría de los casos de materiales de interés industrial que conformaban la problemática del instituto. Las primeras determinaciones estructurales, realizadas sobre materiales de elevada simetría, se desarrollaron sin mayores dificultades mediante el empleo del método tradicional. Pero pronto fue necesario descifrar las estructuras de baja simetría en materiales de los cuales no había monocristales. Nada resultó. La resolución del difractómetro se mejoró en todo lo posible, los picos separables se resolvieron en la computadora, los paquetes de picos se ajustaron como superposiciones de reflexiones, pero no se llegó a una determinación estructural satisfactoria.

Rietveld introdujo entonces un modo de pensar revolucionario. La medición cuidadosa de un patrón de difracción de polvos completo, punto a punto en un intervalo angular amplio, tomando en consideración tanto las zonas con picos como las de puro fondo, da lugar a una colección de intensidades $y_i = y(2\theta_i)$ causadas físicamente por un conjunto de factores físicos, susceptibles de ser cuantificados. Entre los más importantes de estos factores están la estructura cristalina (geometría de la celda elemental, posiciones atómicas, vibraciones térmicas), las características de la muestra (tamaño de cristalita, microtensiones, textura, mezcla de fases) y las condiciones instrumentales (foco, centralización y monocromaticidad del haz, absorción). Desde

el punto de vista del análisis de datos y la solución de problemas numéricos, el espectro $y_i = y(2\theta_i)$ conforma una base de datos grande asociada a una cantidad también grande, aunque soluble, de incógnitas a determinar. La proposición de Rietveld entonces consistió en resolver a la vez todas las incógnitas que permitiesen modelar satisfactoriamente el patrón de polvos completo, punto a punto, en vez de la colección de intensidades integrales obtenidas de éste. El planteamiento y la solución del problema de Rietveld implica el empleo de toda la información contenida en un patrón de difracción policristalina y conduce a la caracterización detallada de todos los factores físicos, estructurales e instrumentales que intervienen en el experimento. La estructura cristalina es uno de estos factores, el más importante.

Una característica personal de Rietveld que jugó un papel notable en la difusión mundial de su método fue su gesto de permitir el libre uso del programa que él elaboró para realizar en la práctica el refinamiento de estructuras a partir del ajuste de patrones punto a punto. Se trataba de un programa realmente complejo y poderoso, de modo que quien lo usaba se estaba beneficiando del gran volumen de trabajo realizado por Rietveld con anterioridad. La actitud de cooperación científica que Rietveld estableció desde el comienzo mismo del trabajo con esta nueva técnica favoreció la amplia aceptación del método que con justicia lleva su nombre.

Quizás uno de los goles más sonados obtenidos por esta técnica haya sido la determinación de la estructura cristalográfica de los superconductores de alta temperatura. En 1987, cuando se descubrieron las cerámicas superconductoras de alta temperatura $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, un número de cristalógrafos en laboratorios diversos se pusieron de inmediato a investigar la estructura de los “monocristales” que pudieron obtener de esta novedosa fase.

Desafortunadamente las respuestas obtenidas en laboratorios diferentes fueron igualmente diferentes. En paralelo, investigadores en varios laboratorios de difracción

policristalina de neutrones también intentaron descifrar la estructura del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ a través del refinamiento de Rietveld. Vaya sorpresa, las estructuras determinadas a partir de policristales resultaron más repetibles que las de monocristales, independientemente de que los modelos iniciales habían sido distintos. El método de Rietveld se mostró poderoso, rápido y estable. Luego se supo que los “monocristales” que fueron usados por los cristalógrafos clásicos presentaban micromaclas que invalidaban la condición de monocristalinidad y los resultados que se derivaran de ella.

Hoy son numerosos los problemas de análisis difractométrico que se resuelven con el método de Rietveld en todo el mundo. Se le emplea tanto en difracción de rayos X como de neutrones, se le considera una técnica sumamente poderosa para el análisis cuantitativo de fases, se le usa para refinar parámetros reticulares, se emplea en la evaluación de la perfección cristalina y de la textura. Finalmente, es una herramienta importante en la determinación de las posiciones atómicas en estructuras relativamente complejas. El éxito de su uso está dado, en buena medida, por la validez del modelo inicial de partida y por la adecuada estrategia de refinamiento que se aplique.

2.6.2 Explicación básica del método

Un refinamiento de Rietveld comienza por el planteamiento de una estructura modelo para la fase cristalina a investigar y la simulación en una computadora del patrón de difracción (punto a punto) que este material produce en un experimento de difracción policristalina. Cuando se ha comprobado que el patrón modelado se parece cualitativamente al experimental, se desarrolla un cuidadoso proceso de variaciones sistemáticas en las características de la muestra y del experimento, se calculan los efectos de estas variaciones sobre el patrón calculado de difracción y se va ajustando este proceso hasta lograr que el patrón simulado se parezca lo máximo posible al experimental. Se entiende que la estructura ha sido *refinada* cuando se ha llegado a un

modelo que da lugar a un patrón calculado que satisface un criterio de convergencia por mínimos cuadrados con el patrón experimental.

La forma de modelar el patrón punto a punto a partir de una estructura ideal es la siguiente:

El conocimiento del grupo espacial y los parámetros reticulares conduce a generar la colección de picos que conforman el patrón. Por aplicación de la Ley de Bragg, se obtiene de manera sistemática la lista de posiciones $2\theta_k$ de los picos posibles. Las intensidades integrales de todos los picos se determinan a partir de los factores de estructura y otros datos. Con esta información, se selecciona una fórmula $\phi = \phi(2\theta)$ para describir la forma de los picos. Luego presentamos los modelos de forma de picos más empleados, los dos más sencillos son las campanas de Gauss y de Lorentz (la curva gaussiana crece algo más verticalmente que la lorentziana). La intensidad y_{ci} del patrón calculado en el punto de observación $2\theta_i$ estará dada por una superposición de contribuciones de todos los picos de difracción en el ángulo considerado:

$$Y_{ci} = s \sum_k L_k |F_k|^2 \phi(2\theta_i - 2\theta_k) P_k A + Y_{bi}$$

Las variables en la ecuación anterior significan lo siguiente. s es un factor de escala; L_k agrupa los factores de Lorentz, polarización y multiplicidad; F_k es el factor de estructura (incluye los factores de temperatura de los diferentes átomos); $\phi(2\theta_i - 2\theta_k)$ es la función de forma de los picos, centrada en el ángulo de Bragg $2\theta_k$; P_k describe la textura; A es el factor de absorción (constante en la geometría de Bragg-Brentano) y finalmente y_{bi} es la intensidad del fondo en la posición $2\theta_i$.

Los índices k e i recorren, respectivamente, los picos de difracción y los puntos del patrón.

Naturalmente, la contribución del pico con máximo en $2\theta_k$ sólo es apreciable en posiciones cercanas a este máximo. En los programas habituales, esta contribución se desprecia más allá de unas pocas veces la anchura de los picos.

La ecuación vista anteriormente resume la dependencia del patrón de difracción respecto de un número elevado de parámetros. Por ejemplo, el factor de estructura está determinado por las posiciones y los factores de dispersión de todos los átomos de la celda elemental, la función de forma de los picos depende del espectro energético del haz incidente, de la perfección y forma de las cristalitas y de un número de parámetros instrumentales.

La idea general del refinamiento por mínimos cuadrados es como sigue. Se calcula el residuo S_y :

$$S_y = \sum_i w_i (y_i - y_{ci})^2$$

En esta expresión y_i son las intensidades experimentales del patrón de difracción y w_i son los pesos respectivos dados a estas intensidades. Generalmente se adopta el criterio $w_i = 1/y_i$.

La cantidad S_y es una complicada función de todos los parámetros que dan lugar al patrón y_{ci} . El problema es, entonces, encontrar los valores óptimos de todos estos parámetros, de manera que S_y adopte el mínimo valor posible.

Las matemáticas de la minimización de S_y se presentan en la obra de Young (1993). Se requiere resolver un llamado sistema de *ecuaciones normales*, lo que se hace mediante la inversión de una *matriz normal* de m por m elementos, donde m es el número de elementos a refinar. La función residuo no es lineal. Llegar a la respuesta real del problema de refinamiento depende fuertemente de que el modelo inicial esté

suficientemente cerca de la solución para que los algoritmos conduzcan al mínimo global de S_y y no a un falso mínimo.

Algunos factores básicos para el cálculo del patrón teórico son el factor de estructura, el factor de Lorentz-polarización y el factor de multiplicidad.

El fondo se calcula como un polinomio de quinto grado:

$$Y_{bi} = \sum_{m=0}^5 B_m \left[\left(\frac{2\phi_i}{BKPOS} \right) - 1 \right]^m$$

B_m son coeficientes (a refinar) y $BKPOS$ es el origen del polinomio (seleccionado por el investigador).

Un aspecto crucial es la forma de los picos. Se dispone de algo más de diez funciones, representativas de los formalismos que se emplean en los programas más difundidos. En estas formulaciones, el ensanchamiento de los picos se caracteriza a través de la variable Hk , el “ancho completo a la mitad de la altura” ($FWHM = Full\ Width\ at\ Half\ Maximum$). Para la contribución instrumental a esta magnitud se emplea generalmente la fórmula empírica de Caglioti *et al* (1958), con U , V y W refinables:

$$H_k^2 = U \tan^2\theta + V \tan\theta + W$$

La investigación por Rietveld comenzó por localizar las estructuras de las fases modelos detectadas. Los detalles de ambas estructuras, a nivel de coordenadas atómicas, se encuentran en los Atlas conocidos de estructuras inorgánicas (Wyckoff, ICSD). La badeleyita es monoclinica (para los objetivos de la presente discusión no interesan sus detalles). La estructura cristalina de la PZT es una variante del prototipo perovskita que estudiamos en el Capítulo I. Ver la Figura I.14. La celda de la PZT está deformada a tetragonal por extensión del eje c y desplazamientos verticales opuestos

de aniones y cationes. Para la modelación y el ajuste de patrones se utilizó *FULLPROF*. La corrida de este programa requirió dos ficheros de datos, uno con el patrón experimental y otro con los parámetros estructurales iniciales y los comandos de refinamiento. La Tabla 13, muestra los principales factores de interés físico que fueron refinados, sus valores iniciales y los resultados finales del ajuste. Los números entre paréntesis son las desviaciones standard de las magnitudes correspondientes, en unidades de la última cifra reportada.

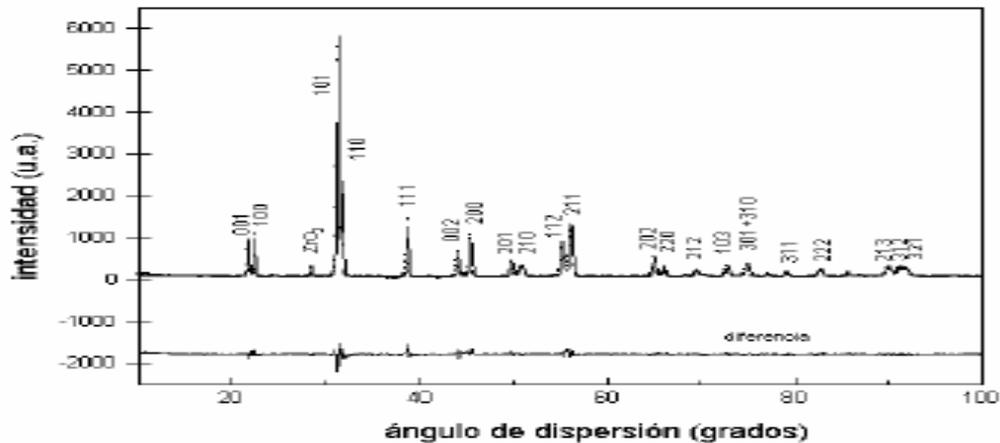
Además de los parámetros reportados en la Tabla 13, también fueron refinados otros factores que caracterizan efectos instrumentales. Estos incluyen los coeficientes para el desarrollo polinomial del fondo, los parámetros U, V, W del ensanchamiento instrumental de los picos y otros factores. En el caso de la badeleyita sólo se refinaron la escala y el ensanchamiento de los picos (solamente el parámetro W, independiente de 2θ).

Tabla 0.10 Método de Rietveld, refinamiento de Rietveld de cerámica

Magnitud	Valor inicial (literatura)	Valor refinado
Parámetro reticular a (PZT)	4.000 Å	4.0065(4) Å
Parámetro reticular c (PZT)	4.100 Å	4.1247(4) Å
Coordenada z átomo (Ti, Zr)	0.500	0.543(4)
Coordenada z átomo Pb	0.000	0.084(4)
Coordenada z átomo O	0.500	0.477(4)
Parámetro isotrópico temp	0.500	0.18(4)
Parámetro textura (G1) PZT	0	-0.151(4)
Fracción peso badeleyita	5 %	7(2) %

La Tabla 13, muestra la comparación entre los patrones experimental y calculado en el refinamiento que se describe.

Figura 2.11. Método de Rietveld, refinamiento de Rietveld de una cerámica piezoeléctrica.



2.7 Propiedades de las rocas y de los macizos rocosos que afectan el diseño y resultado de las tronaduras

2.7.1 Propiedades de las rocas

Densidad

Las densidades y resistencias de las rocas presentan normalmente una buena correlación. En general, las rocas de baja densidad se deforman y rompen con facilidad, requiriendo un factor de energía relativamente bajo mientras que las rocas densas precisan una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, así como un buen desplazamiento y esponjamiento.

Resistencias dinámicas de las rocas

Las resistencias estáticas a compresión y a tracción se utilizaron en un principio como parámetros definitorios de la aptitud de la roca a la voladura. Así se estableció el índice de volabilidad (Hino, 1959) como la relación $\frac{R_C}{R_T}$, de modo que a un mayor ratio resultaría más fácil fragmentar el material.

Porosidad

Existen dos tipos de porosidad: la intergranular o de formación y la de disolución o post-formación.

La primera, cuya distribución en el macizo puede considerarse uniforme, provoca dos efectos:

- Atenuación de la energía de la onda de choque.
- Reducción de la resistencia dinámica a la compresión y, consecuentemente, incremento de la trituración y porcentaje de finos.

La porosidad de post-formación es la causada por los huecos y cavidades que resultan de la disolución del material rocoso por las aguas subterráneas (karstificación). Los espacios vacíos son mucho mayores y su distribución es menos uniforme que la de la porosidad intergranular.

También en las rocas de origen volcánico es frecuente encontrar un gran número de oquedades formadas durante su consolidación.

Tabla 0.11 Propiedades de las rocas, clasificación de las rocas según su facilidad a la fragmentación con explosivos en minas a cielo abierto

CONSUMO ESPECIFICO DE EXPLOSIVO		DISTANCIA MEDIA ENTRE FRACTURAS NATURALES EN EL MACIZO (m)	RESISTENCIA DE LA ROCA A COMPRESION SIMPLE (MPa)	DENSIDAD DE LA ROCA (t/m ³)
LIMITES DE CLASES (kg/m ³)	VALOR MEDIO (kg/m ³)			
0.12-0.18	0.150	< 0.10	10-30	1.40-1.80
0.18-0.27	0.225	0.10-0.25	20-45	1.75-2.35
0.27-0.38	0.320	0.20-0.50	30-65	2.25-2.55
0.38-0.52	0.450	0.45-0.75	50-90	2.50-2.80
0.52-0.68	0.600	0.70-1.00	70-120	2.75-2.90
0.68-0.88	0.780	0.95-1.25	110-160	2.85-3.00
0.88-1.10	0.990	1.20-1.50	145-205	2.95-3.20
1.10-1.37	1.235	1.45-1.70	195-250	3.15-3.40
1.37-1.68	1.525	1.65-1.90	235-300	3.35-3.60
1.68-2.03	1.855	> 1.85	> 285	> 3.55

2.7.2 Clasificación de las rocas según su facilidad a la fragmentación con explosivos en minas a cielo abierto.

Fricción interna

Como las rocas no constituyen un medio elástico, parte de la energía de la onda de tensión que se propaga a través de él se convierte en calor por diversos mecanismos. Estos mecanismos son conocidos por “fricción interna” o “capacidad de amortización específica-SDC”, que miden la disponibilidad de las rocas para atenuar la onda de tensión generada por la detonación del explosivo. La “SDC” varía considerablemente con el tipo de roca: desde valores de 0,02-0,06 para los granitos (Windes, 1950; Blair, 1956) hasta los de 0,07-0,33 para areniscas. La “SDC” aumenta con la porosidad, la permeabilidad, las juntas y el contenido en agua de la roca. También aumenta considerablemente con los niveles meteorizados en función de su espesor y alteración.

Módulo de Young

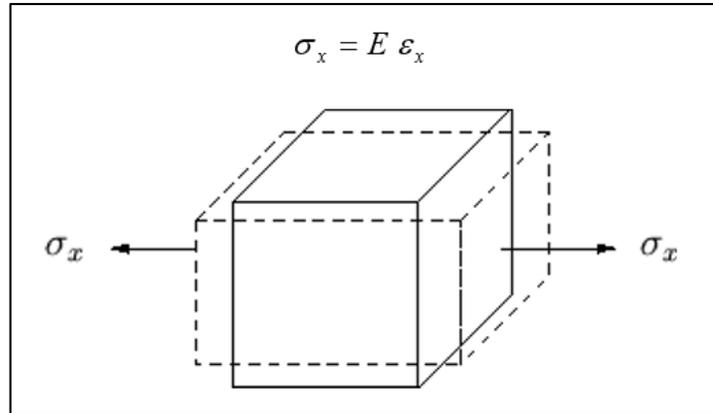
Para determinar las deformaciones elásticas provocadas en el mecanismo de la voladura, es preciso definir los módulos elásticos del material mediante métodos dinámicos (sísmicos) mejor que estáticos (mecánicos).

Antes de continuar, recordaremos que:

- También conocido como módulo de elasticidad longitudinal el módulo de Young (E) se define como la relación entre el esfuerzo unitario de compresión o tracción y la deformación longitudinal unitaria.

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\Delta \frac{F}{A} \text{ (esfuerzo unitario)}}{\Delta \frac{L}{L} \text{ (Deformacion unitaria)}}$$

Figura 2.12. Propiedades de las rocas, módulo de Young.



Índice de Poisson

Todo elemento solicitado a carga axial experimenta una deformación no solo en el sentido de la sollicitación (deformación primaria ϵ_x), sino también según el eje perpendicular (deformación secundaria o inducida ϵ_y, ϵ_z), o sea, toda tracción longitudinal con alargamiento implica una contracción transversal (disminución de la sección del elemento estirado).

El coeficiente de Poisson es la relación de la deformación perpendicular a la axial.

$$v = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_a} = \frac{\Delta \frac{S}{S} \text{ (Cambio unitario del area)}}{\Delta \frac{L}{L} \text{ (Deformacion longitudinal unitaria)}}$$

Corno las velocidades de propagación de las ondas sísmicas son función de las características elásticas de los materiales a través de las cuales se propagan, es posible

servirse de ellas para, previa determinación de la densidad en laboratorio, calcular los módulos elásticos con las siguientes ecuaciones:

$$E = V_s \times \frac{\left[3\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 4 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1 \right]}$$

$$\nu = 0,5 \times \frac{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1 \right]}$$

Donde:

V_p = Velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

V_s = Velocidad de propagación de las ondas transversales.

En la práctica para un índice de Poisson medio de 0,25 puede suponerse que $V_p = 1,73V_s$.

Por otro lado, las propiedades elásticas de las rocas ígneas y metamórficas pueden correlacionarse bien con la densidad. Así del tratamiento estadístico de los valores aportados por Cark (1966) para rocas con una densidad entre 2,6 y 3,4 t/m³, resulta:

Tabla 0.12 Propiedades de las rocas, tratamiento estadístico de los valores aportados por Cark (1966) para rocas con una densidad entre 2,6 y 3,4 t/m³

Vélocidad de propagación (m/s)	Desviación standard (m/s)	Coef. de correlación
$V_p = 3450 . - 3920$	570	0,85
$V_s = 1900 . - 2010$	380	0,83

Cuando el modulo de Young es alto, los gases del explosivo encontrarán resistencia para comprimir y dilatar la roca. La influencia del índice de Poisson es menos evidente, pero puede relacionarse con la fragmentación. El índice de Poisson indica como el material almacena y libera energía. Así una roca con un valor alto almacenará energía más fácilmente que otra con un valor inferior. Por ello, para un nivel de energía dado, se esperará una mejor fragmentación de la roca cuando el índice de Poisson sea bajo (Sassa e Ito, 1970).

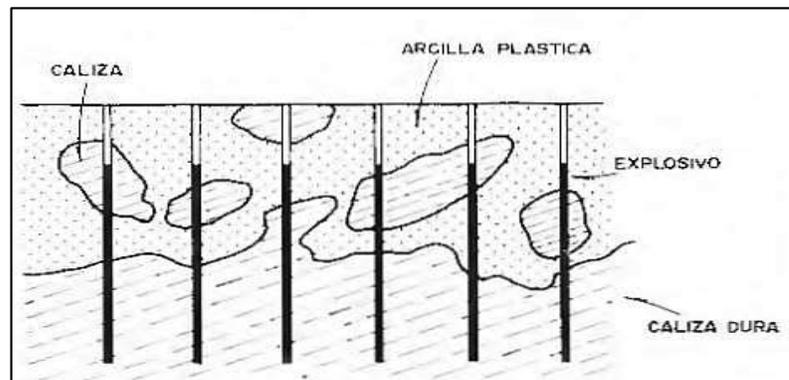
2.7.3 Propiedades de los macizos rocosos

a) Litología

Las tronaduras en zonas donde se produce un cambio litológico brusco, por ejemplo, estéril y mineral, y consecuentemente una variación de las propiedades resistentes de las rocas obliga a una reconsideración del diseño, pudiendo seguirse dos caminos:

- 1) Esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias.
- 2) Esquemas distintos, pero con igual carga por barreno. Esta disposición suele adoptarse manteniendo igual la dimensión de la piedra.

Figura 2.13. Propiedades de los macizos rocosos, tipos de litologías a encontrar.



b) Fracturas preexistentes

Todas las rocas en la naturaleza presentan algún tipo de discontinuidad, microfisuras y macrofisuras, que influyen de manera decisiva en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y, consecuentemente, en los resultados de las tronaduras. Las superficies de discontinuidad pueden ser de distintos tipos: planos de estratificación, planos de laminación y foliación primaria, planos de esquistosidad y pizarrosidad, fracturas y juntas.

Las discontinuidades pueden ser cerradas, abiertas o rellenas, y por ello con diferentes grados de transmisión de la energía del explosivo.

Tabla 0.13 Propiedades de los macizos rocosos, grado de transmisión de la energía según la naturaleza de las fracturas

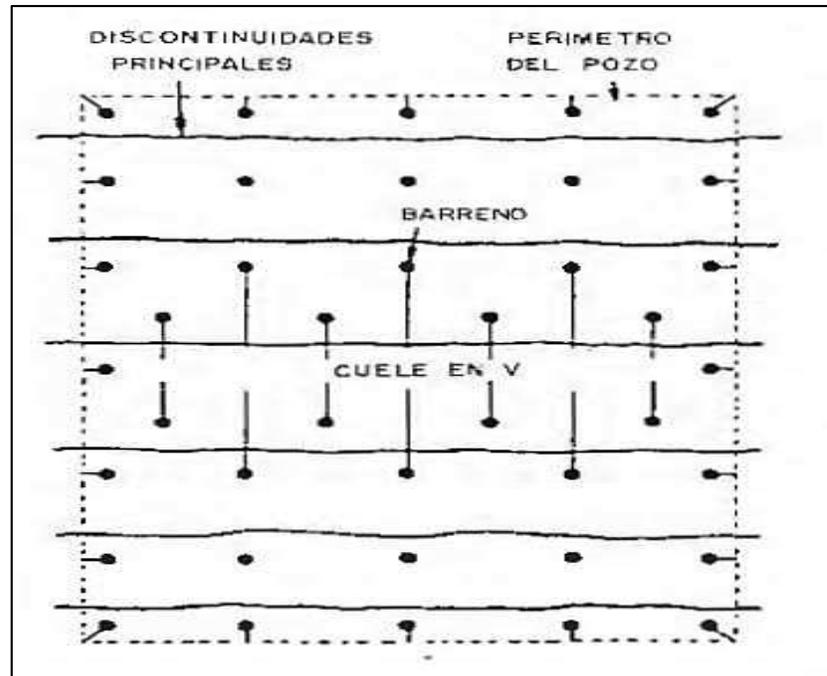
ABSORCIÓN DE LA ENERGÍA DE LA ONDA DE TENSION EN LAS FRACTURAS	ABERTURA DE LAS FRACTURAS (mm)	NATURALEZA DE LAS FRACTURAS
1. PEQUEÑA (< 20%)	(A) 0 (B) 0-4.0	(A) Fuertemente cementada. (B) Cementada con un material de impedancia acústica similar a la de la matriz
2. LIGERA (20-40%)	(A) < 0.5 (B) < 4.0	(A) Fracturas rellenas con aire o agua (B) Cementada con un material de impedancia acústica 1.5-2 veces menor que la de la matriz
3. MEDIA (40-80%)	0.5-1.0	Fracturas abiertas rellenas con aire o agua
4. GRANDE (> 80%)	(A) 0.1-1.0 (B) 1.0	(A) Fracturas rellenas con material suelto y poroso. (B) Fracturas abiertas rellenas de material suelto poroso, aire y agua

c) Tensiones de campo

Cuando actúan las tensiones de campo residuales, tectónicas y/o gravitacionales (no hidrostáticas), el esquema de fracturas generado alrededor de los barrenos puede estar influenciado por la concentración no uniforme de tensiones alrededor del mismo.

En las rocas masivas homogéneas, las grietas que empiezan a propagarse radialmente desde los barrenos tienden a seguir la dirección de las tensiones principales.

Figura 2.14. Propiedades de los macizos rocosos, tipos de tensiones de campo.



d) Presencia de agua

Las rocas porosas y los macizos intensamente fracturados cuando se encuentran saturados de agua presentan habitualmente ciertos problemas:

- Obligan a seleccionar explosivos no alterables por el agua.
- Producen la pérdida de barrenos por hundimientos internos, y
- Dificultan la perforación inclinada.

Por otro lado, el agua afecta a las rocas y a los macizos rocosos en los siguientes aspectos:

- Aumenta la velocidad de propagación de las ondas elásticas en terrenos porosos y agrietados.

- Reduce la resistencia de las rocas a compresión y atracción (Obert y Duvall, 1967) al ser menor la fricción entre partículas. Reduce la atenuación de las ondas de choque y, por ello, se intensifican los efectos de rotura por la “ET” (Ash, 1968).

Las juntas llenas de agua permiten el paso de las ondas de choque sin que se produzca un descostramiento interno. Pero cuando el macizo entra en tensión, esa agua se moviliza ejerciendo una acción de cuña que puede llegar a producir una gran sobre excavación.

e) Temperatura del macizo rocoso

Los yacimientos que contienen piritas suelen presentar, problemas de altas temperaturas de la roca por efecto de la oxidación lenta de este mineral, haciendo que los agentes explosivos del tipo ANFO reaccionen exotérmicamente con la pirita excitándose a partir de una temperatura de $120^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

2.7.4 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura

a) RQD (Rock Quality Designation)

Se desarrolló para proveer un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa a partir de los testigos recuperados en los sondeos se puede aplicar una de las clasificaciones más extendidas, conocida por R.Q.D. (Rock Quality Designation, Deere 1968) que se define como el porcentaje de la longitud de testigo recuperado en trozos mayores de 10 cm respecto de la longitud de sondeo.

- 1) A partir de testigos obtenidos de perforación con diamantina.

$$\frac{\sum \text{Longitud de los pedazos de la muestra} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de la muestra}} \times 100\%$$

- 2) Cuando no se tiene testigos de perforación, pero las trazas de discontinuidades son visibles en afloramientos superficiales o en socavones exploratorios. El RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen.

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

Donde:

J_v = suma del número de discontinuidades por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

- 3) Cuando no se tienen testigos de perforación se puede realizar utilizando formulas empíricas como:

$$RQD = 100 \times (e^{-0,1\lambda} \times (0,1\lambda + 1))$$

Donde:

λ = Numero de discontinuidades por metro lineal.

Tabla 0.14 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, RQD (rock quality designation)

R.Q.D.	CALIDAD DE LA ROCA
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

b) Características de los sistemas de discontinuidades

Son varias las propiedades de las discontinuidades que pueden medirse en un trabajo de caracterización, pero las más importantes, desde el punto de vista del arranque, son el espaciamiento y la orientación. Un índice que suele obtenerse con frecuencia es el conocido por "Volumetric Joint Count, J_v " que se define por el número total de juntas por metro cubico, obtenido al sumar las juntas presentes por metro para cada una de las familias existentes.

