



Universidad Católica del Norte
ver más allá



Escuela de Negocios Mineros
Dirección de Postgrado

OPTIMIZACIÓN CALIDAD DEL PROCESO TRONADURA MINA – PLANTA DE CHANCADO (CADENA PRODUCTIVA MINA - PLANTA)

Proyecto de tesina presentado como parte de la Actividad de Titulación para optar al grado académico de Magíster en Gestión Minera.

Profesor Guía: Alejandro Morales Soto

**ALEJANDRO FLORES VALDEBENITO
CARLOS RAMIREZ MAREY**

Antofagasta, Diciembre 2013

Se dedica este trabajo a nuestras familias que nos apoyan directamente en lograr los objetivos y esperar pacientemente que finalicemos este desafío profesional y académico.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecemos a nuestras familias por apoyar y esperar pacientemente y en forma particular los fines de semana para estar con ellos, dado que tenemos el compromiso de participar activamente en cada módulo de este magister.

A nuestra División Gabriela Mistral de Codelco Chile quien nos dio la oportunidad y el financiamiento para emprender este nuevo desafío personal y profesional.

Se agradece a la Universidad y los profesores por dar todas las facilidades y opciones para terminar cada módulo de este magister.

Se agradece a nuestro profesor guía el Sr Alejandro Morales por aceptar este desafío y apoyar en el logro del objetivo.

Se agradece formalmente a los siguientes colegas que nos apoyan y nos entregan la información suficiente para el logro del objetivo.

- A nuestro colega el Sr. Carlos Peñaloza quien con su dedicación y armonía nos apoya en la colección de datos de nuestra División Gabriela Mistral de Codelco Chile
- A nuestro colega el Sr. Diego Quezada que nos proporciona información valiosa de los seguimientos y logros obtenidos en el proyecto Mine To Leach de nuestra División Gabriela Mistral de Codelco Chile.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I INVESTIGACIÓN PROPUESTA	9
I.1 FORMULACIÓN GENERAL	11
I.2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
I.3 HIPÓTESIS	13
I.4 OBJETIVOS	14
I.4.1 OBJETIVO GENERAL	
I.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
I.6 RESTRICCIONES	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	16
II.1 GEOLOGÍA GENERAL DGM	17
II.2 UNIDADES DE TRONADURAS	25
II.3 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y TRONADURA	27
II.4 FUNDAMENTOS TEÓRICO DE PROCESOS DE TRONADURA	30
II.4.1 Mecanismo de Rotura del Macizo Rocoso	29
II.4.2 Interpretación Análisis Granulométrico	36
II.4.3 Variables de perforación y tronadura que influyen en la fragmentación	38
II.4.4 Variables geomecánicas que influyen en la fragmentación	57

CAPÍTULO III	PROPUESTAS Y METODO DE OPTIMIZACION	66
III.1	SECTORIZACION DE AREAS Y ANALISIS DE INFLUENCIA EN LA GRANULOMETRIA DEL MINERAL	66
III1.1	Caso de estudio 1	69
III1.2	Caso de estudio 2	71
III1.3	Caso de estudio 3	73
III1.4	Caso de estudio 4	75
III1.5	Caso de estudio 5	78
CAPÍTULO IV	ANALISIS DE RESULTADOS	81
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
V.1	Conclusiones	94
V.2	Recomendaciones	96
CAPÍTULO VI	BIBLIOGRAFIA	105
VI.1	Páginas de Internet	105

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es proponer una metodología que permita disminuir la variabilidad en la banda granulométrica de alimentación la Mina a Planta de Chancado de División Gabriela Mistral. Particularmente el presente estudio abordará el proceso Tronadura Mina – Planta de Chancado de la División Gabriela Mistral, en donde el indicador clave es % de finos (40% a 45% en peso) menor a 25 (mm) como tamaño característico desde el mineral ROM obtenido en la tronadura.

La metodología mencionada puede ser expresada mediante la siguiente Figura.



INTRODUCCIÓN

Debido a la competitividad en el mercado Minero-Metalúrgico, cada vez más exigente y a la explotación de yacimientos mineros de baja Ley (degradación de ley), es que las empresas mineras deben ser cada día más eficientes y buscar en la tecnología alternativas que permitan bajar sus costos y mejorar la rentabilidad. Es así como la tronadura (mina) y el proceso de chancado (planta), asumen un rol de proveedor frente al cliente, que en este caso será el proceso de la Lixiviación de Minerales.

Desde la perspectiva de la Geología y Planificación Minera, es importante contar con información del yacimiento a explotar para determinar una secuencia de extracción atractiva para el negocio, dado que los diseños de tronadura se basan en las características litológicas, físicas (geomecánicas o geotécnicas) y mineralógicas del mineral a procesar, además de regirse por el plan de producción vigente.

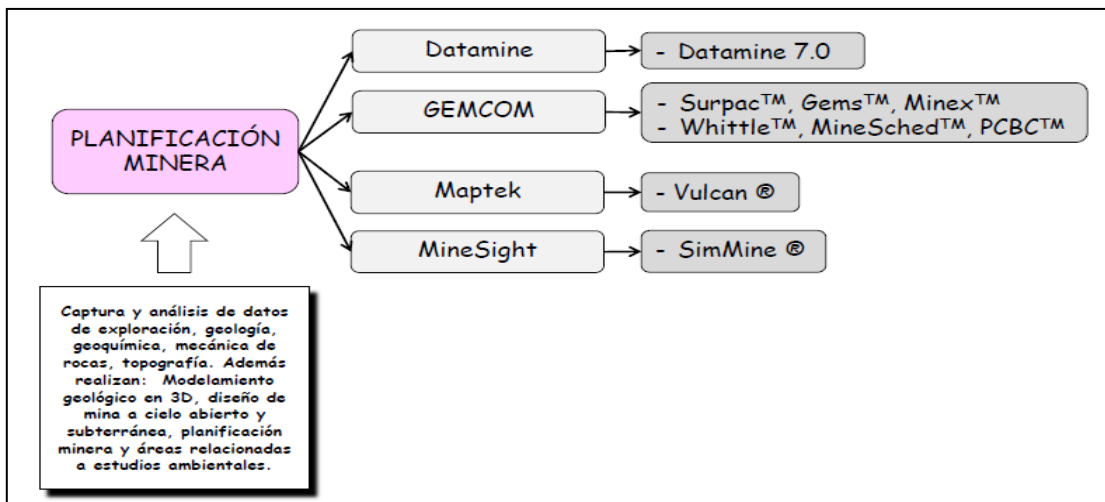
Desde el punto de vista de la Mina, es posible contar con aspectos tecnológicos y de diseño en la tronadura, tales como malla de perforación, diámetros y largo de tiros, tipos y cargas de explosivos dependiendo de la estructura en el macizo rocoso mediante los cuales es posible influir en la distribución granulométrica del material tronado. Dado el contexto anterior, el problema a enfrentar es la variabilidad en la granulometría (distribución granulométrica) de los minerales a alimentar desde la Mina a Planta, por lo cual se ha definido buscar mejoras al proceso Tronadura mina., siendo el indicador clave el % de finos (40% a 45% en peso) menor a 25 (mm) como tamaño característico del mineral ROM.

Para efectos de análisis de resultados, se propondrán alternativas de estudio al proceso de tronadura, utilizando simuladores y pruebas reales, los cuales permitirán determinar los rangos de procesamiento de minerales desde la operación Mina a Planta de Chancado; los resultados serán presentados y se analizarán creando una base de datos con los resultados obtenidos.

Estudios de mercado en el uso de herramientas computacionales para la Planificación Minera ⁽¹⁾

DESARROLLO DE SOFTWARE MINERO

En el mercado hay una amplia variedad de códigos que asisten a la planificación minera. Algunos de los productos de mercado se presentan en la figura siguiente:



Otro campo afín se refiere a herramientas de gestión minera que entregan servicio en áreas de optimización, logística, producción minera y control, en la figura siguiente se listan algunos códigos y sus desarrolladores:

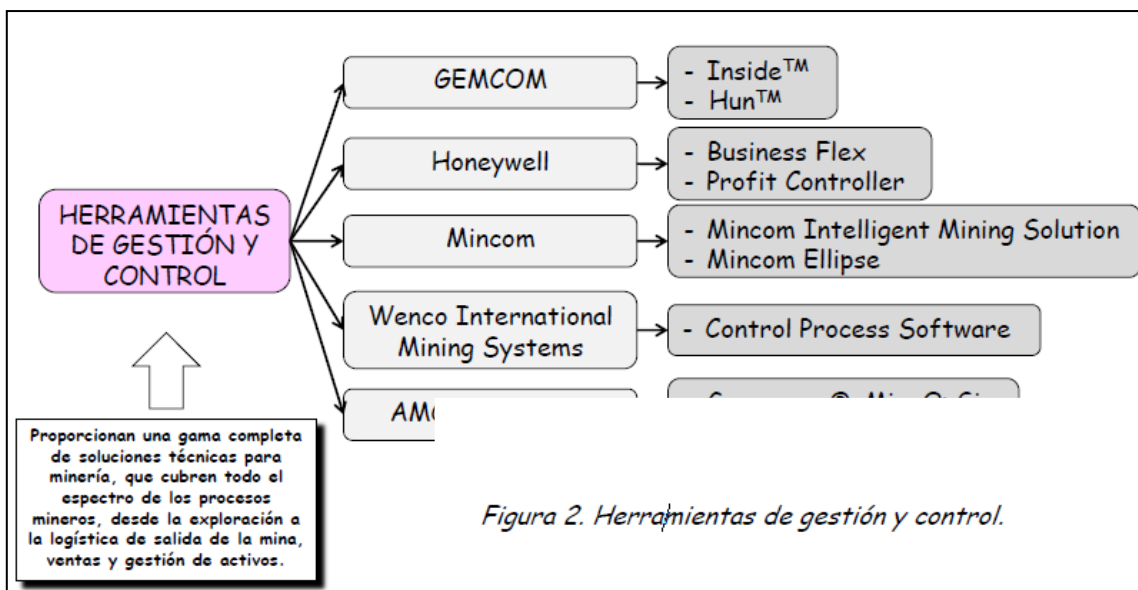
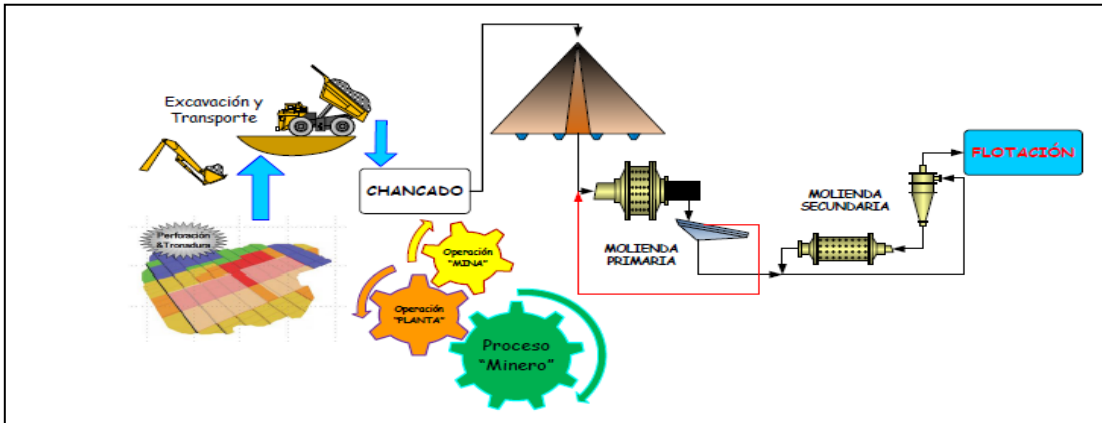


Figura 2. Herramientas de gestión y control.

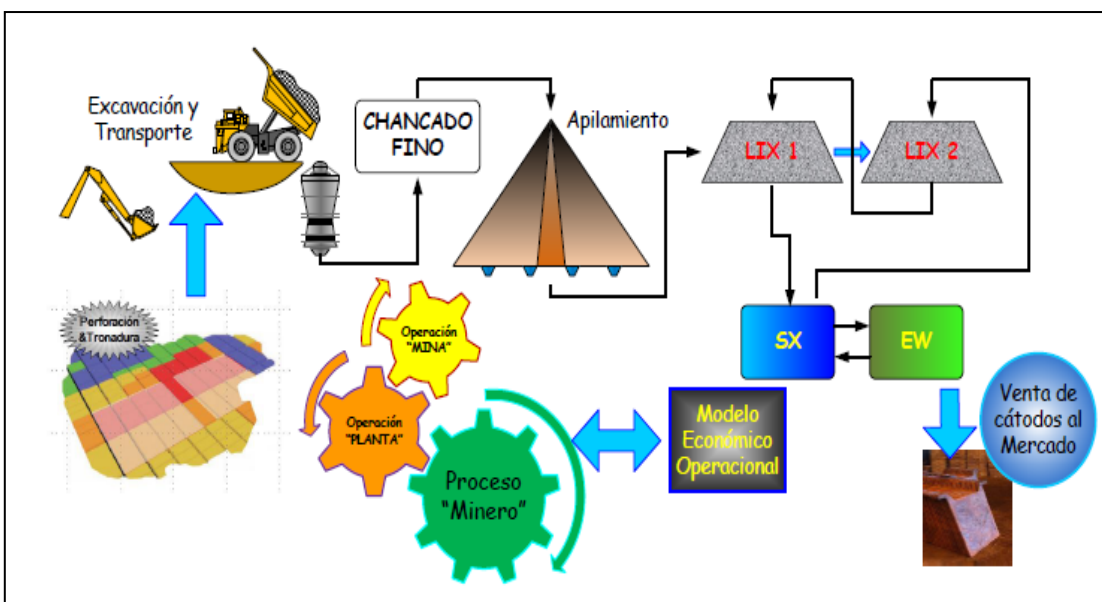
CONCEPTO MINA A MOLIEDA (“MINE TO MILL”)

El concepto Mina a Molienda permite la integración y optimización del proceso en su conjunto desde la explotación del mineral hasta la planta concentradora pasando por la etapa de molienda este concepto se ilustra en la siguiente figura:



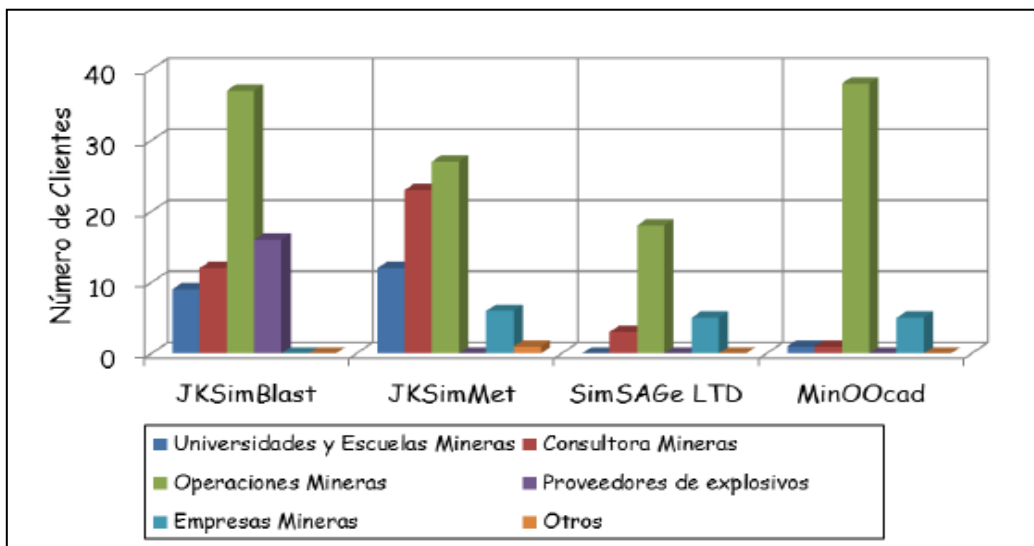
CONCEPTO MINA A CÁTODO (“MINE TO CATHODE”)

Para el proceso Hidrometalúrgico se definen los conceptos Mina a Cátodo (Mine to Cathode) o Mina a Lixiviación (Mine to Leach), el último caso excluye las etapas de de SX –EW ambos excluyen la venta de cátodos al mercado estos conceptos se ilustran en la siguiente figura:



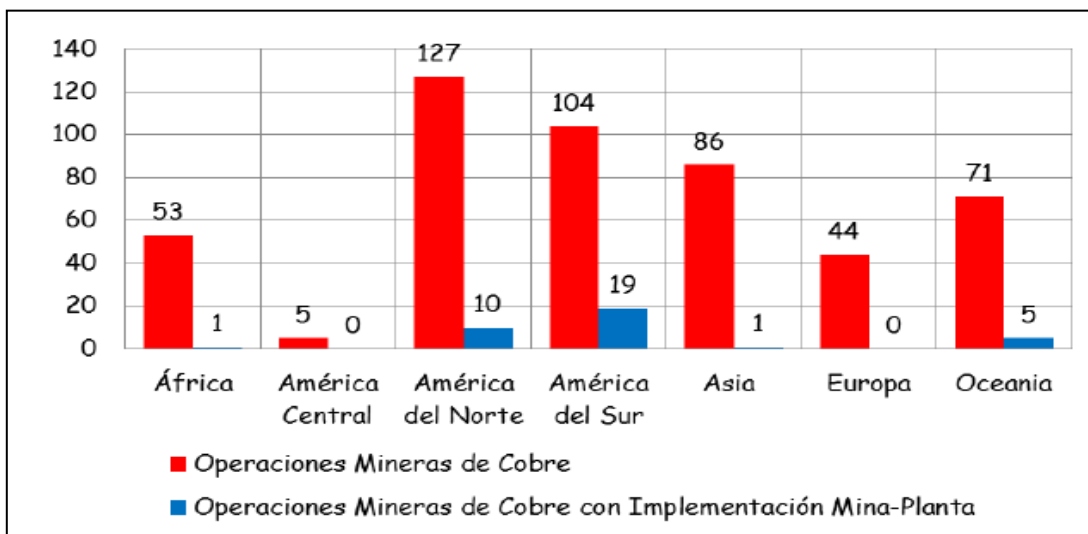
MERCADOS DE USUARIOS

La utilización de software de simulación y modelación de procesos minero-metalúrgicos no es exclusivo de empresas mineras o de operaciones mineras también se usan en universidades y empresas proveedoras su distribución se observa en la siguiente figura:



MERCADO DEL COBRE

A nivel global pocas operaciones emplean herramientas integradas Mina –Planta en el mundo, su distribución se observa en la siguiente figura:



CAPÍTULO I: INVESTIGACIÓN PROPUESTA

1.1.FORMULACIÓN GENERAL

Este estudio está orientado a establecer una banda de control óptimo de granulometría obtenida en el primer proceso de conminución con intercambio de energía que es la tronadura del macizo rocoso. El principal objetivo es disminuir la variabilidad en la granulometría analizando las variables del proceso de Tronadura Mina y que tendrán una repercusión en el proceso siguiente que es el chancado fino de minerales, complementariamente se debe lograr mejorar la fragmentación sin alterar mayormente los costos.