Tabla 0.15 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, "Volumetric Joint Count, J_v "

J_v	CARACTERISTICAS DEL MACIZO
< 1	Bloques masivos
1 - 3	Bloques grandes
3 - 10	Bloques tamaño medio
10 - 30	Bloques pequeños
> 30	Bloques muy pequeños

2.7.5 Índice de tronabilidad de Lilly

Lilly (1986) desarrolló un índice de tronabilidad basado en una combinación de propiedades físicas y estructurales de la masa rocosa a ser tronada. Este índice tiene una base similar que el sistema de clasificación de la roca desarrollado por Bieniawski, Barton y Hansagi, y que se usó con el modelo Kuz-Ram desarrollado por Cunningham (1983). Debe notarse que el índice está fuertemente inclinado hacia la naturaleza y orientación de los planos de debilidad de la masa rocosa. El índice de tronabilidad de Lilly se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$BI = 0,5(RMD + JPS + JPO + SGI + HF)$$

Donde:

BI = Índice de tronabilidad de Lilly

RMD = Descripción de la masa rocosa

JPS = Espaciamiento de los planos de diaclasas

JPO = Orientación de los planos de diaclasas

SGI = Influencia de la gravedad específica

HF = Dureza

En el caso del RMD, JPS y JPO, el autor asigna un valor (rating) de acuerdo a las distintas características de la masa rocosa, naturaleza y orientación de los planos de diaclasas, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 0.16 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, parámetros geomecánicos, para calcular el índice de tronabilidad de Lilly

PARAMETRO		VALOR
Descripción de la masa rocosa(RMD)	RMD	20
Fiable poco consolidado	10	
Diaclasado en bloque	20	
Totalmente masivo	50	
Espaciamiento de los planos de Diaclasas(JPS)	JPS	20
Pequeño(<0,1 m)	10	
Intermedio (0,1 a 1 m)	20	
grande (>1 m)	50	
Orientación de los planos de diaclasas(JPO)	JPO	20
Horizontal	10	
Discontinuidad normal al frente	20	
Dirección con el frente	30	
Buzamiento coincidente con el frente	40	
Influencia de la gravedad específica SGI=25 SG-50	SGI	25
Radio de influencia de la resistencia RSI=0,05 RC	RSI	4,1
	$\Sigma=$	89,1
Índice de volabilidad: BI=0,5((RMD+JPS)+JPO+SGI+RSI)	=	44,6

Las distintas orientaciones de los planos de diaclasas y sus respectivos ratings se pueden observar en la tabla 18:

Tabla 0.17 Caracterización de los macizos rocosos que afectan la tronadura, Las distintas orientaciones de los planos de diaclasas y sus respectivos ratings

Disposición de las estructuras	Esquema	valores
Horizontal		10
Rumbo subparalelo a la cara (0° a 30°) Manteo a favor de talud		20
Rumbo subparalelo a la cara (0° a 30°) Manteo vertical		30
Rumbo subparalelo a la cara (0° a 30°) Manteo en contra talud		40
Rumbo con ángulos con respecto a la cara (30° a 60°)		20
Rumbo con ángulos con respecto a la cara (60° a 90°)		30

2.7.6 Método KUZ-RAM

De las múltiples fórmulas existentes deben utilizarse las que consideren tanto las propiedades de los explosivos como los parámetros de la roca. Según nuestra opinión, el formulaje de Kuz-Ram utilizado para determinación de distribución granulométrica de una tronadura, es la más adecuada para determinar diseños preliminares para todo el rango existente de diámetros de perforación.

El modelo Kuz-Ram de fragmentación es el realizado por Cunningham (1983) y se ha usado extensivamente alrededor del mundo. Se basó en publicaciones rusas antiguas que desarrollaron una relación simple entre los parámetros de tronadura y el tamaño medio de fragmentación. Este trabajo ruso ganó considerable credibilidad del mundo occidental después que se encontró que concordaba muy estrechamente con modelos

de fragmentación basados en la teoría de crecimiento de grietas. El nombre de Kuz-Ram es una abreviación de los dos principales contribuyentes a las ecuaciones que forman la base del modelo: Kuznetsov y Rosin-Rammler.

a) Estimando el factor de roca.

Tal vez el parámetro más importante en el modelo Kuz-Ram es el factor de roca. El factor de roca de Cunningham, A , se deduce de los datos geológicos de la masa rocosa usando la ecuación:

$$A = 0,06 * (RMD + JPS + JPA + RDI + HF)$$

donde RMD es el descriptor de la masa rocosa, JPS es el espaciamiento de las diaclasas verticales, JPA es el ángulo del plano de diaclasa, RDI es la influencia de la densidad y HF es el factor de dureza.

La definición de Cunningham de las diaclasas está relacionada con la malla de perforación, y la definición de sobre tamaño.

b) Modelo de Kuz-Ram (Kuznetsov - Rosin Rammler)

El modelo de Kuz Ram fue desarrollado por Claude Cunningham (1983), y está basado en la formula empírica para determinar el tamaño medio de los fragmentos generados por tronadura, desarrollado por Kuznetsov, y en la curva de distribución granulométrica de Rosin-Rammler.

Es por esto que el modelo es llamado Kuz-Ram, abreviación de los dos principales contribuyentes a las ecuaciones que forman la base del modelo: Kuznetsov y Rosin-Rammler.

1) Ecuación empírica de Kuznetsov

Kuznetsov (1973), desarrolló una ecuación que relaciona el tamaño medio del fragmento y la energía aplicada a la tronadura por unidad de volumen de la roca en función del tipo de roca, estableciendo que el tamaño medio de partícula de una tronadura depende de las propiedades de la roca y del explosivo, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$X_{50} = Ax\left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0,8} x Q^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

X_{50} = Tamaño medio del fragmento.

A = Factor de roca.

V_0 = Volumen de roca quebrado por pozo.

Q = Masa de TNT que es equivalente en energía al de la carga de cada pozo.

El término (V_0/Q) representa el inverso del factor de carga equivalente. La ecuación, por lo tanto, indica que el tamaño medio de la partícula disminuye casi linealmente con el aumento del factor de carga: a medida que el factor de carga aumenta el tamaño medio de partícula disminuye. La ecuación también sugiere una débil dependencia del peso del explosivo por pozo. Esto sugiere que la ecuación diferencia entre diámetros de pozos grandes y pequeños. Diámetros de pozos pequeños producirán una pila de material más fino en virtud de la distribución mejorada de energía.

Después de ajustes a la ecuación de Kuznetsov para permitir la expresión de la potencia en peso respecto al ANFO, la ecuación se convierte en:

$$X_{50} = Ax\left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0,8} x Q^{\frac{1}{6}} x \left(\frac{115}{E}\right)^{0,633}$$

Donde:

X_{50} = Tamaño medio de los fragmentos de Tronadura (cm).

A = factor de roca. (Valor de 1 a 13)

V_o = Volumen de roca fragmentada por pozo (m³).

Q_e = Kilos de explosivo por pozo.

E = Potencia relativa en peso referida al ANFO (%).

Al analizar dos de los términos de esta ecuación nos podemos dar cuenta de que:

- a) A medida que aumenta el Factor de Carga el tamaño medio disminuye:
- b) A medida que disminuye el diámetro de perforación disminuye el tamaño medio.

2) Ecuación de Rosin - Rammler

La curva de Rosin-Rammler ha sido generalmente reconocida tanto en minería como en el procesamiento de minerales, ya que entrega una buena descripción de la distribución de tamaño de las rocas tronadas y trituradas. La curva se define como:

$$P(X) = e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n}$$

Donde:

$P(x)$ = Proporción del material retenido para una abertura de malla x

X = Abertura de malla (cm)

X_c = Tamaño característico (cm)

n = Índice de uniformidad

3) Ecuaciones Kuz Ram

La ecuación de Kuznetsov proporciona una estimación del tamaño medio, o sea, el tamaño del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca. Puesto que la ecuación de Rosin Rammler se puede definir completamente por un punto de la curva y la pendiente de la línea Rosin Rammler, todo lo que se necesita después de la determinación del tamaño medio, es una estimación de “n” en la ecuación de Rosin Rammler y se puede calcular una distribución completa de tamaño de la pila. Para obtener una expresión para el cálculo de “n”, Cunningham (1983) usó la teoría moderna de fracturas para obtener una relación entre “n” y los siguientes factores:

1. Exactitud de la perforación.
2. Relación del burden al diámetro de pozo.
3. Relación espaciamiento/burden.
4. Relación del largo de la carga a la altura de banco.

La aplicación del modelo ha sido extensa, aplicado tanto a datos publicados como a experimentales, y en general, se ha concluido que predice muy bien los tamaños gruesos, pero es menos exacto para las fracciones más finas. Cunningham subraya que la exactitud es más importante para la fracción gruesa (sobre tamaño) que para la fracción fina. Las ecuaciones Kuz-Ram posteriormente desarrolladas son:

Tamaño Medio

$$X_{50} = Ax \left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0,8} x Q^{\frac{1}{6}} x \left(\frac{115}{E}\right)^{0,633}$$

Donde:

X_{50} = Tamaño medio de los fragmentos de Tronadura (cm).

A = factor de roca.

V_o = Volumen de roca fragmentada por pozo (m³).

Q_e = Kilos de explosivo por pozo.

E = Potencia relativa en peso referida al ANFO (%).

4) Factor de Roca

Tal vez el parámetro más importante en el modelo Kuz-Ram es el factor de roca. Los últimos desarrollos en la aplicación del modelo usan una ligera modificación al índice de tronabilidad de Lilly para calcular el factor de roca.

$$A = 0,12 \times BI$$

Donde:

A = Factor de Roca.

BI = Índice de tronabilidad de Lilly.

Tamaño Característico.

$$X_c = \frac{X_{50}}{0,693^{\frac{1}{n}}}$$

Donde:

X_c = Tamaño característico (cm).

X_{50} = Tamaño medio de los fragmentos de Tronadura (cm).

n = Índice de Uniformidad.

5) Índice de Uniformidad

La principal contribución de Cunningham al modelo Kuz-Ram fue el proponer un método para estimar n en la ecuación de Rosin Rammler, basado en la geometría del pozo. La relación desarrollada por Cunningham se muestra en la siguiente ecuación:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{d}\right) x \left(\frac{1+S}{2}\right)^{0,5} x \left(1 - \frac{W}{B}\right) x \left(\frac{\text{abs}(BCL-CCL)}{L_t} + 0,1\right)^{0,1} x \frac{L_0}{H}$$

Donde:

n = Índice de uniformidad.

H = Altura del banco (m).

d = Diámetro de perforación (mm).

abs = Valor absoluto.

B = Burden (m).

S = Espaciamiento (m).

BCL = Longitud de carga de fondo (m).

L_t = Longitud total de carga (m).

CCL = Longitud de carga de columna (m).

L_0 = Longitud de carga sobre el nivel de piso (m).

W = Desviación de perforación (m).

Examinando cada término en dicha ecuación, se revela la forma en que la geometría del pozo afecta a n . El primer término, que involucra al burden y al diámetro del pozo, sugiere que a medida que el burden aumenta para un diámetro fijo de pozo, el n disminuirá (un rango más amplio de tamaño de partícula). El segundo término de la ecuación de Cunningham, que involucra a la relación S/B , sugiere que a medida que la relación S/B aumenta n también aumenta (un rango más estrecho de tamaño de partícula). Dentro de estas limitaciones, nuevamente es completamente razonable que

la uniformidad del tamaño de partícula debe mejorarse con el aumento de la relación S/B.

El tercer término, que involucra a la exactitud de la perforación, sugiere que a medida que mejora, n mejora. El cuarto término, que involucra el uso de la carga de fondo con explosivo de alta energía sugiere que n aumentará aumentando el largo de la carga de fondo. El uso de una carga de fondo fue propuesto por Langefors y Kihlstrom para sobrepasar el confinamiento adicional y la dificultad aumentada de fragmentación en la base de la tronadura en banco. La energía más alta en esta sección de la tronadura ayuda específicamente a mejorar la fragmentación y excavabilidad en las tronaduras.

El término final en la ecuación de Cunningham, que involucra la relación del largo de la carga a la altura del banco, refleja la fragmentación mejorada esperada cuando la carga es distribuida uniformemente a través del banco. Diámetros grandes de pozo conducen a cargas cortas y valores bajos para la relación largo de carga/altura del banco, conduciendo a su vez a una combinación de fragmentación gruesa en la región del collar y una fragmentación fina en la base de la carga. Esta combinación es característica de un n bajo.

El coeficiente de uniformidad da cuenta de la uniformidad de la fragmentación y su variabilidad depende básicamente de:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{d}\right) x F(n..n) \quad \text{B/d Aumenta, n disminuye.}$$

$$n = \frac{L_0}{H} x F(n..n) \quad \text{L_0/H Aumenta, n aumenta.}$$

$$n = \left(\frac{1+\frac{S}{B}}{2}\right)^{0,5} x F(n..n) \quad \text{S/B aumenta, n aumenta/}$$

2.7.7 Fórmula de Larsson

La ecuación propuesta por Larsson (1973) para la determinación del K50, o abertura de malla cuadrada por la que pasa el 50% del material tronado es:

$$K50 = S \times e^{((0,58 \times \ln B - 0,145 \times \ln(\frac{S}{B}) - 1,18 \times \ln(\frac{CE}{c}) - 0,82)}$$

donde:

B = Burden [m].

S/B = Relación espaciamento-burden.

CE = Consumo específico de explosivo [kg/m³].

C = Constante de roca. Equivale al consumo específico de explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca, normalmente varía entre 0,3 y 0,5 [kg/m³].

s = Constante de Volabilidad. Es un factor que tiene en cuenta la heterogeneidad y discontinuidades del macizo rocoso.

Roca muy fisurada y diaclasas muy próximas; s = 0,60

Roca diaclasada; s = 0,55

Roca normal con algunas grietas; s = 0,50

Roca relativamente homogénea; s = 0,45

Roca homogénea; s = 0,40

2.7.8 Fórmula de SVEDEFO (Swedish Detonic Research Foundation)

La fórmula original de Larsson no tiene en cuenta el efecto de la altura de banco y la longitud de retacado, pero la SVEDEFO ha añadido un término de tal manera que la ecuación final es la siguiente (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003):

$$K50 = S \times \left[1 + 4,67 \times \left(\frac{T}{L} \right)^{2,5} \right] \times e^{0,29 \times \ln B^2 \times \sqrt{\frac{S}{1,25}} - 1,18 \times \ln \left[\frac{CE}{c} \right]^{-0,82}}$$

T = Longitud de retacado.

L=Profundidad de pozo

2.8 Propiedades de los explosivos

Los explosivos convencionales y los agentes explosivos poseen propiedades diferenciadoras que los caracterizan y que se aprovechan para la correcta selección, atendiendo al tipo de tronadura que se desea realizar y las condiciones en que se debe llevar a cabo.

Las propiedades de cada grupo de explosivos permiten además predecir cuáles serán los resultados de fragmentación, desplazamiento y vibraciones más probables.

Las características más importantes son: potencia y energía desarrollada, velocidad de detonación, densidad, presión de detonación, resistencia al agua y sensibilidad.

Otras propiedades que afectan al empleo de los explosivos y que es preciso tener en cuenta son: los humos, la resistencia a bajas y altas temperaturas, la desensibilización por acciones externas, etc. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.8.1 Potencia y Energía

La potencia es, desde el punto de vista de aplicación industrial, una de las propiedades más importantes, ya que define la energía disponible para producir efectos mecánicos.

Existen diferentes formas de expresar la potencia (Strength) de un explosivo. En las antiguas dinamitas (Straight dynamites) era el porcentaje de nitroglicerina el parámetro de medida de la potencia. Posteriormente, con la sustitución parcial de la nitroglicerina por otras sustancias, y la realización de ensayos comparativos de laboratorio, se pasó a hablar de Potencia Relativa por Peso (Relative Weight Strength) y Potencia Relativa

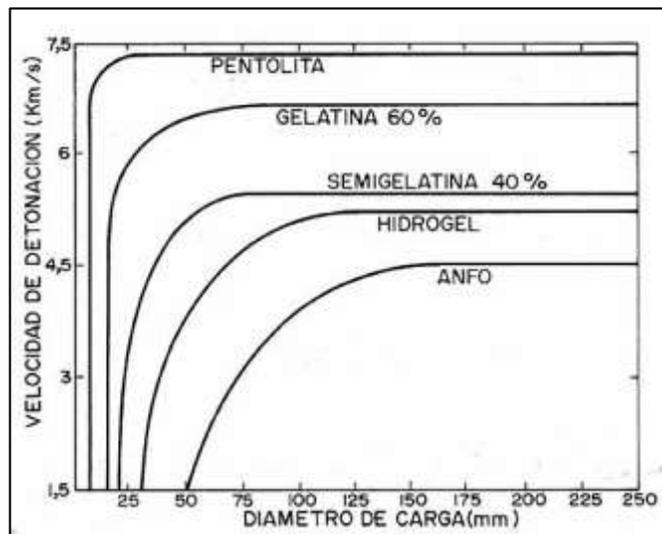
por Volumen (Relative Bulk Strength). Así, es frecuente referir la potencia de un explosivo en tantos por ciento de otro que se toma como patrón, Goma pura, ANFO, etc., al cual se le asigna el valor 100.

2.8.2 Velocidad de Detonación

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía.

Los factores que afectan a la velocidad de detonación son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento, la iniciación y el envejecimiento del explosivo. Para los tres primeros, conforme aumentan dichos parámetros las "VD" resultantes crecen significativamente.

Figura 2.15. Propiedades de los explosivos, Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación (Ash, 1977).



En cuanto a la iniciación, si no es lo suficientemente enérgica puede hacer que el régimen de detonación comience con una velocidad baja, y con respecto al envejecimiento, éste hace que la "VD" también disminuya al reducirse el número y

volumen de las burbujas de aire, sobre todo en los explosivos gelatinosos, ya que son generadores de puntos calientes. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.8.3 Densidad

La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0,8 y 1,6 [g/cm³], y al igual que con la velocidad de detonación cuanto mayor es, más intenso es el efecto rompedor que proporciona.

En los agentes explosivos la densidad puede ser un factor crítico, pues si es muy baja se vuelven sensibles al cordón detonante que los comienza a iniciar antes de la detonación del multiplicador o cebo, o de lo contrario, si es muy alta, pueden hacerse insensibles y no detonar.

La densidad de un explosivo es un factor importante para el cálculo de la cantidad de carga necesaria para una tronadura. Por regla general, en el fondo de los pozos, que es donde se necesita mayor concentración de energía para el arranque de la roca, se utilizan explosivos más densos, como son los gelatinosos e hidrogeles, mientras que en las cargas de columna se requieren explosivos menos densos; como son los pulverulentos y los de base ANFO.

2.8.4 Presión de Detonación

La presión de detonación de un explosivo es función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación.

Los explosivos comerciales tienen una presión de detonación que varía entre 500 y 1,500 [MPa]. Generalmente, en rocas duras y competentes la fragmentación se efectúa más fácilmente con explosivos de alta presión de detonación, debido a la directa relación que existe entre esta variable y los mecanismos de rotura de la roca.

2.8.5 Estabilidad

Los explosivos deben ser químicamente estables y no descomponerse en condiciones ambientales normales. Un método de probar la estabilidad es mediante la prueba Abel, que consiste en el calentamiento de una muestra durante un tiempo determinado y a una temperatura específica, observando el momento en que se inicia su descomposición.

La estabilidad es una de las propiedades que está relacionada con el tiempo máximo de almacenamiento de dichas sustancias para que éstas no se vean mermadas en los efectos desarrollados en las tronaduras.

2.8.6 Resistencia al Agua

Capacidad para resistir una prolongada exposición al agua sin perder sus características. Varía de acuerdo con la composición del explosivo y está vinculada a la proporción de nitroglicerina o aditivos especiales que contengan, así las gomas, los hidrogeles y las emulsiones son muy resistentes al agua. Las sales oxidantes, como el nitrato amónico en el ANFO, disminuyen intensamente la resistencia al agua pues son muy higroscópicas.

La escala de clasificación generalmente aceptada va desde: Nula, Limitada, Buena, Muy Buena y Excelente. En la primera, el explosivo no tiene ninguna resistencia al agua, mientras que la última, garantiza una exposición superior a 12 horas. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.8.7 Sensibilidad

Esta característica engloba varios significados dependiendo del tipo de acción exterior que se produzca sobre el explosivo.

- Acción controlada: La sensibilidad aquí es equivalente a la aptitud a la detonación por un iniciador (Por ejemplo, un detonador).
- Acción incontrolada: La sensibilidad es una medida de la facilidad con la que un explosivo puede ser detonado por calor, fricción, impacto o choque.

2.8.8 Transmisión de la detonación

La transmisión por “simpatía” es el fenómeno que se produce cuando un explosivo al detonar induce en otro próximo su explosión.

Una buena transmisión dentro de los pozos es la garantía para conseguir la completa detonación de las columnas de explosivo. Pero cuando esos pozos se hallan próximos o las cargas dentro de ellos se diseñan espaciadas, se puede producir la detonación por simpatía por medio de la transmisión de la onda de tensión a través de la roca, por la presencia de aguas subterráneas y discontinuidades estructurales o por la propia presión del material inerte de los retacados intermedios sobre las cargas adyacentes. En todos estos casos los resultados de fragmentación y vibraciones se verán perjudicados seriamente.

En la mayoría de los explosivos industriales las distancias máximas hasta las que se produce la detonación por simpatía están entre 2 y 8 veces su diámetro, dependiendo del tipo de explosivo.

Los factores que modifican la transmisión de la detonación del explosivo son: el envejecimiento y el calibre de los cartuchos.

2.8.9 Desensibilización

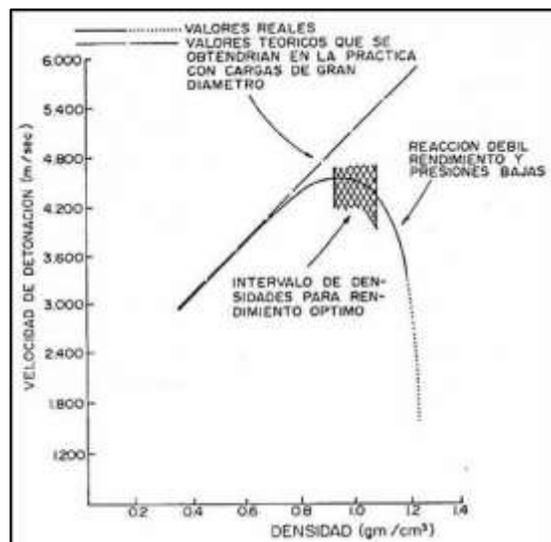
En muchos explosivos industriales, se ha observado que la sensibilidad disminuye al aumentar la densidad por encima de un determinado valor. Este fenómeno, es más

acusado en aquellas composiciones o agentes explosivos que no contienen sustancias como el TNT, la Nitroglicerina, etc.

Para los hidrogeles y las mezclas tipo ANFO la variación de sensibilidad con la densidad es mucho mayor que para los explosivos gelatinosos.

En la figura a continuación se observa la influencia de la densidad del ANFO sobre la “VD”. Por encima de valores de 1,1 [g/cm³] la velocidad cae drásticamente, por lo que a las densidades y a las presiones que producen esos niveles de confinamiento se las denominan como Densidades y “Presiones de Muerte”.

Figura 2.16. Propiedades de los explosivos, velocidad de detonación del ANFO en función de la densidad.



La desensibilización puede estar producida por:

- Presiones hidrostáticas.
- Presiones dinámicas.

El primer caso sólo se suele presentar en pozos muy profundos y no es por esto muy frecuente.

2.8.10 Resistencias a las bajas temperaturas

Cuando la temperatura ambiente se encuentre por debajo de los 8 [°C], los explosivos que contienen nitroglicerina tienden a congelarse, por lo que se suele añadir una cierta cantidad de nitroglicol que hace bajar el punto de congelación a unos -20°C.

2.8.11 Humos

La detonación de todo explosivo comercial produce vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono, y eventualmente, sólidos y líquidos. Entre los gases inocuos citados existe siempre cierto porcentaje de gases tóxicos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Al conjunto de todos esos productos resultantes se le designa por “humos”.

2.8.12 Iniciación y cebado de cargas

Para un explosivo dado, mediante el empleo de iniciadores o cebos puede variarse el equilibrio entre la “ET” y la “EB” desarrolladas durante la voladura, para adecuarse a las características resistentes y estructurales de las rocas.

También, cuando se desea elevar la tensión en un tramo de roca más dura dentro de un barreno pueden emplearse iniciadores colocados en esos niveles.

2.8.13 Tiempos de retardo y secuencias de encendido

Los tiempos de retardo entre barrenos y las secuencias de encendido juegan en las voladuras un papel muy importante pues sirven para disminuir las cargas operantes, y por consiguiente los niveles de vibración producidos, y hacer que se consiga una mayor

efectividad de los mecanismos de rotura y un control sobre el desplazamiento de la roca, la sobre excavación, los ripios y las proyecciones.

2.9 Tipos de Explosivos

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque:

- a) Explosivos rápidos y detonantes. Con velocidades entre 2.000 y 7.000 m/s; y
- b) Explosivos lentos y deflagrantes. Con menos de 2.000 m/s.

Los deflagrantes comprenden a las pólvoras, compuestos pirotécnicos y compuestos propulsores para artillería y cohetería, casi sin ninguna aplicación en la minería o ingeniería civil, salvo en el caso de rocas ornamentales.

Los explosivos detonantes se dividen en Primarios y Secundarios según su aplicación. Los Primarios por su alta energía y sensibilidad se emplean como iniciadores para detonar a los Secundarios, entre ellos podemos mencionar a los compuestos usados en los detonadores y multiplicadores (fulminato de mercurio, pentrita, hexolita, etc.). Los Secundarios son los que se aplican al arranque de rocas y aunque son menos sensibles que los Primarios desarrollan mayor trabajo útil.

Estos compuestos son mezclas de sustancias explosivas o no, cuya razón de ser estriba en el menor precio de fabricación, en el mejor balance de oxígeno obtenido, y en las características y propiedades que confieren los ingredientes a las mezclas en lo relativo a sensibilidad, densidad, potencia, resistencia al agua, etc.

Los explosivos industriales de uso civil se dividen a su vez en dos grandes grupos, que en orden de importancia por nivel de consumo y no de aparición en el mercado son:

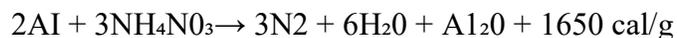
2.9.1 Agentes explosivos

Estas mezclas no llevan, salvo algún caso, ingredientes intrínsecamente explosivos. Los principales son:

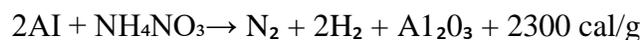
- a) ANFO = El Nitrato Amónico (NH_4NO_3) es una sal inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es $160,6^\circ\text{C}$. Aisladamente, no es un explosivo, pues solo adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una pequeña cantidad de un combustible y reacciona violentamente con el aportando oxígeno. Frente al aire que contiene el 21% de oxígeno, el NA posee el 60%.

Aunque el NA puede encontrarse en diversas formas, en la fabricación de explosivos se emplea aquel que se obtiene como partículas esféricas o prills porosos, ya que es el que posee mejores características para absorber y retener a los combustibles líquidos y es fácilmente manipulable sin que se produzcan apelmazamientos y adherencias.

- b) ALANFO = Como la densidad del ANFO es baja, la energía que resulta por unidad de longitud de columna es pequeña. Para elevar esa energía, desde 1968 se viene añadiendo a ese agente explosivo productos como el Aluminio con unos buenos resultados técnicos y económicos, sobre todo cuando las rocas son masivas y los costes de perforación altos. Cuando el aluminio se mezcla con el nitrato amónico y la cantidad es pequeña la reacción que tiene lugar es:



Pero si el porcentaje de aluminio es mayor, la reacción que se produce es:



- c) HIDROGELES = Los hidrogeles son agentes explosivos constituidos por soluciones acuosas saturadas de NA, a menudo con otros oxidantes como el nitrato de sodio y/o el de calcio, en las que se encuentran dispersos los combustibles, sensibilizantes, agentes espesantes y gelatinizantes que evitan la segregación de los productos sólidos.
- d) EMULSIONES = Las emulsiones explosivas son del tipo denominado “agua en aceite” en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes

disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado.

Este grupo de explosivos que es el de más reciente aparición en el mercado, mantiene las propiedades de los hidrogeles ya citados, pero a su vez mejora dos características fundamentales como son la potencia y la resistencia al agua.

- e) ANFO PESADO = Es una mezcla de emulsión base con ANFO, el ANFO presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz energética.

Figura 2.17. Propiedades de los explosivos, diagrama ANFO pesado.

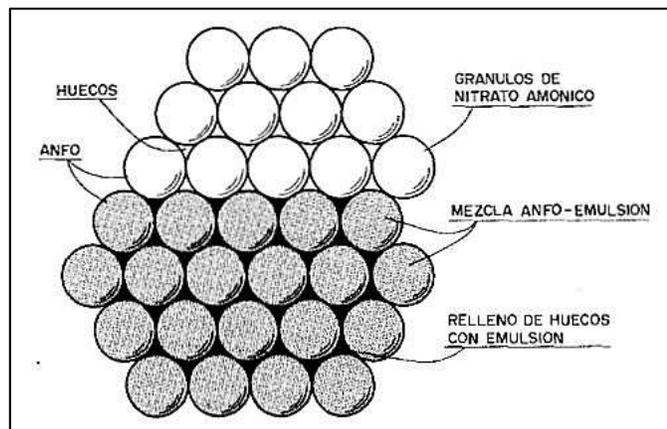


Tabla 0.18 Propiedades de los explosivos, orden cronológico de aparición de los explosivos

EXPLOSIVO	OXIDANTE	COMBUSTIBLE	SENSIBILIZANTE
DINAMITAS	SOLIDO Nitratos	SOLIDO Materias absorbentes (sensibilizantes)	LIQUIDO Nitroglicerina Gasificantes
ANFOS	SOLIDO Nitratos	LIQUIDO Aceites	Poros
HIDROGELES	SOLIDO/LIQUIDO Nitratos Soluciones salinas	SOLIDO/LIQUIDO Aluminio Sensibilizante	SOLIDO/LIQUIDO TNT NMMA, MAN Aluminio en polvo. Gasificantes
EMULSIONES	LIQUIDO Soluciones salinas	LIQUIDO Aceites Parafinas	Gasificantes

2.9.2 Explosivos convencionales

Precisan para su fabricación de sustancias intrínsecamente explosivos que actúan como sensibilizadores de las mezclas. Los más conocidos son:

- a) GELATINOSOS = Alfred Nobel en 1875 descubrió que una gran cantidad de nitroglicerina (NG) podía disolverse y quedar retenida en nitrocelulosa (NC), obteniéndose un producto con consistencia plástica de fácil uso y manipulación en aquella época. Esa gelatina explosiva formada por el 92% de NG y el 8% de NC tenía un balance de oxígeno nulo y desarrollaba una energía incluso superior que la NG pura. Posteriormente, con intención de reducir la potencia de esa mezcla explosiva se añadieron sustancias oxidantes y combustibles, en las proporciones adecuadas para mantener el balance de oxígeno, de manera que además de reducir considerablemente el coste de fabricación se conservaba la consistencia gelatinosa. Así, el porcentaje de NC-NG de las gelatinas explosivas actuales oscila entre el 30 y el 35%, y el resto corresponde a los oxidantes como el nitrato amónico, a los combustibles y a otros productos especiales que sirven para corregir la higroscopicidad de los nitratos.

- b) PULVERULENTOS = Aquellas mezclas explosivas sensibilizadas con NG, pero con un porcentaje inferior al 15%, tienen una consistencia granular o pulverulenta. Dentro de este grupo de explosivos caben distinguir aquellos que poseen una base inerte y los de base activa. Los de base activa, se fabrican en su mayoría sustituyendo las sustancias inertes por una mezcla de oxidantes y combustibles que aportan una potencia adicional. El primer oxidante utilizado fue preferentemente el nitrato sódico, que se sustituye después por el nitrato amónico de mayor eficiencia energética. También en este caso se emplean aditivos especiales para reducir la higroscopicidad del NA.

- c) DE SEGURIDAD = Se denominan Explosivos de Seguridad, en otros países Permisibles, a aquellos especialmente preparados para su uso en minas de carbón con ambientes inflamables de polvo y grisú. Su característica principal es la baja temperatura de explosión.

2.10 Criterios de selección de explosivos

Factores que son necesarios analizar para una correcta selección:

- a) Precio del explosivo = El coste del explosivo es evidentemente un criterio de selección muy importante. En principio, hay que elegir el explosivo más barato con el que se es capaz de realizar un trabajo determinado.
- b) Diámetro de carga = Cuando se utilizan explosivos cuya velocidad de detonación varía fuertemente con el diámetro, como es el caso del ANFO, hay que tomar las siguientes precauciones:
- Con barrenos de diámetro inferior a 50 mm es preferible, a pesar del mayor precio, emplear hidrogeles o dinamitas encartuchadas.
 - Entre 50 y 100 mm el ANFO es adecuado en las tronaduras en banco como carga de columna y en las tronaduras de interior aumentando la densidad hasta un 20% con cargadoras neumáticas y cebándolo de forma efectiva.
 - Cuando se usan hidrogeles, tanto a cielo abierto como en interior, estos son generalmente encartuchados y sensibles al detonador.
 - Por encima de los 100 mm, no existen problemas con el ANFO, aunque en rocas duras es preferible diseñar las columnas de forma selectiva y con un buen sistema de iniciación.

En los calibres grandes con las diferentes mezclas explosivas a granel (ANFO, hidrogeles, emulsiones y ANFO pesado) es muy económico realizar la carga con medios mecánicos.

- c) Características de la roca = Las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a volar conforman el grupo de variables más importantes no solo por su influencia directa en los resultados de las tronaduras sino además por su interrelación con otras variables de diseño.

Los criterios de selección recomendados son:

- Rocas masivas resistentes
- Rocas muy fisuradas.
- Rocas conformadas en bloques.
- Rocas porosas.

- d) Volumen de roca a volar = Los volúmenes de excavación a realizar y ritmos de trabajo marcan los consumos de explosivo a efectuar dentro de las operaciones de arranque. En las obras de mayor envergadura las cantidades de explosivo pueden llegar a aconsejar su utilización a granel, ya que posibilitan la carga mecanizada desde las propias unidades de transporte, se reducen los costes de mano de obra dedicada a dicha operación y se aprovecha mejor el volumen de roca perforado.
- e) Presencia de agua = Cuando el ANFO se encuentra en un ambiente que le aporta una humedad superior al 10 % se produce su alteración que impide la detonación de la mezcla explosiva.
- f) Condiciones de seguridad = Un punto de equilibrio, a veces no fácil de lograr en un explosivo es el binomio sensibilidad-seguridad. Los explosivos gelatinosos tienen una alta sensibilidad, pero si en la pila de escombros queda por algún motivo (descabezamiento de barrenos, rotura de cordón detonante, etc.), restos de explosivo y es necesario el empleo de maquinaria pesada: tractores de orugas o excavadoras, puede producirse la detonación con riesgo para el personal de operación. Este problema se ha resuelto con el empleo de

los hidrogeles y emulsiones que son insensibles a los golpes, fricciones y estímulos subsónicos, pero poseen un grado de sensibilidad adecuada para la iniciación.

- g) Atmosferas explosivas = Las excavaciones que se realizan con atmosferas potencialmente inflamables con grisú o polvo, tanto en minas de carbón como en otras explotaciones metálicas e incluso de obra pública, pueden dar lugar a grandes catástrofes si se producen explosiones secundarias. Por ello, en esos proyectos es preciso efectuar un estudio de la atmosfera y entorno próximo a la tronadura para tomar la decisión de utilizar explosivos de seguridad y/o inhibidores en el material de retacado.
- h) Problemas de entorno = Las principales perturbaciones que inciden sobre el área próxima a las tronaduras son las vibraciones y onda aérea.

Desde el punto de vista del explosivo, aquellos que presentan una elevada, “ET” son los que dan lugar a un mayor nivel de vibraciones. Así, si es factible, será mejor utilizar ANFO que hidrogeles. El seccionado y secuenciado de cargas se puede realizar también con explosivos a granel y encartuchados aplicando diferentes técnicas de iniciación.

En cuanto a la onda aérea, se recomienda que el explosivo tenga una relación equilibrada y sobre todo que se controle el diseño geométrico de la voladura.

- i) Problemas de suministro = Por último, hay que tener en cuenta las posibilidades reales de suministro en función de la localización de los trabajos y puntos de abastecimiento de los explosivos y accesorios.

Asimismo, si se dispone de polvorines propios será necesario considerar los tiempos de almacenamiento y las variaciones de las características explosivas de algunos de los productos.

2.11 Parámetros controlables de las tronaduras

En el cálculo y diseño de las tronaduras las variables que son controlables se clasifican en los siguientes grupos:

- a) Geométricas (Diámetro, longitud de carga, piedra, espaciamento, etc.).
- b) Químico-Físicas o del explosivo (tipos de explosivo, potencia, energía, sistemas de cebado, etc.).
- c) De tiempo (tiempos de retardo y secuencia de iniciación).

2.11.1 Parámetros geométricos

VARIABLES DE DISEÑO.

H (Altura de banco) = Distancia vertical entre dos bancos adyacentes.

D (Diámetro del barreno) = Los barrenos, denominados también taladros, son perforaciones lineales ejecutadas en las rocas por medio de herramientas especiales accionadas por aire comprimido.

L (Longitud del barreno) = Largo de perforación.

d Diámetro de la carga = Diámetro de la sección del explosivo a utilizar.

B (Burden nominal) = Dimensión lineal entre el pozo y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de pozos que constituyen una fila.

S (Espaciamento nominal) = Dimensión lineal entre pozos de tronadura adyacente que forman una línea y se mide usualmente paralelo a la cara libre.

LV (Longitud de la voladura) = Largo del sector de la tronadura.

AV (Anchura de la voladura) = Ancho del sector de la tronadura.

B, (Burden efectivo) = Dimensión lineal entre el pozo y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de detonación del pozo y toma en consideración la dirección de la iniciación.

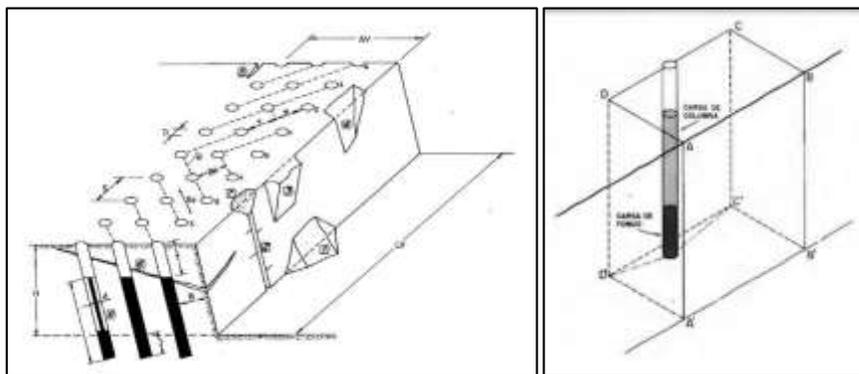
S (Espaciamento efectivo) = Dimensión lineal entre pozos que detonan sucesivamente y toma en consideración la cara libre.

T (Retacado) = Es el material inerte añadido en la cima del pozo de tronadura para efectuar el confinamiento de los gases de la explosión y prevenir una proyección y sobre presión excesiva.

J (Sobre perforación) = Longitud de perforación por debajo del piso teórico de explotación.

L (Longitud de carga) = Distribución vertical de explosivo en un banco y es igual a la razón del largo de la carga sobre el piso del banco a la altura del pozo.

Figura 2.18. Parámetros controlables de las tronaduras, parámetros geométricos.



2.11.2 Fórmulas utilizadas en el diseño de una tronadura (método tradicional).

a) Altura del banco.

$$H = 10 + 0,57 (C_c - 6)$$

Tabla 0.19 Parámetros controlables de las tronaduras, calculo altura del banco en función del tipo de roca

VARIABLE DE DISEÑO	RESISTENCIA DE LA ROCA (MPa)		
	Blanda < 70	Medio-dura 70-180	Muy dura > 180
ALTURA DE BANCO - H	52 D	44 D	37 D

b) Taco.

Tabla 0.20 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del taco

VARIABLE DE DISEÑO	RESISTENCIA DE LA ROCA (MPa)		
	Blanda < 70	Media-dura 70-180	Muy dura > 180
RETACADO - T	40 D	32 D	25 D

c) Sobreperforación.

Tabla 0.21 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo de la sobreperforación en función del tipo de roca

VARIABLE DE DISEÑO	DIAMETRO DEL BARRENO. (mm)	
	180 - 250	250 - 450
SOBREPERFORACION - J	7 - 8 D	5 - 6 D

d) Burden y Espaciamiento.

Tabla 0.22 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del burden y espaciamiento en función del tipo de explosivo y tipo de roca

TIPO DE EXPLOSIVO	VARIABLE DE DISEÑO	RESISTENCIA DE LA ROCA (MPa)		
		Blanda < 70	Media-dura 70-180	Muy dura > 180
ANFO	PIEDRA - B	28 D	23 D	21 D
	ESPACIAMIENTO - S	33 D	27 D	24 D
HIDROGELES Y EMULSIONES	PIEDRA - B	38 D	32 D	30 D
	ESPACIAMIENTO - S	45 D	37 D	34 D

e) Longitud del Pozo.

$$L = H + J$$

f) Volumen de Arranque.

$$VR = B \times S \times H$$

g) Rendimiento Arranque.

$$RA = \frac{VR}{L}$$

h) Longitud de la carga de fondo.

$$L_C = 8 \text{ a } 16D$$

i) Factor de carga.

$$\text{Factor de carga} \left[\frac{\text{grs}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{grs. Explosivo}}{\text{Tonelaje a remover}}$$

$$\text{Factor de carga} \left[\frac{\text{grs}}{\text{ton}} \right] = \frac{\rho_{exp.} \times \text{Volumen columna de explosivos}}{B \times E \times \rho_{rx} \times H}$$

$$\text{Factor de carga} \left[\frac{\text{grs}}{\text{ton}} \right] = \frac{\rho_{exp.} \left[((H + P) - T) \times \frac{\pi}{4} \times \phi^2 \right]}{B \times E \times \rho_{rx} \times H}$$

donde:

ρ_{exp} = Densidad del explosivo [g/cm³].

ρ_{rx} = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

T = Taco [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

ϕ = Diámetro del pozo [cm].

2.11.3 Método de Ash (1963)

$$B = \frac{K_B \times D}{12}$$

Donde K_B depende de la clase de roca y tipo de explosivo empleado.

Tabla 0.23 Parámetros controlables de las tronaduras, cálculo del parámetro K_B en función del tipo de explosivo y tipo de roca

TIPO DE EXPLOSIVO	CLASE DE ROCA		
	BLANDA	MEDIA	DURA
• Baja densidad (0,8 a 0,9 g/cm ³) y baja potencia	30	25	20
• Densidad media (1,0 a 1,2 g/cm ³) y potencia media	35	30	25
• Alta densidad (1,3 a 1,6 g/cm ³) y alta potencia	40	35	30

- Profundidad de barreno

$$L = K_L \times B \quad (K_L \text{ entre } 1,5 \text{ y } 4)$$

- Sobre perforación

$$J = K_J \times B \quad (K_J \text{ entre } 0,2 \text{ y } 0,4)$$

- Retacado

$$T = K_t \times B \quad (K_t \text{ entre } 0,7 \text{ y } 1)$$

- Espaciamiento

$$S = K_s \times B_2$$

$K_s = 2,0$ para iniciación simultánea.

$K_s = 1,0$ para barrenos secuenciados con mucho retardo.

$K_s =$ entre 1,2 y 1,8 para barrenos secuenciados con pequeño retardo.

2.11.4 Método de Langefors (1963)

Langefors y Kihlstrom proponen la siguiente expresión para calcular el valor de la Piedra Máxima “ B_{max} ”.

$$B_{Max} = \frac{D}{33} \sqrt{\frac{\rho_c \times PRP}{\bar{C} \times f \times (S/B)}}$$

B_{max} = Piedra máxima (m).

D = Diámetro del barreno (mm).

\bar{C} = Constante de roca (calculada a partir de c).

f = Factor de fijación.

- Barrenos verticales.

$$f = 1.$$

- Barrenos inclinados.

$$3:1 \quad f = 0,9.$$

- Barrenos inclinados.

$$2:1 \quad f = 0,85.$$

S/B = Relación Espaciamiento/Piedra.

ρ_c = Densidad de carga (kg/dm³).

PRP = Potencia Relativa en Peso del explosivo (1 - 1,4).

La constante “c” es la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 m³ de roca, normalmente en voladuras a cielo abierto y rocas duras se toma $c = 0,4$.

Ese valor se modifica de acuerdo con:

$$B = 1,4 - 15 \text{ m} \quad \bar{C} = c + 0,75$$

$$B < 1,4 \text{ m} \quad \bar{C} = 0,07/B + c$$

La piedra practica se determina a partir de:

$$B = B_{\max} - e' - d_b \times H$$

donde:

H = Altura de banco (m).

e' = Error de emboquille (m/m).

d_b = Desviación de los barrenos (m).

2.11.5 Konya (1976)

$$B = 3,15 \times D \times \left[\frac{\rho_c}{\rho_r} \right]^{0,33}$$

donde:

B = Piedra (pies).

D = Diámetro de la carga (pulgadas).

Pe = Densidad del explosivo.

Pr = Densidad de la roca.

El espaciamiento se determina a partir de las siguientes expresiones.

- Barrenos de una fila instantáneos.

$$H > 4B \quad S = \frac{H + 2B}{3}$$

$$H > 4B \quad S = 2B$$

- Barrenos de una fila secuenciados.

$$H < 4B \quad S = \frac{H + 2B}{8}$$

$$H < 4B \quad S = 2$$

- Retacado.

$$\text{Roca masiva} \quad T=B$$

$$\text{Roca estratificada} \quad T = 0,7B$$

2.11 Explosivos utilizados

Una de las variables controlables por los Ingenieros en minas en las tronaduras es el constituido por los explosivos. La elección del tipo de explosivo forma parte importante del diseño de una tronadura y por consiguiente de los resultados a obtener.

Los explosivos que se utilizan en la tronadura del yacimiento de la primera región son proporcionados por la empresa Enaex los cuales son:

- Pirex P-70.
- Pirex P-50
- Apd cilíndricos (iniciador).

Los explosivos que se utilizan en la tronadura del yacimiento de la tercera región son proporcionados por la empresa Orica los cuales son:

- Fortan Control 50.
- Flexigel Advantage serie-110.
- Flexigel control serie 50-60-70-80.
- Fortan Extra 30.

e) Pentex(iniciador).

Los explosivos que se utilizan en la tronadura del yacimiento de la segunda región son región son proporcionados por la empresa Orica los cuales son:

a) Emulsion Subtek Velcro.

b) Softron 11/16"x20.

c) Tronex 1 ¹/₈x8.

d) Amex ANFO.

e) Pentex(iniciador)

CAPITULO III: Desarrollo experimental

De acuerdo a lo expresado en el marco teórico existen varios formalismos estipulados en la literatura minera que permiten realizar el diseño de las mallas de perforación y factores de carga dejando absolutamente de lado la información mineralógica contenida en los macizos rocosos en los cuales se realizan las tronaduras.

De acuerdo a este criterio, se realiza en este trabajo la invitación anónima a varios profesionales que trabajan en diferentes faenas mineras del norte de Chile a donar muestras. Por razones de confidencialidad las ubicaciones exactas de los yacimientos no se darán a conocer.

Los aportes de muestras para esta investigación son los siguientes:

-Pórfido Cuprífero explotado a rajo abierto Primera Región.

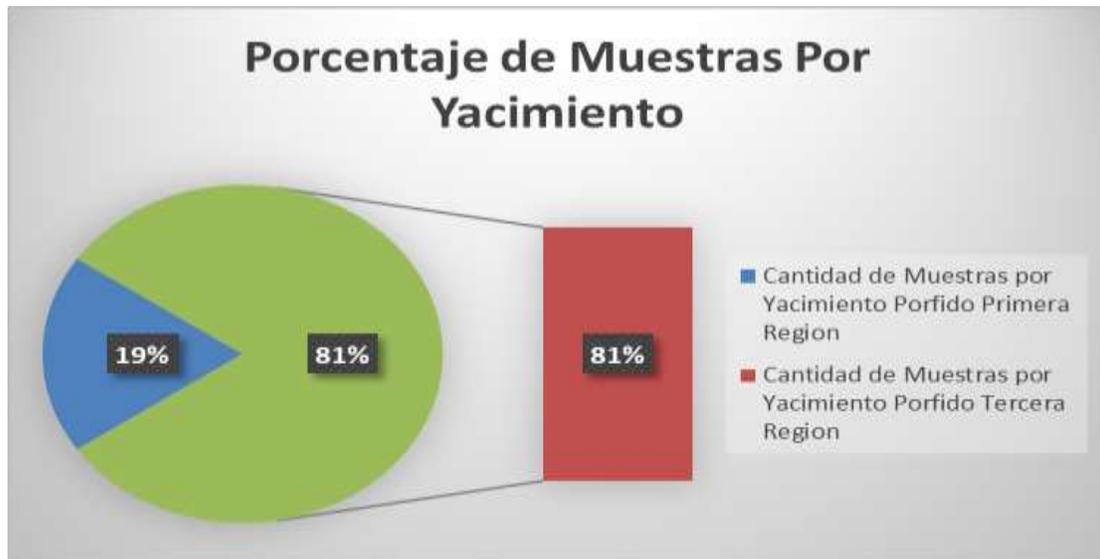
-Pórfido Cuprífero explotado a rajo abierto Tercera Región.

La cantidad de muestras analizadas fue de 21 y los aportes fueron:

Tabla 0.1 Desarrollo experimental, cantidad de muestras por yacimiento

Cantidad de Muestras por Yacimiento	
Pórfido Primera Región	Pórfido Tercera Región
4	17

Grafico 3.1. Desarrollo experimental, porcentaje de muestras por yacimiento



Una vez obtenidas las muestras (de acuerdo al protocolo de muestreo de pozos de tiro de cada faena, ver Anexo I, pág. 139) se procede a enviarlas a laboratorio para su análisis por medio de la técnica de difracción de rayos X, para efectuar el barrido y la cuantificación de la composición mineralógica global de los polvos.

Todas las muestras fueron analizadas en el laboratorio de mineralogía de la empresa Gestión de Proyectos Pro Limitada, ubicado en la ciudad de El Salvador.

3.1 Equipo, Parámetros Instrumentales y Softwares utilizados en los Barridos por Difracción de Rayos X

3.1.1 Equipo Miniflex 600 de la marca Rigaku

El MiniFlex 600 se basa en características que lo han hecho popular durante muchos años, incluyendo el tamaño compacto y diseño sólido, que permite su instalación en un espacio pequeño y es fácil de usar.

Se opera a 600 watts (tubo de rayos X), el MiniFlex 600 dos veces más potente que otros modelos de sobremesa, lo que permite realizar un análisis más rápido y un rendimiento general mejorado.

Idealmente adecuado para analizar a pasos rápidos la difracción de rayos X, la nueva sexta generación de MiniFlex ofrece la velocidad y la sensibilidad a través de mejores tecnologías innovadoras, como la opción D/teX detector de alta velocidad junto a la nueva fuente de rayos X 600W. Si la resolución es de suma importancia, las aberturas de haz incidente y difractado pueden ser seleccionadas para proporcionar la resolución deseada. Para el flujo de altas muestras, el MiniFlex es el único sistema de sobremesa con difracción de rayos X que contiene un cambiador de muestras disponibles.

Figura 3.1. Desarrollo experimental, equipo MiniFlex 600.



Óptica integrada en el software.

Figura 3.2. Desarrollo experimental, óptica integrada al software.



Fotografía de la óptica montada en el equipo para alta resolución

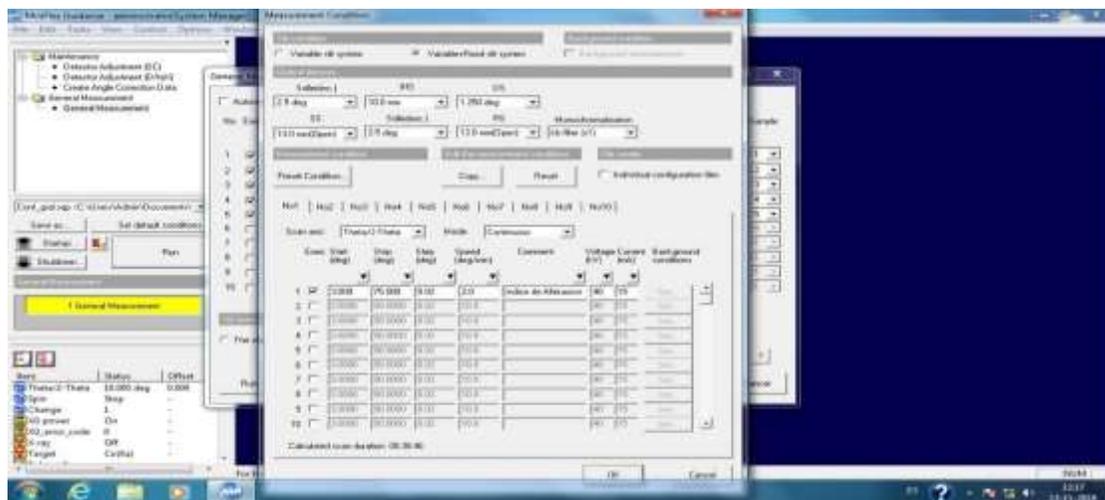
Figura 3.3. Desarrollo experimental, óptica integrada al equipo para alta resolución.



3.1.2 Parámetros instrumentales utilizados en la investigación

La siguiente imagen corresponde a los parámetros instrumentales utilizados en el software de operación del miniflex 600.

Figura 3.4. Desarrollo experimental, parámetros instrumentales utilizados en el software.



Parámetros Indicados en imagen anterior: Rango de medición 3°-75°, 0.02 Step*Grado, Velocidad 2.0 Grad/min target de Cobalto, Con Spin Sample.

3.1.3 Software PDXL

PDXL es un software suite omnifuncional de análisis de difracción por polvo. El diseño modular, su motor avanzado y la GUI (interfaz gráfica de usuario) fácil de usar, han sido de la satisfacción de los usuarios experimentados y novatos desde el lanzamiento de PDXL en 2007.

PDXL ofrece diversas herramientas de análisis tales como la identificación automática de fase, el análisis cuantitativo, el análisis del tamaño de los cristalitas, red constante de refinamiento, análisis de Rietveld, determinación de la estructura ab initio, etc.

a) Fase de identificación usando COD

La Crystallography Open Database (COD) es una base de datos gratis y de dominio público de las estructuras cristalinas publicadas por la Unión Internacional de Cristalografía, la Sociedad Mineralógica de América y otras asociaciones.

3.2 Resultados entregados por el laboratorio

Los resultados de laboratorio se ordenaron en las siguientes tablas y graficas por yacimiento:

Tabla 0.2 Desarrollo experimental, Tabla resultados DRX de Pórfido Cuprífero Primera Región

Tabla resultados DRX de Pórfido Cuprífero Primera Región																
ID	Cuarzo	Albita	Orthoclasa	Muscovita	Biotita	Clorita	Caolinita	Pirofillita	Epidota	Actinolita	Calcita	Hematita	Magnetita	Pyrita	Calcopirita	Total
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4310404	33,6	3,2	4,0	6,5	0,7	5,0	12,4	18,6	2,8	0,0	2,1	0,6	1,2	8,7	0,6	100,00
4310406	52,4	2,0	1,5	21,1	1,9	4,7	3,3	0,8	0,1	0,0	0,4	1,4	1,3	8,8	0,3	100,00
4311806	44,5	1,8	1,4	25,2	7,8	5,8	4,9	0,0	2,3	0,0	0,3	0,7	0,5	4,6	0,2	100,00
4311B17	29,6	2,8	3,2	2,5	2,8	19,0	8,7	0,0	11,8	2,4	5,3	0,6	0,7	10,5	0,1	100,00

Gráfico 3.2. Desarrollo experimental, Composición Mineralógica Global Pórfido Cuprífero de la Primera Región

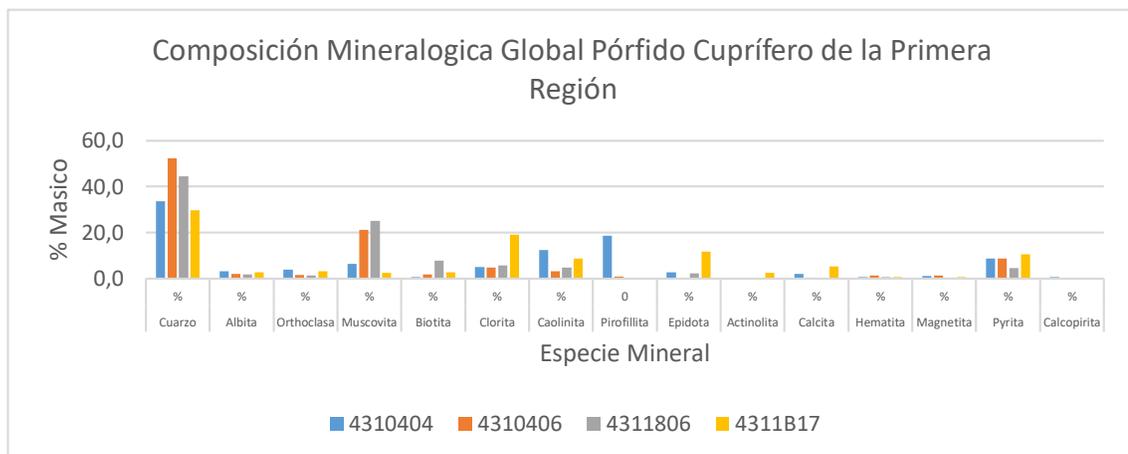


Tabla 0.3 Desarrollo experimental, Tabla resultados DR

X de Pórfido Cuprífero Tercera Región

Tabla resultados DRX de Pórfido Cuprífero Tercera Región																						
ID	Carbo	Alb	Orhoc	Maso	Bor	Clor	Calc	Prot	Epil	Alm	Actin	Ye	Amhyd	Hema	Magne	Pyri	Calc	Corel	Calcop	Bor	Emarg	For
	%	%	%	%	%	%	%	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MCA_1	22.1	37.4	9.2	2.4	9.9	6.4	4.0	0	4.0	0.9	0.0	0.3	0.3	1.0	1.3	0.1	0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	100.0
MCA_2	42.6	15.7	20.6	2.3	1.5	3.4	2.7	0	0.7	0.8	0.0	0.1	6.2	0.2	2.4	0.1	0.1	0.0	0.6	0.0	0.0	100.0
MCA_3	66.8	7.4	11.6	3.5	0.6	0.7	3.7	0	0.1	0.3	0.0	0.1	1.6	1.0	1.2	0.1	0.1	0.0	1.0	0.2	0.0	100.0
MCA_4	50.9	2.8	5.6	27.8	0.9	1.1	1.2	0	0.3	1.5	0.0	0.3	4.4	0.0	0.9	0.1	0.1	0.0	2.0	0.1	0.0	100.0
MCA_5	15.8	33.4	10.1	5.3	9.8	4.4	6.5	0	5.9	1.2	1.8	0.6	2.6	0.0	1.8	0.1	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	100.0
MCA_6	72.1	8.0	11.2	0.6	1.0	0.6	1.7	0	1.2	0.3	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.3	0.1	0.3	0.8	0.5	0.5	100.0
MCA_7	48.3	15.9	12.1	5.2	0.3	3.1	4.0	0	0.2	5.2	0.0	0.2	0.4	2.0	0.5	1.2	0.1	0.0	1.1	0.2	0.0	100.0
MCA_8	71.5	6.4	8.6	1.3	0.7	0.4	2.8	0	2.4	0.2	0.0	0.0	0.1	0.8	0.7	1.8	0.1	0.0	1.9	0.3	0.0	100.0
MCA_9	67.4	9.6	1.8	9.1	0.6	1.8	1.6	0	1.0	1.1	0.0	0.2	2.4	0.0	0.8	0.4	0.1	0.0	1.8	0.3	0.0	100.0
MCA_10	77.4	1.7	3.1	0.8	5.4	0.2	0.3	0	0.3	2.7	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	5.9	0.7	0.0	0.8	0.2	0.3	100.0
MCA_11	51.3	15.9	4.9	7.3	4.1	2.4	3.6	0	0.5	0.8	0.0	0.2	3.3	3.4	0.2	1.7	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	100.0
MCA_12	68.2	8.8	6.4	2.4	2.1	0.8	1.2	0	4.6	1.2	0.0	1.2	1.0	0.2	0.3	1.2	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	100.0
MCA_13	66.2	4.9	9.0	3.4	2.2	0.4	2.0	0	0.1	1.1	0.0	0.2	6.3	0.6	0.4	1.1	0.1	0.1	1.4	0.5	0.0	100.0
MCA_14	20.5	34.9	4.2	2.5	5.2	6.5	7.8	0	4.3	0.6	0.0	0.2	0.8	1.8	2.6	7.0	0.2	0.7	0.2	0.0	0.0	100.0
MCA_15	58.0	17.5	8.5	1.6	1.1	0.4	2.1	0	1.8	1.7	0.0	0.5	2.2	1.8	0.7	0.3	0.1	0.1	1.6	0.0	0.0	100.0
MCA_16	84.7	0.2	0.5	0.7	0.9	0.3	0.1	0	0.6	0.1	0.0	0.0	3.7	0.0	0.3	5.4	0.1	0.0	1.7	0.4	0.3	100.0
MCA_17	83.0	3.0	2.3	1.1	1.7	0.2	0.7	0	0.1	0.2	0.0	0.1	3.1	0.1	0.2	3.0	0.3	0.0	0.2	0.1	0.6	100.0

3.3 Hipótesis para la obtención del Índice de alteración experimental

En parte del marco teórico se hace mención a las propiedades físicas de los minerales, para este estudio se considera la tenacidad como característica central. Esta importante cualidad permite conocer más a fondo el comportamiento de los diferentes minerales que componen un macizo rocoso.