Se espera que la disminución de la variabilidad en cuanto a granulometría se refiere, permita mejoras aguas abajo en los procesos siguientes, tanto en el proceso de chancado secundario-terciario, como en la etapa de lixiviación, tales como menor cantidad de finos en sistema (% menor a #100), un producto más uniforme en el chancado terciario (entre 40% a 45% en peso) menor a 25 (mm) y obtener como producto final una granulometría representada por un indicador clave (KPI) como el p80 (el 80% del mineral en peso con un tamaño medio menor a 13 mm u otro valor definido por el proceso), lo cual claramente contribuirá al aumento en la recuperación metalúrgica de la especie de valor que en nuestro caso es el Cobre.

La metodología a utilizar en el presente estudio consiste en los siguientes pasos:

1. Conocer la geología y geomecánica del yacimiento a operar.
2. Determinar unidades de tronadura (UT).
3. Definición de parámetros técnicos de perforación y tronadura.
4. Analizar las variables que afectan la fragmentación.
5. Generar casos de estudio.
6. Análisis de resultados.

1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Actualmente no se cuenta con una banda de control definida y acotada para la distribución granulométrica del material que resulta de la tronadura y que posteriormente ingresa a la planta. Dado este antecedente, el problema que se requiere solucionar es disminuir la **variabilidad en la distribución granulométrica de los minerales**, sustentada en el análisis histórico de datos de la planta, para lo cual se pretende mejorar el proceso de tronadura, dado que se estima que el diseño de las mallas en esta etapa es preponderante en la obtención de la granulometría esperada 40%-45% menor a 25 (mm).

Las interrogantes a resolver son:

¿Qué variables técnicas son las que se deben analizar y evaluar para lograr una tronadura que entregue un producto uniforme?

¿Cómo obtenemos un porcentaje de fino entre 40 a 45 % menor a 25 mm respecto de la banda granulométrica?

¿Cómo logramos que el producto de tronadura esté dentro de la banda granulométrica deseada?

1.3 HIPÓTESIS

La presente hipótesis tiene como finalidad llevar a cabo un estudio y análisis de la fragmentación obtenida post tronadura en División Gabriela Mistral de Codelco Chile, particularmente el porcentaje de material obtenido bajo un tamaño característico, que en este caso es 25 (mm) para asegurar la homogeneidad en la curva granulométrica del material a alimentar a planta de chancado.

El estudio del problema comienza con un análisis geológico y geomecánico del rajo (macizo rocoso), de esta manera se evaluarán las zonas del rajo que son capaces de generar el % de finos requerido mediante pruebas de fragmentación.

Además, se generará la línea base de los parámetros de diseño perforación y tronadura utilizados en División Gabriela Mistral, para determinar mallas de perforación y tronadura que optimicen y logren entregar la banda granulométrica deseada.

De esta manera la hipótesis se enmarca en determinar las zonas del rajo que generan más o menos finos para implementar la configuración técnico-económica óptima de las mallas de perforación y tronadura, y así generar el % de finos necesario para obtener una curva granulométrica homogénea del material a alimentar a planta.

El método de control de los estudios será la inspección visual de la banda granulométrica mediante 3 vías.

- 1.- Tomas fotográficas (durante el proceso) analizadas mediante un software computacional.
- 2.- Muestreo en correa que recoge producto del chancador primario.
- 3.- Implementación tecnológica con monitoreo de granulometría en línea.

Ver anexo N°1: Análisis de distribución granulométrica.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de la presente tesis es proponer una metodología que permita disminuir la variabilidad en la banda granulométrica de alimentación a la Planta de Chancado de División Gabriela Mistral. Particularmente el presente estudio abordara el proceso Tronadura Mina – Planta de Chancado de la División Gabriela Mistral, en donde el indicador clave es % de finos (40% a 45% en peso) menor a 25 (mm) como tamaño característico desde el mineral ROM obtenido en la tronadura.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar las variables de perforación y tronadura que influyen en la fragmentación de los minerales en División Gabriela Mistral
- Identificar factores de relevancia que impactan en la distribución granulométrica de finos desde la operación Mina a Planta de Chancado.
- Proponer alternativas al proceso de tronadura, utilizando una metodología y pruebas reales, para determinar rangos de procesamiento de minerales desde la operación Mina a Planta de Chancado.
- Analizar y crear una base de datos con los resultados obtenidos.

1.5 RESTRICCIONES.

- El estudio no contempla un análisis geotécnico detallado del macizo rocoso.
- No detalla los costos asociados a las mejoras en la fragmentación tanto en el área Mina y Planta.
- El estudio no contempla todos los factores que influyen en la fragmentación, está acotado a aquellos de los cuales se tiene seguimiento e información certera.
- El estudio se focaliza solo en analizar los resultados de las tronaduras mediante los métodos de control propuestos en la Hipótesis.
- Las variables a modificar son los parámetros de perforación y tronadura, dado que la geología del macizo rocoso no es modificable bajo ningún aspecto técnico y práctico, por lo cual estas condiciones se consideran como una constante en el presente estudio.
- El presente estudio está focalizado en la Fase 4 del yacimiento Gabriela Mistral.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El marco teórico de esta investigación está cifrado en un análisis correlacional de los procesos que se inician en la ocurrencia de los tipos de minerales y gangas dispuestas en modelo geológico del yacimiento y los fenómenos de tronadura para la obtención de un determinado % de finos.

El análisis correlacional entrega la metodología para establecer los rangos de las variables de importancia para el proceso Tronadura-Chancado y su impacto en los resultados esperados para la generación del producto final.

La variabilidad de las respuestas logradas en los procesos generados desde la Tronadura-Mina al Chancado de Minerales repercuten directamente en el proceso siguiente (Lixiviación de Minerales), es por ello que se debe lograr un control de los parámetros en forma exhaustiva conciliando costos y resultados de los procesos de tronadura y chancado.

El negocio minero metalúrgico demanda cada vez más un análisis de costo-beneficio para los procesos de tronadura y chancado dada las bajas leyes de minerales, es por ello la importancia de incorporar tecnologías afines para disminuir costos, mejorar eficiencias y mantener control en cada etapa del proceso Mina-Chancado.

El marco teórico abordara temas tales como la geología y geotecnia del yacimiento, parámetros de tronadura, modelos utilizados para la generación y determinación de la distribución granulométrica, data obtenida en terreno para evidenciar la variabilidad de los tamaños resultantes del proceso de tronadura.

II.1 GEOLOGÍA GENERAL YACIMIENTO GABRIELA MISTRAL

Geología del Distrito División Gabriela Mistral

Las unidades litológicas expuestas en el distrito varían en el rango de edades que van desde el Carbonífero Superior hasta el Cuaternario. Gran parte del área está cubierta por depósitos sub-horizontales de gravas (Mioceno Plioceno).

El basamento pre-Mioceno está constituido principalmente por rocas volcánicas, rocas ígneas intrusivas, y minoritariamente por sedimentos de carácter continental. La unidad Estratos de Quebrada Escondida, se encuentra distribuida en la zona central del distrito y corresponde a una secuencia estratificada, de origen volcánico dominante, con intercalaciones sedimentarias. La Formación Estratos El Bordo está constituida por andesitas, riolitas y rocas piroclásticas de composición andesítica a riolítica. Sobreyaciendo e intruyendo a las unidades anteriores, se dispone una secuencia volcánica constituida por domos y tobas riolíticas, denominada Formación La Tabla, distribuida en las zonas central, sur y oeste, con edad asignada al Pérmico Triásico.

Historia geológica y aproximación a la génesis del yacimiento

Eventos Geológicos

Durante las etapas finales de Paleozoico y asociado a eventos volcánicos eruptivos de carácter explosivo, se depositaron Andesitas, Riolitas y Tobas de composición ácida a intermedia. Estas unidades se reconocen hacia los sectores occidentales del yacimiento, con el nombre de Estratos de Quebrada Escondida. Se asocian a las volcanitas de la Formación la Tabla y Estratos El Bordo. Complejos ígneos de origen intrusivo e intrusivo-efusivo de composición ácida a intermedia, se emplazan dando lugar a stocks granodioríticos y lavas riolíticas a tobáceas durante el Pérmico y hasta el Triásico. Estas unidades se asocian actualmente al Complejo Intrusivo Pampa Elvira. Las rocas intrusivas de estas unidades, expresadas como granodioritas en el sector del yacimiento, cortan discordantemente a la secuencia volcánico-sedimentaria del Paleozoico.

En el Terciario Inferior eventos ígneos de composición diorítica a tonalítica intruyeron discordantemente a las rocas volcánicas e ígneas más antiguas. Estos eventos,

portadores de la mineralización cuprífera de importancia económica, se expresan, en el yacimiento, en los Pórfidos Crowded y Gaby.

Eventos Mineralizadores

Los cuerpos intrusivos Pórfidos Crowded y Gaby, portadores de la mineralización, se emplazan en una cuenca tectónica distensiva, asociada a traslape de fallas submeridianas transpresivas de carácter dextral. Los pórfidos se encuentran en la porción central de esta cuenca, en cuyos bordes se encuentran brechas ígneas e hidrotermales.

Los eventos de mineralización-alteración asociados a la intrusión de estos cuerpos porfídicos y eventos supérgenos posteriores son los siguientes:

a) Alteración

- **Alteración Potásica:** Más ampliamente reconocida en el yacimiento, se expresa por la presencia de biotita secundaria, reemplazando total a parcialmente los minerales máficos.
- **Alteración Propilítica:** Restringida a la periferia del yacimiento, afectando rocas de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria, presenta asociación clorita-epidota como reemplazo parcial a total de máficos, también se observa en vetillas.
- **Alteración Sericítica:** Ubicada preferentemente en el sector Sureste del yacimiento, al Sur de la Falla Capricornio, correspondiendo a vetas con cuarzo-pirita- calcopirita y halos penetrativos, normalmente pervasivos, de cuarzo-sericita (desarrollo local de un halo exterior de caolín). Estas vetas son subparalelas a la Falla Capricornio, rumbo NE.

b) Mineralización

Mineralización Hipógena: corresponde principalmente a cantidades variables de calcopirita-pirita, y menor bornita, la que presenta dos eventos reconocidos en el yacimiento, que corresponden a los siguientes:

- **Mineralización Tardimagmática:** Presenta una distribución en anillos concéntricos, los que varían desde:
 - Calcopirita >> Bornita >> Pirita: Se presenta diseminada y escasamente en vetillas, corresponde al núcleo de mineralización y se desarrolla principalmente en el Pórfido Crowded. También se presenta en las otras unidades litológicas, a menor escala y con ocurrencia en vetillas. Se asocia a alteración potásica.
 - Calcopirita > Pirita: Se presenta en vetillas y escasamente diseminada, se desarrolla principalmente en Granodiorita, asociada a alteración potásica.
 - Pirita >> Calcopirita: Se presenta en vetillas, corresponde al anillo exterior, se desarrolla en la Secuencia Volcánico, asociada a alteración propilítica.

El tipo de ocurrencia de la mineralización tardimagmática puede ser explicado por el escaso hidrofracturamiento existente en el Pórfido Crowded.

- **Mineralización Hidrotermal:** Se produce al disminuir la temperatura del sistema porfídico, lo que hace disminuir la actividad del K^{2+} y aumentar la actividad del H^{+} , esto genera el cambio desde alteración potásica a sericítica. Consiste en pirita-calcopirita, que se emplazan en vetas en Granodiorita, asociadas a alteración sericítica, ubicadas en el sector Sur del yacimiento. También se ubican en brechas hidrotermales ígneas.
- **Mineralización Supérgena:** fue afectada por procesos supérgenos de oxidación-lixiviación hasta profundidades mayores a 150 m. Se ubica inmediatamente bajo el techo de roca, presentando la siguiente distribución vertical general:
- **Zona Lixiviada:** Se ubica, bajo el contacto grava-roca, se caracteriza por la presencia de minerales del grupo de las limonitas. Son abundantes al Sur de la Falla

Capricornio, asociados a la existencia de vetas. Existen otros lixiviados de origen freático asociados al techo de sulfuros con escasa representación en el yacimiento.

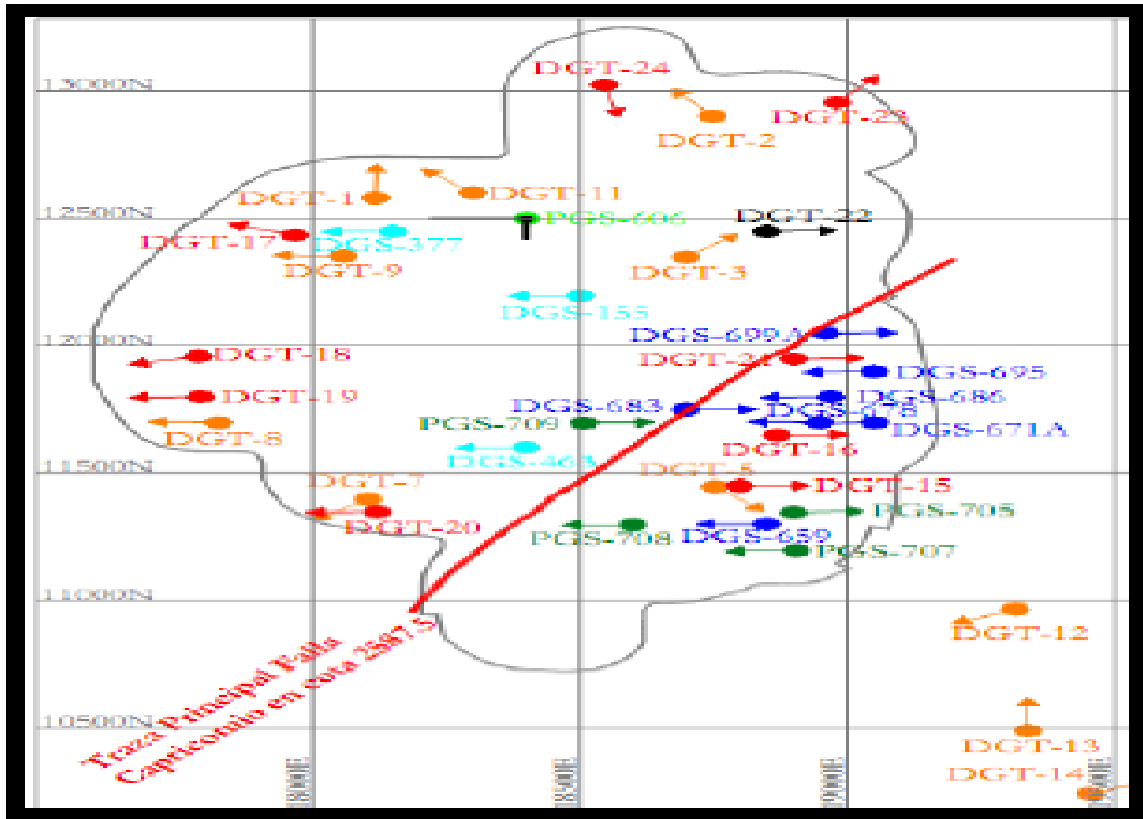
- **Zona Oxidada:** Ubicada bajo la zona lixiviada y, en general, directamente bajo el techo de roca. Los minerales oxidados de cobre reconocidos en Gaby, corresponden principalmente a crisocola, atacamita y óxidos negros (copper wad, neotocita, etc.).

El proceso de oxidación en el yacimiento Gaby presenta características distintivas según su ubicación con respecto a la Falla Capricornio, la que actúa como un límite natural de ambientes geológicos, evidenciado también en la distribución de la mineralización primaria y secundaria.

La Falla de Capricornio está ubicada en la parte Sureste del pit proyectado. Corresponde a una zona de falla, con una densidad de ocurrencia superior a la media del yacimiento, presentando un set de fallas principales y una serie de fallas mayores. Es un ente geológico mayor que actúa como un divisor de ambientes. Al Norte de la falla existe una asociación y disposición de minerales de alteración y mena, controles de la mineralización y arreglo estructural distinto al existente en el sector Sur. (ver figura II.1).

- **Oxidados al Sur de la Falla Capricornio:** La mena oxidada predominante corresponde a atacamita, cuya disposición presenta un fuerte control estructural. Su origen corresponde a oxidación *in-situ* de la calcosina presente en las vetas.

Figura II.1



La formación de atacamita involucra un PH ácido (dado por la presencia de sericita-pirita), en un ambiente de alta salinidad y escasa humedad. Los niveles superiores presentan crisocola en lugar de atacamita, evidenciando la actuación de un Paleonivel Freático (**Atacamita + agua= Crisocola**). La actuación de las aguas meteóricas produce además una migración lateral de los óxidos, la que se produce hacia el Noroeste, de acuerdo a un gradiente hidráulico coincidente con la morfología del techo de roca. En esta zona existe presencia de cantidades menores e irregulares de cuprita y cobre nativo, ubicadas sobre el techo de sulfuros, los que evidencian cambios en el nivel freático.

Oxidados al Norte de la Falla Capricornio: La crisocola es la mena oxidada predominante, con cantidades menores de óxidos negros y escasa atacamita. La zona posee un fuerte control litológico.

La distribución de óxidos en el yacimiento, se ve afectada por un “**Enriquecimiento en Óxidos**”, evidenciando la existencia de al menos otro Paleonivel Freático (distinto al evidenciado por el piso de oxidación).

- **Zona de Enriquecimiento Secundario:** Este proceso se inicia con el enfriamiento del sistema porfídico y el inicio de la actuación de aguas meteóricas, en un flujo convectivo de circulación, desarrollándose principalmente en zonas de mayor acidez (mayor concentración de pirita) y con alto contenido de sulfuros de cobre. La acción de las aguas meteóricas se evidencia por la destrucción de la textura original de la roca, con desarrollo de fuerte alteración sericítica, destrucción de los sulfuros primarios de cobre (calcopirita) y precipitación de calcosina, además de la generación de mayores cantidades de pirita.

Tiene su mayor desarrollo al Sur de la Falla Capricornio, donde las mayores concentraciones de pirita favorecen el desarrollo de condiciones ácidas que permiten la formación de calcosina, la que se encuentra principalmente en vetillas. La alteración predominante corresponde a sericítica.

Geomecánica del yacimiento (Fallas Importantes)

Se diferencian dos tipos de fallas: Fallas Principales y Fallas Mayores

- Fallas Principales: Continuidad en la interpretación en todo o gran o parte del yacimiento.
- Fallas Mayores: Se caracteriza por dos superficies (no necesariamente planas) separadas por un relleno o “roca de falla”, la que presenta estructuras internas menores, por lo general no paralelas a la superficie de falla.

Existe una amplia variedad de rumbos de fallas pero con predominio de algunas direcciones características las que corresponden a:

Dirección Noreste (NE)

Se consideran fallas Noreste a las que presentan rumbos variando entre N10°E y N70°E. Este sistema es el de mayor presencia en el yacimiento, se encuentra relacionado con la

disposición de los cuerpos de pórfidos Gaby y Crowded en la zona central del yacimiento, con la distribución de las brechas en los límites Norte y Sur del cuerpo mineralizado principal y fuertemente relacionado con la distribución de los cuerpos de alteración sericítica, y de mineralización de atacamita, sulfuros secundarios y lixiviados en la zona Sur del yacimiento.

Dirección Noroeste (NW)

Son las fallas que presentan rumbos variando entre N20°W y N70°W. De acuerdo a la variografía de leyes, existe un control asociado en la dirección NE de la distribución de sulfuros, además se encuentra relacionada con la distribución de cuerpos menores de brechas y de alteración sericítica en la zona Sur-Central del yacimiento.

Dirección Submeridiana (NS)

Corresponde a una dirección aproximadamente Norte-Sur, rumbos entre N20°W y N10°E. Esta dirección de fallas se encuentra directamente relacionada con la disposición del contacto entre la secuencia volcánico-sedimentaria, por el Oeste, y los cuerpos intrusivos por el Este, contacto que se encuentra destruido por fallas pertenecientes a este sistema.

Dirección General Este-Oeste (EW)

Se consideran fallas EW a las que tienen rumbos variando entre N70°E y N70°W. Esta dirección de fallas, al interior del yacimiento, se encuentra asociada principalmente con la disposición de filones microdioríticos en granodiorita.

Se considera en general una relación de temporalidad y corte de estructuras donde:

El sistema NE corta a todos los demás sistemas.

El sistema NW es cortado sólo por el sistema NE, cortando a los sistemas NS y EW.

El sistema NS es cortado por los sistemas NE y NW, cortando al sistema EW.

El sistema EW es cortado por todos los demás sistemas.

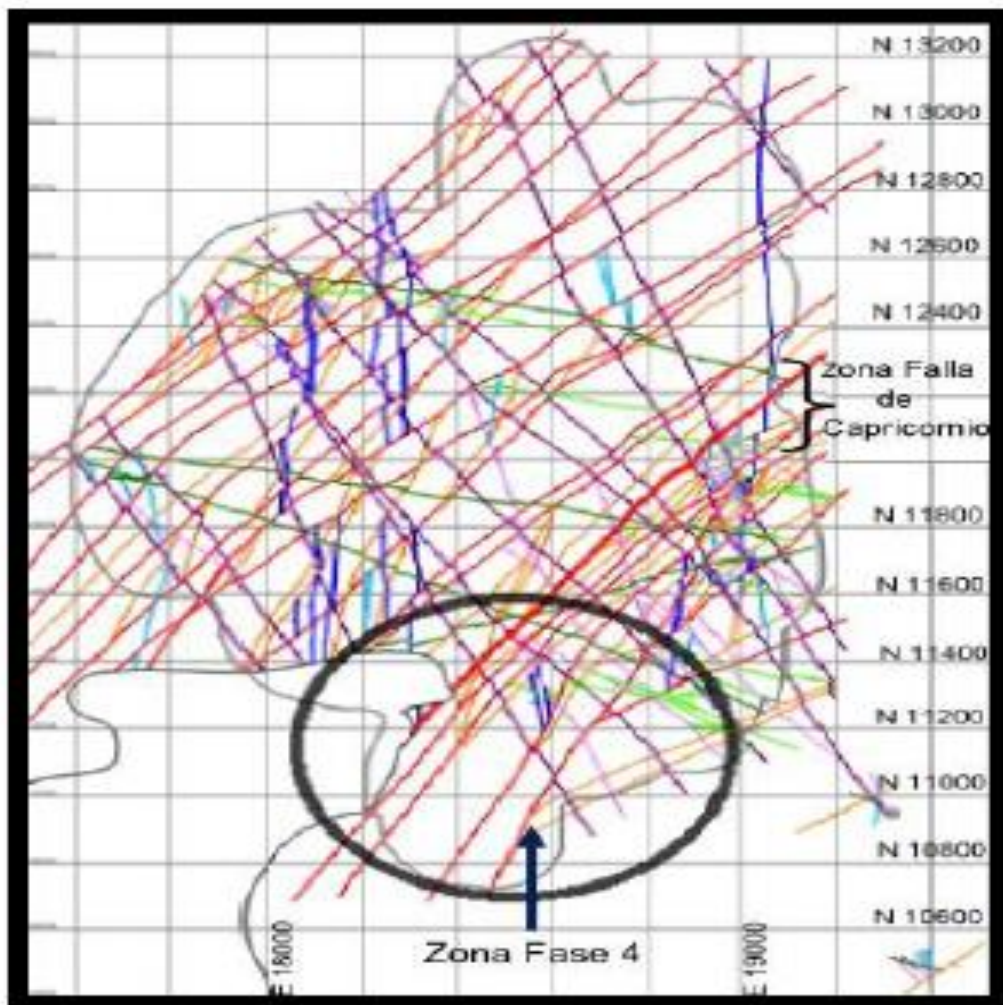
Se considera la continuidad y paralelismo de las fallas, a no ser que sean cortadas por una falla de otro sistema o que converjan hacia una falla mayor de su mismo sistema.

Se considera que las fallas aumentan paulatinamente su ángulo de manteo en profundidad.

Si hay convergencia o cruce de dos fallas pertenecientes al mismo sistema, se considera en general que la falla que continúa es la de mayor ángulo de manteo.

En la figura II.2 se pueden observar la distribución de los sistemas estructurales

Figura II.2



Ubicación y disposición de estructuras del yacimiento al nivel 2587,5

II.2 UNIDADES DE TRONADURA

Las unidades de tronadura fueron definidas sobre la base de las características geológicas que inciden en el proceso de Perforación y Tronadura, las que permitirían definir diseños diferenciados para cada una de ellas, apuntando a los siguientes objetivos:

Tronaduras de Producción: Control Granulométrico del producto inicial
Tronaduras Perimetrales: Minimizar el daño hacia la caja y asegurar el logro de las líneas de programa y criterios de diseño (Bermas y caras de Banco).

Las Unidades de Tronaduras (UT) definidas son las siguientes:

- **UT1:** Rocas Blandas: Corresponde a Brechas y Granodiorita con alteración Sericítica o Argílica y a zonas estructurales mayores.
- **UT2:** Rocas Duras con Fracturamiento Intenso: Corresponde a Pórfido Crowded (PT) y Granodiorita con alteración Potásica y Potásico-Sericítica con una frecuencia de fracturas mayor a 10 FF/m.
- **UT3:** Rocas Duras con Fracturamiento Moderado: Corresponde a Pórfido Crowded (PT) y Granodiorita con alteración Potásica y Potásico-Sericítica con una frecuencia de fracturas menor a 10 FF/m. 27
- **UT4:** Rocas Duras con Fracturamiento Débil: Frecuencia fractura menor a 5 FF/m.

A estas unidades se les asignó propiedades de Roca Intacta y Macizo Rocoso, que les permitieron una clasificación distintiva como unidades de Tronadura. (ver tabla II.1)

La unidad de tronadura principal es la UT2, es decir, roca dura fracturamiento intenso, esta se encuentra predominando en toda la fase.

En el banco superior las rocas duras con Fracturamiento Intenso abarcan la mayor superficie de la fase, seguidas en abundancia por Rocas Blandas; la UT 3 se presenta en una mínima área en el centro de la fase. La UT4 en este banco no se presenta; aún no estaba definida esta nueva unidad de tronadura.

En el banco 2565 aumenta la presencia de Rocas Duras con Fracturamiento Moderado hacia el sector este de la fase, mientras que la UT2 se mantiene como unidad de tronadura principal. Debido a la presencia de nuevas características geológicas fue necesario definir

una nueva unidad de tronadura, esta es la UT4, Rocas Duras con Fracturamiento Débil, que se ubica en la punta sureste del banco.

Tabla II.1

Propiedades de Roca Intacta y Macizo Rocoso, Unidades de Tronadura ⁽⁴⁾

UNIDAD	Propiedades Roca Intacta				Propiedades Macizo rocoso		
	Densidad (gr/cm ³)	UCS (Mpa)	σ_{ti} (Mpa)	E_i (Gpa)	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	E_m (Gpa)
Rocas Blandas	2.51	36.50	-1.30	14.80	2.40	0.02	3.80
Rocas Duras Fracturamiento Intenso	2.65	117.15	-5.50	31.87	3.50	0.02	5.20
Rocas Duras Fracturamiento Moderado	2.65	117.15	-5.50	31.87	4.20	0.04	5.40
Rocas Duras Fracturamiento Débil	2.65	117.15	-5.50	31.87	10.20	0.24	20.10
UCS	Resistencia en compresión uniaxial de la Roca Intacta						
σ_{ti} (Mpa)	Resistencia en tracción de la Roca Intacta según el criterio de H&B						
σ_c (Mpa)	Resistencia en compresión uniaxial del Macizo Rocoso según el criterio de H&B						
σ_t (Mpa)	Resistencia en tracción del Macizo Rocoso según el criterio de H&B						
E_i (Gpa)	Módulo de Young para la Roca Intacta						
E_m (Gpa)	Módulo de Young para el Macizo Rocoso						

II.3 PARÁMETROS DE PERFORACION Y TRONADURA

Los diseños de tronadura en DGM, han variado dependiendo las necesidades que surjan, sin embargo existen algunos parámetros que permanecen constantes en el transcurso de la explotación estos son:

- **Altura de Banco:** El diseño del rajo considera la altura del banco de 15 m.
- **Diámetro de Perforación:** El diámetro de perforación de pozos de producción es de 10 5/8 pulgadas, mientras que en pozos buffer se utilizan 9 1/4”.
- **Longitud Pozos:** El largo de los pozos de producción es de 15 metros con una sobre perforación o pasadura de 1,5 m; longitud total del pozo de perforación de 16,5 m. La longitud del pozo solo varía cuando se trata de la perforación de rampas.
- **Sistemas de Iniciación y Tiempos:** Se utiliza el sistema de iniciación del tipo electrónico. Los tiempos usados están en relación a:

- **Tiempo crítico de acoplamiento (Tca)**

$T_{ca} = (1/3) \times T$ donde el periodo Gaby es de 18,48 ms y el tiempo mínimo será

$T_m = t_{ca} + \text{dispersión Retardo} + t_{nole}$

Obtenidos de estudios de onda elemental: tiempo mínimo de retardo 6 ms zona de producción

Zona buffer se utiliza el triple del tiempo que de los pozos de producción, Tiempos de filas están en función del burden de alivio roca dura 112 ms.

Los tiempos de iniciación usados habitualmente en fase 4 son: 7 ms entre pozo y 100 ms entre fila o 4 ms entre pozo y 100 ms entre fila.

- **Taco:** El taco utilizado habitualmente es de 7 m, aunque en algunos casos excepcionales se ha utilizado tacos de 6, 6.5, o 7,5 m. El material utilizado corresponde al mismo extraído en la perforación del pozo.

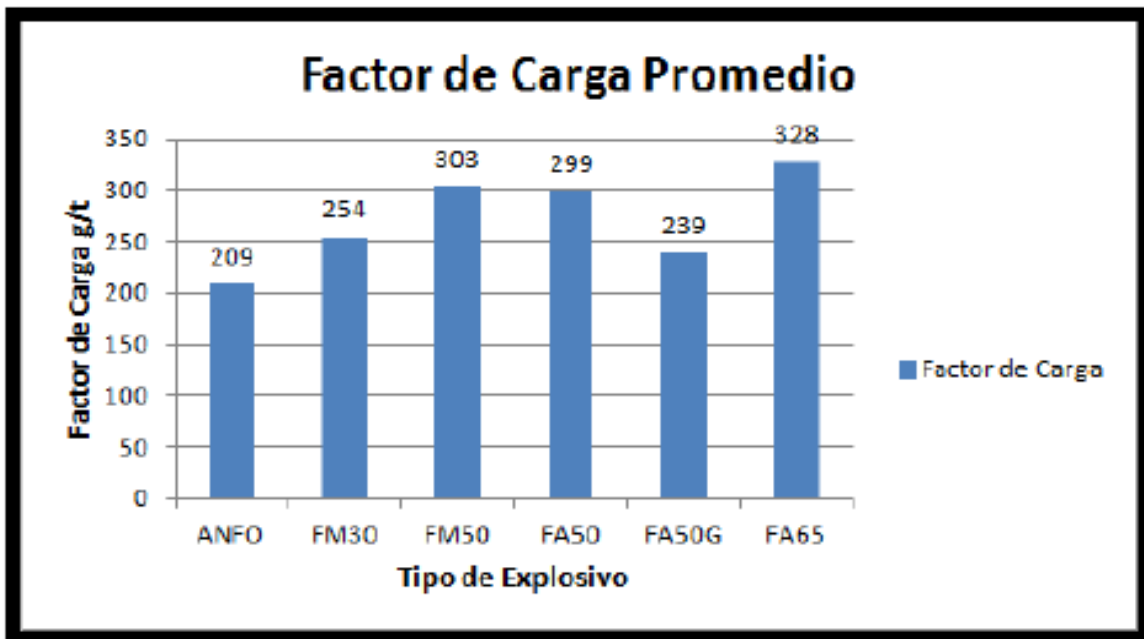
Los parámetros que han variado durante el desarrollo de las fases corresponden a:

- **Factor de Carga:** La cantidad de explosivo utilizado por volumen de roca explotada, varía dependiendo del explosivo empleado.

En explosivos como Anfo, el factor de carga utilizado en la faena, es aproximadamente 200 g/t, esta cantidad se incrementa para emulsiones como FortanMex, llegando a valores superiores a los 250 g/t.

El factor de carga calculado con los explosivos correspondientes a la línea FortanAdvantage de Orica (FA50-FA65), es el más alto de la faena, llegando a los 400 g/t, en algunas tronaduras. (ver figura II.3).

Figura II.3 Gráfico factor de carga promedio según explosivo



- **Mallas de Perforación**

El esquema de perforación empleado es mallas rectangulares trabadas. Las dimensiones de las mallas de perforación han variado dependiendo de la zona en que se encuentra la tronadura y de los resultados obtenidos con dichos diseños.

- **Tamaño y Forma de la Tronadura**

La forma y tamaño de la tronadura varía dependiendo de las necesidades de material tronado que se requiera, de la cantidad de pozos que se encuentren perforados y de la carga con explosivos de estos mismos. Generalmente tienden a ser rectangulares o cuadradas. En algunos sectores del yacimiento se tiene la restricción de tronar un máximo de 200.000 toneladas debido a la existencia de alguna estructura importante o para evitar el daño a las paredes.

- **Explosivos**

Los explosivos utilizados en la faena han ido variando de acuerdo a los resultados obtenidos y a las condiciones que se presentan en el rajo.

En el banco superior (2580) se utilizó Anfo, FortanMex 30 (FM30), FortanMex 50 (FM50) y Flexigel 80 (FX80).

Las primeras tronaduras fueron con Anfo y FM30, posteriormente se cambió a un explosivo de densidad más alta (FM50; 1,3 g/cm³), que puede alcanzar una mayor velocidad de detonación (VOD), la cual al elevarse provoca un efecto rompedor más intenso. Puesto que se incrementaron las dimensiones de las mallas de perforación, y con la mayor densidad de este explosivo se maximiza la fragmentación. El Flexigel se empezó utilizar en pozos buffer en las últimas tronaduras de este banco para evitar daños en paredes con la reducción de vibraciones.

En este caso nuevamente se cambia a un explosivo de mayor densidad (FA50), que entrega una mayor energía relativa disponible, también se continúan cuidando las paredes al utilizar Flexigel.

II.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PROCESO DE TRONADURA

Es indispensable que los conceptos utilizados en el desarrollo del estudio, estén claramente especificados, puesto que son la base que sustenta la investigación.

El proyecto se basa en el estudio y análisis de la generación de finos, para determinar los aspectos a considerar durante el transcurso de éste, se debe tener el conocimiento de algunos conceptos, procesos, y estudios que faciliten el desarrollo del tema.

Para una mejor comprensión, con el fin de unificar criterios y evitar interpretaciones erróneas, se considera los siguientes fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del estudio:

- Mecanismo de Rotura del Macizo Rocoso
- Interpretación Análisis Granulométrico
- Variables de perforación y tronadura que influyen en la fragmentación
- Variables geomecánicas que influyen en la fragmentación

II.4.1 MECANISMO DE ROTURA DEL MACIZO ROCOSO

Al iniciarse la detonación de un explosivo dentro del macizo rocoso, la elevada presión a que está sometida la roca, quebranta la zona adyacente al barreno y se encuentra con un mayor espacio a las intensas tracciones y tensiones tangenciales, esto producto de generación de las ondas de choque expansivas producidas por la detonación que recorre la roca a una velocidad de 3.000- 5.000 m/s. Como resultado de las tensiones radiales se generará un sistema de grietas radiales que parten del centro del barreno hasta llegar bastante lejos, a unos centímetros o cerca del metro del barreno.

La fragmentación de rocas por tronadura comprende la acción de un explosivo e involucra factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción.

Durante la detonación de una carga de explosivo en el interior de la roca, las condiciones de sollicitación que se presentan están caracterizadas por dos fases de acción:

1a fase: Se produce un fuerte impacto debido a la onda de choque, vinculada a la Energía de Tensión, durante un corto espacio de tiempo.

2a fase: Actúan los gases producidos detrás de la zona de reacción que a alta presión y temperatura son portadores de la Energía Termodinámica o de Burbuja.

En la fragmentación de materiales rocosos con explosivos intervienen, al menos, siete mecanismos de rotura, con mayor o menor responsabilidad, pero partícipes todos en los resultados de las voladuras.