La fragilidad y la elasticidad, 2 tipos de tenacidad conocidas, son las que por principio de observación dan origen a la idea de obtener un índice que permita demostrar que la relación de estos principios tiene un comportamiento matemático a medida que los aportes de minerales frágiles como las arcillas y elásticos como las micas se van haciendo presentes en los diferentes ambientes de las alteraciones hidrotermales.

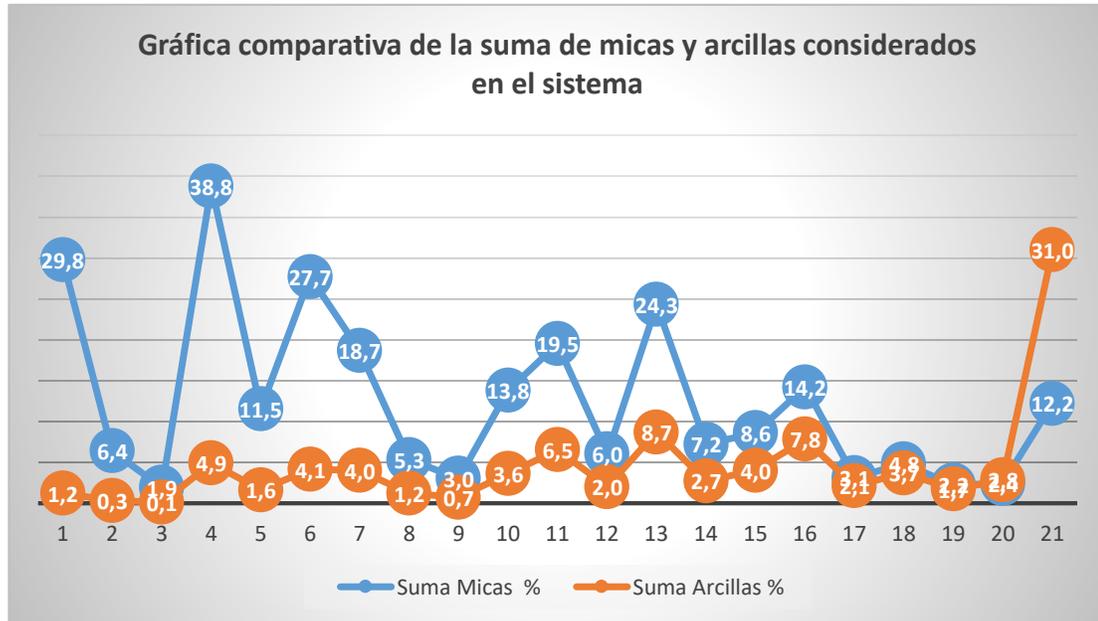
Asumiendo que la tenacidad dependerá de la presencia de estos minerales se realiza el ejercicio de sumar los valores cuantificados por medio de la difracción de rayos X correspondientes a la cantidad de arcillas presentes en la roca para obtener el valor de la fragilidad y de sumar la cantidad de micas (Biotita, Muscovita y Clorita) para obtener el valor de la elasticidad.

Como primer ejercicio se ordenaron los datos considerando solo los minerales de interés, dando origen a la siguiente tabla:

Tabla 0.4 Desarrollo experimental, datos ordenados minerales de interés

ID	Micas			Arcillas				Suma	
	Muscovita	Biotita	Clorita	Caolinita	Pirofillita	Jarosita	Goethita	Micas	Arcillas
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MCA_4	27.8	0.9	1.1	1.2	0	0.0	0.0	29.8	1.2
MCA_10	0.8	5.4	0.2	0.3	0	0.0	0.0	6.4	0.3
MCA_16	0.7	0.9	0.3	0.1	0	0.0	0.0	1.9	0.1
4311806	25.2	7.8	5.8	4.9	0.0	0.0	0.0	38.8	4.9
MCA_9	9.1	0.6	1.8	1.6	0	0.0	0.0	11.5	1.6
4310406	21.1	1.9	4.7	3.3	0.8	0.0	0.0	27.7	4.1
MCA_1	2.4	9.9	6.4	4.0	0	0.0	0.0	18.7	4.0
MCA_12	2.4	2.1	0.8	1.2	0	0.0	0.0	5.3	1.2
MCA_17	1.1	1.7	0.2	0.7	0	0.0	0.0	3.0	0.7
MCA_11	7.3	4.1	2.4	3.6	0	0.0	0.0	13.8	3.6
MCA_5	5.3	9.8	4.4	6.5	0	0.0	0.0	19.5	6.5
MCA_13	3.4	2.2	0.4	2.0	0	0.0	0.0	6.0	2.0
4311B17	2.5	2.8	19.0	8.7	0.0	0.0	0.0	24.3	8.7
MCA_2	2.3	1.5	3.4	2.7	0	0.0	0.0	7.2	2.7
MCA_7	5.2	0.3	3.1	4.0	0	0.0	0.0	8.6	4.0
MCA_14	2.5	5.2	6.5	7.8	0	0.0	0.0	14.2	7.8
MCA_15	1.6	1.1	0.4	2.1	0	0.0	0.0	3.1	2.1
MCA_3	3.5	0.6	0.7	3.7	0	0.0	0.0	4.8	3.7
MCA_6	0.6	1.0	0.6	1.7	0	0.0	0.0	2.2	1.7
MCA_8	1.3	0.7	0.4	2.8	0	0.0	0.0	2.4	2.8
4310404	6.5	0.7	5.0	12.4	18.6	0.0	0.0	12.2	31.0

Grafico 3.4. Desarrollo experimental, Gráfica comparativa de la suma de micas y arcillas considerados en el sistema



De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla anterior y a la gráfica se decide vincular los resultados en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de Alteración Experimental} = \frac{\sum \text{Frag}}{\sum \text{Elast}}$$

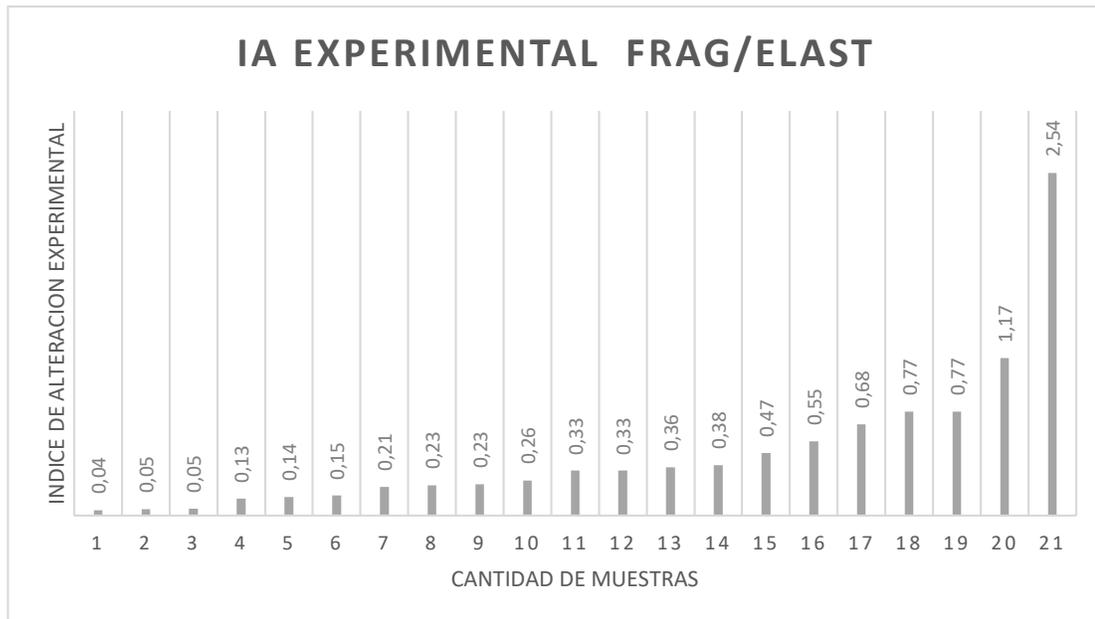
Lo cual permite relacionar estos tipos de minerales, al aplicar la fórmula se consiguen los siguientes valores:

Tabla 0.5 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración

ID	Micas			Arcillas				I.A.Experimental
	Muscovita	Biotita	Clorita	Caolinita	Pirofillita	Jarosita	Goethita	
	%	%	%	%	%	%	%	FRAG/ELAST
MCA_4	27.8	0.9	1.1	1.2	0	0.0	0.0	0.04
MCA_10	0.8	5.4	0.2	0.3	0	0.0	0.0	0.05
MCA_16	0.7	0.9	0.3	0.1	0	0.0	0.0	0.05
4311806	25.2	7.8	5.8	4.9	0.0	0.0	0.0	0.13
MCA_9	9.1	0.6	1.8	1.6	0	0.0	0.0	0.14
4310406	21.1	1.9	4.7	3.3	0.8	0.0	0.0	0.15
MCA_1	2.4	9.9	6.4	4.0	0	0.0	0.0	0.21
MCA_12	2.4	2.1	0.8	1.2	0	0.0	0.0	0.23
MCA_17	1.1	1.7	0.2	0.7	0	0.0	0.0	0.23
MCA_11	7.3	4.1	2.4	3.6	0	0.0	0.0	0.26
MCA_5	5.3	9.8	4.4	6.5	0	0.0	0.0	0.33
MCA_13	3.4	2.2	0.4	2.0	0	0.0	0.0	0.33
4311B17	2.5	2.8	19.0	8.7	0.0	0.0	0.0	0.36
MCA_2	2.3	1.5	3.4	2.7	0	0.0	0.0	0.38
MCA_7	5.2	0.3	3.1	4.0	0	0.0	0.0	0.47
MCA_14	2.5	5.2	6.5	7.8	0	0.0	0.0	0.55
MCA_15	1.6	1.1	0.4	2.1	0	0.0	0.0	0.68
MCA_3	3.5	0.6	0.7	3.7	0	0.0	0.0	0.77
MCA_6	0.6	1.0	0.6	1.7	0	0.0	0.0	0.77
MCA_8	1.3	0.7	0.4	2.8	0	0.0	0.0	1.17
4310404	6.5	0.7	5.0	12.4	18.6	0.0	0.0	2.54

Al ordenar los datos en forma creciente y con un solo componente numérico se observa la siguiente gráfica:

Grafico 3.5. Desarrollo experimental, Gráfica datos ordenados según Índice de Alteración



Ésta demuestra que el resultado obtenido respecto del índice de alteración experimental tiene un comportamiento ordenado y ascendente, por tanto, es posible utilizarlo como herramienta matemática para generar modelos de regresión lineal.

3.4 Discusión

3.4.1 Uso de los datos obtenidos para la generación de la curva de calibración

Todas las muestras analizadas para esta metodología cumplieron con el requerimiento de ser acompañadas con sus respectivos protocolos de tronadura donde se debía indicar como información mínima el factor de carga equivalente en ANFO, (algunos de estos protocolos se encuentran en la sección Anexos), a fin de poder realizar la comparación

de los valores del índice de alteración respecto al peso de los explosivos utilizados por pozo de tronadura.

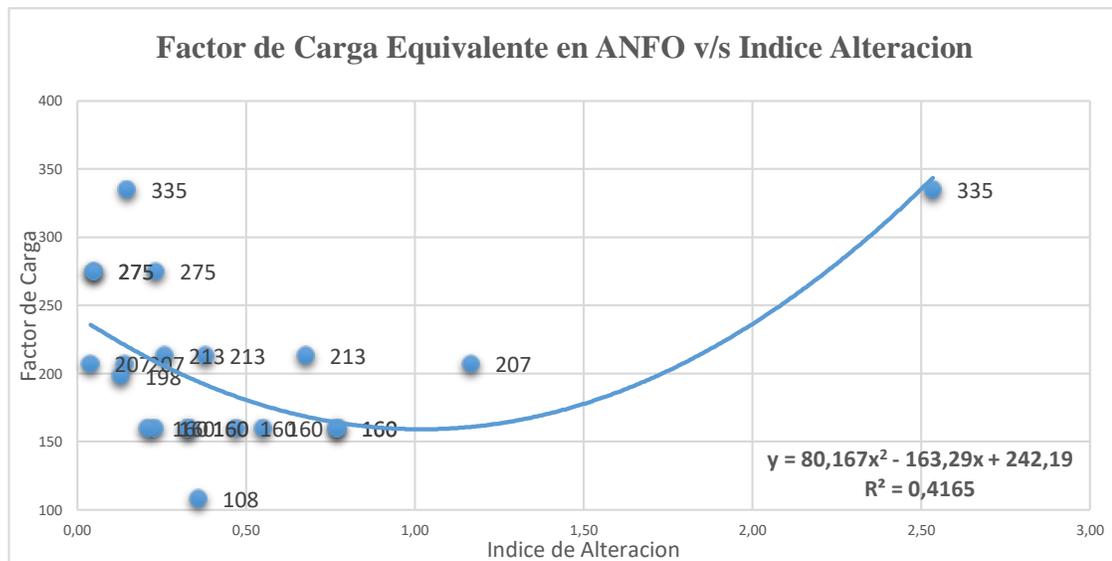
De acuerdo a este criterio los datos se ordenaron en la siguiente tabla:

Tabla 0.6 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración y Factor de Carga

ID	IA	FC (Grs/Ton)
4310404	2.53	335
MCA_8	1.17	207
MCA_6	0.77	160
MCA_3	0.77	160
MCA_15	0.68	213
MCA_14	0.55	160
MCA_7	0.47	160
MCA_2	0.38	213
4311B17	0.36	108
MCA_5	0.33	160
MCA_13	0.33	160
MCA_11	0.26	213
MCA_12	0.23	160
MCA_17	0.23	275
MCA_1	0.21	160
4310406	0.15	335
MCA_9	0.14	207
4311806	0.13	198
MCA_16	0.05	275
MCA_10	0.05	275
MCA_4	0.04	207

Al realizar esta comparación de datos se obtiene la siguiente gráfica:

Grafico 3.6. Desarrollo experimental, Gráfica Factor de Carga Equivalente en ANFO v/s Índice Alteración



De acuerdo al resultado obtenido se puede apreciar un comportamiento matemático claro ya que la línea de tendencia calculada se centra en la nube de puntos de la gráfica.

La función $y = 80.167x^2 - 163.29x + 242.19$ definida de acuerdo a la dispersión, carece de confianza ya que su coeficiente de Pearson solo manifiesta un $R^2=0.4165$, inferior a un 0.5 donde las probabilidades de éxito no son lo suficientemente claras.

A fin de poder realizar el mejor ajuste de los datos de la curva, se realiza el cálculo de los factores de carga en ANFO equivalente, se realiza el cálculo de los errores absolutos en gramos y errores porcentuales.

Formulismo para el cálculo de los errores:

Valor calculado:

$$y = 80.167 x^2 - 163.29x + 242.19$$

Donde x corresponde al valor del índice de alteración experimental

Valor real:

Entregado por los protocolos de tronadura de cada muestra.

Para realizar la estimación del cálculo del error absoluto se utiliza la siguiente formula:

$$|Err| = |valor\ real - valor\ calculado|$$

Para la obtención del error porcentual:

$$Error\ \% = (|(Valor\ calculado)/(Valor\ real)| - 1) * 100$$

Valores obtenidos:

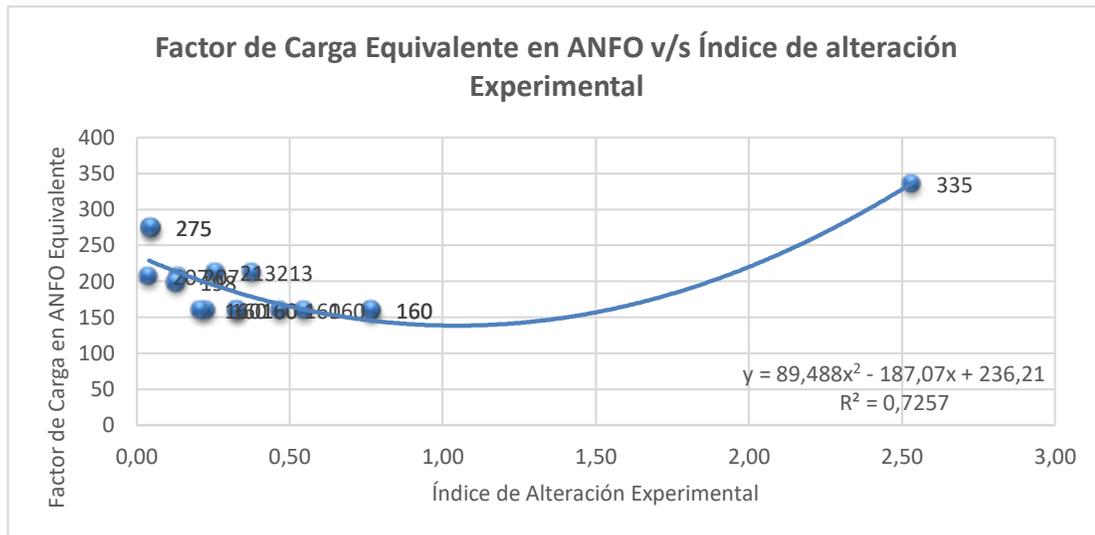
Tabla 0.7 Desarrollo experimental, Tabla de cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales

ID	IA Experimental	FC_Real(Grs/Ton)	FC_Calculado (Grs/Ton)	Error ABS (Grs/Ton)	%Error
4310404	2.53	335	343.4	8.4	2.43%
MCA_8	1.17	207	160.8	46.2	28.73%
MCA_6	0.77	160	164.0	4.0	2.43%
MCA_3	0.77	160	164.0	4.0	2.43%
MCA_15	0.68	213	168.4	44.6	26.51%
MCA_14	0.55	160	176.6	16.6	9.42%
MCA_7	0.47	160	183.2	23.2	12.64%
MCA_2	0.38	213	191.7	21.3	11.10%
4311B17	0.36	108	193.8	85.8	44.29%
MCA_5	0.33	160	197.0	37.0	18.80%
MCA_13	0.33	160	197.0	37.0	18.80%
MCA_11	0.26	213	205.2	7.8	3.82%
MCA_12	0.23	160	208.9	48.9	23.40%
MCA_17	0.23	275	208.5	66.5	31.92%
MCA_1	0.21	160	211.4	51.4	24.33%
4310406	0.15	335	219.7	115.3	52.45%
MCA_9	0.14	207	220.9	13.9	6.29%
4311806	0.13	198	222.3	24.3	10.94%
MCA_16	0.05	275	234.2	40.8	17.41%
MCA_10	0.05	275	234.2	40.8	17.41%
MCA_4	0.04	207	235.8	28.8	12.21%

Las muestras coloreadas con rojo son muestras que tienen sobre un 25% de error en el cálculo, indagando un poco más en cuanto al origen de los especímenes se confirmó que algunos de estas fueron utilizados para otros fines, como contornos, pozos buffer y otras de las que no se tiene mayor información.

Al refinar los datos se confeccionó la siguiente gráfica:

Gráfico 3.7 Desarrollo experimental, Gráfica Factor de Carga Equivalente en ANFO v/s Índice Alteración con datos refinados



Al realizar este ejercicio se ajusta mucho mejor el modelo y se obtiene mayor confianza en el análisis ya que el R^2 aumenta de un 0.4165 a un 0.7257, por tanto, se infiere que el modelo funciona a nivel teórico experimental.

Al obtener una nueva función $y = 89.488x^2 - 187.07x + 236.21$ es posible recalculer los errores de acuerdo al mismo protocolo, obteniendo los siguientes resultados:

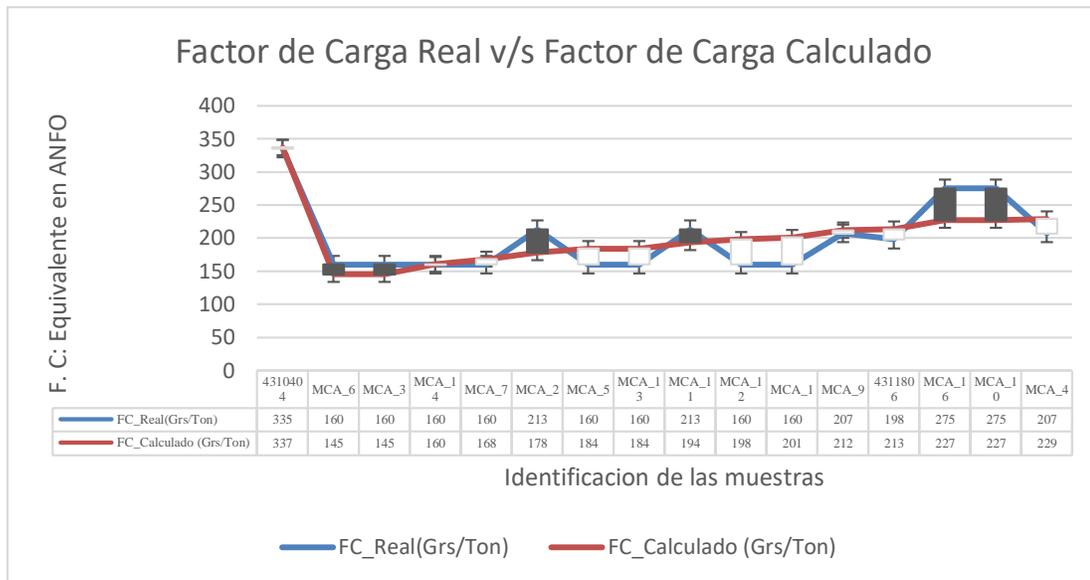
Tabla 0.8 Desarrollo experimental, cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales con datos refinados

ID	IA Experimental	FC_Real(Grs/Ton)	FC_Calculado (Grs/Ton)	Error ABS(Grs/Ton)	%Error
4310404	2.53	335	337.0	8.4	2.43%
MCA_6	0.77	160	145.2	4.0	2.43%
MCA_3	0.77	160	145.2	4.0	2.43%
MCA_14	0.55	160	160.4	16.6	9.42%
MCA_7	0.47	160	168.1	23.2	12.64%
MCA_2	0.38	213	178.0	21.3	11.10%
MCA_5	0.33	160	184.2	37.0	18.80%
MCA_13	0.33	160	184.2	37.0	18.80%
MCA_11	0.26	213	193.6	7.8	3.82%
MCA_12	0.23	160	197.9	48.9	23.40%
MCA_1	0.21	160	200.9	51.4	24.33%
MCA_9	0.14	207	211.8	13.9	6.29%
4311806	0.13	198	213.4	24.3	10.94%
MCA_16	0.05	275	227.1	40.8	17.41%
MCA_10	0.05	275	227.1	40.8	17.41%
MCA_4	0.04	207	228.9	28.8	12.21%

Con este nuevo modelo solo en una muestra se llega a diferencias por sobre los 50 gramos por tonelada, lo que permite suponer que a mayor cantidad de muestras es posible dar mayor robustez a la curva de calibración.

Al comparar los valores de los factores de carga obtenidos de acuerdo a su Índice de alteración versus los utilizados en terreno se evidencia el siguiente comportamiento:

Grafico 3.8 Desarrollo experimental, comportamiento Factor de Carga Real v/s Factor de Carga Calculado



En la comparación de los datos experimentales versus los datos de terreno es posible observar la linealidad de los valores obtenidos en base a la calibración, mientras los datos utilizados en terreno reflejan una tendencia clara pero no una linealidad.

3.4.2 Comparación del modelo con muestras de otro tipo yacimiento y diferente método de explotación.

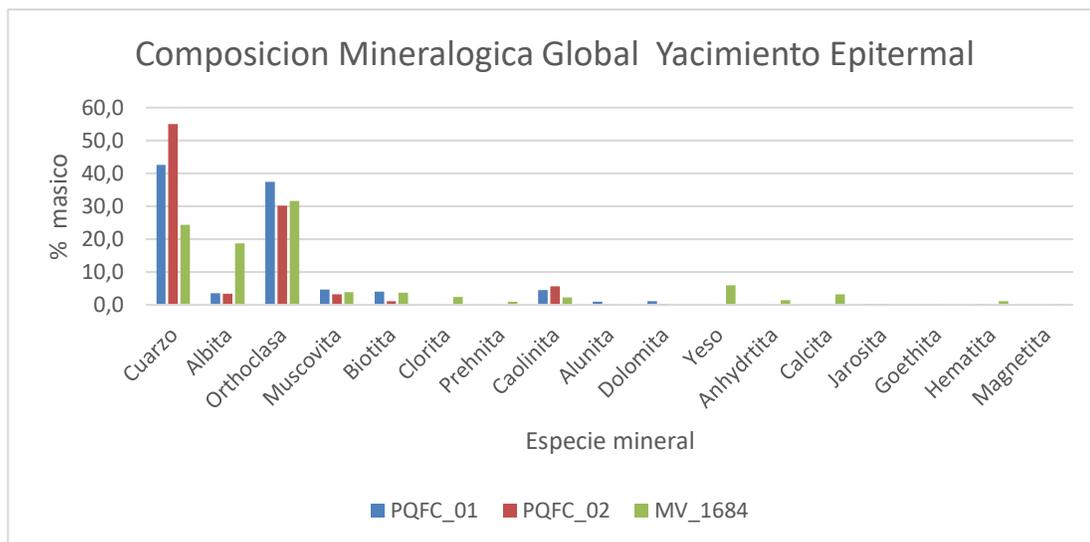
Con la finalidad de realizar una comprobación de la función obtenida y si esta cumple con el objetivo de realizar el cálculo del factor de carga en ANFO equivalente se consiguieron muestras de un yacimiento tipo epitermal con método de explotación subterráneo.

Para la realización de los análisis comparativos se utilizaron las mismas condiciones operacionales que en el caso anterior.

Los resultados obtenidos en el yacimiento epitermal fueron los siguientes:

Tabla 0.9 Desarrollo experimental, tabla resultados DRX de Yacimiento Epitermal Segunda Región

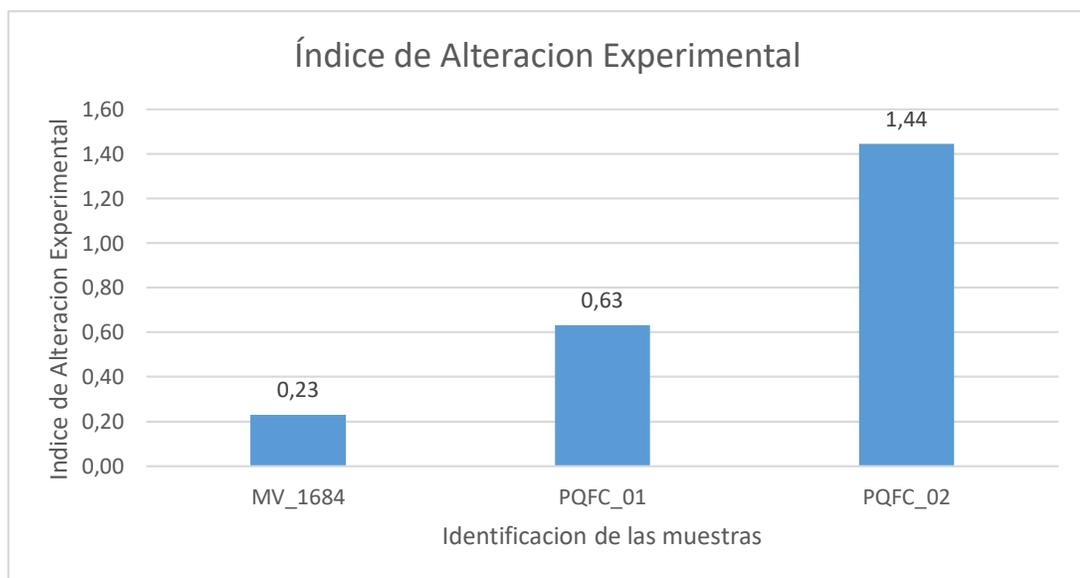
Tabla resultados DRX de Yacimiento Epitermal Segunda Región																		
ID Muestras	Cuarzo	Albita	Orthoclasa	Muscovita	Biotita	Clorita	Prehnita	Caolinita	Alunita	Dolomita	Yeso	Anhidrita	Calcita	Jarosita	Goethita	Hematita	Magnetita	Total
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
PQFC_01	42.6	3.6	37.5	4.7	4.0	0.0	0.0	4.6	0.9	1.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.3	0.0	100.0
PQFC_02	55.0	3.4	30.2	3.3	1.2	0.0	0.0	5.7	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.2	0.0	100.0
MV_1684	24.3	18.7	31.6	3.8	3.7	2.5	0.9	2.3	0.0	0.0	6.0	1.4	3.2	0.0	0.0	1.2	0.4	100.0

Grafico 3.9 Desarrollo experimental, Composición Mineralógica Global Yacimiento Epitermal

Una vez informados los datos de laboratorio, al igual que en las muestras de los yacimientos tipo pórfidos cupríferos se ordenaron y obtuvieron los valores de los Índices de alteración considerando dentro del grupo de los minerales frágiles, las arcillas producidas por óxidos de hierro o del grupo de las limonitas, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 0.10 Desarrollo experimental, Tabla datos ordenados según Índice de Alteración

Identificación Muestra	Muscovita	Biotita	Clorita	Caolinita	Jarosita	Goethita	Hematita	I.A Experimental
	%	%	%	%	%	%	%	
MV_1684	3.8	3.7	2.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.23
PQFC_01	4.7	4.0	0.0	4.6	0.4	0.2	0.3	0.63
PQFC_02	3.3	1.2	0.0	5.7	0.4	0.2	0.2	1.44

Gráfico 3.10 Desarrollo experimental, grafico Índice de Alteración Experimental, Yacimiento Epitermal

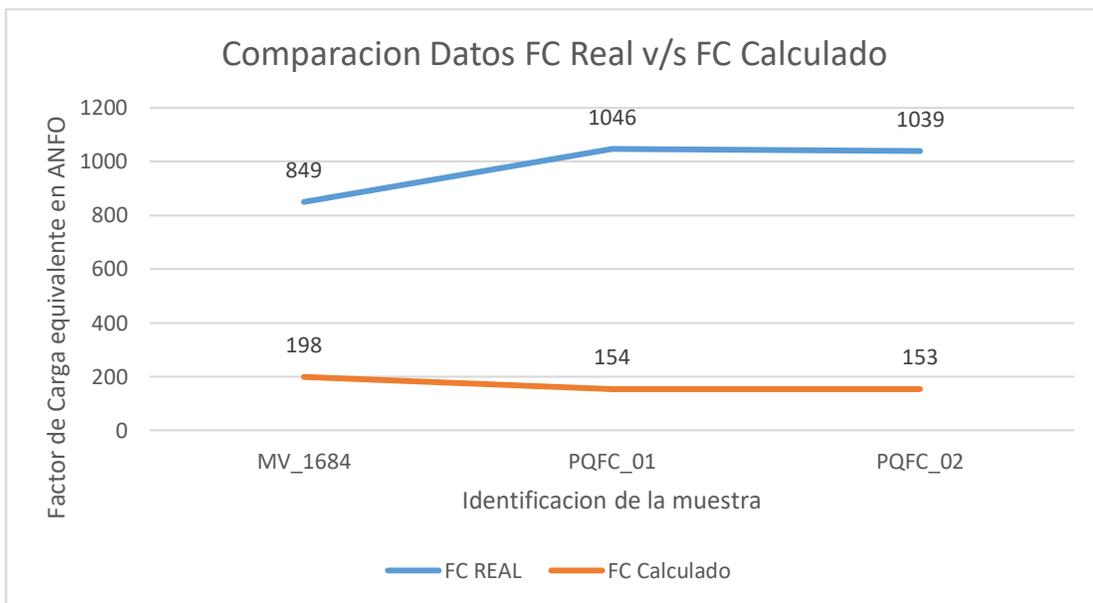
Al observar la gráfica se vuelve a tener la misma tendencia que en el caso anterior por lo que se procedió a realizar la comparación de los datos de los factores de carga en ANFO equivalente calculados con la función $y = 89.488x^2 - 187.07x + 236.21$ a fin de comprobar el recorrido de la curva con una nueva matriz de datos y un método de explotación diferente.