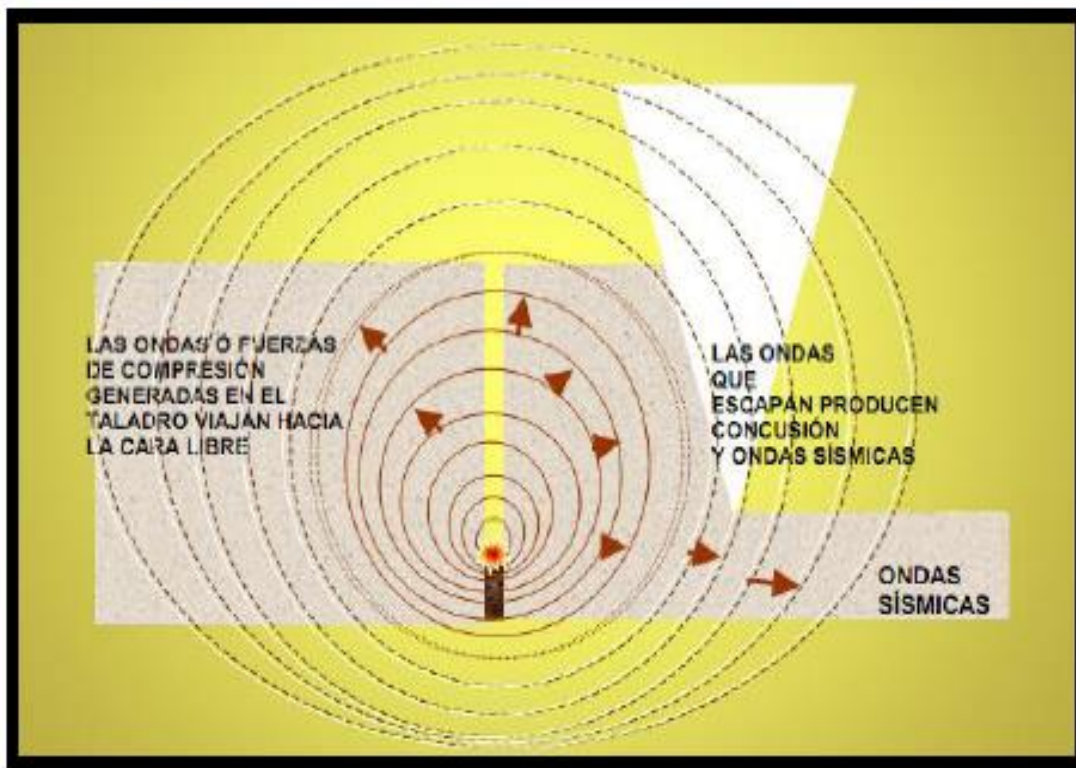


Figura II.4 Detonación del explosivo y propagación de las ondas

Trituración de la roca

En los primeros instantes de la detonación, se expande coaxialmente una onda de compresión cilíndrica u onda de choque, que al superar la resistencia a la compresión dinámica de la roca provoca la destrucción de su estructura intercrystalina e intergranular. El tamaño del anillo de roca triturada aumenta con la presión de detonación del explosivo y

con el acoplamiento de la carga a las paredes del barreno. Según Hagan (1977) este mecanismo de rotura aporta muy poco a la fragmentación de la roca (cerca del 0,1 % del volumen total).

La presión en la onda de choque es positiva para pasar rápidamente a valores negativos, debido principalmente al cambio que hay de ondas de compresión a ondas de tracción, esto se debe principalmente cuando la onda de choque pasa de un medio a otro.

Agrietamiento Radial

Durante la propagación de la onda de choque, la roca circundante al barreno es sometida a una intensa compresión radial que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de dicha onda. Cuando las tensiones superan la resistencia dinámica a tracción de la roca se inicia la formación de una densa zona de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea al barreno. Durante este primer periodo de agrietamiento no hay prácticamente rotura.

La cantidad y longitud de grietas radiales formadas aumentan con:

- La disminución de la resistencia dinámica a tracción de la roca y el factor de atenuación de la Energía de Tensión.
- La intensidad de la onda de choque en la pared del barreno o en el límite exterior del anillo de roca triturada.

Cuando la roca presenta fracturas naturales la extensión de las grietas, guarda una estrecha relación con éstas. Si las columnas de explosivo son intersectadas longitudinalmente por fracturas existentes, éstas se abrirán por efecto de la onda de choque y se limitará el desarrollo de las grietas radiales en otras direcciones.

Reflexión de la onda de choque

Cuando la onda de choque alcanza una superficie libre se generaran dos ondas, una de tracción y otra de cizallamiento. Esto ocurre cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la distancia desde la carga a esa superficie libre.

Si la onda de tracción es suficientemente intensa y supera la resistencia dinámica de la roca se producirá el descostramiento. Este mecanismo de rotura aporta muy poco al proceso global de fragmentación. (ver Figura 5).



Figura II.5 Reflexión de la onda de choque

Extensión y apertura de las grietas radiales

La presión de los gases provoca un campo de tensiones cuasi estático alrededor del pozo. Los gases se expanden y penetran las fracturas, las grietas radiales se prolongan bajo la influencia de la concentración de tensiones en los extremos de las mismas. La cantidad y longitud de las grietas abiertas y desarrolladas depende fuertemente de la presión de los gases, por lo que un escape prematuro de éstos por un taco insuficiente o por la presencia

de alguna zona débil del frente libre puede conducir a un menor aprovechamiento de la energía del explosivo.

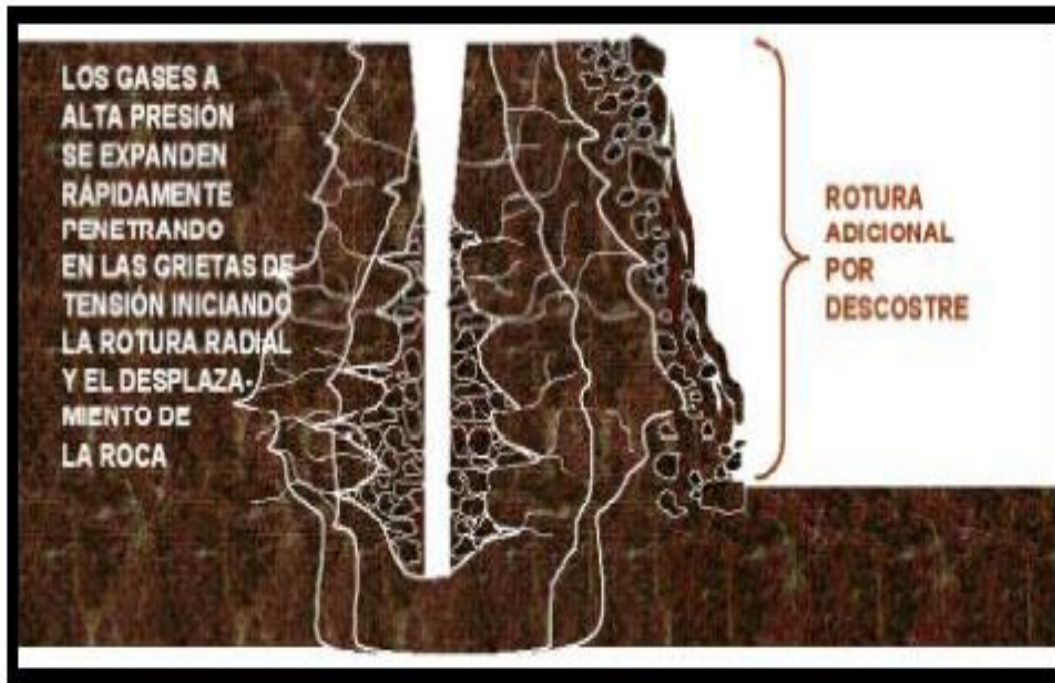


Figura II.6 Rotura de Extensión

Fracturación por liberación de carga

Antes de que la onda de choque alcance el frente libre efectivo, la energía total transferida a la roca por la compresión inicial varía entre el 60 y el 70% de la energía de la voladura (Cook et al 1966). Después del paso de la onda de compresión, se produce un estado de equilibrio cuasi-estático seguido de una caída súbita de presión en el barreno, debido a las fracturas radiales, al escape de los gases a través del taco, y al desplazamiento de la roca. La Energía de Tensión almacenada se libera muy rápidamente, generándose solicitaciones de tracción y cizallamiento que provocan la rotura del macizo.

Rotura por Flexión

Durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento, la presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado frente a la columna de explosivo hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del barreno, y en la zona del retacado, es decir, los extremos del barreno se mantienen como puntos fijos produciéndose la deformación y el agrietamiento por los fenómenos de flexión.



Figura II.7 Rotura por Flexión

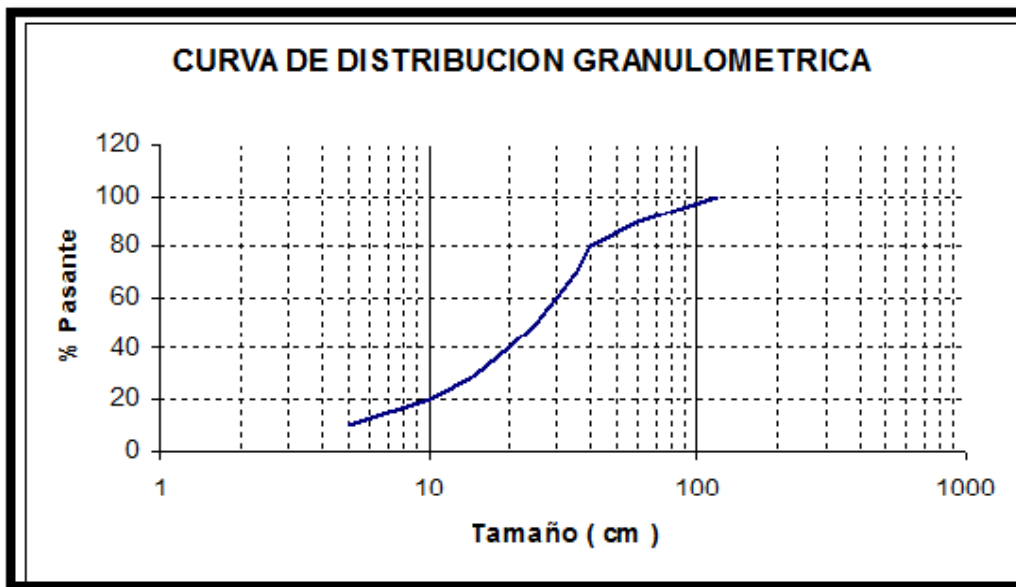
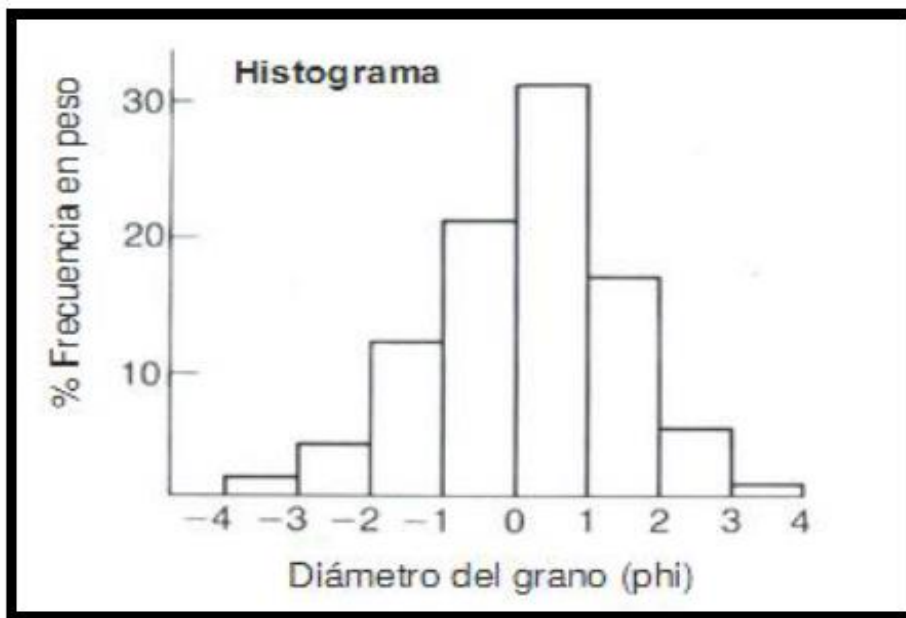
Fracturación por cizallamiento

En formaciones rocosas sedimentarias cuando los estratos presentan distintos módulos de elasticidad o parámetros geomecánicos, se produce la rotura en los planos de separación al paso de la onda de choque por las tensiones diferenciales o cortantes en dichos puntos.

II.4.2 INTERPRETACIÓN ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El grado de fragmentación generado por una tronadura puede ser representado de dos maneras:

- Histograma: Entrega una distribución no acumulada de tamaños o pesos de fragmentos de una determinada clase.
- Gráfico Acumulativo: Entrega una curva de distribución acumulada.



El análisis empleado para conocer el comportamiento de la Distribución Granulométrica de las partículas, en este trabajo de titulación será a partir de una Curva de distribución granulométrica acumulada, basada en dos variables representadas en un gráfico de escala.

Las variables que intervienen en el análisis, son:

- Porcentaje Pasante (Escala Natural)
- Diámetro de las Partículas (Escala Logarítmica)

II.4.3 VARIABLES DE PERFORACIÓN Y TRONADURA QUE INFLUYEN EN LA FRAGMENTACIÓN

La tronadura consiste en la fragmentación de la roca, ya sea estéril o mineral utilizando explosivos. El producto final que se obtiene depende de ciertas variables, las que pueden ser o no controladas. Dentro del primer grupo de variables, estas pueden clasificarse en tres grupos:

- 1) Geométricas: Diámetro de perforación, longitud de carga, burden, altura del banco, espaciamiento, pasadura, etc.
- 2) Químico -Físicas: Tipo de explosivo, potencia, energía, sistemas de cebado, etc.
- 3) Tiempo: Tiempos de retardo y Secuencia de Iniciación.

En la figura 8 se detalla el esquema de tronadura en banco, en donde las variables de diseño identificadas son las siguientes:

H: Altura de banco	Be: Burden efectivo
D: Diámetro de perforación	Se: Espaciamiento efectivo
L: Longitud del pozo	T: Taco
d: Diámetro de la carga	J: Sobreperforación o Pasadura
B: Burden: Burden	l: Longitud de carga
S: Espaciamiento Nominal	θ: Angulo de salida
LV: Longitud Voladura	v/w: Grado de Equilibrio
AV: Ancho de la Voladura	Tr: Tiempo de retardo

Diámetro de Perforación

El diámetro (D) óptimo para un trabajo depende de algunos factores tales como:

- Nivel de fragmentación requerida
- Altura del banco y dimensiones de las cargas
- Características del macizo rocoso
- Economía del proceso
- Dimensiones de los equipos de carga

En general, entre más grande sea el diámetro del barreno, mayores serán los problemas con la sobrepresión de aire, la roca en vuelo, la vibración y la fragmentación.

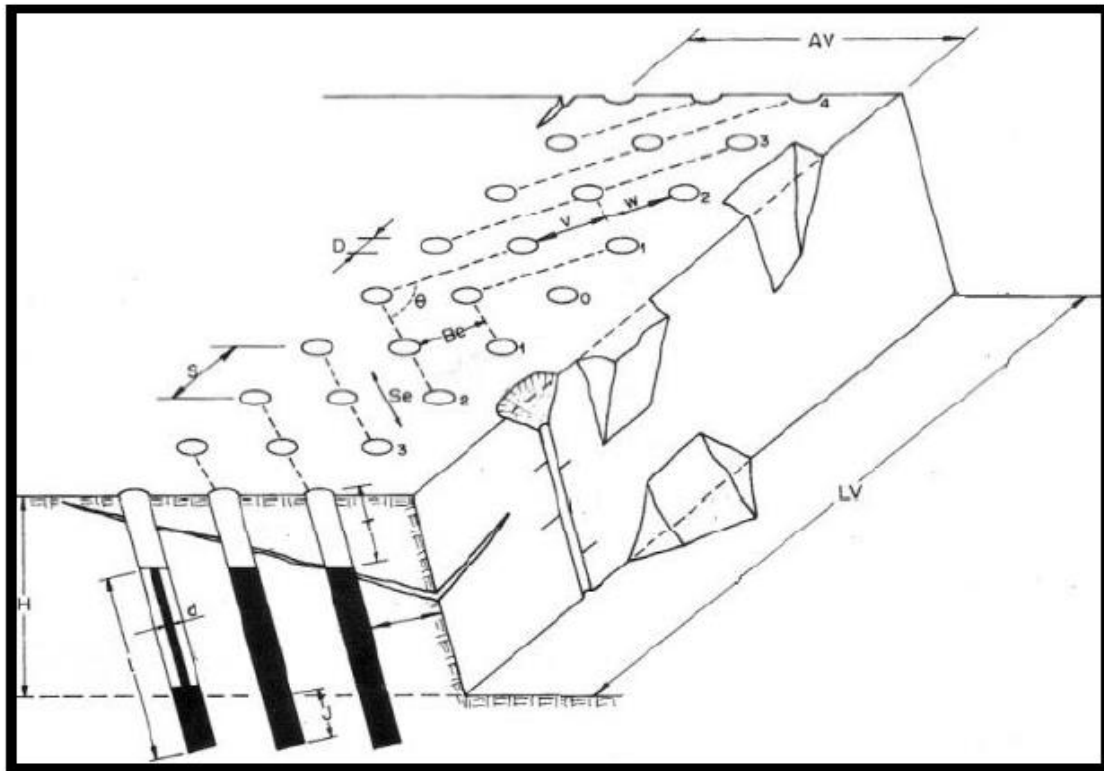


Figura II.8 Esquema de una tronadura en banco

Lo que empeora con la presencia de discontinuidades y diaclasas que presenten un espaciamiento amplio y conformen bloques in situ.

En esos casos se recomienda que el espaciamiento entre barrenos sea menor que la separación media entre fracturas. Se procede de igual manera si el área a volar está constituida por una matriz elasto-plástica que engloba bloques de roca sana que difícilmente pueden fragmentarse si no se intersectan con barrenos en una malla cerrada.

El aumento del diámetro tiene algunas ventajas las cuales son:

- Elevación velocidad de detonación de los explosivos, se producirá la detonación en un régimen más estable y menos afectado por condiciones externas.
- Posibilidad de mecanización de la carga de explosivo.
- Disminución del costo global de perforación y voladura.
- Mayor rendimiento de la perforación (m³ tronados/ml perforados).
- Aumento del rendimiento de la excavadora como consecuencia de la reducción de zonas de baja productividad.

Si el diámetro de perforación es pequeño los costos de perforación, iniciación y cebado serán altos, además las operaciones como carga, retacado y conexión tomarán más tiempo y se necesitará más mano de obra. El único punto a favor es la mejor distribución del explosivo lo que conlleva un consumo específico menor de éste.

Altura del Banco

La altura del banco relacionada con la dimensión del burden entrega una aproximación de cómo será la fragmentación obtenida, la roca en vuelo, la vibración del terreno y la sobrepresión generada. Este parámetro se denomina relación de rigidez y es la altura del banco dividida entre la distancia del burden (H/B).

Relación de Rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en Vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración Terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente

Tabla II.2 Relación de rigidez

De la tabla II.2 se desprende que mientras mayor sea esta relación se obtendrá una mejor fragmentación. Ash (1977) señala que la relación óptima es $H/B \geq 3$.

Cuando la altura del banco (H) es pequeña, cualquier variación del burden (B) o el espaciamiento (S) tiene una gran influencia en los resultados de las tronaduras. Cuando H aumenta, manteniendo B constante, el espaciamiento puede incrementarse sin verse afectada la fragmentación hasta un valor máximo.

Si las alturas de banco son muy grandes, pueden presentarse problemas de desviación de los barrenos que afectarán a la fragmentación de la roca, aumentarán el riesgo de generar fuertes vibraciones, proyecciones, y sobreexcavaciones, debido a que la malla de perforación B x S no se mantendrá constante en las diferentes cotas del barreno.

Inclinación de Barrenos

La inclinación de la perforación, en tronaduras en bancos tiene pros y contras. Generalmente en minas a rajo abierto donde se utilizan perforadoras rotativas, se tiende a realizar perforaciones verticales.

Las ventajas de la perforación inclinada son:

- Taludes más sanos y seguros en los nuevos bancos creados.
- Mejor fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la pila de material. (Burden más uniforme).
- Mayor rendimiento de la perforación, por unidad volumétrica arrancada.

- Menor consumo específico de explosivo al reflejarse de forma más eficiente la onda de choque en la pata del banco.
- Disminución del nivel de vibraciones por el mejor aprovechamiento de la energía del explosivo al tener menos sobreperforación.
- Menores problemas de descabezamiento de barrenos, disminuyendo así los cortes y fallo en las tronaduras.

Los contras de la perforación inclinada son:

- Aumenta la longitud de perforación.
- Mayor desviación de las perforaciones en bancos altos.
- Mayor desgaste de las brocas, varillaje y estabilizadores.
- Disminuye empuje disponible en las perforadoras, por lo que en rocas duras la velocidad de penetración se limita en proporción directa al ángulo de inclinación del mástil.
- Dificulta el posicionamiento de la perforadora.
- Problemas de carga de explosivo, especialmente en barrenos con agua.
- Dificultad en el barrido de detritus, se necesita un aumento del caudal de aire debido a las fuerzas de rozamiento.
- Menor disponibilidad mecánica de la perforadora, debido a los mayores esfuerzos de fatiga en el mástil y desgastes en el sistema de traslación.

Sobreperforación

La sobreperforación o pasadura (J), es la longitud de barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado, que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista. Si la sobreperforación es pequeña no se producirá el corte en la rasante proyectada, resultando la aparición de montículos, lo que aumenta los costos de carga.

Sin embargo una sobreexcavación excesiva también genera problemas los cuales son:

- Aumento costos de perforación y tronadura
- Fragmentación excesiva en la parte alta del banco inferior, que provocará problemas en la perforación del mismo y afectará en las zonas finales de corte a la estabilidad de los taludes.
- Incremento en el nivel de vibraciones
- Aumento del riesgo de sobreexcavación al acentuarse la componente vertical de desplazamiento de la roca.

Normalmente se cumple que $J=0.3B$

Taco

El taco o retacado (T), es la longitud de barreno que en la parte superior se rellena con un material inerte y cuya finalidad es confinar y retener los gases producidos en la explosión. Para que una carga de alto explosivo funcione adecuadamente, debe liberar el máximo de energía, y permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca. El confinamiento adecuado, también es necesario para controlar la sobrepresión de aire y la roca en vuelo (flyrocks). Si el taco es insuficiente se producirá un escape prematuro de los gases a la atmósfera, generándose problemas de onda aérea y riesgo de proyecciones. Por otra parte, con un taco excesivo se obtendrá gran cantidad de bloques procedentes de la parte alta del banco, poco esponjamiento de la pila de material y un nivel de vibración elevado. En la determinación del taco se deben tener en cuenta:

- El tipo y tamaño del material utilizado
- La longitud de la columna de taco

Generalmente se utiliza la relación $Taco=0.7 \text{ Burden}$; lo que constituye una distancia adecuada para evitar que salga material prematuramente del barreno.

Además aumentar o disminuir la longitud del taco, va a influir en la longitud de la carga explosiva, es decir, aumenta el taco disminuye la longitud de la carga explosiva y si disminuye el taco aumenta la longitud de carga.

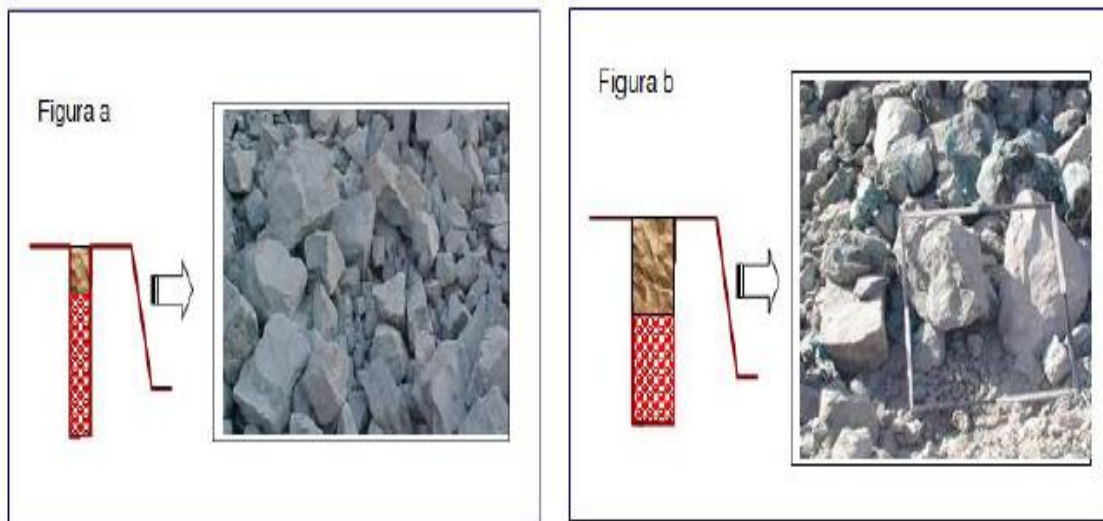


Figura II.9

- a) Mayor columna explosiva con menor diámetro del pozo (Menor Taco)**
- b) Menor columna explosiva con mayor diámetro del pozo (Mayor Taco)**

En la figura II.9 se realiza la comparación de la fragmentación obtenida con a) un taco menor y en b) utilizando un taco mayor que en a.

El material que se utiliza usualmente como taco es el detrito de perforación, debido a su disponibilidad junto a la broca sin embargo, los detritos muy finos comúnmente llamado polvo es un material muy pobre para el taco ya que no se traba contra las paredes del barreno y es fácilmente expulsado.

Actualmente se está también utilizando material granular anguloso proveniente de chancado dado que es más efectivo y la resistencia a la eyección de la columna de retacado aumenta con la disminución del contenido de humedad. Algunos estudios indican que el taco más eficaz se alcanza para tamaños de partículas entre $1/17 D$ y $1/25 D$. Las longitudes óptimas de taco aumentan conforme disminuye la competencia y la calidad de la roca entre $20D$ y $60D$. Siempre que sea posible debe mantenerse una longitud de taco superior a $25 D$ para evitar los problemas de onda aérea, proyecciones, cortes y sobreexcavaciones. En tronaduras múltiples, debe prestarse atención al taco de los barrenos de la primera fila,

sobre todo cuando el frente se encuentra con irregularidades que hacen que desde la cabeza al pie del banco la dimensión del burden varíe ampliamente. Ver figura II.10 desempeño del taco.

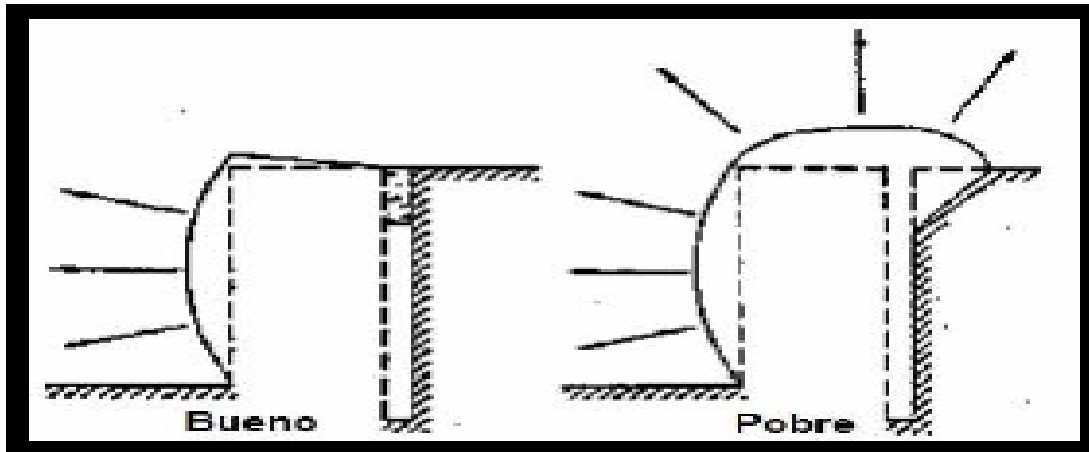


Figura II.10 Desempeño de la zona del taco

Burden y Espaciamiento

La dimensión del burden (B) se define cómo la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona. El alivio se considera normalmente cómo la cara original del banco o bien cómo una cara interna creada por una hilera de barrenos que han sido disparados previamente con un retardo anterior. El espaciamiento (S) es la distancia entre las perforaciones de una misma fila. Estas variables dependen del diámetro de perforación, de las propiedades de las rocas, de los explosivos, de la altura del banco, del grado de fragmentación y desplazamiento del material deseado.

Existen numerosas fórmulas para calcular el Burden las cuales generalmente lo sitúan en el rango de 25 a 40 D dependiendo de las propiedades del macizo rocoso.

Es muy importante asegurarse de que la dimensión del Burden sea la adecuada. Valores mayores o menores con respecto al teórico previsto pueden darse en las siguientes situaciones.

- Error en el posicionamiento o replanteo de la perforación
- Falta de paralelismo entre la perforación y la cara del banco

- Desviaciones de la perforación
- Irregularidades en la frente del talud.

Si el burden es demasiado pequeño, la roca es lanzada a una distancia considerable de la cara debido a que los gases se escapan y expanden a una velocidad muy alta hacia la frente libre. Los niveles de golpe de aire son altos y la fragmentación puede resultar demasiado fina. Por el otro lado, si el burden es muy grande, dará como resultado el rompimiento trasero y el bronqueo de la cara final (lanzamiento de material hacia atrás). Si el Burden es excesivo los gases de la explosión encuentran mucha resistencia para agrietar y desplazar la roca por exceso de confinamiento en los barrenos y parte de la energía se transforma en energía sísmica aumentando la intensidad de las vibraciones. Este fenómeno tiene su manifestación más clara en las voladuras de precorte donde el confinamiento es total y se registran niveles de vibración hasta cinco veces superiores a los de una voladura en banco.

Los burden excesivos también pueden ocasionar que los barrenos se escopeteen lanzando piedra a distancias considerables, los niveles de golpe de aire altos y la formación de cráteres ocurren cuando los barrenos sólo tienen el alivio hacia arriba. La fragmentación de la roca puede ser extremadamente gruesa y con frecuencia se tienen problemas en la parte baja o pata del banco.

En relación al Espaciamiento, este se calcula en función del Burden, del tiempo de retardo entre perforaciones y de la secuencia de encendido. Espaciamientos muy pequeños producen entre las cargas un exceso de trituración y roturas superficiales en cráter, bloques de gran tamaño por delante de la fila de barrenos y problemas de sobresaltos. Si el espaciamiento es muy grande los gases escapan a la atmósfera antes de que penetren completamente en las grietas formadas entre las perforaciones.

Razón Espaciamiento - Burden E/B en Tronadura Simultánea

Al detonar varios tiros iniciados en forma simultánea, los frentes de ondas de choque generadas por la detonación del explosivo, se propagan mediante superficies cilíndricas y por lo tanto, existen varios puntos de encuentro entre estas ondas producidas por dos tiros

sucesivos, ubicadas simétricamente respecto a la línea de carga (Ver Figura II.11), donde los esfuerzos que actúan sobre la roca son proporcionales a la suma de las intensidades de los frentes en dicha onda. Por lo tanto, al aumentar el espaciamiento entre las cargas para no generar una sobremolienda es válido según la teoría de propagación de las ondas de choque, por otro lado, al incrementar el espaciamiento con respecto al burden, el radio de curvatura de los frentes de la onda serán mayores y por ende las superficies de dichos frentes serán más cóncavas (Ver Figura II.12), provocando una fragmentación bastante mejorada debido a un mayor esfuerzo de cizalle a que se somete la roca en esta zona.

En la Figura II.12 se tiene que al variar el espaciamiento de E_1 a E_2 se tendrán dos situaciones totalmente distintas. En el caso a_2 se tiene una zona de menor sobremolienda con respecto al caso a_1 , mientras que la Figura II.12 bajo las mismas condiciones que la Figura II.11, tenemos la forma de cómo se propagan de las ondas, para el caso b_2 la forma de las ondas son más cóncavas que caso b_1 , producto del aumento en el espaciamiento ($E_1 < E_2$), existiendo una mayor superficie de propagación.

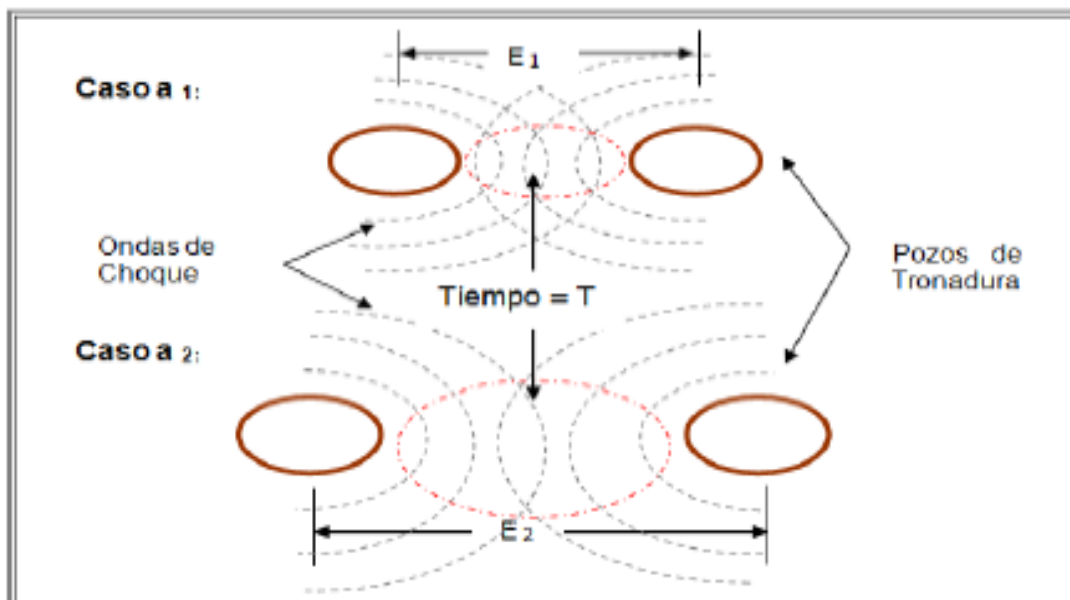


Figura II.11 Propagación de las Ondas de Choque en tiempos simultáneos para una variación en el espaciamiento de los pozos

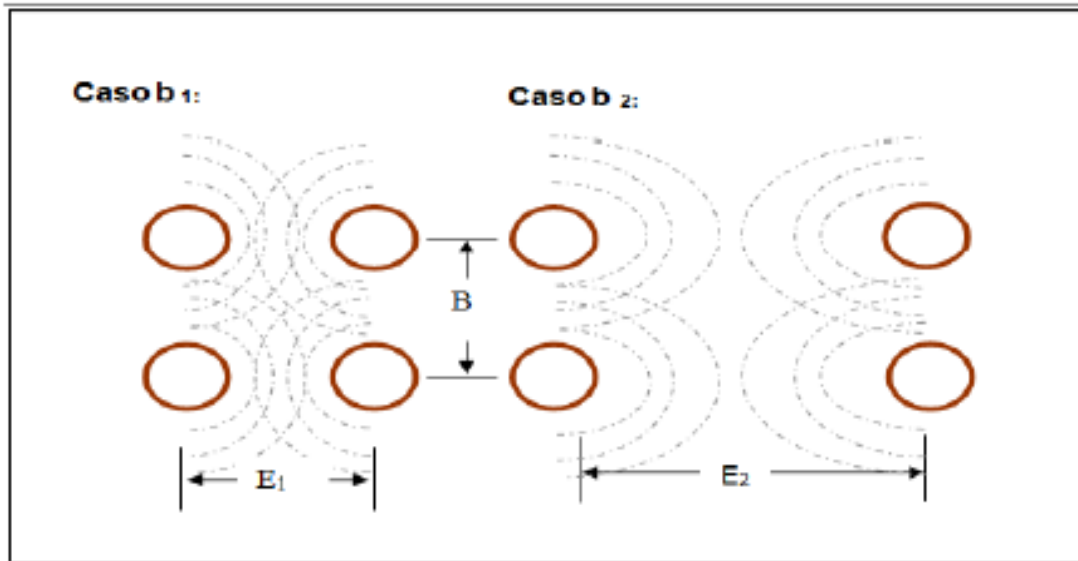


Figura II.12 Formas de Propagación de las Ondas de Choque en tiempos simultáneos para una variación en el espaciamiento de los pozos.

Esquema de Perforación

En las tronaduras en banco, generalmente, los esquemas utilizados son cuadrados o rectangulares debido a la facilidad de replanteo de los puntos a perforar. Sin embargo los esquemas más efectivos son las denominadas mallas trabadas (staggered) donde se forman triángulos equiláteros (Ver figura II.13), debido a que se produce una mejor distribución de la energía del explosivo en la roca y permite obtener una mayor flexibilidad en el diseño de la secuencia de encendido y dirección de la salida de la tronadura.

Geometría del Frente Libre

La geometría de la frente más efectiva, es aquella en la que cada punto de esa superficie equidista del centro de la carga de explosivo. Esta se consigue:

- Disponiendo la cara libre y los barrenos de forma que sean paralelos o formen el ángulo más pequeño posible.
- Estando la roca, próxima a la superficie, algo fracturada por las tronaduras precedentes.

- Diseñando una secuencia de encendido en la que cada barreno disponga de un frente que forme una superficie semicilíndrica convexa o biplanar.