Estos resultados se expresaron en la siguiente tabla:

Tabla 0.11 Desarrollo experimental, Tabla de cálculos de factor de carga real, calculado, errores absolutos en gramos y errores porcentuales

Identificación Muestra	IA	Factor de Carga		Error	
	Experimental	Real GRS/TON	Calculado GRS/TON	Absoluto grs	%
MV_1684	0.23	849	198	651	429.09%
PQFC_01	0.63	1046	154	892	680.53%
PQFC_02	1.44	1039	153	886	680.70%

Gráfico 3.11 Desarrollo experimental, grafico comparación datos FC Real v/s FC Calculado



De acuerdo con la comparación de los datos de la prueba se observa que las curvas no tienen el mismo comportamiento y el rango de los errores estimados esta entre el 429.09% y el 680.70% lo que no hace consistente el modelo.

Ante esta situación se decide realizar una nueva curva de calibración, pero solo con datos correspondientes a este yacimiento, asumiendo que las diferencias en los resultados son producidas probablemente por condiciones del método de explotación.

CAPITULO IV: Conclusiones

Al terminar nuestra investigación podemos concluir que la ecuación planteada para el cálculo del índice de Alteración Experimental cumple con el objetivo y alcance de relacionar de forma matemática los minerales que afectan la tenacidad del macizo rocoso.

Por medio de la difracción de rayos X se hizo posible:

- Primero reutilizar muestras destinadas al análisis químico, lo que generó oportunidad de complementar la información por medio de las mismas muestras de pozos de tiro, sin generar costos a parte en muestreos.
- Segundo tener una cuantificación precisa de las especies minerales por medio del método de Rietveld, gracias al uso de la difracción de rayos X se aminoraron los tiempos de respuesta en relación a otras técnicas de análisis de minerales, lo que hace posible incluso inferir que el resultado del análisis puede ser diario en procesos de producción y/o a largo plazo utilizando las muestras de sondajes, se determinó que el tiempo de respuesta del laboratorio es menor a 8 horas.

Respecto al costo del análisis de DRX y a su oferta en el mercado local, hay laboratorios que ofertan el análisis, respecto de otras técnicas más lentas y casi del mismo costo como los cortes transparentes, el análisis se valorizó en 1.5 unidades de fomento, lo que hace un costo alcanzable para la implementación industria minera.

- Tercero al obtener las cuantificaciones de los minerales por medio del software PDXL de Rigaku, se evita la disyuntiva entre los criterios personales del porcentaje contenido de minerales de alteración, permite conocer con exactitud la especie mineral y su cuantificación, dejando de lado la empírica para dar paso a la precisión analítica de la técnica.

Al finalizar la discusión de los datos y los modelamientos que permitieron el desarrollo de la metodología se demostró que los factores de carga en ANFO equivalente son sensibles al contenido de minerales del tipo mica y arcillas contenidos en las diferentes fases de alteración hidrotermal, dejando claro que los valores de los Índices calculados inferiores a 1 reflejan un predominio de minerales micáceos y los valores superiores a 1 un predominio de minerales arcillosos.

Si bien las funciones obtenidas en base a las dispersiones, dieron a entender que existe una correlación y confianza con valores interesantes, es necesario aumentar la cantidad de muestras ya que en la nube de puntos del gráfico 7 no se evidencian datos entre el valor del Índice de Alteración 0,77 y 2,53.

Al realizar el ajuste de los datos para el planteamiento de la función del primer modelo para el cálculo de factor de carga equivalente en ANFO por medio de un Índice de Alteración Experimental se observó que el modelo llega a una confianza de un 74% lo cual para fines de esta investigación es un gran avance, pero se requiere de un universo mayor de muestras.

A fin de comprobar si el modelo propuesto era válido para otros tipos de yacimiento que no fueran pórfidos cupríferos lo pusimos a prueba con muestras de un yacimiento tipo epitermal de explotación subterránea, al realizar este ejercicio el resultado fue desastroso ya que los errores fueron de un 400% a un 600%, por tanto, el modelo de un pórfido cuprífero a rajo abierto no es consistente con el de yacimientos de explotación subterránea.

En esta problemática al desarrollar un nuevo modelo, con muestras solo del yacimiento epitermal se demostró que el modelo y la metodología podrían funcionar, ya que al someter las 3 muestras con las que se contaba a la nueva regresión se logra un buen comportamiento matemático.

CAPITULO V: Bibliografía

1. Manual Perforación y Tronadura de Rocas de López Jimeno, Capítulo 20 página 221.
2. Manual de Tronadura de ENAEX, páginas 6 y 7.
3. Diseño de Voladuras, Dr. Calvin J. Konya, Ing. Enrique Albarán N., Primera edición, 1988.
4. Manual de Empleo de Explosivos, Unión Española de Explosivos, abril 2002, Madrid.
5. Modelamiento de Fragmentación de Rocas por Tronaduras, Mina Chuquicamata, Juan Carlos Quispe Lemus, Tesis, 2009.
6. Diseño de Parámetros de Voladura, Aplicando el Modelo KUZ RAM y la Teoría de Daño por Vibraciones en Roca, Fulton Carlos Reátegui Ordoñez, Tesis, 2017.
7. Utilización de Información Geomecánica en los Diseños de Tronadura, Julio Cesar Castillo Cortez, Tesis, 1996.
8. Influencia de las Propiedades de los Macizos Rocosos en el Diseño y Resultados de las Voladuras, Emilio López Jimeno.
9. Guía del Explosivista, Enaex, 2016.
10. Manual de Mineralogía, J. Dana, Cuarta Edición, 1996.
11. Efectos de la Alteración Hidrotermal en la Volabilidad de Unidades Andesíticas, Implicancia en las Operaciones Unitarias, XI Congreso de Geología Chileno, agosto 2006, Antofagasta.
12. Manual Práctico de voladura, Exsa S.A.
13. Apuntes de Yacimientos Minerales, Instituto Politécnico Nacional, México.
14. Caracterización de la Chancabilidad de Rocas Mineralizadas Provenientes del Proyecto Chuquicamata Subterráneo, Bruno Merello Estay, 2016.
15. Geología de Yacimientos Minerales Metálicos, Jorge Varela, UNMSM, 1987.

16. Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas, Susana Patrick, Casagrande A, Ronald Castillo Blanco.
17. Principios de Análisis Instrumental, Skog, Douglas A, Quinta edición; Mc Graw Hill; 2001, página 298.
18. Introducción al Método Rietveld, L Fuentes año 2004.
19. www.rigaku.com/es/products/xrd.
20. www.enaex.com/productos/.
21. www.orica.com/Productos---Services/blasting#.XNCqro4zaUk.

ANEXO I. Protocolo toma de muestras

Modelo de optimización factor de carga

1. Objetivos

Orientar en la toma, manejo y preparación de muestras, con el fin de obtener una cantidad representativa del lote, manto o pila que se quiera caracterizar.

2. Alcance.

Este instructivo comprende las actividades necesarias para obtener una muestra mineral representativa, la cual se analizará en laboratorio.

3. Numero de muestras a tomar.

El número de muestras a tomar, es en función de la variabilidad de las litologías presentes en la explotación y de las técnicas de muestreo.

Ideal 2 muestras por sector

ejemplo:

5 litologías presentes, 10 muestras.

4. Peso mínimo de las muestras a tomar.

El peso debe ser lo suficientemente grande para que las partículas de todos los tamaños queden incluidas, así como para que todas las partículas queden representadas en la misma proporción y distribución que el existente en toda la unidad litológica que se está muestreando (3 kg aproximadamente).

5. Tipo de muestreo.

Muestreo de producción. Este muestreo se refiere al mineral que ha sido extraído o arrancado por operaciones mineras. Este muestreo puede ser de mineral en reposo(estacionario) o de una corriente de mineral (mineral en movimiento).

Lo principal de este muestreo es que debe hacerse de una unidad litológica pura.

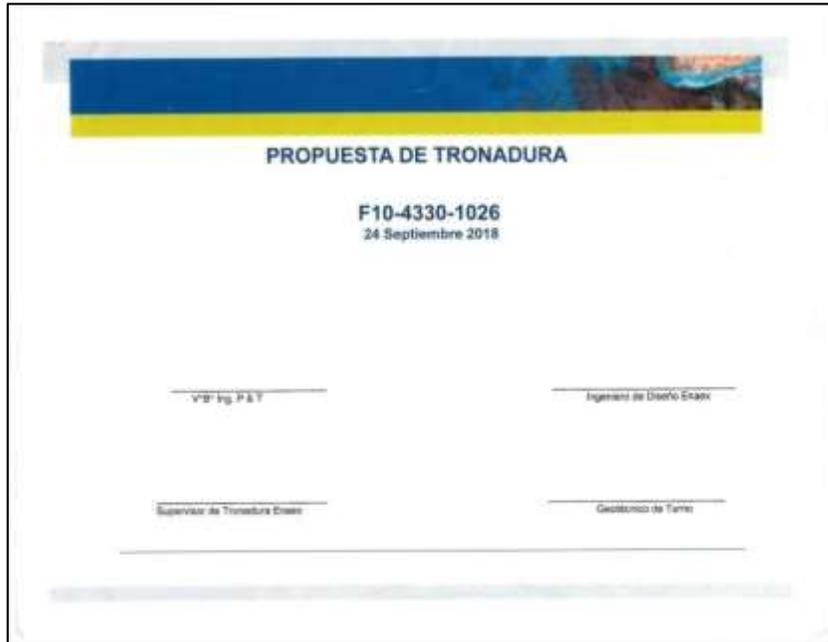
6. Empaque de la muestra.

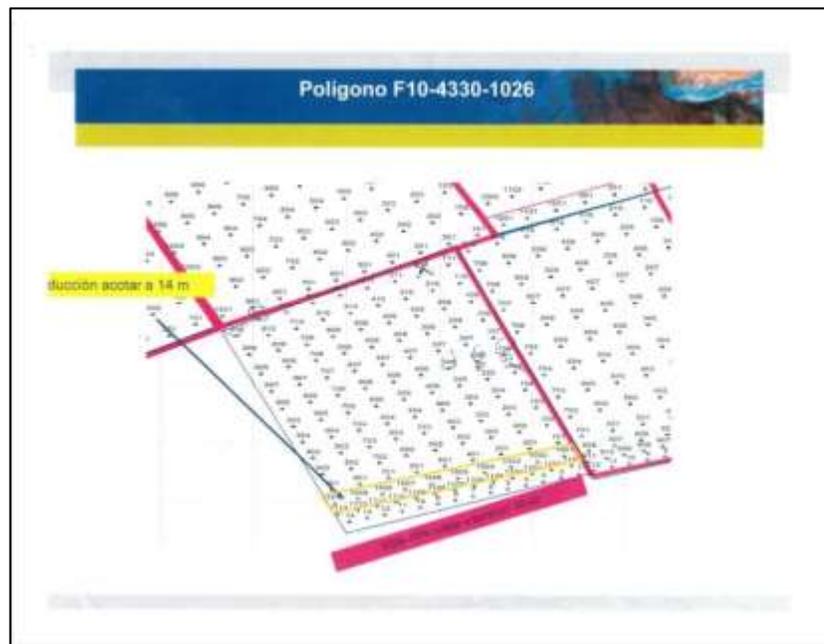
Para todos los casos tome la muestra, mézclelas, triture, pulverice y debe ser secada hasta lograr un 2% de humedad.

Reducir la masa a ± 200 grs, previo chancado 100% bajo 10 malla.

Pulverizar ± 200 grs de muestra P80-140 malla.

ANEXO II. Protocolos de tronadura Yacimiento Primera Región





Propuesta F10-4330-1026

Legenda:

- Superficie actual
- Agua
- Superficie impermeable
- Superficie F10
- Fy Road
- Fy Road Drenaje

Nota: En presencia de agua, usar Fy Road impermeable en superficie en la zona de tráfico, impermeable y drenaje solo en la zona de estacionamiento.

PROYECTO DE TRONADURA

CONDICIONES GENERALES:

Nombre:	PROYECTO DE TRONADURA	Fecha:	17/09/2018
Ubicación:	...	Escala:	1:100
Proyecto:	...	Autores:	...
Cliente:	...	Revisado:	...
Estado:	...	Fecha de entrega:	...
...

CONDICIONES PARTICULARES:

Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050

PROPUESTA DE TRONADURA

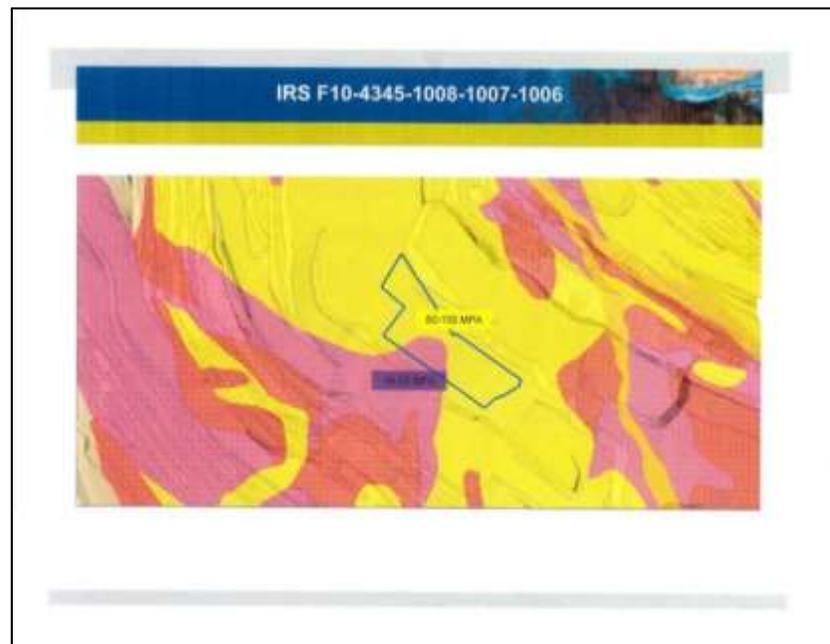
F10-4345-1008-1010
17 Septiembre 2018

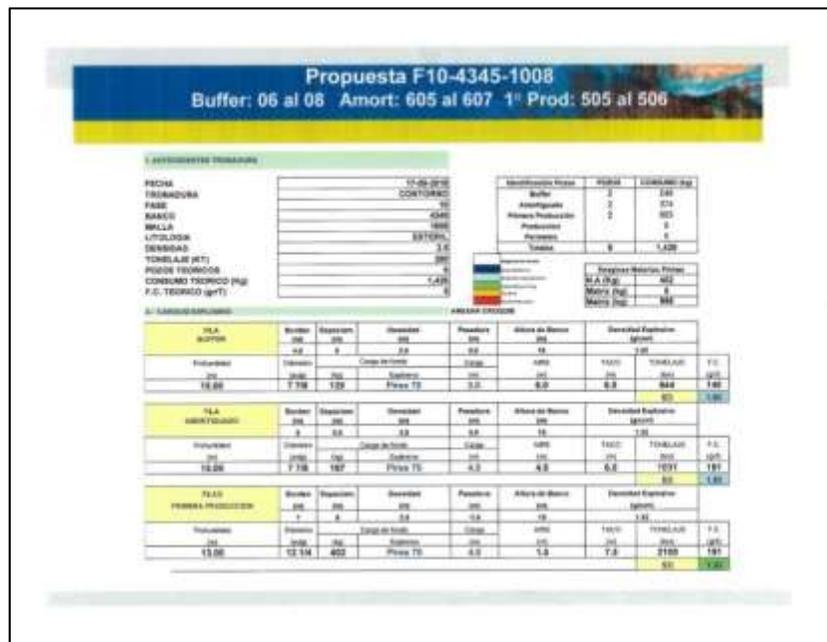
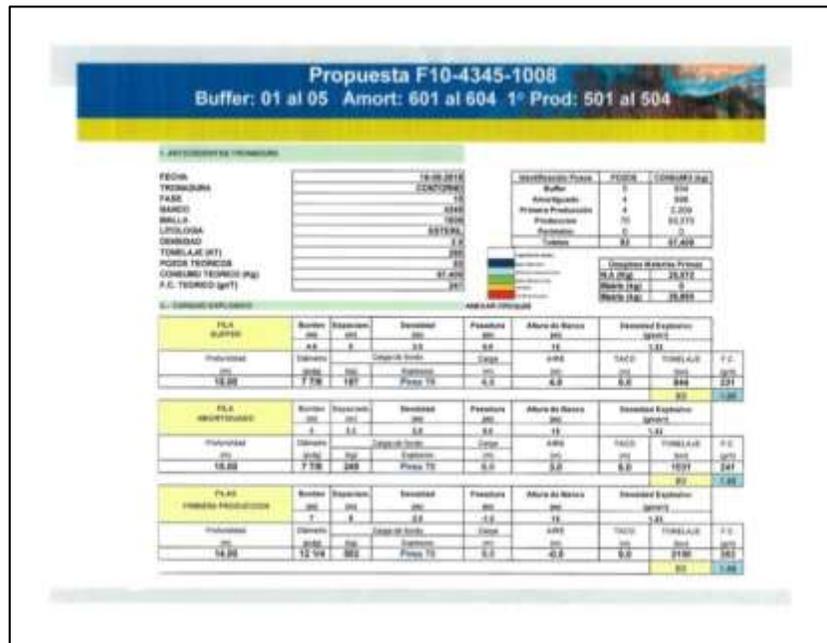
Vº Ing. P & T

Ingeniero de Diseño Eruvex

Supervisor de Tronadura Eruvex

Geometrico de Trazo





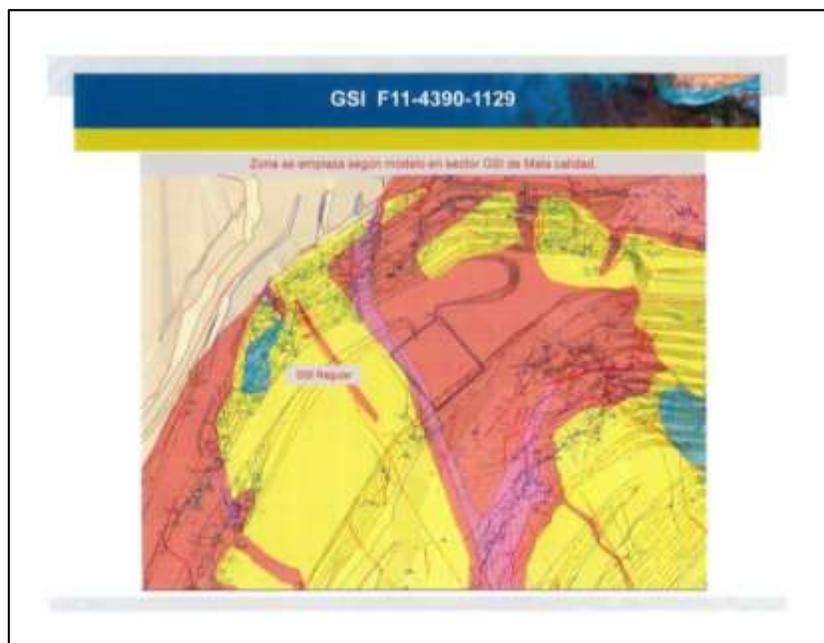
PROPUESTA DE TRONADURA

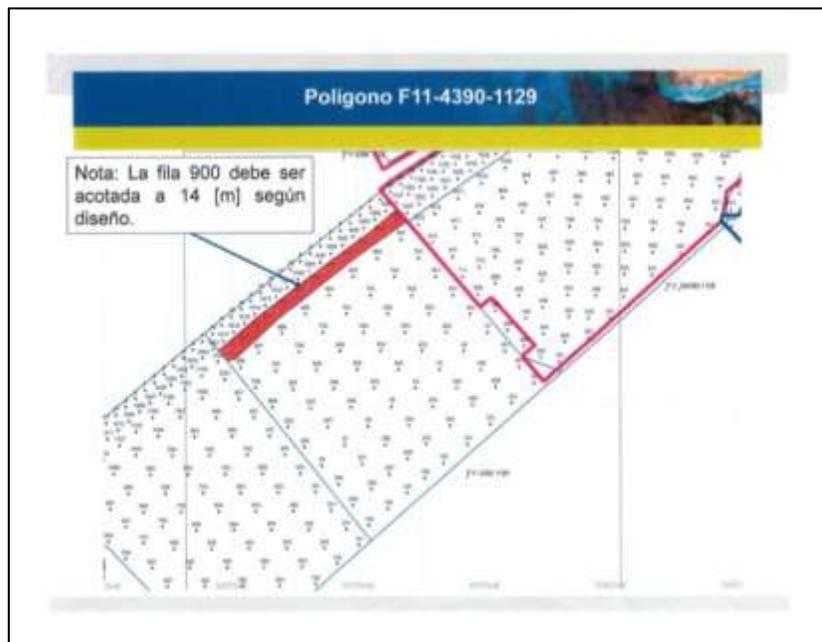
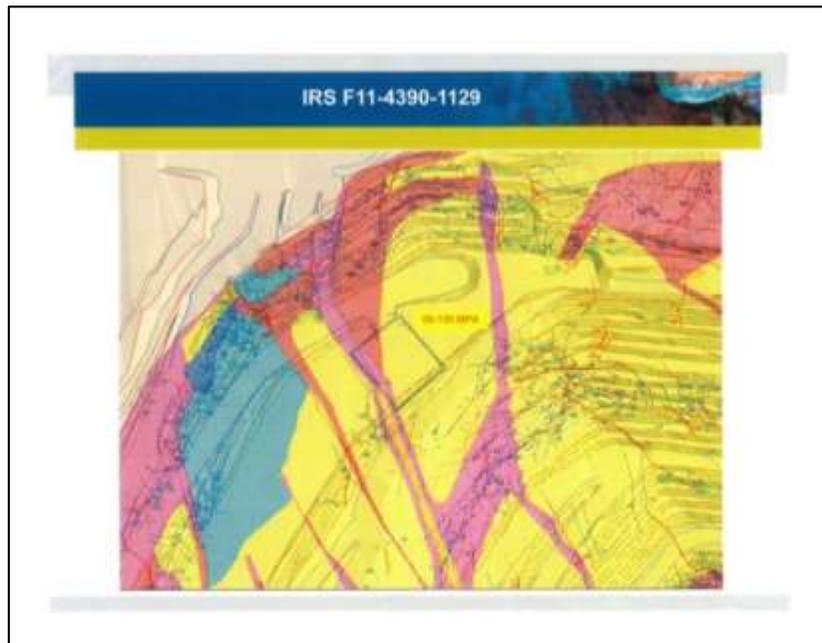
F11-4390-1129
28 Mayo 2018