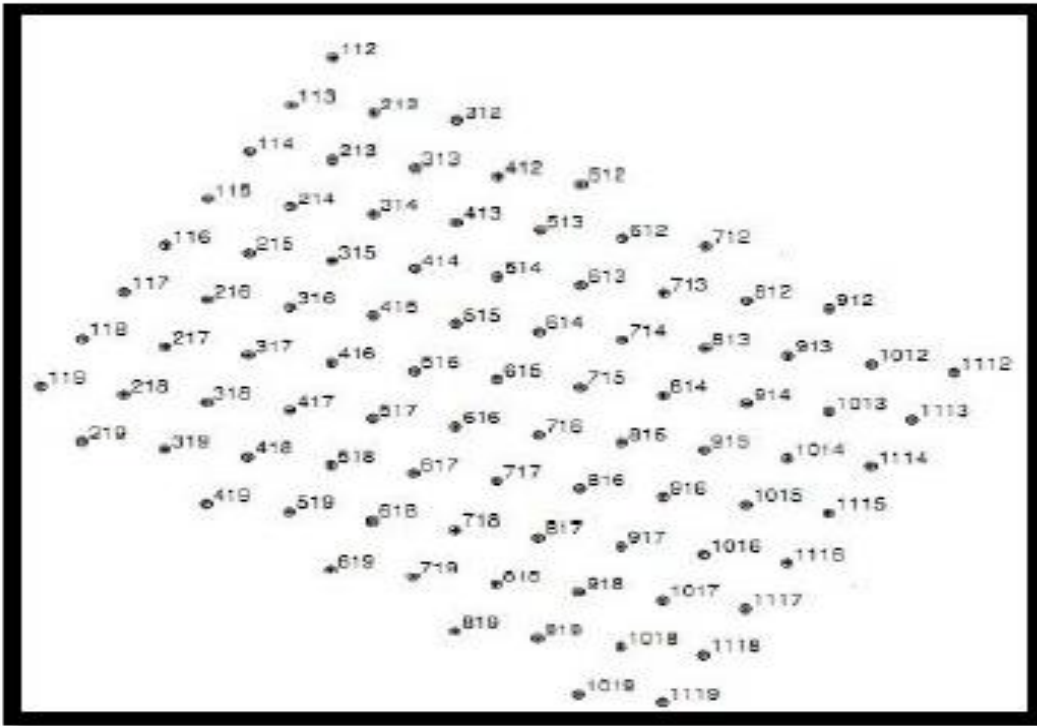


Figura II.13 Ejemplo Esquema de Perforación Malla Trabada 7x7

Tamaño y Forma de la Tronadura

Se obtienen mayores beneficios de tronaduras que abarcan una gran superficie, deben ser tan grandes como sea posible pues se obtienen las siguientes ventajas:

- Ahorro en el tiempo de supervisión y control que implica la tronadura
- Menor longitud porcentual de la zona perimetral de las tronaduras, donde se produce una fragmentación más deficiente debido a la mayor dificultad de establecer esquemas regulares, al riesgo de encontrar bloques preformados y al escape prematuro de los gases de las grietas existentes.
- Disminución de los tiempos improductivos de los equipos de perforación, carguío y transporte.

En general, la fragmentación en las tronaduras múltiples es mejor que en las de una sola fila. Por otra parte los inconvenientes que generan las voladuras con filas múltiples son:

- Aumento de la intensidad de las vibraciones y onda aérea producidas.
- Aparición de sobre excavaciones y proyecciones en las últimas filas si no se ha disparado con una secuencia correcta.
- En rocas muy blandas, reducción de la bonificación del volumen arrancado por sobre excavación al disminuir el número de voladuras.

En definitiva más tronaduras pequeñas significa más contactos entre tronaduras (sobre quebradura entre una y otra, fuente de sobre tamaño) y tronaduras más grandes, menos frecuencia de voladuras por día o semana, menos interferencia operacional (cortes de energía, despeje de palas, etc.) y mayor productividad.

Configuración de Cargas

Se utilizan columnas continuas de explosivos en barrenos de longitud pequeña, cuando las perforaciones son más profundas es conveniente utilizar cargas espaciadas ya que existe una mejor relación costo/efectividad.

Harries y Hagan (1979) demostraron que la tensión generada por la detonación de una carga aumenta cuando la relación L/D se incrementa de 0 a 20, permaneciendo constante a partir de ese valor.

De esta forma, empleando la relación $L/D = 20$ se obtendrá la fragmentación máxima y se alcanzará el valor óptimo del Burden. Si esas cargas son iniciadas en los puntos medios, se producirá una intensa fragmentación en las zonas hemisféricas de cada uno de los extremos, por lo que se ha visto que una carga continua con $L/D= 52$ no es mejor que la espaciada con $L/D= 20$ y un taco de $12D$ (Ver figura II.14)

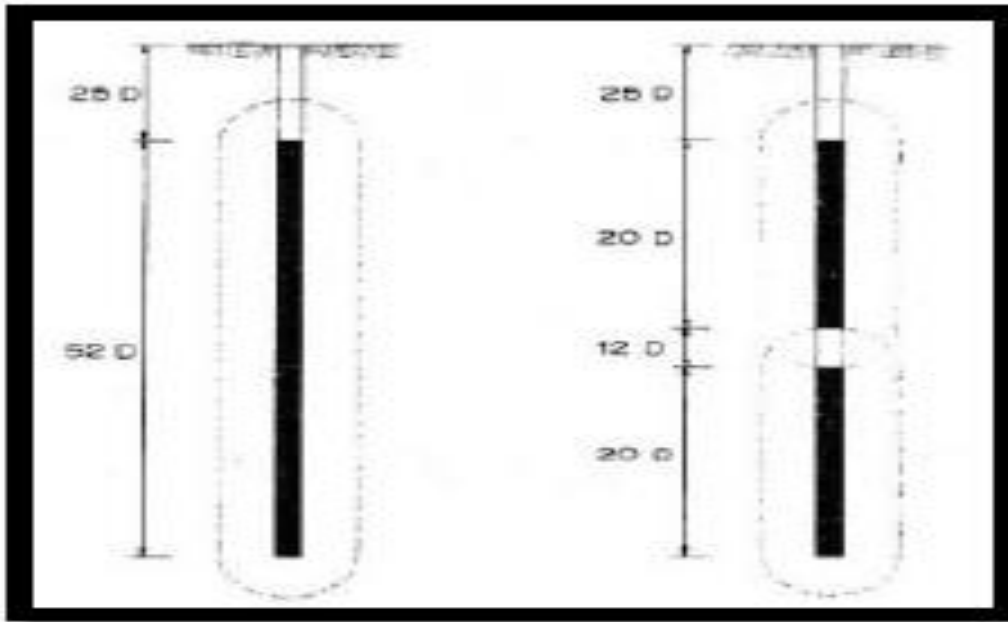


Figura II.14 Columnas de Cargas continuas y espaciadas

La utilización de cargas espaciadas también tiene sus desventajas dado que puede afectar el rendimiento en palas de ruedas como consecuencia del menor desplazamiento y esponjamiento del material. El uso o no de este tipo de configuración de cargas dependerá de la diferencia entre el ahorro potencial de explosivo y el tiempo, grado de complejidad y costo de iniciación añadido a la columna seccionada. El atractivo de las cargas espaciadas aumentará conforme los explosivos se encarezcan, el taco pueda mecanizarse y cuando las vibraciones constituyan una limitación y sea preciso disminuir las cargas operantes mediante el seccionado y secuenciado del explosivo dentro de un mismo barreno.

En rajo abierto las alturas de banco mínimas para poder dividir la columna de forma efectiva deben ser tal que $H/D > 70$.

Desacoplamiento de las cargas

Existen dos técnicas para controlar la presión de un explosivo encartuchado; por Desacoplamiento la cual consiste en dejar un hueco vacío o con material inerte entre la columna de explosivo y la pared del barreno. La otra técnica es el Espaciamiento de cargas, que se basa en dividir la carga por medio de separadores de aire o material poroso. Algunos estudios (Melnikov, 1972) han demostrado que empleando alguna de estas técnicas se mejora la fragmentación y uniformidad de la granulometría en ciertas rocas, además de reducir el consumo específico de explosivos y el nivel de vibraciones.

Explosivos

La función de un explosivo en la tronadura de un macizo rocoso, consiste en disponer de una energía, situada en un lugar apropiado y en cantidad suficiente, con el objetivo que cuando ésta se libere controladamente en tiempo y espacio, se obtenga una fragmentación del material rocoso adecuada.

La elección del explosivo requiere de conocer las propiedades de las rocas que se desean fragmentar y de los explosivos disponibles en el mercado.

Cuando se arrancan rocas masivas, casi toda la superficie específica del material se crea en la tronadura y los explosivos adecuados son los de mayor potencia y velocidad de detonación (VOD) que producen una alta presión de barreno. En rocas intensamente fracturadas o estratificadas en las que la superficie total de las discontinuidades representa un área relativamente mayor que la que se crea en la tronadura, los explosivos de baja densidad y velocidad de detonación son los de mayor eficiencia. Dado que además de fragmentar la roca se requiere un esponjamiento y desplazamiento del material para lograr efectuar la carga con un buen rendimiento, se debe determinar en cada caso el equilibrio entre la energía de tensión (ET) y la energía de los gases (ES).

Para un explosivo dado, esas energías dependerán del diámetro de las cargas, de la densidad y del sistema de iniciación.

Los parámetros más importantes de un explosivo, a la hora de cuantificar la fragmentación son la Presión de Detonación y la Potencia o fuerza, la primera de ellas es considerada

como el mejor indicador del potencial de fuerza o fragmentación, y la segunda se define como la máxima energía disponible de un explosivo para desplazar el medio confinante o bien, como la capacidad de un explosivo de fragmentar y desplazar el material en forma eficiente.

Consumos específicos de Explosivos

Se denomina Consumo Especifico (CE) a la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1m³ o 1Tn de roca. La distribución espacial de las cargas de explosivo dentro del macizo rocoso tiene una gran influencia sobre los resultados de las voladuras.

El "CE" de una voladura se incrementa con:

- Aumento del diámetro de las perforaciones, la resistencia de la roca y el grado de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento requerido.
- Una mala distribución de la carga, disminución del taco, tiempo inadecuado de retardo de las cargas.

Los consumos específicos altos proporcionan una buena fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la roca. Ayudan a alcanzar el punto óptimo de los costos totales de la operación (perforación, tronadura, carguío, transporte, chancado y molienda).

Cebado y Reforzadores de carga

Un cebo se define como una unidad explosiva que contiene un iniciador por otro lado un Reforzador es unidad explosiva de diferente composición a la de la carga principal y no contiene un dispositivo iniciador. Es iniciado por la carga de columna adyacente y se utiliza para poner energía adicional dentro de una capa de roca dura o difícil, algunas veces se coloca entre cada cartucho de explosivo para asegurar la trasmisión de la detonación a través de las uniones de los cartuchos.

Un cebado inadecuado puede ser costoso para el operador. Si la carga principal del barreno no se inicia apropiadamente, las plantillas de perforación por necesidad serán mucho más pequeñas de lo que normalmente serían. El tamaño de la fragmentación será más grande.

Además se puede causar vibración excesiva del terreno, golpe de aire, roca en vuelo y un daño considerablemente mayor detrás de la última hilera de barrenos de lo que ocurriría si se utilizaran procedimientos de cebado adecuados.

Estas unidades se utilizan para variar el equilibrio de energía para adecuarse a las características resistentes y estructuras de las rocas.

Tiempos de Retardo y Secuencia de Encendido

a) Tiempos de Retardo

Si un diseño esta perforado y cargado adecuadamente, el tiempo de iniciación controla el tamaño de la fragmentación, la pila resultante de material quebrado, el nivel de vibración máxima, la cantidad de ruido generado, la roca en vuelo producida (Flyrocks) y el rompimiento trasero y lateral.

Existen dos opciones para tiempos de iniciación. La primera es donde los barrenos dentro de una hilera son disparados instantáneamente o simultáneamente. La iniciación simultánea a lo largo de la hilera requiere de un espaciamiento mayor y por lo tanto, ya que los barrenos se encuentran más alejados, el costo por metro cúbico o por tonelada del material extraído se ve reducido. Las desventajas de tener iniciación simultánea a lo largo de la hilera, son los problemas que surgirán relacionadas con la vibración del terreno debido a que hay muchos barrenos detonando al mismo tiempo. Aunque se producen más metros cúbicos con la iniciación instantánea, la fragmentación será más gruesa que la obtenida con los retardos de tiempo adecuados y espaciamientos más cortos. La iniciación retardada a lo largo de la hilera reduce la vibración del terreno y produce una fragmentación más fina a un costo mayor

Mediante pruebas experimentales se ha demostrado que cuando los tiros son iniciados simultáneamente y cuando la Presión de detonación no excede la resistencia a la Compresión Simple de la roca, aumenta el tamaño medio de la fragmentación. Por otro lado, si el tiempo de retardo comienza a incrementar en forma constante, entonces, al encontrarse con una roca debilitada por la detonación anterior, el tamaño medio de la fragmentación disminuye. Esta situación estudiada por Bergmann-Wu y Eld, quienes

determinaron un comportamiento entre el tamaño medio de la fragmentación (X) y el tiempo de retardo por metro de Burden " T_e ", para una misma carga específica. (Ver Figura II.15), donde para T_e mayores a 2 (ms/m burden) los X se va haciendo constante independientemente los distintos valores de la relación S/B

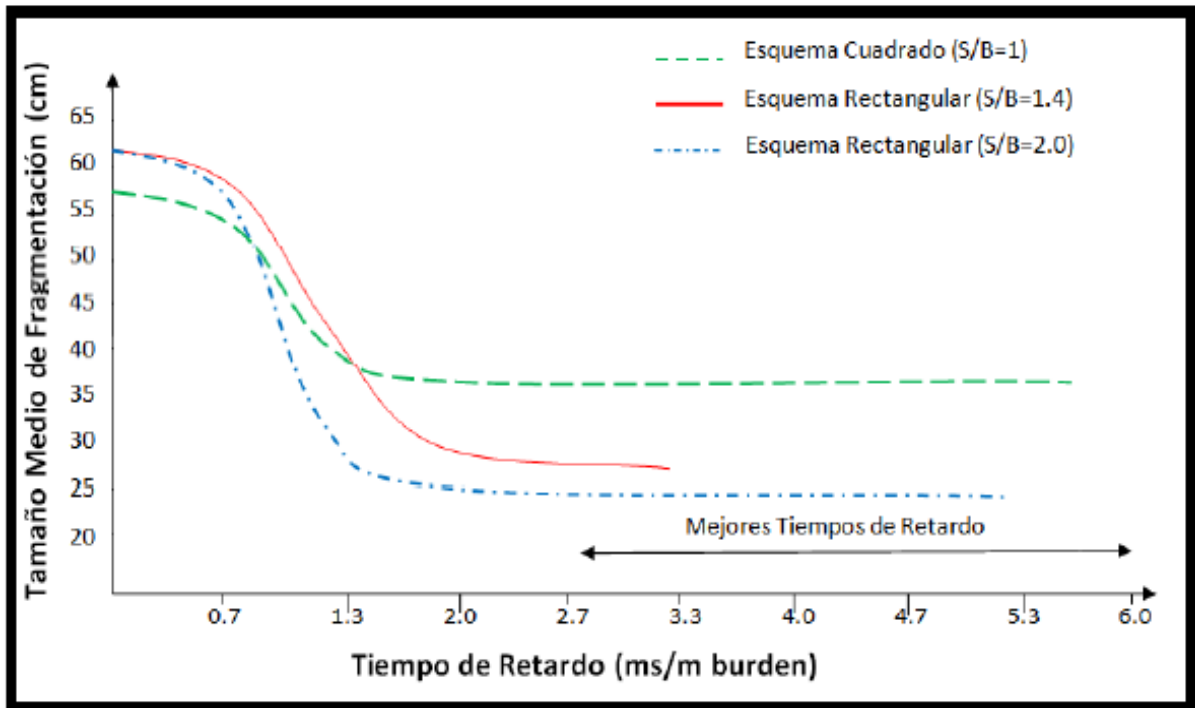


Figura II.15 Gráfico Variación del Tamaño Medio v/s Tiempo de Retardo

b) Retardos Fila a Fila

Los lineamientos para el retardo entre filas son los siguientes:

- Los retardos cortos causan pilas de roca más altos y pegados en la cara
- Los retardos cortos causan más rompimiento trasero
- Los retardos cortos causan más violencia, sobrepresión de aire y vibración del terreno
- Los retardos cortos tienen más potencial para causar roca en vuelo
- Los retardos largos reducen los niveles de vibración

- Los retardos largos reducen el rompimiento trasero

c) Secuencia de Salida de los Tiros

En un diseño de tronadura, lo primero que se determina es el burden y el espaciamiento, sin embargo, la secuencia de salida es quien determina el verdadero valor que toman estos parámetros, por lo tanto, el tamaño medio de fragmentación depende tanto del volumen de roca como de la carga explosiva asociada a un pozo, en consecuencia, dicho tamaño dependerá en forma relevante de la secuencia de salida de los tiros.

Sistemas de Iniciación

El sistema de iniciación transfiere la señal de detonación de barreno a barreno en un tiempo preciso. La selección de este, es muy importante en el éxito de una voladura. Sirve para disminuir las cargas operantes y por consiguiente los niveles de vibración, el tamaño de la fragmentación producida, el rompimiento trasero y las proyecciones.

Los sistemas de iniciación pueden ser Detonadores Eléctricos, Detonadores No eléctricos y Detonadores Electrónicos.

II.4.4 VARIABLES GEOMECÁNICAS QUE INFLUYEN EN LA FRAGMENTACIÓN

Existen ciertas condiciones que influyen en los resultados de la tronadura, que no se pueden controlar, por ello, es muy importante conocerlas y adaptarse a ellas. Estas corresponden a las propiedades físicas y mecánicas que tienen las rocas y el macizo rocoso, además de las condiciones geológicas constituyentes del terreno. Conocer estos parámetros es vital a la hora de diseñar una tronadura, dado que en esta se busca obtener una fragmentación óptima minimizando el daño al macizo rocoso.

Los materiales que constituyen los macizos rocosos poseen ciertas características físicas que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que sobre ellos han actuado. El conjunto de estos fenómenos conduce en un determinado entorno a una litología particular con unas heterogeneidades debidas a los agregados minerales policristalinos y a las discontinuidades de la matriz rocosa (poros y fisuras); y a una estructura geológica en un estado tensional característico, con un gran número de discontinuidades estructurales (planos de estratificación, fracturas, diaclasas, diaclasas, etc.).

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 más densas requieren una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, así como un buen desplazamiento y esponjamiento del escombros.