VBI Ing. P&T

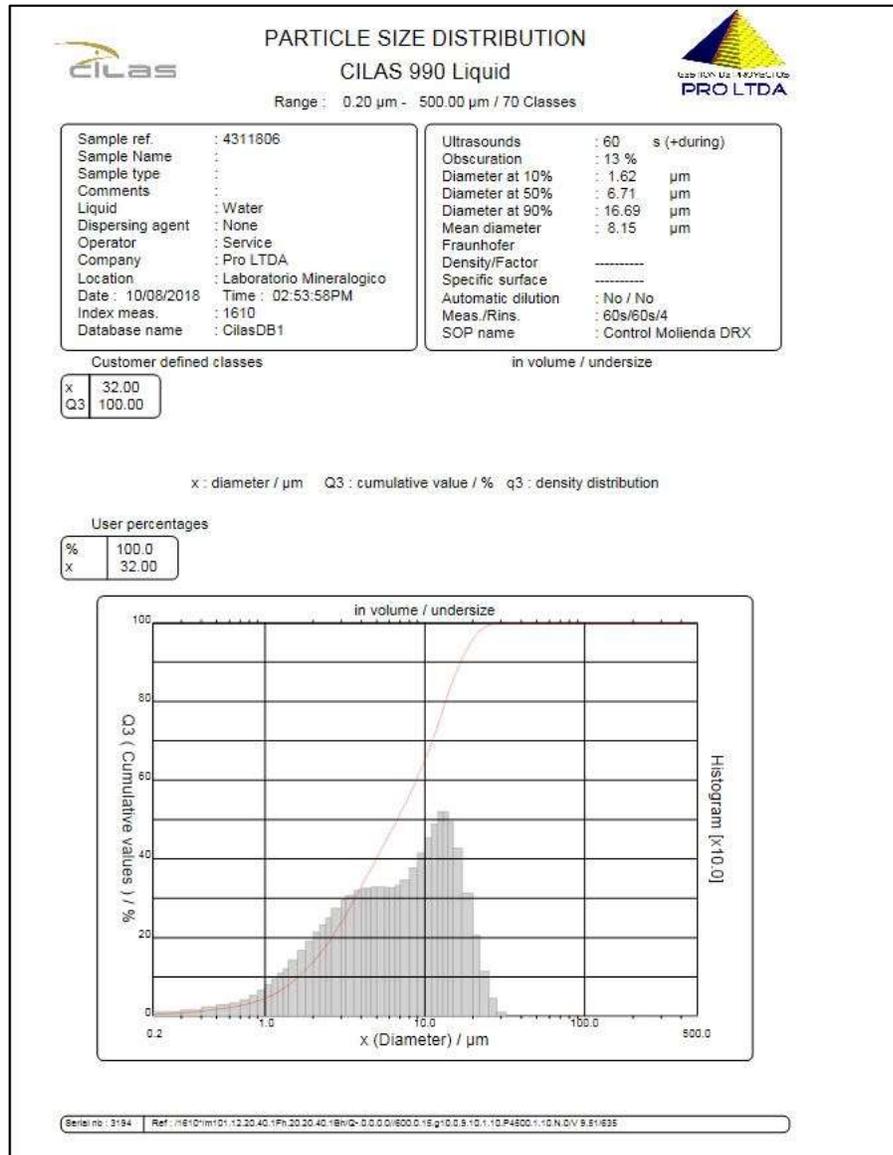
Ingeniero de Diseño Erosion

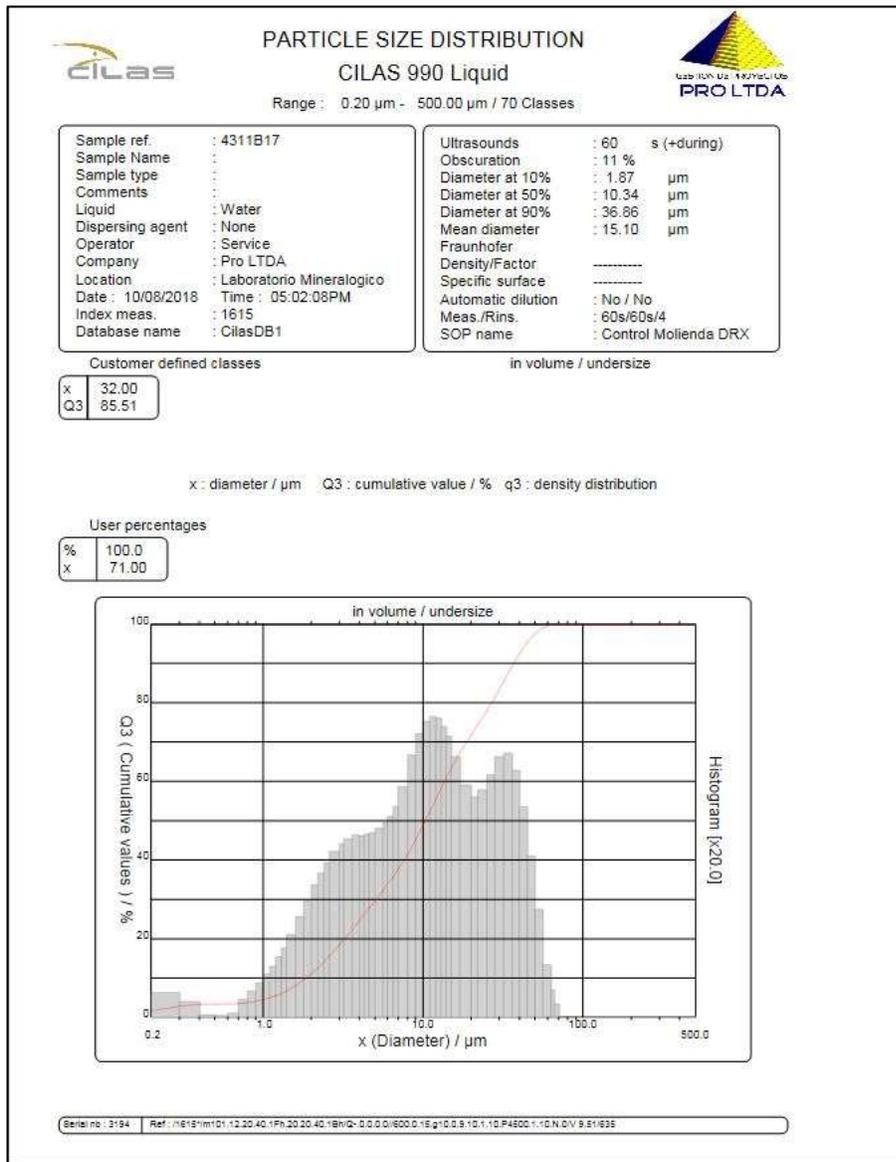
Supervisor de Tronadura Erosion



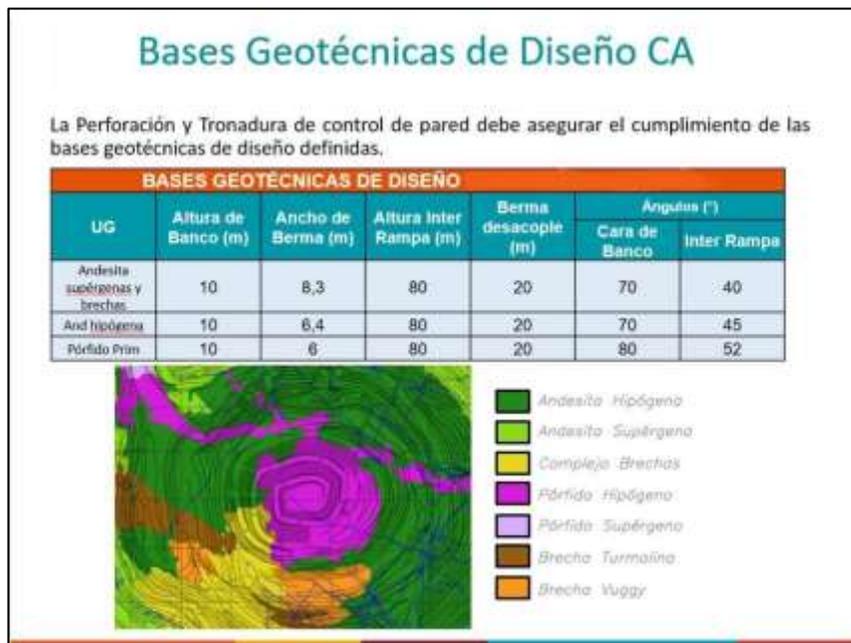


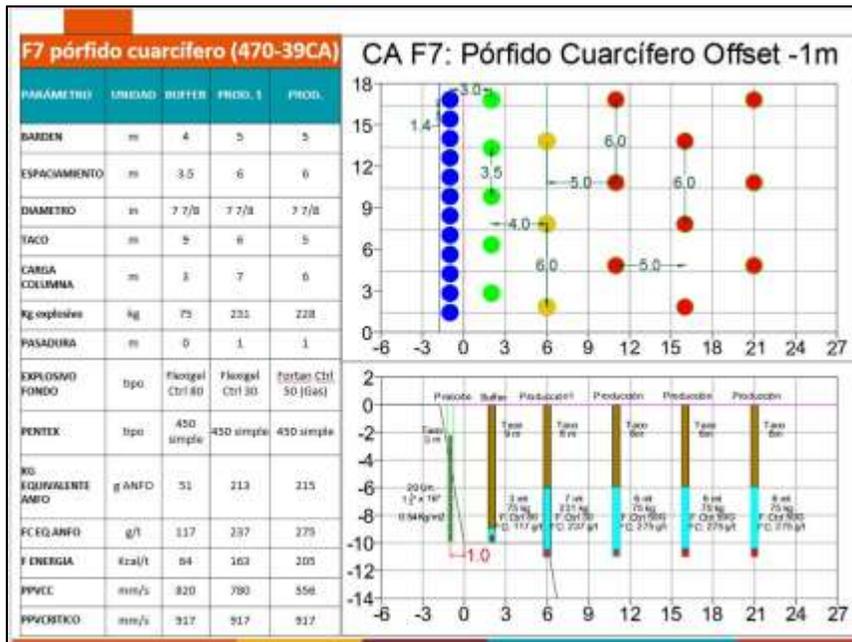
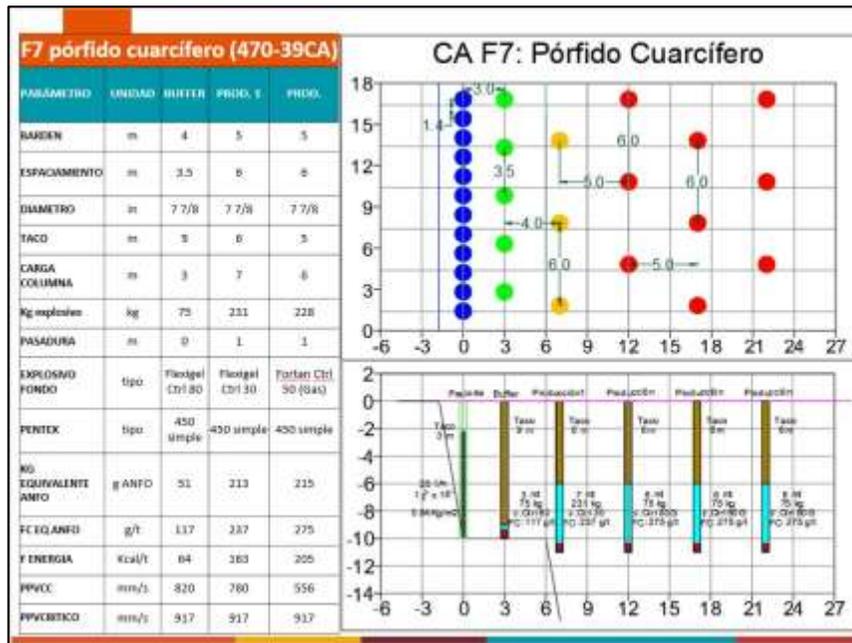
ANEXO III. Medición de Partículas Yacimiento Primera Región

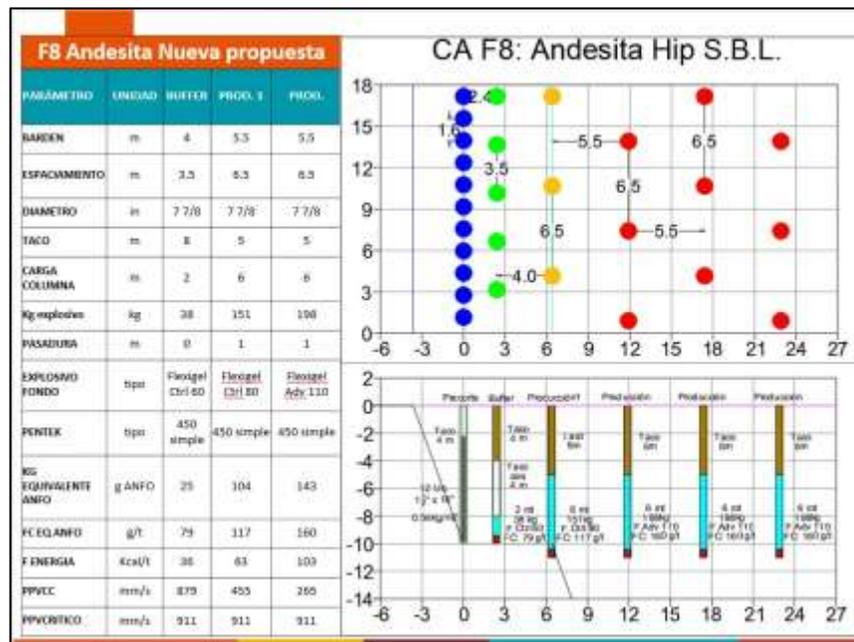
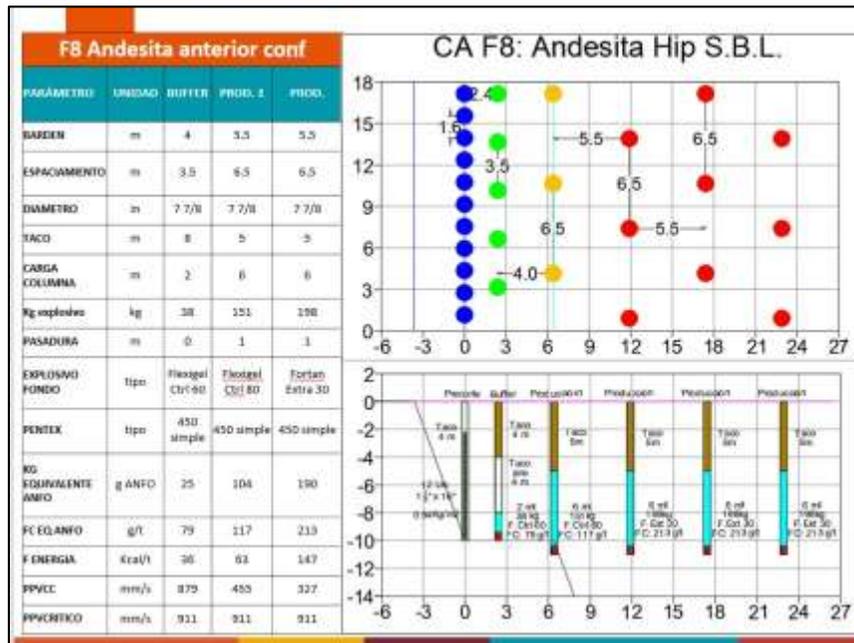


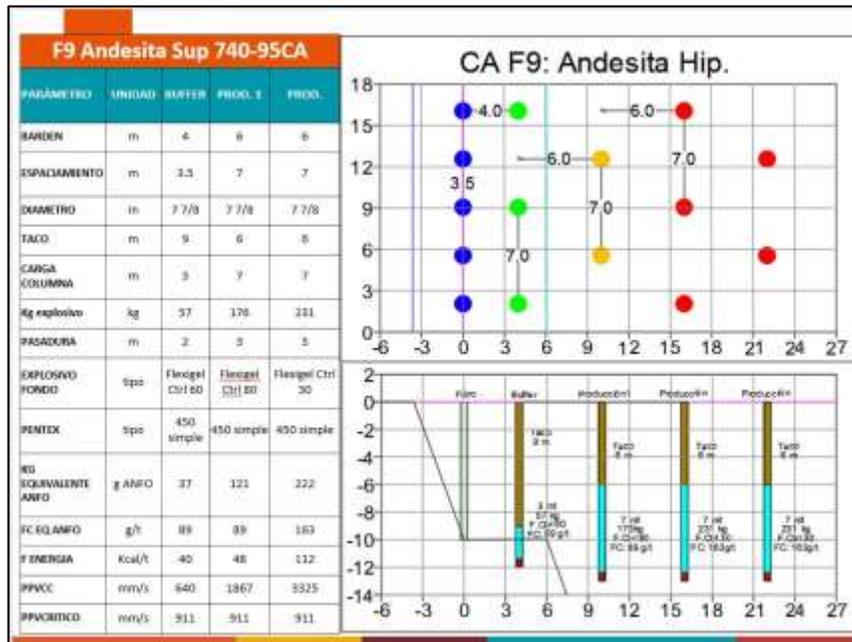
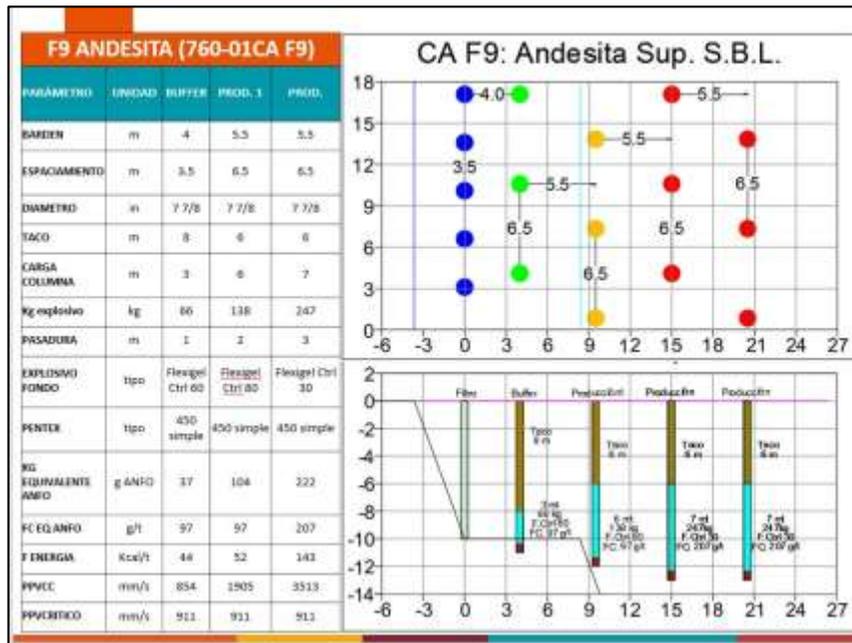


ANEXO IV. Protocolos de tronadura Yacimiento Tercera Región



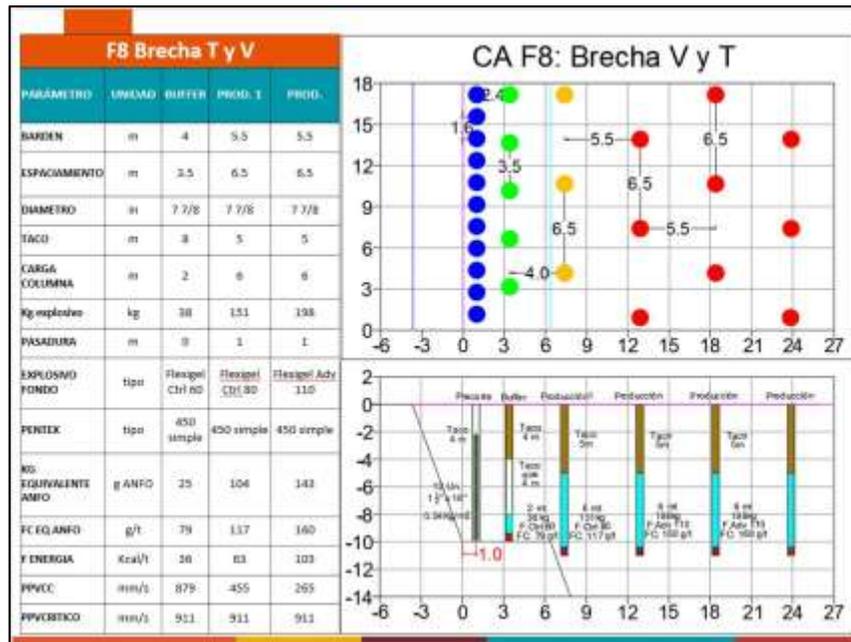
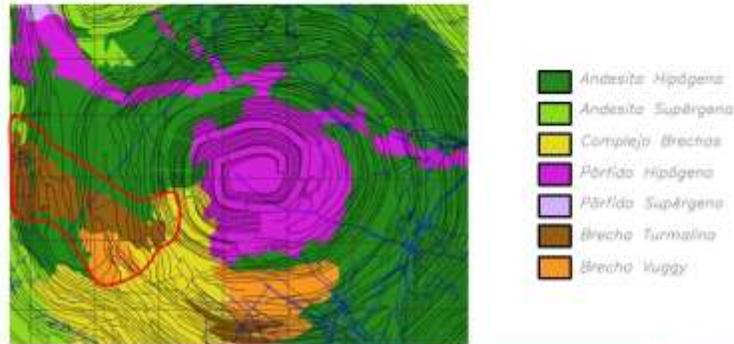






Tronadura para Brecha Turmalina y Vuggy

A pesar del cumplimiento de la línea de programa en las tronaduras realizadas en el sector de Brecha Turmalina Y Vuggy, el índice de calidad de talud producido no es aceptable, por tanto se recomienda desplazar el diseño presente en 1 [m], alejándolo del talud.



ANEXO V. Tabla información pozos de tronadura según Protocolos de Carga

Tabla informacion pozosde tronadura según Protocolos de Carga.													
Identificación del Pozo	Barden(m)	Espaciamiento (m)	Taco(m)	Altura del Banco(m)	Ø Perforacion (pulg)	Ø Perforacion (mm)	Pasadura(m)	Altura del barreno(m)	Densidad Roca(gr/cm ³)	Nombre Explosivo	Tipo Explosivo	Densidad Explosivo(gr/cm ³)	Factor de Carga (gr/ton)
4310404	8	8	8	15	12 ^{3/4}	311	1	16	2,5	Pirex P-70	Anfo pesado bombeable	1,32	335
MCA_6	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_3	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_14	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_7	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_2	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Fortan Extra 30	Anfo pesado bombeable	1,1	213
MCA_5	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_13	5	6	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Fortan Ctrl 50(gas)	Emulsión a granel de ANFO pesado	1,25	275
MCA_11	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Fortan Extra 30	Anfo pesado bombeable	1,1	213
MCA_12	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_1	5,5	6,5	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Flexigel Adv 110	Emulsion	1,1	160
MCA_9	5,5	6,5	6	10	7 ^{7/8}	200	3	13	Sin Informacion	Fortan Extra 30	Anfo pesado bombeable	1,1	207
4311806	10	12	7,5	15	12 ^{3/4}	311	1,5	16,5	2,5	Pirex P-50	Anfo pesado bombeable	1,3	198
MCA_16	5	6	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Fortan Ctrl 50(gas)	Emulsión a granel de ANFO pesado	1,25	275
MCA_10	5	6	5	10	7 ^{7/8}	200	1	11	Sin Informacion	Fortan Ctrl 50(gas)	Emulsión a granel de ANFO pesado	1,25	275
MCA_4	6	7	6	10	7 ^{7/8}	200	3	13	Sin Informacion	Fortan Extra 30	Anfo pesado bombeable	1,1	163
4310406	8	8	8	15	12 ^{3/4}	311	1	16	2,5	Pirex P-70	Anfo pesado bombeable	1,32	335
4311B17	5	5	6	15	7 ^{7/8}	200	0	15	2,5	Pirex P-50	Anfo pesado bombeable	1,3	109

ANEXO VI. Protocolos de tronadura Yacimiento Segunda Región

N° Foto : 52382

SOLICITUD DE EXPLOSIVOS

Mediante el siguiente documento, se solicita entrega de los explosivos y accesorios con las siguientes coordenadas:

Origen: POLVORIN	Cliente:	Turno: A
Ubicación:		
Mina: BLOQUE NORTE	Sector: ESMERALDA	Casero: ESMERALDA CENTRAL
Método de explotación:		
Evento: AVANCE	Nivel: 1004	Labor: ACCESO 1004
Método: ACCESO		

Detalle Explosivos y Accesorios:

ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
- Arto Arma (Saco 25 KG)	120 kilos
- Tronzo Plus 1, 1/2" x 6"	100 Unidades
- Soños 1 1/4" x 20"	72 Unidades
- Cartas 6.2 ms	2 Unidades
- PENTACORD 3P 2x105MCL	40 Minus

Desarrollo:

ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
Explosivos 4,20 MS 1	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 2	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 3	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 4	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 5	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 6	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 7	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 8	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 9	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 10	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 11	1 Unidad
Explosivos 4,20 MS 12	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 3	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 4	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 5	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 6	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 7	2 Unidades
Explosivos 4,20 LP 8	2 Unidades
Explosivos 4,20 LP 9	1 Unidad
Explosivos 4,20 LP 10	2 Unidades
Explosivos 4,20 LP 11	2 Unidades
Explosivos 4,20 LP 12	8 Unidades
Explosivos 4,20 LP 13	8 Unidades
Explosivos 4,20 LP 14	4 Unidades
Explosivos 4,20 LP 15	2 Unidades

Fecha: Martes 28 de Agosto del 2018 a las 09:41 AM

Solicitado por: FERNANDO CORREA

Vale de consumo		52302				
Tipo Explosivo	Unidad	Cantidad (un)	Peso en Kgs	Conversión	kgs Anfo Equiv	
Amex	Kg	125	125	1	125	
Amex UH	Kg	0	0	0,94	0	
Amex LD	Kg	0	0	0,87	0	
Tronex 1 1/8 x 8	und	133	20	1,1	22	
Tronex 1 1/4 x 8	und	0	0	1,1	0	
Emultex CN 1 1/8 X 8	und	0	0	1,01	0	
Emultex CN 1 1/4 X 8	und	0	0	1,01	0	
Emultex CN 1 1/4 X 16	und	0	0	1,01	0	
APD-150	und	0	0	1,5	0	
Pentex 225	und	0	0	1,28	0	
Pentex 150	und	0	0	1,28	0	
Softron	und	72	10	1,13	11	
Senatel Trimex	und	0	0	0,9	0	
Enaline 1 1/4 x 8 mt	und	0	0	0,89	0	
Enaline 1 1/4 x 12 mt	und	0	0	0,89	0	
Famecorte 8 mts	und	0	0	0,87	0	
Senatel Magnum 1 1/8 x 8	und	0	0	1,25	0	
Senatel Magnum 1 1/4 x 8	und	0	0	1,25	0	
Senatel Pulsar 1 1/4 x 16	und	0	0	1,12	0	
Senatel Pulsar 1 1/4 x 8	und	0	0	1,12	0	
Emulsión Subtek Velcro	Kg	0	0	0,798	0	
Tronex 1 1/4 x 16	und	0	0	1,1	0	
Famecorte 12 mts	und	0	0	0,87	0	
Enaline 1 1/2 x 12	und	0	0	0,89	0	
Emultex 1 1/2 x 16	und	0	0	1,01	0	
					0	
			156	Kg eq Anfo	159	

N° Folio: 6268T

SOLICITUD DE EXPLOSIVOS

Mediante el siguiente documento, se solicita entrega de los explosivos y accesorios con las siguientes coordenadas:

Origen: POLVORIN	Cliente:	Torre: B
Ubicación:		
Mina: EL COQUE NORTE	Sector: AL ESTE	Caseros: AL ESTE SUR SUR 2
Método de explotación:		
Evento: AVANCE	Nivel: 1000	Labor: 1000 SUR 10
Método: DRIFT		
Sub Método: S/C		

Detalle Explosivos y Accesorios:

ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
Wells 30mm (Diam 25 Kg)	100 Unid
Proxim Plus 1, 100' x 9"	100 Unid
Balón 14"10" x 20"	50 Unid
Cables 6.3 mm	2 Unid
PENTACORD 1P 2X70M CL	40 Unid

Desarrollo:

ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
Exp 40mmx600 4.20 MS 1	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 2	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 3	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 4	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 5	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 6	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 7	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 8	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 9	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 10	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 11	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 MS 12	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 1	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 4	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 5	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 6	1 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 7	2 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 8	2 Unid
Exp 40mmx600 4.20 LP 9	2 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 10	2 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 11	2 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 12	4 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 13	4 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 14	4 Unid
Exp 40mmx600 4.20 OF 15	4 Unid

Fecha: Martes 4 de Septiembre del 2018 a las 23:17 PM

Solicitado por: JIMY WARD

Vale de consumo		52687					
Tipo Explosivo	Unidad	Cantidad (un)	Peso en Kgs	Conversión	Kgs Anfo Equiv		
Amex	Kg	125	125	1	125		
Amex UH	Kg	0	0	0,94	0		
Amex LD	Kg	0	0	0,87	0		
Tronex 1 1/8 x 8	und	130	20	1,1	22		
Tronex 1 1/4 x 8	und	0	0	1,1	0		
Emultex CN 1 1/8 X 8	und	0	0	1,01	0		
Emultex CN 1 1/4 X 8	und	0	0	1,01	0		
Emultex CN 1 1/4 X 16	und	0	0	1,01	0		
APD-150	und	0	0	1,5	0		
Pentex 225	und	0	0	1,28	0		
Pentex 150	und	0	0	1,28	0		
Softron	und	72	10	1,13	11		
Senatel Trimex	und	0	0	0,9	0		
Enaline 1 1/4 x 8 mt	und	0	0	0,89	0		
Enaline 1 1/4 x 12 mt	und	0	0	0,89	0		
Famecorte 8 mts	und	0	0	0,87	0		
Senatel Magnum 1 1/8 x 8	und	0	0	1,25	0		
Senatel Magnum 1 1/4 x 8	und	0	0	1,25	0		
Senatel Pulsar 1 1/4 x 16	und	0	0	1,12	0		
Senatel Pulsar 1 1/4 x 8	und	0	0	1,12	0		
Emulsión Subtek Velcro	Kg	0	0	0,798	0		
Tronex 1 1/4 x 16	und	0	0	1,1	0		
Famecorte 12 mts	und	0	0	0,87	0		
Enaline 1 1/2 x 12	und	0	0	0,89	0		
Emultex 1 1/2 x 16	und	0	0	1,01	0		
					0		
			155	Kg eq Anfo	158		

N° Folio : 64478

SOLICITUD DE EXPLOSIVOS

Mediante el siguiente documento, se solicita entrega de los explosivos y accesorios con las siguientes coordenadas:

Origen: POLVORIN	Cliente:	Turno: A
Ubicación:		
Mina: SLOQUE NORTE	Sector: BOMANZA	Caseros: ABUNDANCIA OESTE
Método de explotación:		
Evento: PRODUCCION	Nivel: 1650	Labor: UC 1732/1732 SUR
Método: BENCH (UC)	Cámara: ZE	Veta: C1
	Parada: Desde 41 Hasta 45	

Detalle Explosivos y Accesorios:

ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
APD 150 Puntos	10 Unidad
APD 225 Puntos	10 Unidad
Soltón 11/18" 4 20"	60 Unidad
Cables 6,2 mts.	2 Unidad
PENTACORD 3P 2X75MM CL	18 Metros

Produccion:

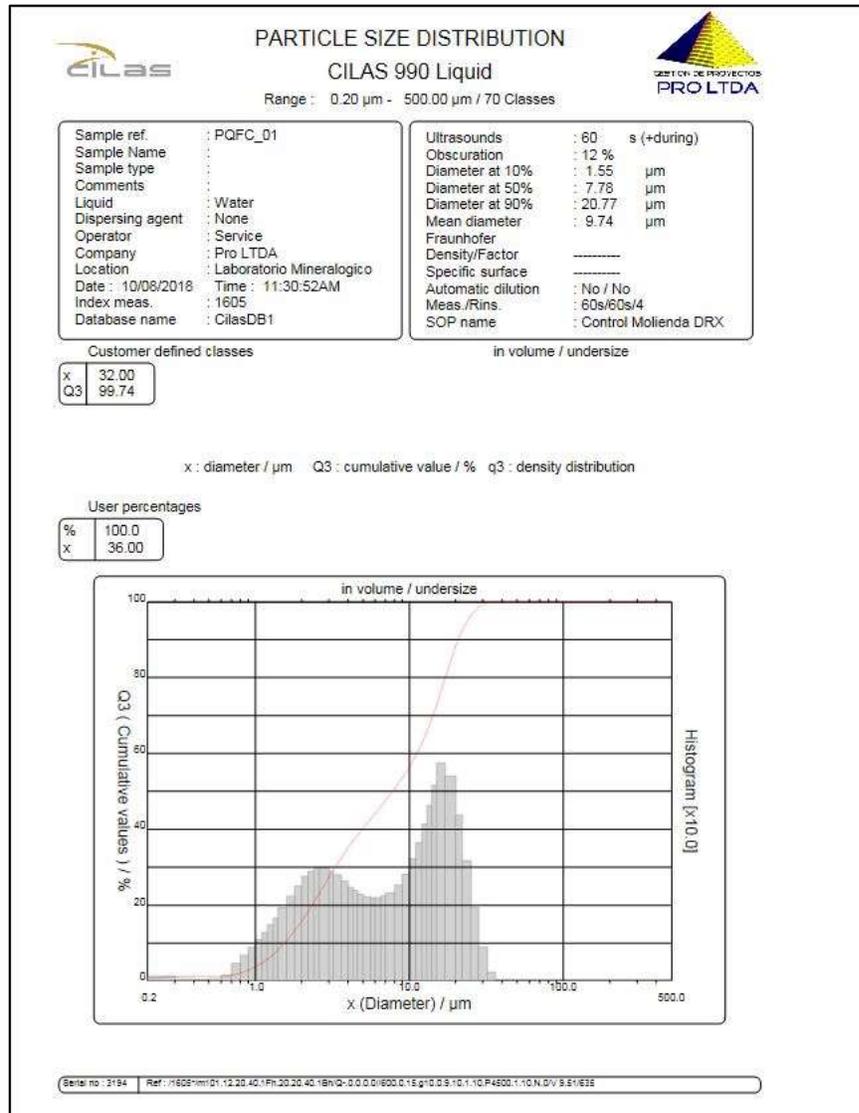
ARTICULO	CANTIDAD SOLICITADA
Exp-detonadores 12,2 Mts 01	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 11	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 12	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 13	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 14	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 15	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 16	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 17	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 18	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 19	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 20	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 21	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 22	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 23	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 24	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 25	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 26	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 27	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 28	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 29	1 Unidad
Exp-detonadores 12,2 Mts 30	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 01	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 11	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 12	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 13	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 14	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 15	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 16	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 17	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 18	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 19	1 Unidad
Exp-detonadores 15,0 Mts 20	1 Unidad

Fecha: Miércoles 10 de Octubre del 2018 a las 10:24 AM

Solicitado por : PABLO ZUÑIGA

Vale de consumo		64478	Sector Abundancia				
Tipo Explosivo	Unidad	Cantidad (un)	Peso en Kgs	Conversión	Kgs Anfo Equiv		
Amex	Kg	0	0	1	0		
Amex UH	Kg	0	0	0,94	0		
Amex LD	Kg	0	0	0,87	0		
Tronex 1 1/8 x 8	und	0	0	1,1	0		
Tronex 1 1/4 x 8	und	0	0	1,1	0		
Emultex CN 1 1/8 X 8	und	0	0	1,01	0		
Emultex CN 1 1/4 X 8	und	0	0	1,01	0		
Emultex CN 1 1/4 X 16	und	0	0	1,01	0		
APD-150	und	0	0	1,5	0		
Pentex 225	und	10	2	1,28	3		
Pentex 150	und	10	2	1,28	2		
Softron	und	90	13	1,13	14		
Senatel Trimex	und	0	0	0,9	0		
Enaline 1 1/4 x 8 mt	und	0	0	0,89	0		
Enaline 1 1/4 x 12 mt	und	0	0	0,89	0		
Famecorte 8 mts	und	0	0	0,87	0		
Senatel Magnum 1 1/8 x 8	und	0	0	1,25	0		
Senatel Magnum 1 1/4 x 8	und	0	0	1,25	0		
Senatel Pulsar 1 1/4 x 16	und	0	0	1,12	0		
Senatel Pulsar 1 1/4 x 8	und	0	0	1,12	0		
Emulsión Subtek Velcro	Kg	188	188	0,798	150		
Tronex 1 1/4 x 16	und	0	0	1,1	0		
Famecorte 12 mts	und	0	0	0,87	0		
Enaline 1 1/2 x 12	und	0	0	0,89	0		
Emultex 1 1/2 x 16	und	0	0	1,01	0		
					0		
			204	Kg eq Anfo	169		

ANEXO VII. Medición de Partículas Yacimiento Segunda Región



ANEXO VIII. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Primera Región

Ficha Técnica
Productos/Graneles
V0117

Enaex

Pirex®

Agente de voladura de alta calidad

DESCRIPCIÓN

Agente de voladura de alta calidad diseñado especialmente para rocas minerales que contienen un alto grado de Pirita. Pirex® es un producto bombeable y se carga con camiones especialmente diseñados.

Su principal característica es aumentar la seguridad en la operación, ante posible autodetonaciones por la reacción entre el anto y la roca reactiva.

USOS

El uso principal de Pirex® es en subos piríticos. Enaex ha desarrollado esta tecnología para retardar la reacción anto/pirita en minería a cielo abierto, y así aumentar la seguridad en la mina.

INFORMACIÓN DE TRANSPORTE

Agente de Voladura
Clase 1, División 1.5 D
N°NU: 031 - Grupo III
HDS-EMG-01



FABRICACIÓN

- In situ.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Propiedad	Pirex P-20	Pirex P-30	Pirex P-40	Pirex P-45	Pirex P-50	Pirex P-70
Densidad* (g/cc)	0,86±5%	1,00±5%	1,20±5%	1,30±5%	1,30±5%	1,32±4%
VOD Típico (m/s)	3.756	3.943	4.018	4.008	4.101	3.161
VOD Mínimo (m/s)	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Presión de detonación (Rbar)	31	39	48	52	55	33
Energía (KJ/Kg)	3.699	3.486	3.377	3.319	3.264	3.207,12
Volumen de gases (L/Kg)	1.067	1.076	1.084	1.089	1.094	951,30
Diámetro Mínimo (pulg)	5	5	5	5	5	5
Potencia relativa al Anto						
Peso	0,95	0,93	0,91	0,90	0,89	0,82
Volumen	1,14	1,30	1,56	1,69	1,69	1,71
Resistencia al agua	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	Buena
Proporción Emulsión / Anto	20/80	30/70	40/60	45/55	50/50	70/30

PRESENTACIÓN

Producto especialmente formulado para retardar la reacción de rocas reactivas con el explosivo. La principal característica de Pirex® es aumentar la seguridad en la operación.

ADVERTENCIA

Enaex Servicios S.A. sólo es responsable por lo expresamente indicado en este documento, y no será en ningún caso responsable por daños, pérdidas o cualquier contingencia derivada del uso de los productos, salvo aquellos expresamente indicados por la legislación Chilena vigente. El uso de explosivos está regulado en cada país por leyes propias. Enaex Servicios S.A. se reserva el derecho de modificar sus productos, sin aviso previo.

Variedades de APD®

APD's Varieties

Cilíndricos

Carga explosiva de alta potencia y gran seguridad destinada a la iniciación de agente de voladura. El iniciador cilíndrico APD® (Alto Poder Detonante) es el más eficiente iniciador de agentes de voladura que se fabrica y es especialmente recomendable para diámetros medianos y grandes.

Tronco Cónico

Corresponde a una carga explosiva con forma de cono truncado de alta potencia.

Especialmente diseñado para aprovechar al máximo su energía disponible en la iniciación de agentes de voladura.

Recomendado para sectores de mineral en que se requiere una mayor fragmentación y en los diseños de perforación con menos pasadura.

Minibooster® y Miniblaster®

Los iniciadores Minibooster® y Miniblaster® son una variedad especial de APD® Booster de bajo gramaje, especialmente diseñados para el uso de detonadores de tipo no eléctrico y facilitar la operación de primado en minería subterránea y desarrollo de túneles. En algunos casos puede ser introducido con la misma manguera de carguo de Anfo o Emulsión.

UP-HOLE

Los iniciadores UP-HOLE son una variedad especial de APD® específicamente diseñados para tiros largos ascendentes, de zanjas o embudos en operaciones de caserones o hundimiento en minas subterráneas, para facilitar la operación de primado. Puede ser aplicado con la misma manguera de carguo de Anfo o Emulsión.

APD Up One

Carga explosiva de Pentolita de Alta Potencia, especialmente diseñada para minería subterránea para ser utilizada en tiros ascendentes, en zonas de hundimiento, zanjas o embudos. Este APD facilita la operación del primado y su colocación puede ser hecha con la misma manguera de carguo de anfo o emulsión.

Safelock®

Accesorio de seguridad que evita el desalojamiento del detonador desde el APD, durante el primado o carguo de explosivos en el pozo.

Cylindrical

High-power and highly safe explosive charge for blasting agent initiation. The Cylindrical initiator APD® is the most efficient blasting agent initiator manufactured, and it is particularly recommendable for medium and large diameters.

Truncated Cone

It is a high power explosive charge with truncated-cone shape. It is specially designed to make the most of its available energy in the blasting agents' initiation. It is recommended for ore areas where more fragmentation is required, and in drilling design with less subdrilling.

Minibooster®, Miniblaster®

The Minibooster® and Miniblaster® initiators are a special variety of small-capacity boosters, particularly designed for the use of non-electric detonators and to facilitate the priming operations in underground mining and tunnel opening. In some cases, it can be introduced with the Anfo or Emulsion loading hose.

UP-HOLE

The UP-HOLE initiators are a special APD® variety, designed for long ring holes in drawbells or undercut in a caving or open stopes operations, to make easy the priming operations. It can be introduced with the Anfo or Emulsion loading hose.

APD Up One

High power Pentolite explosive charge, specially designed for underground mining to be used in ring holes in a drawbell or undercut, in caving or open stopes methods. This APD facilitates the priming operation and it can be introduced with the Anfo or Emulsion loading hose.

Safelock®

It is a security accessory that locks the detonator in the APD, avoiding its decoupling and making the priming operation more safer.



4 | Iniciadores APD Booster

Características Técnicas

Technical Characteristics



Densidad Density	1,62 ± 3% g/cc
Velocidad de detonación* Velocity of detonation*	7.200 ± 3% m/s
Presión de detonación Detonation pressure	216 Kbar
Energía Energy	5.598 KJ/KG
Resistencia al agua Water resistance	Excelente - Excellent
Volumen de gases Gas volume	692 l/KG
Potencia relativa al ANFO Relative strength (ANFO)	1,50 Peso - Weight 3,12 Volumen - Volume

*Medido en probeta de 1 1/8" x 16"
*Measured in 1 1/8" x 16" test tube

Descripción de Embarque de Materiales Peligrosos

Hazardous Materials Shipping Description

Información de Transporte

Alto Explosivo
Class 1, División 1.1 D
ONU N° 0042



Transport Information

High Explosive
Class 1, Division 1.1 D
UN: 0042



ANEXO IX. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Tercera Región

Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Sistema Fortan™ Control

Descripción

El Sistema de emulsión a granel de ANFO pesado Fortan™ Control está específicamente diseñado para aplicaciones presentes en minería a cielo abierto. Fortan™ Control utiliza un sensibilizador sólido para mejorar su desempeño.

Aplicación

Fortan™ Control está diseñado para aumentar la energía explosiva en barrenos secos, sin embargo, la mezcla de emulsión de más alta densidad, Fortan™ Control 50, pueden ser usada en voladuras de barrenos desaguados. No se aconseja para terrenos que presentan sulfuro reactivo. Fortan™ Control es usado en aplicaciones donde se requiere un grado de fragmentación mejorada.

Beneficios claves

- Fortan™ Control es confiable en barrenos secos y desaguados.
- Fortan™ Control asegura una densidad uniforme a lo largo de la columna explosiva, proporcionando un desempeño mejorado en la parte superior de la columna.
- Fortan™ Control es un producto con densidad fija, lo que permite que el producto sea cargado de manera confiable a una determinada altura de columna.
- Al ser sensibilizado con un regulador sólido, Fortan™ Control asegura un óptimo control de la longitud de carga y la longitud del taco.
- La operación de taqueo podrá efectuarse inmediatamente luego de ser cargado Fortan™ Control en el barreno, incrementando la productividad en el banco.
- Fortan™ Control maximizan la fragmentación, generación de finos y desplazamiento de las pilas del material volado, para mejorar la productividad mina a mina.
- El producto integrado y los sistemas de entrega de los sistemas a granel Fortan™ Control aseguran exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- La alta fuerza en volumen de Fortan™ Control permite la expansión de los patrones de voladura, mejorando la disponibilidad de perforación y reduciendo sus costos.
- La tasa de producción de Fortan™ Control, por sobre los 500kg/min, permite entrega alta productividad en el banco.

Recomendaciones para su uso

Longitud de carga de barreno

Fortan™ Control es apropiado para uso en barrenos de hasta 40 metros en longitud, dependiendo del diámetro del barreno, inclinación y presencia de agua. Por favor póngase en contacto con un representante del servicio técnico de Orica para mayor información.

Propiedades Técnicas

	Fortan™ Control 50
Densidad (g/cm ³) ¹⁾	1,25
Diámetro mínimo barrenos (mm)	127
Profundidad máxima barrenos (m)	40
Máxima longitud de carga (m)	35
Tipo de barrenos	Secos/Desaguados
Sistema de cargado	Vaciado
Tipo de iniciador Pentax TM recomendado para el mínimo diámetro	Pentax™ 450g
VOD típico (km/s) ²⁾	3.2 - 6.4
Energía Relativa Efectiva (REE) ³⁾	
Fuerza Relativa en peso	115
Fuerza Relativa en volumen	165
Emisión CO ₂ (kg/ton) ⁴⁾	167
Tiempo de espera ⁵⁾	7 días

Primado e Iniciación

Fortan™ Control debe ser iniciado usando un iniciador Pentax™ de 450g junto con un detonador Exel™. No se recomienda el uso de cordón detonante con Fortan™.

Carguo

El Sistema a granel Fortan™ Control es parte de un rango de productos a granel entregado por las unidades fabricas de Orica (MMU™). Fortan™ Control es producido en los MMU™ y vaciado dentro de los barrenos a pedido.

Tiempo de espera en el barreno de voladura

El tiempo máximo de espera recomendado es de 7 días. El tiempo de espera depende de factores tales como diámetro del barreno, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. El personal técnico de Orica Mining Services debe ser consultado si se presentan condiciones especiales en el terreno.

Temperatura del Terreno

Este producto está disponible para uso en terrenos de temperatura entre 0° a un máximo de 55°C. Si usted requiere aplicaciones en terrenos fuera de este rango, por favor contacte a representante Local Orica.



Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Sistema Flexigel™ Advantage

Descripción

El sistema Flexigel™ Advantage es parte de la familia de productos explosivos a granel de Orica. Este comprende productos diseñados para voladuras en barrenos secos, húmedos y desaguados, para aplicaciones en minería metálica a cielo abierto.

Aplicación

El rango de Flexigel™ Advantage proporciona la capacidad de adaptarse a las condiciones que el terreno requiere, para mejorar el desempeño del explosivo. Flexigel™ Advantage es usado solo o en conjunto con productos Fortis o Fortan de Orica, para mejorar los resultados de las voladuras a través de una mejor distribución de energía a lo largo de toda la columna explosiva.

Beneficios claves

- Flexigel™ Advantage se puede utilizar en barrenos secos, con agua o desaguados.
- Flexigel™ Advantage puede proporcionar una reducción de los costos en algunas aplicaciones.
- Todos los productos del sistema Flexigel™ Advantage pueden ser bombeados permitiendo un carguo eficiente dentro de los barrenos de diámetros pequeños.
- Existen mejoras en la seguridad con el uso de Flexigel™ Advantage.
- Flexigel™ Advantage tiene la capacidad de variar su densidad en el barreno con un solo paso de carga.
- La energía de Flexigel™ Advantage puede ser ajustada a las condiciones que el terreno requiere.

Recomendaciones para su uso**Largo de Barreno**

Flexigel™ Advantage es adecuado para ser usado en barrenos de hasta 60 metros de longitud; dependiendo del diámetro del barreno, la densidad del producto y la presencia de agua. Por favor póngase en contacto con un representante del servicio técnico de Orica para mayor información.

Cebado e Iniciación

Flexigel™ Advantage puede ser iniciado confiablemente utilizando un iniciador Pentex™ de 450g en conjunto con un detonador Exel™. No es recomendado el uso de cordón detonante con Flexigel™ Advantage

Diámetro de barreno

El diámetro mínimo recomendado para el barreno depende de la densidad seleccionada. Por favor consulte al personal del servicio técnico de Orica para mayor información.

Propiedades Técnicas

Producto	Flexigel Advantage		
	90	100	110
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.90	1.00	1.10
Diámetro mínimo barrenos (mm)	100	150	150
Máxima longitud barrenos (m)	75	70	40
Máxima longitud de carga (m) (Vacuada)	60	35	20
Máxima longitud de carga (m) (Bombeada)	60	35	20
Tipo de Barrenos	barrenos secos y desaguados		Secos, desaguados y con agua
Sistema de cargado	Vacuado/ Bombeo		
Booster Pentex™ recomendado para diámetro mínimo del barreno	Iniciador Pentex 450g		
VOD típico (m/s) ⁽²⁾	3.2 – 4.2	3.5 – 4.5	3.8 – 4.8
Energía Relativa Electiva (REE)⁽³⁾			
Fuerza Relativa en peso	80	87	93
Fuerza Relativa en volumen	91	109	128
CO ₂ (kg/t) ⁽⁴⁾	144	130	121
Tiempo de Espera ⁽⁵⁾	7 días		

Carguo

Flexigel™ Advantage es parte de un rango de explosivos a granel elaborado en Unidades Móviles Fabrica (MMU) de Orica. Flexigel™ Advantage es fabricado en MMU y bombeado dentro del barreno según lo requerido.

Tiempo de espera en el barreno de voladura

El tiempo máximo de espera recomendado es de 7 días. El tiempo de espera dependerá de factores tales como diámetro del barreno, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. El personal técnico de Orica Mining Services debe ser consultado si se presentan condiciones especiales en el terreno.


www.oricaminingservices.com
www.oricaminingservices.com

Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Sistema Flexigel™ Advantage

Temperatura del Terreno

Este producto está disponible para ser usado en terrenos con una temperatura máxima de 55°C. Si usted requiere aplicaciones en terrenos fuera de este rango, por favor contacte a un representante del servicio técnico de Orica Mining Services.

Densidad media en el barreno

Para un correcto ajuste del producto Flexigel™ Advantage, en su aplicación de voladura, la siguiente tabla puede ser usada como una guía para determinar la densidad promedio alcanzada en el barreno, para una longitud de carga dada.

Seleccione su longitud de carga y la densidad que más se acerca a la que usted desea como densidad media en el barreno y determine el producto Flexigel™ Advantage apropiado para cubrir sus necesidades.

Tabla 1: Flexigel Advantage Densidad media en el pozo

Longitud de carga (m)	Flexigel Advantage 90	Flexigel Advantage 100	Flexigel Advantage 110
5	0.90	1.00	1.10
10	0.91	1.02	1.11
15	0.93	1.04	1.13
20	0.95	1.06	1.15
25	0.98	1.09	1.18
30	1.01	1.13	1.22
35	1.04	1.17	1.26
40	1.08	1.22	1.31
45	1.12	1.27	1.36
50	1.16	1.32	1.41
55	1.20	1.37	1.46
60	1.24	1.42	1.51
65	1.28	1.47	1.56
70	1.32	1.52	1.61
75	1.36	1.57	1.66
80	1.40	1.62	1.71
85	1.44	1.67	1.76
90	1.48	1.72	1.81
95	1.52	1.77	1.86
100	1.56	1.82	1.91
105	1.60	1.87	1.96
110	1.64	1.92	2.01
115	1.68	1.97	2.06
120	1.72	2.02	2.11
125	1.76	2.07	2.16
130	1.80	2.12	2.21
135	1.84	2.17	2.26
140	1.88	2.22	2.31
145	1.92	2.27	2.36
150	1.96	2.32	2.41
155	2.00	2.37	2.46
160	2.04	2.42	2.51
165	2.08	2.47	2.56
170	2.12	2.52	2.61
175	2.16	2.57	2.66
180	2.20	2.62	2.71
185	2.24	2.67	2.76
190	2.28	2.72	2.81
195	2.32	2.77	2.86
200	2.36	2.82	2.91
205	2.40	2.87	2.96
210	2.44	2.92	3.01
215	2.48	2.97	3.06
220	2.52	3.02	3.11
225	2.56	3.07	3.16
230	2.60	3.12	3.21
235	2.64	3.17	3.26
240	2.68	3.22	3.31
245	2.72	3.27	3.36
250	2.76	3.32	3.41
255	2.80	3.37	3.46
260	2.84	3.42	3.51
265	2.88	3.47	3.56
270	2.92	3.52	3.61
275	2.96	3.57	3.66
280	3.00	3.62	3.71
285	3.04	3.67	3.76
290	3.08	3.72	3.81
295	3.12	3.77	3.86
300	3.16	3.82	3.91
305	3.20	3.87	3.96
310	3.24	3.92	4.01
315	3.28	3.97	4.06
320	3.32	4.02	4.11
325	3.36	4.07	4.16
330	3.40	4.12	4.21
335	3.44	4.17	4.26
340	3.48	4.22	4.31
345	3.52	4.27	4.36
350	3.56	4.32	4.41
355	3.60	4.37	4.46
360	3.64	4.42	4.51
365	3.68	4.47	4.56
370	3.72	4.52	4.61
375	3.76	4.57	4.66
380	3.80	4.62	4.71
385	3.84	4.67	4.76
390	3.88	4.72	4.81
395	3.92	4.77	4.86
400	3.96	4.82	4.91
405	4.00	4.87	4.96
410	4.04	4.92	5.01
415	4.08	4.97	5.06
420	4.12	5.02	5.11
425	4.16	5.07	5.16
430	4.20	5.12	5.21
435	4.24	5.17	5.26
440	4.28	5.22	5.31
445	4.32	5.27	5.36
450	4.36	5.32	5.41
455	4.40	5.37	5.46
460	4.44	5.42	5.51
465	4.48	5.47	5.56
470	4.52	5.52	5.61
475	4.56	5.57	5.66
480	4.60	5.62	5.71
485	4.64	5.67	5.76
490	4.68	5.72	5.81
495	4.72	5.77	5.86
500	4.76	5.82	5.91
505	4.80	5.87	5.96
510	4.84	5.92	6.01
515	4.88	5.97	6.06
520	4.92	6.02	6.11
525	4.96	6.07	6.16
530	5.00	6.12	6.21
535	5.04	6.17	6.26
540	5.08	6.22	6.31
545	5.12	6.27	6.36
550	5.16	6.32	6.41
555	5.20	6.37	6.46
560	5.24	6.42	6.51
565	5.28	6.47	6.56
570	5.32	6.52	6.61
575	5.36	6.57	6.66
580	5.40	6.62	6.71
585	5.44	6.67	6.76
590	5.48	6.72	6.81
595	5.52	6.77	6.86
600	5.56	6.82	6.91
605	5.60	6.87	6.96
610	5.64	6.92	7.01
615	5.68	6.97	7.06
620	5.72	7.02	7.11
625	5.76	7.07	7.16
630	5.80	7.12	7.21
635	5.84	7.17	7.26
640	5.88	7.22	7.31
645	5.92	7.27	7.36
650	5.96	7.32	7.41
655	6.00	7.37	7.46
660	6.04	7.42	7.51
665	6.08	7.47	7.56
670	6.12	7.52	7.61
675	6.16	7.57	7.66
680	6.20	7.62	7.71
685	6.24	7.67	7.76
690	6.28	7.72	7.81
695	6.32	7.77	7.86
700	6.36	7.82	7.91
705	6.40	7.87	7.96
710	6.44	7.92	8.01
715	6.48	7.97	8.06
720	6.52	8.02	8.11
725	6.56	8.07	8.16
730	6.60	8.12	8.21
735	6.64	8.17	8.26
740	6.68	8.22	8.31
745	6.72	8.27	8.36
750	6.76	8.32	8.41
755	6.80	8.37	8.46
760	6.84	8.42	8.51
765	6.88	8.47	8.56
770	6.92	8.52	8.61
775	6.96	8.57	8.66
780	7.00	8.62	8.71
785	7.04	8.67	8.76
790	7.08	8.72	8.81
795	7.12	8.77	8.86
800	7.16	8.82	8.91
805	7.20	8.87	8.96
810	7.24	8.92	9.01
815	7.28	8.97	9.06
820	7.32	9.02	9.11
825	7.36	9.07	9.16
830	7.40	9.12	9.21
835	7.44	9.17	9.26
840	7.48	9.22	9.31
845	7.52	9.27	9.36
850	7.56	9.32	9.41
855	7.60	9.37	9.46
860	7.64	9.42	9.51
865	7.68	9.47	9.56
870	7.72	9.52	9.61
875	7.76	9.57	9.66
880	7.80	9.62	9.71
885	7.84	9.67	9.76
890	7.88	9.72	9.81
895	7.92	9.77	9.86
900	7.96	9.82	9.91
905	8.00	9.87	9.96
910	8.04	9.92	10.01
915	8.08	9.97	10.06
920	8.12	10.02	10.11
925	8.16	10.07	10.16
930	8.20	10.12	10.21
935	8.24	10.17	10.26
940	8.28	10.22	10.31
945	8.32	10.27	10.36
950	8.36	10.32	10.41
955	8.40	10.37	10.46
960	8.44	10.42	10.51
965	8.48	10.47	10.56
970	8.52	10.52	10.61
975	8.56	10.57	10.66
980	8.60	10.62	10.71
985	8.64	10.67	10.76
990	8.68	10.72	10.81
995	8.72	10.77	10.86
1000	8.76	10.82	10.91

Tabla 2: Flexigel Advantage: Compatibilidad del producto

	Para ser usado en pozos de 100mm o mayores.
	Para ser usado en pozos de 150mm o mayores.
	Para ser usado en pozos de 200mm o mayores.
	Para ser usado en pozos de 250mm o mayores.
	No cargar

Clasificación de explosivo

Nombre Autorizado: Series Flexigel™ Advantage
 Nombre para transporte: Explosivo, Voladura, Tipo E
 Nº NU: 0332
 Clasificación: 1.5D

Destrucción

La destrucción de materiales explosivos puede ser peligrosa. Los métodos para una segura destrucción de explosivos pueden variar dependiendo de la situación del usuario. Por favor contacte al representante local de Orica para más información acerca de prácticas seguras.

Seguridad

Flexigel™ Advantage es relativamente insensible a la iniciación accidental por fuerte impacto, fricción o impacto mecánico bajo condiciones de uso normal. Puede ocurrir detonación por un impacto fuerte o calor excesivo, particularmente bajo condiciones de confinamiento.

Los explosivos hechos a base de Nitrato de Amonio, tales como Flexigel™ Advantage, pueden reaccionar con materiales piríticos en el terreno y pueden crear situaciones potencialmente peligrosas. Orica no acepta responsabilidad alguna por pérdida o responsabilidad surgida por el uso del producto en terreno que contenga material pirítico o cualquier otro material reactivo.

Marcas registradas

La palabra, logotipo y marca Orica son marcas registradas del grupo de compañías Orica. El sistema a granel Flexigel™ Advantage es marca registrada de Orica Explosives Technology Pty Ltd ACN 075 659 353, 1 Nicholson Street, East Melbourne, Victoria, Australia.

Limitación de responsabilidades

La información contenida aquí está basada en experiencias, la cual se asume exacta y actualizada a la fecha de su preparación. Sin embargo, su aplicación y condiciones de uso no están dentro del control del fabricante y los usuarios deberían determinar la aplicabilidad de los productos y los métodos de uso de acuerdo a sus propósitos. Ni el fabricante o el vendedor otorgan garantía de ningún tipo, expresa o implícita, legal o de otro tipo, excepto que los productos descritos aquí cumplirán las especificaciones del fabricante y del vendedor. El fabricante y el vendedor expresamente excluyen cualquier otra garantía, INCLUYENDO, SIN LIMITACIONES, GARANTÍAS CONCERNIENTES A COMERCIABILIDAD O ADAPTABILIDAD PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR. Bajo ninguna circunstancia el fabricante o el vendedor serán responsables por daños indirectos, especiales, consecuenciales o accidentales, incluyendo, pero sin limitación, daño por lucro cesante, ganancias previstas o por oportunidades pérdida.



www.oricaminingservices.com

www.oricaminingservices.com

Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Sistema Flexigel™ Control

Descripción

El sistema *Flexigel™ Control* forma parte de la familia de productos explosivos a granel de Orica. La cual comprende productos diseñados para aplicaciones de voladuras con barrenos secos, con agua y desaguados, además de entregar el mayor rango de densidades de los explosivos a granel.

Aplicación

El rango de *Flexigel™ Control* permite ajustarse de mejor manera a las condiciones del terreno, para mejorar el desempeño del explosivo. *Flexigel™ Control* puede ser usado solo o en conjunto con los productos *Fortan™* y *Fortis™* de Orica, para mejorar los resultados de las voladuras a través de una mejor distribución de energía a lo largo de la columna explosiva. *Flexigel™ Control* puede ser usado en, según la experiencia de Orica, en voladuras para reducir las vibraciones asociadas con las operaciones de voladura en áreas de medio ambiente sensibles y para cuidado de paredes finales.

Beneficios claves

- *Flexigel™ Control* tiene la capacidad de reducir vibraciones de las operaciones de voladura.
- Capacidad para cargar productos de baja energía contra pared final en minas de cielo abierto, con *Flexigel™ Control* se mejora la estabilidad en el mediano y largo plazo.
- *Flexigel™ Control* es aplicable a barrenos de voladuras secos, húmedos y desaguados.
- La seguridad es mejorada con el uso de *Flexigel™ Control*.
- *Flexigel™ Control* tiene la capacidad de cambiar la densidad en un solo paso de carga.
- La energía de *Flexigel™ Control* puede ser adaptada a las condiciones del terreno.

Recomendaciones para su uso Largo del barreno

Flexigel™ Control es adecuado para ser usado en barrenos de hasta 75 metros de longitud; dependiendo del diámetro del barreno, la densidad del producto y la presencia de agua. Por favor póngase en contacto con un representante del servicio técnico de Orica para mayor información.

Diámetro de barreno

El diámetro mínimo de barreno recomendado depende de la densidad seleccionada. Por favor consulte al personal del servicio técnico de Orica para mayor información.



Propiedades Técnicas

Propiedades	Sistema <i>Flexigel™ Control</i>			
	50	60	70	80
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.50	0.60	0.70	0.80
Diámetro Mínimo del Barreno (mm)	200	200	150	150
Largo Máximo del Barreno (m)	80	80	80	80
Largo Máximo de Carga (m)	75	75	75	65
Tipo de Barreno	Solo Barrenos Secos			Secos y Desaguados
Sistema de Carguío	vaciado			vaciado/ Bombeable
Booster <i>Pentax™</i> recomendado para diámetro mínimo del barreno	<i>Pentax™</i> 450g			
VOD Típico (km/s) ⁽²⁾	2.0 – 3.0	2.2 – 3.2	2.5 – 3.5	2.8 – 3.8
Energía Relativa Efectiva (REE) ⁽³⁾				
Fuerza Relativa en peso	53	60	67	74
Fuerza Relativa en volumen	33	45	57	74
Salida de CO ₂ (kg/t) ⁽⁴⁾	170	168	168	163
Tiempo de Espera	7 días			

Primado e Iniciación

Flexigel™ Control puede ser iniciado confiablemente utilizando un booster *Pentax™* de 450g en conjunto con un detonador *Exel™*. No se recomienda el uso de cordón detonante con *Flexigel™ Control*.

Carguío

Flexigel™ Control es parte de un rango de explosivos a granel fabricados en Unidades Móviles Fabrica (MMU) de Orica. *Flexigel™ Control* es fabricado en una MMU y bombeado dentro del barreno a pedido.

Terrenos reactivos

Los explosivos basados en Nitrato de Amonio, tal como *Flexigel™ Control*, pueden reaccionar en el terreno con materiales piríticos y crear una situación potencial de riesgo. Orica no acepta responsabilidad por ninguna pérdida originada por el uso del producto en terrenos que contengan piritas u otro material reactivo.



www.oricaminingservices.com

Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Sistema Flexigel™ Control

Tiempo de espera en el barrenado de voladura

El tiempo máximo de espera recomendado es de 7 días. El tiempo de espera depende de factores tales como diámetro del barrenado, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. El personal técnico de Orica Mining Services debe ser consultado si se presentan condiciones especiales en el terreno.

Temperatura del Terreno

Este producto está disponible para uso en terrenos de temperatura entre 0° a un máximo de 55°C. Si usted requiere aplicaciones en terrenos fuera de este rango, por favor contacte al representante del servicio técnico de Orica.

Densidad media en el barrenado

Para un correcto ajuste del producto *Flexigel™ Control* en su aplicación de voladura, la siguiente tabla puede ser usada como una guía a fin de determinar la densidad promedio alcanzada en el barrenado, para una longitud de carga dada.

Seleccione su longitud de carga y la densidad que más se acerca a la que usted desea como densidad media en el barrenado y determine el producto *Flexigel™ Control* apropiado para cubrir sus necesidades.

Tabla 1: *Flexigel Control* densidad media en el pozo

Longitud Carga (m)	<i>Flexigel Control</i> 50	<i>Flexigel Control</i> 60	<i>Flexigel Control</i> 70	<i>Flexigel Control</i> 80
5	0.90	0.90	0.70	0.90
10	0.90	0.90	0.70	0.90
15	0.90	0.90	0.70	0.90
20	0.90	0.90	0.70	0.90
25	0.90	0.90	0.70	0.90
30	0.90	0.90	0.70	0.90
35	0.90	0.90	0.71	0.90
40	0.90	0.90	0.73	0.90
45	0.90	0.90	0.75	0.90
50	0.90	0.90	0.75	1.00
55	0.90	0.90	0.80	1.00
60	0.90	0.90	0.84	1.00
65	0.90	0.90	0.86	1.00
70	0.90	0.90	0.88	1.04
75	0.90	0.90	0.90	1.05

Tabla 2: *Flexigel Control*: Compatibilidad del Producto

	Para ser usado en pozos de 100mm mayores
	Para ser usado en pozos de 150mm mayores
	Para ser usado en pozos de 200mm mayores
	Para ser usado en pozos de 250mm mayores



Destrucción

La destrucción de materiales explosivos puede ser peligrosa. Los métodos para una segura destrucción de explosivos pueden variar dependiendo de la situación del usuario. Por favor contacte a un representante local de Orica para más información acerca de prácticas seguras.