En rocas con alta densidad para que el impulso impartido a la roca por acción de los gases sea el adecuado, deberán tomarse las siguientes medidas:

- Aumentar el diámetro de perforación para elevar la presión del barreno.
- Reducir el esquema (Espaciamiento efectivo por Altura de banco) y modificar la secuencia de encendido.
- Utilizar explosivos con alta Energía de Burbuja.

- Mejorar la efectividad del taco para aumentar el tiempo que actúan los gases y hacer que estos escapen por el frente libre.

Resistencias Dinámicas de las Rocas

Las resistencias estáticas a compresión y a tracción se utilizaron en un principio como parámetros indicativos de la aptitud de la roca a la tronadura. Así se definió el Índice de Volabilidad (Hino, 1959) como la relación “RC/RT” de modo que a un mayor valor resultaría más fácil fragmentar la roca.

El tratamiento racional de los problemas reales obliga a considerar las resistencias dinámicas. Las resistencias de las rocas aumentan con la velocidad de carga pudiendo llegar en algunos casos a alcanzar valores entre 5 a 13 veces superiores a las estáticas. (Rinehart, 1958; Persson et al, 1970).

Cuando la intensidad de la onda de choque supera a la resistencia dinámica a la compresión se produce una trituración de la roca circundante a las paredes del barreno por colapso de la estructura intercrystalina. Pero esta trituración contribuye muy poco a la fragmentación y provoca una fuerte disminución de la energía de tensión.

Se recomienda:

- Utilizar explosivos que desarrollen en las paredes del barreno tensiones inferiores o iguales a la resistencia a la compresión (RC).
- Provocar variación en la curva de Presión-Tiempo por desacoplamiento de carga dentro del barreno.

Los parámetros dinámicos de la roca determinados en laboratorio no son representativos por la heterogeneidad y anisotropía de los macizos rocosos y por la imposibilidad de reproducir los ensayos en condiciones similares a los periodos de carga de una voladura que son inferiores a 0,1 ms.

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, provocados 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 porcentajes de finos.

El trabajo de fragmentación de rocas muy porosas se realiza, casi en su totalidad, por la energía de burbuja, por lo que deberán observarse las siguientes recomendaciones:

- Retener los gases de voladuras a alta presión con un dimensionamiento adecuado de la longitud y tipo de taco.
- Incrementar la Energía de Burbuja (EB) a costa de la Energía de Tensión (ET) mediante el desacoplamiento de las cargas y los sistemas de iniciación.(L. Jimeno,1980).
- Utilizar explosivos con una relación “EB / ET” elevada.

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.

Cuando se intersecta una cavidad por un barreno esta dificulta la perforación, y afecta la eficiencia de la tronadura. La existencia de cavidades en la zona de perforación trae como consecuencia:

- La rápida caída de presión de los gases al intercomunicarse el pozo con las cavidades, resultando el frenado de la apertura de grietas radiales al escapar los

gases hacia los espacios vacíos. Lo que implica que la fragmentación y el desplazamiento disminuirá.

- Prematura terminación de las grietas radiales al ser interrumpidas en su propagación por los huecos existentes.

Fricción Interna

Como las rocas no constituyen un medio elástico perfecto, 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 Amortiguación Específica” (SDC), que miden la disponibilidad de las rocas para atenuar la onda de tensión generada por disponibilidad de las rocas para atenuar la onda de tensión generada por la detonación del explosivo. La SDC varía con el tipo de roca y aumenta con la porosidad, la permeabilidad, las diaclasas y el contenido en agua de la roca. También aumenta considerablemente con los niveles meteorizados en función de su espesor y alteración.

La intensidad de la fracturación debida a la onda de tensión aumenta conforme disminuye la fricción interna. Así por ejemplo, las emulsiones son más efectivos en formaciones duras y cristalinas que en los materiales blandos. Por el contrario, en éstos últimos, el ANFO es más adecuado a pesar de su menor energía de tensión.

PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

Planos de Discontinuidades Preexistentes

Las Fisuras, fallas y discontinuidades preexistentes en la roca afectan a favor o en contra a la generación y desarrollo de las fisuras provocadas por la detonación del explosivo (fracturas por tensión, radiales, flexurales y por descostre), por tanto bien controladas contribuyen a mejorar la fragmentación y el costo de tronadura.

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. En el caso de tronaduras de producción, un porcentaje de la pila de material se presentara en tamaños superiores al admitido por el equipo de carga y el chancador, por lo que se requerirá una fragmentación adicional, aumentando así los costos de producción.

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 diaclasas.

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

En discontinuidades cerradas o bien cementadas, las grietas radiales inducidas por la detonación las cruzaran permitiendo su propagación a través del macizo rocoso. Cuando las discontinuidades están abiertas y sin material de relleno, la reflexión de la onda de choque puede originar la fracturación por descostramiento interno (Figura II.16).

Las grietas radiales serán en este caso interrumpidas prematuramente al no transmitir esfuerzos de tracción, se mejorara la fragmentación entre el pozo y la discontinuidad, pero se reducirá al otro lado de esta.

La fragmentación está influenciada por el espaciamiento entre taladros, la separación entre diaclasas y el tamaño máximo de bloque admisible.

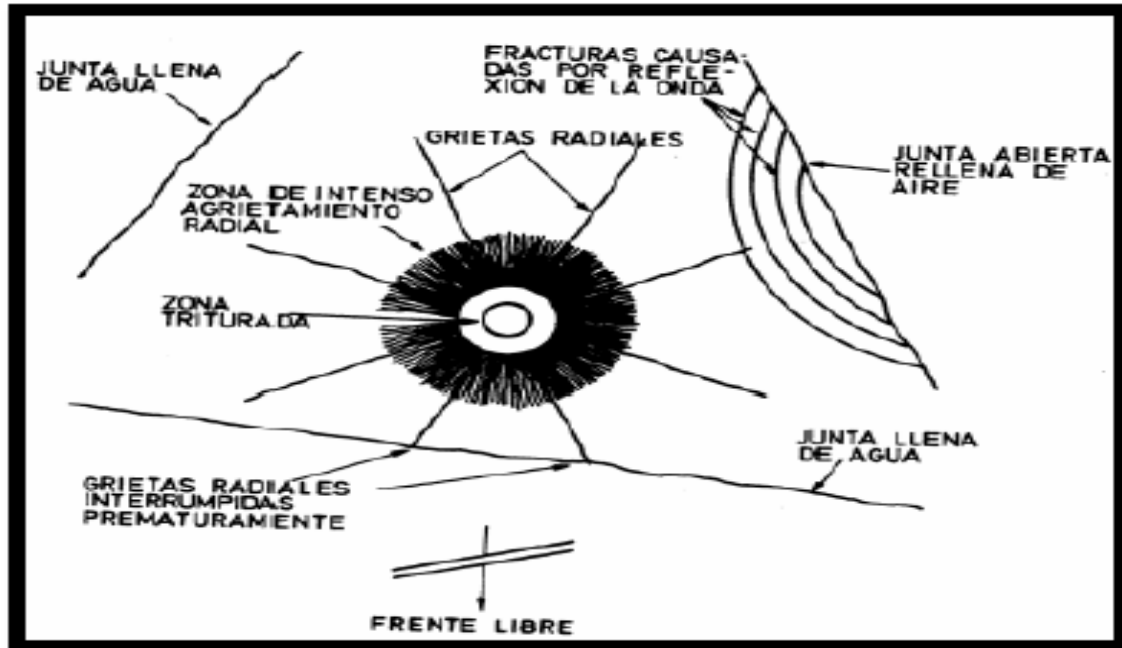


Figura II.16 Trituración y agrietamiento radial alrededor de un barreno y descostramiento interior por reflexión de la onda de choque

Otro aspecto del diseño de las voladuras es lo que se entiende por control geoestructural del macizo rocoso, que se refiere a la orientación relativa del frente y dirección de salida de la secuencia con respecto a la dirección y buzamiento de los estratos.

La mejor fragmentación se obtiene cuando la dirección de abatimiento forma 90° con la dirección predominante de las discontinuidades (Belland, 1966).

Cuando la estratificación o los sistemas de diaclasas presentan una pequeña inclinación $<30^\circ$ se recomienda que las perforaciones sean normales a dichos planos para aumentar el rendimiento de la tronadura y mejorar la fragmentación.

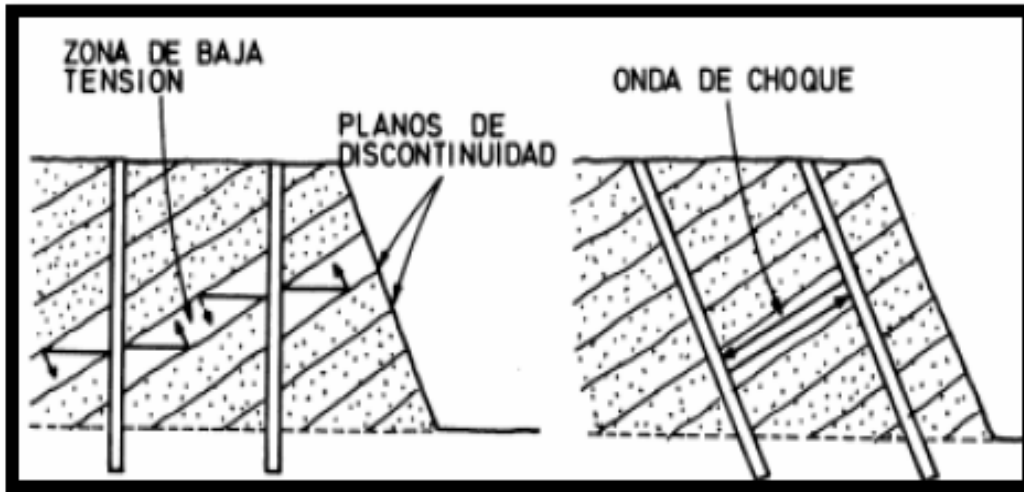


Figura II.17 Mejora la fragmentación con la perforación inclinada

Litología

Las voladuras 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, basado en:

- Esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias.
- Distinto esquemas pero con igual carga por pozo. Esta disposición suele adoptarse manteniendo igual la dimensión del burden, ya que la introducción de un esquema “BxS” distinto en cada zona supondría una mayor complejidad de perforación y un escalamiento del nuevo frente creado.

Cuando se encuentran en contacto dos materiales de características resistentes muy diferentes, como por ejemplo una caliza competente en contacto con arcillas muy plásticas, y si los barrenos atraviesan estas formaciones, tendrá lugar una gran pérdida de energía asociada con la caída de presión y escape de los gases al producirse deformaciones plásticas de dichos materiales blandos y, por consiguiente, se obtendrá una mala fragmentación.

Existen algunos consejos para mejorar el rendimiento de la tronadura:

- Emplear carga de explosivos totalmente acopladas a la roca competente con una gran velocidad de detonación y una relación de ET/EB alta.
- El taco de material adecuado para aquellas zonas del barrenado que estén en contacto con material plástico o próximo a ellas.

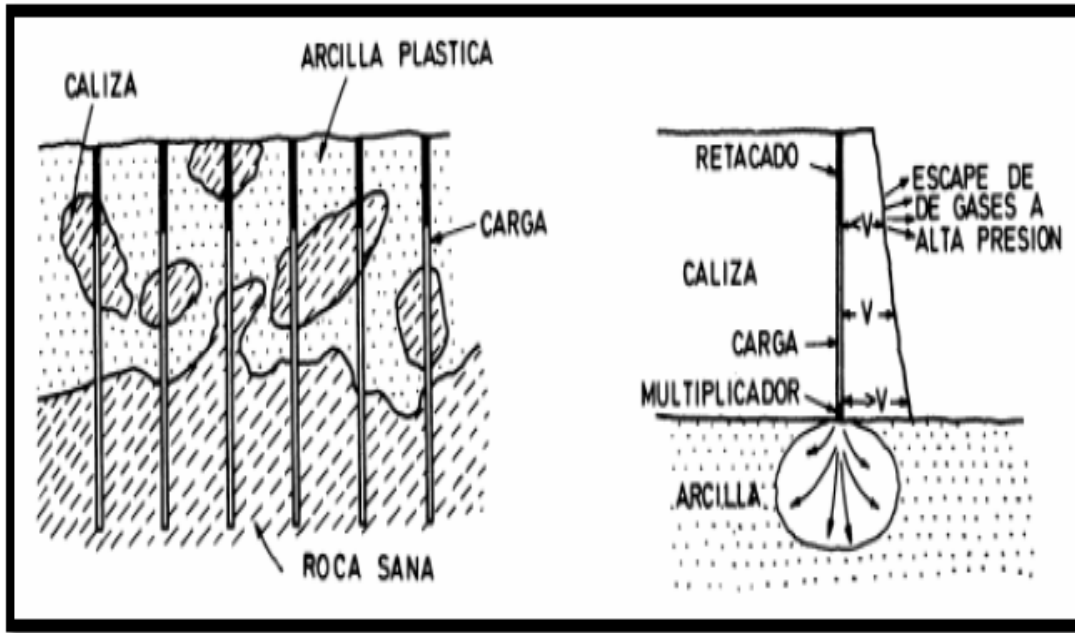


Figura II.18 Casos típicos de cambios litológicos con contacto entre rocas competentes y materiales plásticos 68

- Evitar el escape prematuro de los gases a la atmosfera asegurando que tanto la longitud del taco y la dimensión del burden son correctas en la parte superior de los pozos.
- Situar los multiplicadores en el punto medio de la roca dura para incrementar la resultante de la onda de tensión que actúa a ambos lados.

Presencia de agua

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

- Pérdidas de pozos por hundimientos internos.
- Necesidad de utilizar explosivos no alterables por el agua.
- Dificultad para perforar de forma inclinada.

También 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 la compresión y tracción (Obert y Duval, 1967), al ser menor la fricción entre partículas.
- Las diaclasas llenas de agua permiten el paso de las ondas de tensión sin que se produzca un descostramiento interno. Pero cuando el macizo entra en tensión, el agua se moviliza ejerciendo una acción de cuña que puede llegar a producir una gran sobreexcavación.

CAPÍTULO III: PROPUESTAS Y METODO DE OPTIMIZACION

Una vez conocido el yacimiento desde el punto de vista geológico-geotécnico, las propiedades del macizo rocoso, las variables técnicas del proceso de perforación y tronadura y las variables que afectan la fragmentación estamos en condiciones de generar propuestas al proceso de Tronadura Mina- Planta de Chancado.

La metodología de estas propuestas se realizara mediante casos de estudios en distintas zonas mineralizadas a alimentar a la planta de chancado. Esta es la forma conocida y propuesta en la hipótesis de determinar las variables idóneas para el logro de una banda granulométrica homogénea, esto es, la sectorización de áreas en la fase 4 de explotación (fase escogida para el estudio).

III.1 SECTORIZACION DE AREAS Y ANALISIS DE INFLUENCIA EN LA GRANULOMETRIA DEL MINERAL

Cuando no se obtiene una granulometría óptima con la tronadura, es decir, no se logra el porcentaje de finos requerido; que es el 40% del material pasante bajo 25 mm (determinado para mina Gaby), se deben tomar medidas y reconsiderar los parámetros controlables que influyen en la fragmentación. Por ello, en base a los resultados de los muestreos realizados que arrojaron zonas donde no se logra este objetivo, se efectuaron cambios y se muestrearon nuevamente estas mismas zonas en el banco siguiente, con el propósito de cuantificar si hubo o no mejoras.

Además de determinar así, la influencia que tienen estos parámetros controlables en la granulometría y finos generados. Puesto que la geología, factor también influyente en la fragmentación, entre un banco y otro no varía mucho, lo que está respaldado con el análisis realizado en el capítulo II “Antecedentes Generales División Gabriela Mistral” en el punto II.1 “Caracterización Geológica”.

La granulometría obtenida con la tronadura debe cumplir ciertos requisitos los cuales son:

- El 40% del material pasante debe ser del tamaño de 25 mm o menor.
- El 100% del material pasante debe estar bajo el tamaño de 250 mm.

- La distribución granulométrica debe ser homogénea.

Todo esto para facilitar los procesos aguas abajo (chancado primario, secundario, terciario, lixiviación, etc.)

Cabe señalar que en algunas tronaduras se utiliza más de un tipo explosivo, es el caso de tronaduras con pozos buffer, donde se emplea el explosivo Flexigel. Para este estudio no se considera el efecto que se provoca en los bordes, puesto que cuando se realiza el muestreo, el material procesado en chancado primario proviene del centro del sector tronado, donde se puede determinar el efecto inducido por el explosivo principal.

El análisis que se realizará corresponde al porcentaje de incremento o disminución de finos producidos, considerando la influencia de la geología constante y atribuyendo ésta variación a la modificación de los parámetros de perforación y tronadura.

Los sectores estudiados corresponden a los señalados en la figura III.1:

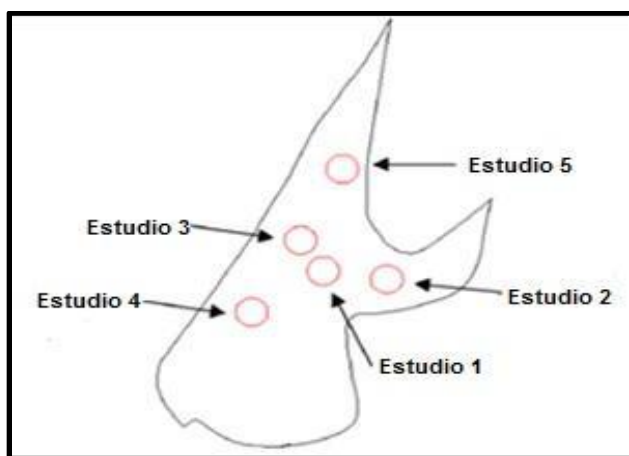


Figura III.1 Vista en planta fase 4, sectores muestreados

Para las zonas señaladas en la figura III.1, se muestreo el banco superior (2580 en la mayoría de los casos), para después variando parámetros, como malla de perforación, explosivos y factor de carga, buscar obtener una mejor fragmentación.

Posteriormente se compara con nuevos muestreos realizados en el mismo sector, en bancos más profundos. (Bancos 2565 y 2550).

Téngase en cuenta que los parámetros a modificar para todos los estudios posteriores corresponden a Burden (B), Espaciamiento (S), y taco en metros y Factor de Carga (FC), en gramos por tonelada (g/t).

Además los nombres de las mallas (entiéndase por malla al área o polígono donde se realiza una tronadura), que se utilizan durante el estudio (ejemplo: malla 09), corresponden a la identificación determinada en el momento de diseño de la tronadura, donde en ocasiones se unen dos mallas diseñadas con anterioridad y se tronan al mismo tiempo (malla 10_11) con una nueva configuración, vale decir se genera un área mayor, con más pozos cargados que genera un nivel de vibraciones mayor, lo que influye en la secuencia de detonación que se utilizara.