Seguridad

El sistema de emulsiones explosivas a granel *Flexigel™ Control* es insensible a la iniciación accidental por fuerte impacto, fricción o impacto mecánico bajo condiciones de uso normal. Puede ocurrir detonación por un impacto fuerte o calor excesivo, particularmente bajo condiciones de confinamiento.

Los explosivos hechos a base de Nitrato de Amonio, tales como *Flexigel™ Control*, pueden reaccionar con materiales piríticos en el terreno y pueden crear situaciones potencialmente peligrosas. Orica no acepta responsabilidad alguna por pérdida o responsabilidad surgida por el uso del producto en terreno que contenga material pirítico o cualquier otro material reactivo.

Marcas registradas

La palabra, logotipo y marca Orica son marcas registradas del grupo de compañías Orica. El sistema a granel *Flexigel™ Advantage* es marca registrada de Orica Explosives Technology Pty Ltd ACN 075 659 353, 1 Nicholson Street, East Melbourne, Victoria, Australia.

Explosive Classification

Nombre Autorizado: *Serie Flexigel™ Control*
 Nombre para transporte: Explosivo, Voladura, Tipo E
 N° NU: 0332
 Clasificación: 1.5D

Marcas registradas

La palabra, logotipo y marca Orica son marcas registradas del grupo de compañías Orica. El sistema a granel *Flexigel™ Advantage* es marca registrada de Orica Explosives Technology Pty Ltd ACN 075 659 353, 1 Nicholson Street, East Melbourne, Victoria, Australia.



www.oricamining.com

Fortan™ Extra 30 Kazakhstan

Description

The Fortan™ Extra 30 of heavy ANFO blend has been designed for difficult blasting applications in dry and dewatered blasthole applications in open cut hard rock mining. The Fortan™ Extra range of high energy dry hole explosive products enable pattern expansion and resulting in reduced drilling costs.

Application

The Fortan™ Extra 30 of product is high energy dry hole explosive which may enable pattern expansion and subsequently reduce mining costs. The Fortan™ Extra 30 can be confidently used in open cut metalliferous mining. It is not suitable for ground containing reactive sulphides⁽¹⁾. Incorrect application of this product may result in undesirable blast outcomes, such as poor fragmentation or elevated levels of post blast fume.

Key benefits

- Fortan™ Extra 30 is designed to give longer sleep time and superior reliability in dry and dewatered blastholes.
- The integrated product and delivery systems of the Fortan™ Extra 30 ensures accuracy, productivity and dependability of supply.
- Fortan™ Extra 30 can be loaded at varying energies and densities.
- The high bulk strength of Fortan™ Extra 30 enables blast pattern expansion and reduced cost of drill and blast.
- High densities of Fortan™ Extra 30 can increase fragmentation and muckpile displacement for improved productivity.
- Manufacturing rates of Fortan™ Extra 30 up to 750 kg/min delivers high on-bench productivity.

Technical specifications

Specification name	
Nominal Density (g/cm ³) ⁽¹⁾	1.10
Minimum blast hole diameter (cm)	89
Blast hole depth (m)	50
Hole type	dry
Delivery system	Augered
Velocity of detonation (km/s) ⁽²⁾	3.5-6.0
Oxygen balance, %	-0.71
Relative Effective Energy (REE) ⁽⁴⁾	
Relative Weight Strength	116
Relative Bulk Strength	159
BC (blasting cap), ED (electrical detonator) and DC (detonating cord) Sensitivity	insensitive
Water-resistance	not resistant
Sleep time, days	21

Recommendations for Use

Blast hole depth

Fortan Extra 30 can be used for almost any blast hole depths.

Initiation

Fortan Extra 30 – is blasting detonator non-sensitive and requires booster usage.

Charging

Fortan Extra 30 is part of the range of bulk products delivered by Orica's Mobile Manufacturing Units (MMU™). Fortan™ Control is manufactured on the MMU™ and augured into blastholes on demand.

Product classification

Trade name: Fortan Extra 30
 Specification: Blasting explosive, Blasting, Type E
 UN No. 0241
 Class Code 1.1D



Technical Data Sheet

Pentex™

The Power
of Partnership

(Foto referencial)

Descripción

Es un moderno explosivo que provee un alto poder de iniciación en un amplio rango de aplicaciones. Ha sido desarrollado en base a PETN y TNT como materias primas, lo que le confiere la capacidad de ser un explosivo estable y excelente iniciador de cargas poco sensibles o insensibles, de ahí que tiene como característica principal desarrollar una alta presión de detonación.

Aplicación

- Los boosters Pentex™ CD están destinados a servir como iniciadores de cargas primarias poco sensibles tales como los nitrocarbonitratos, emulsiones y mezclas a granel en perforaciones de mediano y gran diámetro.
- En el caso de los boosters Pentex™ CO se utilizan como carga explosiva en voladuras secundarias, reduciendo rocas de gran tamaño producidas por la voladura primaria.

Propiedades Técnicas

Densidad	1,62 ± 3% g/cc
Velocidad de detonación	7.200 ± 3% m/seg.
Resistencia al agua	Excelente
Sensibilidad	Detonador N° 8
Iniciador mínimo	Cordón Detonante 10 g/m
Presión de Detonación	216 kbar
Energía	5.598 kJ/kg
Recubrimiento Exterior Pentex™ CD	Envase Plástico (HDPE)
Recubrimiento Exterior Pentex™ CO	Envase de Cartón
Color Envase	Naranja

Embalaje (Cantidades por caja)

Se encuentran disponibles dos tipos de boosters Pentex™ CD (cilíndrico), disponible en 150 g , 225 g , 450 g y 900 g ; así como Pentex™ CO (cónico), disponible en 450 g , 900 g , 1.350 g y 2.250 g.

Embalaje Booster Cilíndrico

Tipo	Unid. por caja	Peso Neto caja (Kg)	Peso Bruto caja (Kg)	Dimensión Emb. Largo X Ancho X Alto (mm)
Pentex™ CD - 150	80	12,0	12,5	379X343X137
Pentex™ CD - 225	56	12,6	13,1	379X343X137
Pentex™ CD - 450	30	13,5	14,0	379X343X137
Pentex™ CD - 900	15	13,5	14,0	379X343X137

Embalaje Booster Cónico

Tipo	Unid. por caja	Peso Neto caja (Kg)	Peso Bruto caja (Kg)	Dimensión Emb. Largo X Ancho X Alto (mm)
Pentex™ CO - 450	40	18,0	19,0	462X415X177
Pentex™ CO - 900	18	18,2	17,2	462X415X177
Pentex™ CO - 1350	12	18,2	17,2	462X415X177
Pentex™ CO - 2250	8	18,0	19,0	462X415X177

Recomendaciones de uso

- Usar el producto más antiguo en polvorines.
- Almacenamiento adecuado según reglamento de explosivos y polvorines.

Clasificación como Explosivo

Nombre autorizado : Pentex™
Nombre correcto de envío : Cargas Multiplicadoras sin detonador
: Booster, sin detonador

Número UN:	0042
Clasificación :	1.1D

Todas las reglamentaciones relacionadas con la manipulación y uso de tales explosivos son aplicables



Abril 2013
Página 1 de 3


www.oricamining services.com

ANEXO X. Explosivos Utilizados en tronadura Yacimiento Segunda Región.



Descripción

Amex™ es una mezcla balanceada entre nitrato de amonio poroso y combustible diesel. El prill, de color blanco cristalino, es ligeramente coloreado mediante la adición de un tinte rojo en el combustible diesel.

Nota: *Amex™* no es adecuado para ser usado en entornos reactivos.

Aplicación

Amex™ es adecuado para ser usado en barrenos secos y que permanecerán secos hasta la detonación. *Amex™* puede ser usado como carga de columna en minería cielo abierto, subterránea, canteras y para trabajos de voladuras en general. *Amex™* puede ser vertido o cargado neumáticamente dentro del barreno.

Beneficios claves

- Costo de explosivos efectivos para aplicaciones de voladuras en barrenos secos.
- *Amex™* permite cargas totalmente acopladas para maximizar los resultados de las voladuras.
- *Amex™* es fiable y fácil de usar, proporcionando resultados consistentes.
- Especialmente formulado para usos subterráneos, *Amex™* reduce los humos de post voladura y mejora el tiempo de retorno.
- *Amex™* puede ser cargado de forma neumática para incrementar la densidad del explosivo, y para que la carga de barrenos pequeños sea rápida y eficiente.

Embalaje

Amex™ está disponible en sacos de 25kg de polipropileno con protección adicional interior de plástico de polietileno. Para mayor información contacte al representante local de Orica.

Propiedades Técnicas

Densidad	0,80 g/cm ³
Diámetro mínimo del barreno (mm)	38
Energía Relativa Efectiva (REE) ¹	
Fuerza Relativa en peso	100%
Fuerza Relativa en volumen • a ANFO @ 0.8g/cm ³	100%
Rango de Velocidad de Detonación ²	2.5 – 4.8 km/s
CO ₂ ³	182 kg/tonne

Recomendaciones para su uso

Diámetro de barreno

El diámetro mínimo de barreno recomendado para carga neumática de *Amex™* es de 38mm y para cargulo del producto en forma de vaciado 76mm.

Longitud de carga

Amex™ puede ser usado en barrenos de cualquier profundidad práctica.

Primado e Iniciación

Se recomienda un booster *Pentax™* para iniciar de manera confiable *Amex™* en conjunto con un detonador *Exel™*. Alternativamente, también se puede usar para iniciar *Amex™* de forma confiable un cartucho de explosivo *Sensafe™* del mayor diámetro posible. No se recomienda el uso de cordón detonante con *Amex™*.

Cargulo

La presión recomendada para cargulo de *Amex™* es de 350 a 400kPa. Durante el cargulo neumático puede ocurrir acumulación de corriente estática. Precauciones tales como el uso de mangueras de carga semiconductoras deben ser tomadas. El cargulo neumático debe ser también conectado a tierra. No es recomendable el uso de detonadores desnudos cuando se utiliza cargulo neumático.

Tiempo de espera en el barreno de voladura

Para barrenos secos, el máximo tiempo de espera recomendado es de 30 días. El tiempo de espera depende de factores tales como temperatura del terreno o humedad ambiental, y tenderá a ser menor cuando la temperatura o humedad se incrementa.

Terrenos calientes

Este producto está disponible para uso en terrenos de temperatura entre 0° a un máximo de 55°C. Si usted requiere aplicaciones en terrenos fuera de este rango, por favor contacte a representante Local Orica.



www.oricaminingservices.com

Technical Data Sheet

The Power
of Partnership

Amex™

Clasificación de explosivo

Nombre autorizado: Amex™
 Nombre para transporte: Explosivo, Voladura, Tipo D
 N° NU: 0331
 Clasificación: 1.5D

Todas las regulaciones pertinentes a la manipulación y uso de tales explosivos aplican.

Almacenamiento

Almacene Amex™ en un polvorín debidamente aprobado para explosivos Clase 1.5D. Amex™ tiene un tiempo de vida almacenado de hasta 4 meses en situaciones estables, condiciones templadas.

Es mejor almacenar Amex™ a temperatura ambiente. En casos de cambios extremos de temperatura, que va en un rango de -18° C a 32° C (0° F - 90° F), la vida útil se reduce y se hace difícil de ser manipulado.

Destrucción

La destrucción de materiales explosivos puede ser peligrosa. Los métodos para una segura destrucción de explosivos pueden variar dependiendo de la situación del usuario. Por favor contacte a un representante local de Orica para más información acerca de prácticas seguras.

Seguridad

Los humos de post detonación característicos de Amex™ hacen al producto apropiado para aplicaciones en superficie y subterráneas. Los usuarios deben asegurar que haya una ventilación adecuada previa al ingreso dentro del área volada.

Amex™ puede ser iniciado por golpe extremo, fricción o impacto mecánico. Como sucede con todos los explosivos, Amex™ debe ser manipulado y almacenado con cuidado y debe estar aislado de cualquier tipo de flama y calor excesivo. Amex™ es fácilmente dañado por el agua.

Marcas registradas

La palabra, el logotipo y la marca Orica son marcas registradas del grupo de compañías Orica. Amex™, Sensafe™, Pentex™, Exel™ y Itex™ son marcas registradas de Orica Explosives Technology Pty Ltd. ACN 075 650 353, 1 Nicholson Street, Melbourne, VIC, Australia.

Limitación de responsabilidades

La información contenida aquí está basada en experiencias, la cual se asume exacta y actualizada a la fecha de su preparación. Sin embargo, su aplicación y condiciones de uso no están dentro del control del fabricante y los usuarios deberían determinar la aplicabilidad de los productos y los métodos de uso de acuerdo a sus propósitos. Ni el fabricante o el vendedor otorgan garantía de ningún tipo, expresa o implícita, legal o de otro tipo, excepto que los productos descritos aquí cumplirán las especificaciones del fabricante y del vendedor. El fabricante y el vendedor expresamente excluyen cualquier otra garantía, INCLUYENDO, SIN LIMITACIONES, GARANTÍAS CONCERNIENTES A COMERCIABILIDAD O ADAPTABILIDAD PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR. Bajo ninguna circunstancia el fabricante o el vendedor serán responsables por daños indirectos, especiales, consecuenciales o accidentales, incluyendo, pero sin limitación, daño por lucro cesante, ganancias previstas o por oportunidades pérdida.

Los explosivos hechos a base de Nitrato de Amonio, tales como Amex™, pueden reaccionar con materiales piríticos en el terreno y pueden crear situaciones potencialmente peligrosas. Orica no acepta responsabilidad alguna por pérdida o responsabilidad surgida por el uso del producto en terreno que contenga material pirítico o cualquier otro material reactivo.

Orica Mining Services, Plana LA PORTADA
 Camino a Mejillones Km. 18, Antofagasta - Chile
 Teléfono: +56 55 565 634
 Fax: +56 55 565 633

Teléfonos de Emergencia

Dentro de Chile: 55 565 633 / 9 873 47 84
 Fuera de Chile: +56 55 565 633 / +56 99 873 47 84

Notas:

- REE es la Energía Relativa Efectiva al ANFO para una densidad de 0.8g/cm³. El ANFO tiene una energía efectiva de 2.30MJ/kg. Las energías acotadas están basadas en cálculos de detonación teóricos con 100MPa de presión de corte. La energía de una detonación no ideal se encuentra disponible por requerimientos. Tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en una voladura tales como: diámetro del barrenado, tipo de roca y comportamiento de la reacción del explosivo.
- La VGD real depende de las condiciones de uso incluyendo la densidad del explosivo y el grado de confinamiento. El rango acotado se refiere a un diámetro mínimo no confinado y cálculo teórico.
- El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.



www.oricamining.com

Ficha Técnica
Productos/Dinamitas
V1216



Softron®

Explosivo para voladura amortiguada

DESCRIPCIÓN

Explosivo de bajo poder rompedor, especialmente diseñado para trabajos de voladura controlada en tunelería, donde es necesario obtener un perfilmetro parejo con un mínimo de sobre-excavación. Permite minimizar el fracturamiento de la roca, más allá de la línea de contorno.

Por sus características, los cartuchos Softron deben ser acoplados perfectamente entre sí, para lo que se presenta en tubos rígidos acoplables de polietileno.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Densidad	1,19 ± 3%	gr/cc
Velocidad de detonación min.*	3.000	m/s
Presión de detonación*	33	Kbar
Energía	4.480	Kj/Kg
Resistencia al agua	12	Horas
Volumen de gases	968	L/Kg
Potencia relativa al ANFO		
En Peso	1,13	
En Volumen	1,72	

*Prueba de laboratorio, no confinado.

USOS

- Colocar como cabo, en contacto con el primer envase Softron, un adaptador de Softron con Miniblaster 40, Tronex Plus o Emulfex CN.
- La duración garantizada de este producto es de 2 años con una adecuada ventilación de polvorines y ambiente seco. Para utilizar con mayor antigüedad solicitar asesoría a Enaex Servicios S.A.

INFORMACIÓN DE TRANSPORTE

Alto Explosivo
Clase 1 División 1.1 D
Nº NU: 0061
HDS-DIN-02



DIMENSIONES*

Tamaño** (pulgadas)	Unidades por caja	Peso unidad (g)	Peso caja (Kg)
11/16 x 20	142	141	20

*tamaño y peso del producto es aproximado (+/- 3%).

DIMENSIONES DE LA CAJA

Largo x Ancho x Alto	61 x 34 x 23 (cm)
----------------------	-------------------

FABRICACIÓN

- Planta Río Los, Enaex Servicios S.A.

ADVERTENCIA

Enaex Servicios S.A. solo se responsabiliza por lo expresamente indicado en este catálogo, y no será en ningún caso responsable por daños, pérdidas o cualquier consecuencia derivada del uso de los productos, salvo aquellas expresamente indicadas por la legislación Chilena respectiva. El uso de equipos o de este producto en cada país por leyes locales. Enaex S.A. se reserva el derecho de modificar sus productos, sin aviso previo.

Softron®

Explosivo para voladura amortiguada

INSTRUCCIONES USO FÁCIL

Las siguientes son instrucciones y recomendaciones con sugerencias prácticas de lo que "se debe hacer" y lo que "no se debe hacer" para un uso correcto del producto "Softron" en el cargado de los tiros de contorno en labores de desarrollo de la mina subterránea.

SE DEBE HACER

- Colocar como cabo, en contacto con el primer envase "Softron", un Adaptador de Softron con Miniblaster 40, Ironex Plus o Emluxx CN.
- Acople unilateralmente los tubos de "Softron" en cada perforación de coronas y cajas.
- Preparar y unir 2 ó 3 unidades de "Softron" antes de introducirlas en las perforaciones. Así se incrementa el rendimiento de cargado en las cajas y coronas.
- Dependiendo del largo de las perforaciones se pueden cargar las coronas y cajas con 4 - 5 - 6 ó 7 unidades de "Softron" por perforación.
- Al preparar una columna de varias unidades de "Softron", se corre el riesgo de que por una mala operación de cargado, las tiras se doblen o flexion bruscamente, lo cual producirá una interrupción de la onda de detonación en la columna de explosivos.
- A cada tubo de "Softron" se debe aplicar un leve esfuerzo para su acoplamiento rápido (click-click), así los envases quedan en íntimo contacto. Ver figuras Nº1, 2 y 3.
- Coloque un buen "taco" de greda, cartón húmedo y autonituable, dependiendo del diámetro de perforación. De esta forma la columna de "Softron" queda bien confinada y se evita su eyección fuera de la perforación.
- Si se cumplen las indicaciones, no se requiere el uso de cordón detonante adosado a la columna de "Softron".

Forma de Acoplar

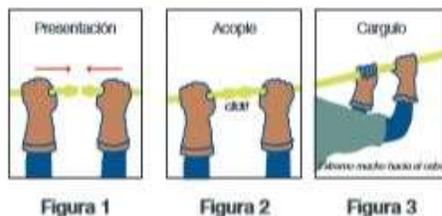


Figura 1

Figura 2

Figura 3

NO SE DEBE HACER

- Colocar en contacto con el cabo el lado de la unión "hembra" del envase de "Softron".
- Doblar los envases "Softron" para luego usarlos como taco. En esas condiciones podría aparecer parto del producto en la mina.
- Por seguridad no se recomienda insertar el detonador "No Eléctrico, Eléctrico o Electrónico" como iniciador, dejando la mitad de la cápsula fuera del envase "Softron".
- Dejar de empujar todo el conjunto de "Softron" con el colgite, asegurando de esta manera un buen contacto con el cabo.
- Al unir los envases de "Softron" no deben quedar sueltos entre sí. Se corre el riesgo de desacoplarse bruscamente. El sistema de unión permite un acoplamiento rápido y seguro.
- No preparar más de 3 unidades de "Softron" antes de introducirlas en las perforaciones, puesto que, según los largos de las perforaciones, cada una de ellas pueden contener 4 - 5 - 6 ó 7 unidades de "Softron" por perforación. De esta manera, al iniciar su cargado al interior de las perforaciones de cajas y coronas, no se doblarán ni flexionarán los envases, manteniendo su rigidez, lo que favorecerá un buen cargado.

Producto	Softron
Color de envase	Amarillo
Sistema de acople	Embutido rápido

ADVERTENCIA

Enaex Services S.A. solo se responsabiliza por la representación indicada en este catálogo, y no será en ningún caso responsable por daños, pérdidas o cualquier consecuencia derivada del uso de los productos, salvo aquellas expresamente indicadas por la legislación Chilena aplicable. El uso de equipos no está regulado en cada país por leyes propias. Enaex S.A. se reserva el derecho de modificar sus productos, sin aviso previo.

Ficha Técnica
Productos/Dinamitas
W117



Tronex® Plus

Semigelatina de uso general

DESCRIPCIÓN

Dinamita tipo semigelatina, especialmente diseñada para trabajos de superficie y faenas subterráneas (excepto minas de carbón), en roca sin agua. Esta semigelatina posee una alta velocidad de detonación, incluso en condiciones de confinamiento deficiente, por lo que tiene especial aplicación como carga principal en tunelería y desarrollo de galerías y como indicador de Anfo en diámetros pequeños.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Densidad	1,18 ± 3%	g/cc
Velocidad de detonación mínima*	4.000 (1)	m/s
	4.500 (2)	m/s
Presión de detonación*	77	Kbar
Energía	4.908	KJ/Kg
Resistencia al agua Estática	12	Horas
	Dinámica	Regular
Volumen de gases	942	L/Kg
Potencia relativa del Anfo	1,22	En peso
	1,85	En volumen

(1) Cartucho de 1" 1/2" x 8" no controlado
(2) Cartucho de 1" 1/2" x 8" controlado

USOS

- Utilizar como iniciador mínimo un Detonador Nº8.
- No abrir o "amasar" los cartuchos.
- El diámetro mínimo del cartucho es de 7/8".
- Este producto puede soportar longitudinalmente desacoplamiento entre cartuchos dentro de la perforación de 10".
- La duración garantizada de este producto es de 2 años. Para utilizar con mayor antigüedad solicitar asesoría a Enaex Servicios S.A.

DIMENSIONES DE LA CAJA

Largo x Ancho x Alto	46 x 42 x 19 (cm)
	81 x 34 x 23 (cm)

INFORMACIÓN DE TRANSPORTE

Alto Explosivo
Clase 1., División 1.1 D
Nº NU: 0061
HDS-DIN-02



DIMENSIONES*

Tamaño** (pulgadas)	Unidades por caja	Peso unidad (g)	Peso neto caja (Kg)
7/8 x 6	320	79	23,4
7/8 x 7	274	85,2	23,3
7/8 x 8	250	93	23,3
1 x 6	220	91	20,0
1 x 7	216	108	23,3
1 x 8	190	123	23,4
1 1/8 x 7	174	134	23,3
1 1/8 x 8	153	153	23,4
1 1/4 x 7	144	162	23,3
1 1/4 x 8	126	185	23,3
1 1/4 x 16	52	385	20,0
1 1/2 x 7	95	244	23,2
1 1/2 x 8	72	278	20,0
1 1/2 x 10	67	348	23,3
1 1/2 x 16	37	54	20,0
1 3/4 x 8	59	34	20,0
2 x 8	44	455	20,0
2 x 16	22	91	20,0
2 1/2 x 16	15	1.333	20,0

* Tamaño y peso de cartuchos son aproximados.
** Para otros tamaños consultar a Enaex Servicios S.A.

FABRICACIÓN

• Planta Fio Loa, Enaex Servicios S.A.

ADVERTENCIA

Enaex Servicios S.A. no es responsable por lo representado indicado en este documento, y no asume ninguna responsabilidad por daños, pérdidas o cualquier consecuencia derivada del uso de los productos, según se define en los reglamentos indicados por la legislación (Clases vigentes). El uso de este producto está regulado en cada país por leyes locales. Enaex Servicios S.A. se reserva el derecho de modificar sus productos, sin aviso previo.

TECHNICAL DATA SHEET

Subtek™ Velcro

UK

Description

Subtek™ Velcro bulk emulsion explosive is a primer sensitive pumped explosive which has the appearance of an opaque fluid, similar in viscosity to heavy grease. Subtek™ Velcro has excellent water resistance as an inherent characteristic of an emulsion explosive.

Application

Subtek™ Velcro is manufactured at the blast site from an Orica designed underground pumping unit. This combines non-explosive emulsion with sensitiser to deliver the water resistant explosive product into the blasthole. The density of the final product can be varied to suit ground conditions or blast design. Subtek™ Velcro is specifically designed for use in upholes and is also suitable for downholes and development headings.

Key Benefits

- Subtek™ Velcro has been designed specifically to provide enhanced retention in upholes in underground mining.
- The final product density of Subtek™ Velcro can be varied to match desired product performance criteria.
- Subtek™ Velcro pumped emulsion reduces spillage and with excellent water resistance, minimises nitrate leaching and the resultant environmental impact.
- Subtek™ Velcro provides fully coupled explosive to maximise blasting outcomes.
- The increased speed of charging and reduced post-blast fumes when using Subtek™ Velcro, dramatically improves stope turnaround time.
- Subtek™ Velcro reduces potential for sulphide dust explosions.
- Occupational Health & Safety issues around the handling and storage of packaged products is eliminated.

Recommendations for Use

Blasthole Charge Length

Subtek™ Velcro is suitable for use in holes of up to 50 m in length, depending on hole diameter, inclination and presence of water. Mechanical retention devices may be required under certain circumstances. For use in downholes please contact Orica Technical Services Personnel for further information.

Technical Properties

Product	Subtek™ Velcro				
Density (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Minimum Blasthole Diameter (mm) ⁽²⁾	38	38	38	38	42
Hole Type	Wet and dry				
Delivery System	Pumped				
Typical VOD (km/s) ⁽³⁾	4.5	4.9	5.3	5.7	6.2
Relative Effective Energy (REE) ⁽⁴⁾					
Relative Weight Strength (%)	72	78	85	92	98
Relative Bulk Strength (%)	72	89	106	127	147
CO ₂ Output (kg/t) ⁽⁵⁾	183				
Sleep time (months)	3				

Priming and Initiation

Subtek™ Velcro can be reliably initiated using a Pentex™ primer or equivalent in conjunction with an Exel™ detonator. Pentex™ primers must be appropriate to the blasthole size. Use of detonating cord with Subtek™ Velcro is not recommended. Contact Orica Technical Service Personnel for further information.

Charging

Charging is carried out using specialised proprietary underground pumping equipment. Retention of the explosive in a blasthole will depend on hole diameter, inclination, cleanliness of the hole and presence of water. Contact Orica Technical Service Personnel for further information.

Sleep-Time within Blastholes

The recommended maximum sleep time is 3 months. Sleep time is dependent on factors such as hole diameter, density, ground water conditions, initiation system and mining method. Orica Mining Services Technical Personnel should be consulted if special conditions exist.

Gassing

The gassing rate of Subtek™ Velcro is temperature dependent. Typical gassing time is approximately 30 minutes at 30 °C. Sixty minutes should be allowed between loading and firing blastholes at 25 °C.



2018-08-30
1 of 2



TECHNICAL DATA SHEET

Subtek™ Velcro

UK

Ground Temperature

These products are available for use in ground temperatures 0 °C to a maximum of 55 °C. If your application requires you to operate outside this temperature range, please contact your local Orica Account Manager.

Storage and Handling

Product Classification

Authorised Name: Subtek™ Velcro
 Proper Shipping Name: Explosive, Blasting, Type E
 UN No.: 0241
 Classification: 1.1D
 EC Type Certificate: ENB/B/090/09

All regulations pertaining to the handling and use of such explosives apply.

Disposal

Disposal of explosive materials can be hazardous. Methods of safe disposal of explosives may vary depending on the user's situation. Please contact a local Orica representative for information on safe practices.

Safety

The post detonation fume characteristics of Subtek™ Velcro make it suitable for underground blasting applications. Users should ensure that adequate ventilation is provided prior to re-entry into the blast area.

Subtek™ Velcro is relatively insensitive to accidental initiation by shock, friction or mechanical impact under normal conditions of use. Detonation may occur from heavy impact or excessive heating particularly under conditions of confinement.

Explosives based on Ammonium Nitrate such as the Subtek™ Velcro may react with pyritic materials in the ground and create potentially hazardous situations. Orica accepts no responsibility for any loss or liability arising from use of the product in ground containing pyritic or other reactive material.

Disclaimer

© 2018 Orica Group. All rights reserved. All information contained in this document is provided for informational purposes only and is subject to change without notice. Since

the Orica Group cannot anticipate or control the conditions under which this information and its products may be used, each user should review the information in the specific context of the intended application. To the maximum extent permitted by law, the Orica Group specifically disclaims all warranties express or implied in law, including accuracy, non infringement, and implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose. The Orica Group specifically disclaims, and will not be responsible for, any liability or damages resulting from the use or reliance upon the information in this document.

The word Orica and the Ring device are trademarks of the Orica Group.

Orica UK Limited

North Quarry Business Park
 Skull House Lane
 Appley Bridge
 Wigan WN6 9DL
 UK

Phone: +44 (0) 1257 256100
 Fax: +44 (0) 1257 255670
 Customer Service: +44 (0) 1925 767679

Emergency Telephone Numbers

+44 (0) 1928 572000

Notes

- Nominal Density Only.
- Contact your local Orica Representative for further advice on loading at minimum hole diameters.
- VOD will depend on application including explosive density, blasthole diameter and degree of confinement. The VOD range is based on minimum unconfined and calculated ideal.
- REE is the Effective Energy relative to ANFO at a density of 0.8 g/cm³. ANFO has an effective energy of 2.30 MJ/kg. Energies quoted are based on ideal detonation calculations with a 100 Mpa cut off pressure. Non-ideal detonation energies are also available on request. These take account of blasthole diameter, rock type and explosive reaction behaviour.
- Carbon dioxide is the main greenhouse gas produced. The output is calculated assuming ideal detonation.



2018-08-30
2 of 2



orica.com