En general el nombre de las mallas está asociado al polígono de extracción del sector.

El muestreo es realizado por la empresa contratada, la cual entrega un informe del **Análisis Granulométrico** realizado en la correa CV-001 del chancador primario.

(Ver anexo N°1).

El proceso desarrollado para realizar el muestreo, consiste en la detención del chancado primario, antes de ello se carga un último camión con material de la malla que se desea muestrear, el cual se dirige a chancado primario, en donde descarga, el material es procesado y pasa por la correa, es en ese momento cuando ésta se detiene y se procede con la operación de muestreo, tomando las medidas de seguridad correspondientes. Se extrae cierta cantidad de kilos de material y se realizan tamizajes.

La información correspondiente a los parámetros de tronadura es extraída del protocolo de tronadura, este es un documento oficial en donde se detallan las características de cada tronadura tales como: burden, espaciamiento, cantidad de pozos, kilos de explosivo utilizado, etc. Y que debe ser autorizado por el supervisor de la empresa contratada, el Ingeniero de tronadura y el Superintendente de Chancado Primario y Tronadura de DGM, lo que constituye un respaldo en caso de cualquier acontecimiento irregular. **(Ver anexo N°2 Protocolo de Tronadura).**

Los estudios realizados fueron los siguientes:

III.1.1 Caso de Estudio 1

Muestreo 1 realizado a la malla 03_03B_05A del 11 de febrero banco 2580 correspondiente al sector Centro de Fase 4, el resultado obtenido fue un 34,7% finos, como este porcentaje no cumplió con el óptimo requerido de 40%, se generaron modificaciones en el diseño de la tronadura por ello, se muestreo el mismo sector, malla 11 banco 2565 del 13 de mayo, donde el porcentaje de finos fue de 58,24%.

Los parámetros utilizados fueron:

Muestreo	Banco	Tronadura	B	S	FC	Taco	Explosivo	Litología	Zona
M1	2580	03_03B_05A	7	9	291	7	FM30	80% GD	Centro
M11	2565	11	8	9	246	7	FM50		

En la tabla III.1 se detalla la información obtenida de los protocolos de tronadura (ver anexo 2, formato Protocolo de Tronadura), donde se determinan los parámetros de diseño utilizados en las tronaduras muestreadas.

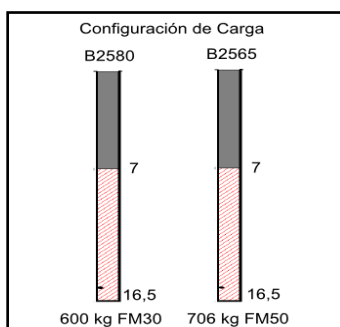


Figura III.2 Configuración de carga Caso de Estudio 1

En la figura III.2 se aprecia la configuración de carga para un pozo de cada una de las tronaduras muestreadas, en donde, en el banco 2580 fue cargado con Fortan Mex 30, se utilizó 600 kg y mientras que en la tronadura del banco 2565, empleando Fortan Mex 50 se cargaron 706 kg por pozo, con la misma dimensión de taco en ambas mallas.

Dado los requerimientos en perforación en el banco 2565 (se necesitaban perforar los pozos en menor tiempo), se aumentó el burden para generar una malla de mayores dimensiones que la utilizada en el banco 2580, sin embargo se cambió de explosivo a uno de mayor

densidad, lo que implica disponer de una mayor energía para contrarrestar el efecto provocado en la fragmentación por una malla más grande. (Ver anexo N°3 Hoja Técnica de Explosivos).

El cambio de explosivo se realiza en consenso con los técnicos consultores de la empresa que está a cargo de entregar el servicio de explosivos a División Gabriela Mistral. Se detectaron las necesidades de mejorar la fragmentación y puesto que se determinó aumentar la malla de perforación, se optó por un explosivo más energético, dado los buenos resultados obtenidos en otras faenas.

La variación de la fragmentación entre las tronaduras estudiadas se puede ver en la figura III.3, gráfico de las curvas granulométricas.

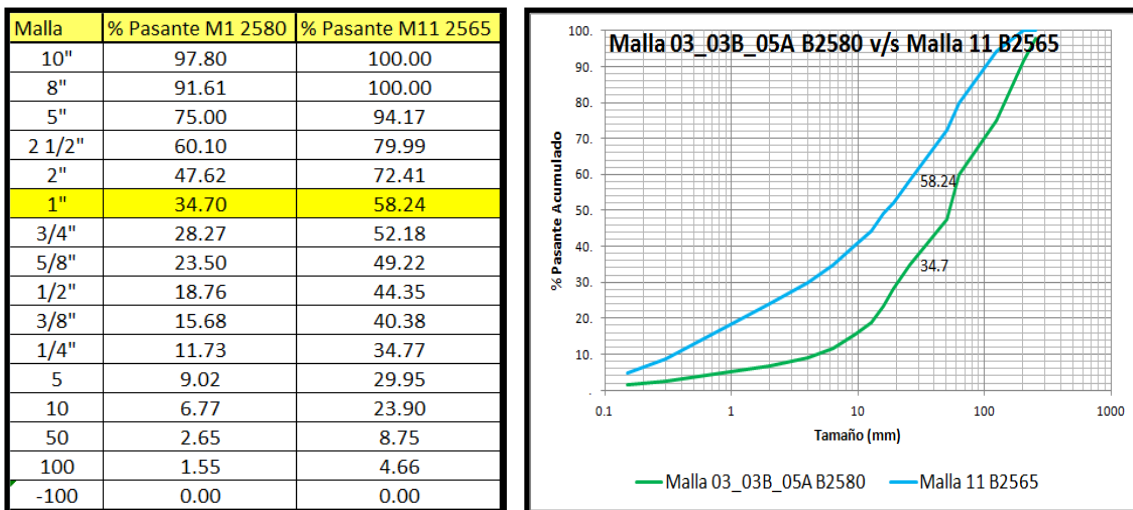


Figura III.3 Gráfico Curvas Granulométricas Estudio 1, Malla 03_03B_05A B2580 y Malla 11 B2565.

El resultado obtenido del análisis granulométrico como se puede ver en la figura III.3, indica que la fragmentación obtenida al variar el diseño de la tronadura (curva granulométrica malla 11 B2565), mejoro en cada una de los tamices muestreados, la curva en general se ubicó unos puntos más arriba que la obtenida del primer muestreo en el banco 2580, lo que apunta a porcentajes mayores de granulometría de menor tamaño.

El porcentaje de finos, principal parámetro de comparación entre las curvas, aumento en 23,54%.

Esto implica que el uso de explosivos más energéticos si influye en la generación de finos.

El costo por tonelada removida varió de 0,17 US\$/t a 0,21 US\$/t, debido al mayor precio del nuevo explosivo.

III.1.2 Caso de Estudio 2

Se realizó un muestreo (Figura III.1), en el sector Este de la fase banco 2580, donde se obtuvo una muy buena fragmentación, llegando al 48,32% de finos 1". Posteriormente se efectuó, nuevamente un control de la granulometría en el banco siguiente (2565), para determinar si el sector continuaba generando buenos resultados. Lo que se obtuvo fue un mayor porcentaje de finos que llegó al 51,72%.

Los parámetros de diseño de la tronaduras utilizados fueron los indicados en la tabla 4.

Tabla III.2 Parámetros Perforación y Tronadura Malla 06 B2580 y Malla 11_18 B2565.

Muestreo	Banco	Tronadura	B	S	FC	Taco	Explosivo	Litología	Zona
M3	2580	06	7	9	233	7	FM30	100% GD	Este
M16	2565	11_18	9	10	240	7	FA50G		

Dado los buenos resultados en el banco 2580, se optó por agrandar la malla de perforación en el banco 2565, sin embargo el explosivo utilizado (Fortan Advantage 50 gasificado, posee una mayor energía relativa efectiva que el Fortan Mex 30), lo que ayuda a mejorar la fragmentación.

Los cambios generados en la malla de perforación fueron determinados teóricamente y basados en experiencias anteriores, es decir no se realizaron cálculos ni uso de software para decidir el tamaño de la nueva malla. Esta medida fue tomada en conjunto por los técnicos consultores de la empresa asesora y el ingeniero de tronadura de la minera. Al igual que el cambio de explosivos, puesto que es determinado dentro de gama de explosivos, que son los productos que ofrece la empresa asesora.

Los pozos fueron cargados según la siguiente configuración:

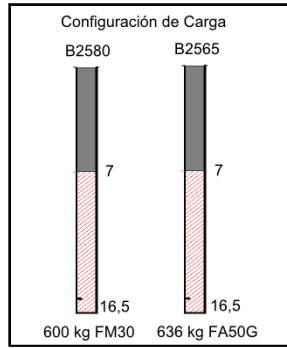


Figura III.4 Configuración de Carga Estudio 2

La configuración utilizada para cargar los pozos (figura III.4), muestra que para la malla 11_18, se utilizaron más kilos de explosivo Fortan Advantage 50 gasificado, que en la malla 06 cargada con Fortan Mex 30. Sin embargo el explosivo al ser gasificado, la cantidad necesaria es menor a la que se hubiera utilizado con Fortan Advantage 50 sin el proceso de gasificación.

Malla	% Pasante M3 2580	% Pasante M16 2565
10"	100.00	99.11
8"	96.34	92.86
5"	89.29	85.30
2 1/2"	72.69	74.96
2"	64.27	68.11
1"	48.32	51.72
3/4"	42.73	47.19
5/8"	40.61	42.83
1/2"	36.21	38.15
3/8"	33.22	34.82
1/4"	29.12	29.27
5	25.38	25.24
10	19.78	21.01
50	5.60	8.39
100	2.61	5.96
-100	0.00	0.00

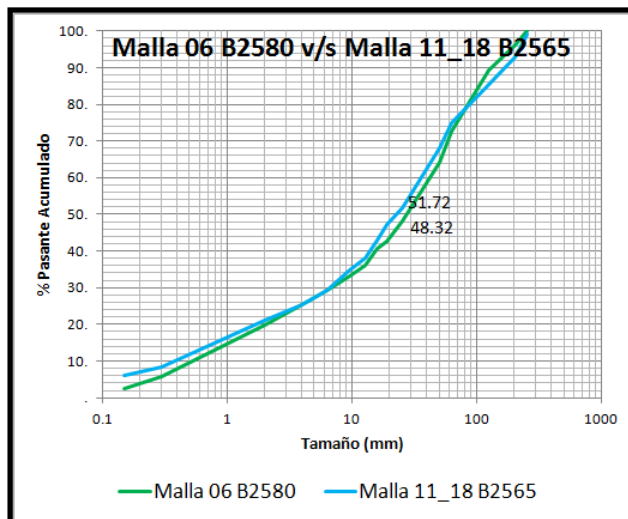


Figura III.5 Gráfico Curvas Granulométricas Estudio 2, Malla 06 B2580 y Malla 11_18 B2565.

El gráfico (figura III.5) muestra los resultados del muestreo N°3 (Malla 06 banco 2580) versus el obtenido en el banco 2565, en el mismo sector pero con cambios en el burden, espaciamiento y explosivos. Además se resalta en porcentaje de finos de cada una de las curvas, parámetro de vital importancia en este estudio.

Existe un leve aumento del porcentaje de finos de 3,4%, en general las curvas granulométricas se ajustan con mínimas variaciones, poseen una distribución granulométrica similar.

Nuevamente, la elección del explosivo que se utiliza, es de vital importancia para obtener buenos resultados de fragmentación, puesto que al aumentar la malla se espera que la fragmentación obtenida tienda a ser más gruesa (según fundamento teórico, capítulo 3). Sin embargo este efecto se ve contrarrestado al utilizar el explosivo Fortan Advantage 50 Gasificado.

EL costo por tonelada removida aumento levemente, ya que varió de 0,18 US\$/t a 0,19 US\$/t, costo asociado al cambio de explosivo.

III.3 Caso de Estudio 3

Realizado en la zona Oeste de la fase, donde se tenía antecedentes en bancos superiores, de baja generación de finos. La tronadura muestreada en el banco 2580 fue malla 10_11, cuyos resultados del análisis granulométrico indicaron un porcentaje de 17,58% correspondiente al material pasante de tamaño 1”, muy lejano al 40% requerido.

En el banco de explotación siguiente (2565), se modificó la malla de perforación y el explosivo utilizado, la tronadura muestreada fue la malla 09, donde mejoro notoriamente la fragmentación obtenida alcanzando un 41,8% del material bajo 1”.

La información sobre las tronaduras muestreadas está en la tabla III.3.

Tabla III.3 Parámetros Perforación y Tronadura Malla 10_11 B2580 y Malla 09 B2565.

Muestreo	Banco	Tronadura	B	S	FC	Taco	Explosivo	Litología	Zona
M7	2580	10_11	7	9	195	6.5	ANFO	GD-BI	Oeste
M10	2565	09	7	7	249	6.5	FM50		

En la tabla III.3 se detalla la información obtenida de los protocolos de tronadura, donde se determinan los parámetros de diseño utilizados en las tronaduras muestreadas.

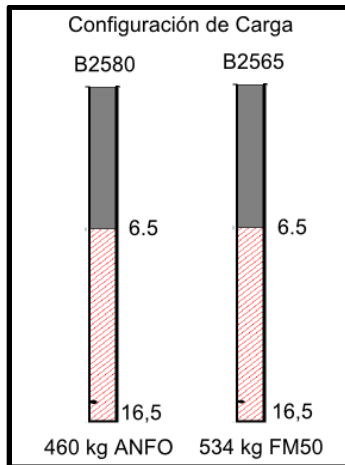


Figura III.6 Configuración de carga Estudio 3

Los pozos fueron cargados con 460 kg de Anfo en la malla 10_11 del banco 2580 y con 534 kg de Fortan Mex 50 en la malla 09.

En este caso también se utilizó Flexigel 80 para el borde donde se cargaron pozos con 328 kg.

Recordando que en lo que respecta a este estudio, los explosivos de baja densidad utilizados para contornos (Flexigel), no representan importancia alguna. El dato anterior solo añade información extra, sin influir en los resultados del estudio.

Se mantuvo la dimensión del burden, pero el espaciamiento se disminuyó para formar una malla más pequeña, que permitiera que los gases de la tronadura penetraran fácilmente en las grietas, y así generar una fragmentación más fina.

La experiencia de las personas a cargo de la tronadura, fundamenta el cambio generado en el diseño además de los resultados obtenidos, puesto que en el estudio 4 en la malla 07A del banco 2565 que constituyó el muestreo 9, se utilizó una malla de perforación de 7x7 con Fortan Mex 50 y generó un 38,1% de finos y se optó en este caso por emular dicho diseño.

En la figura III.7 se aprecia los resultados granulométricos obtenidos de los dos muestreos considerados en el estudio 3.

El gráfico muestra las curvas granulométricas de los dos muestreos realizados en el sector, donde la primera curva (muestreo 7 malla 10_11 banco 2580), denota una distribución más gruesa (se encuentra varios puntos más abajo y tiende a tamaños mayores), que la del muestreo 10 (malla 09 banco 2565).

Los resultados de fragmentación obtenidos al variar las dimensiones de la malla y el explosivo fueron claramente superiores a los alcanzados en el primer muestreo de ese sector (muestreo 7 malla 10_11), puesto que el 100% del material estuvo bajo las 10” de tamaño, además el porcentaje considerado finos en la malla 09 del banco 2565, aumento en 24.22%, superando el 40% requerido, lo que supone que en el sector es posible obtener una buena fragmentación con un diseño adecuado de la tronadura.

Malla	% Pasante M7 2580	% Pasante M10 2565
10"	96.78	100.00
8"	85.05	95.41
5"	61.46	86.42
2 1/2"	36.77	70.23
2"	30.26	62.59
1"	17.58	41.80
3/4"	13.76	34.28
5/8"	12.34	31.52
1/2"	9.99	25.55
3/8"	8.45	21.48
1/4"	6.80	15.68
5	5.56	11.45
10	4.22	8.64
50	1.75	4.29
100	1.13	3.05
-100	0.00	0.00

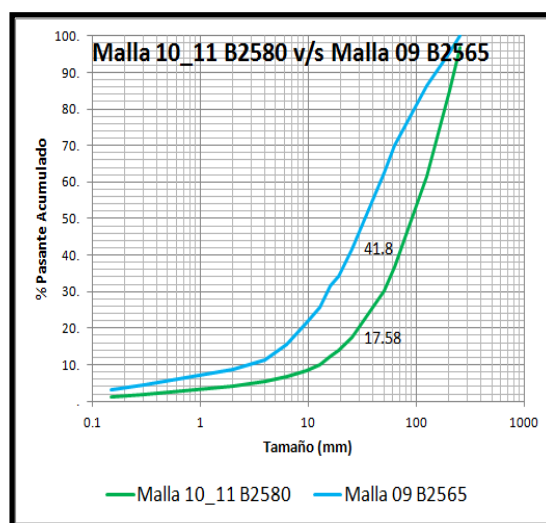


Figura III.7 Gráfico Curvas Granulométricas Estudio 3, Malla 10_11 B2580 y Malla 09 B2565.

Para lograr la fragmentación requerida se varió el explosivo, lo que incremento el costo por tonelada removida de 0,14 US\$/t a 0,17 US\$/t.

III.1.4 Caso de Estudio 4

El sector estudiado se ubica en la zona centro con tendencia Oeste (Ver figura III.1), se analizaron tres muestreos correspondientes a las tronaduras de las mallas 09 del banco 2580, malla 07A banco 2565 y malla 02 del banco 2550.

El sector centro se caracteriza por generar una fragmentación que no supera el 40% de finos, el estudio se realiza para mejorar los resultados obtenidos.

Se inició el estudio con un muestreo en el banco 2580 cuyo resultado fue de 37,75% de finos, posteriormente se muestreo el banco 2565 donde se obtuvo un 38,1% de finos, luego se analizó el actual banco de explotación 2550, donde el porcentaje pasante correspondiente al tamaño 1” fue de 54,26%.

Además existe una nueva condición que se presenta en el banco 2550, actualmente en explotación, que es la presencia de agua. Esto obliga a cambiar el explosivo anteriormente utilizado por uno no alterable por el agua.

Puesto que no se tenía registro del comportamiento de este nuevo explosivo dentro de la faena, fue de vital importancia la cuantificación de los resultados generados con el muestreo a la malla 02 del banco 2550.

Parámetros de diseño utilizados en las tronaduras muestreadas tabla III.4:

Tabla III.4 Parámetros Perforación y Tronadura Malla 09 B2580 y Malla 05 B2550.

Muestreo	Banco	Tronadura	B	S	FC	Taco	Explosivo	Litología	Zona
M5	2580	09	7	9	202	7	ANFO	GD-PT	Oeste
M9	2565	07A	7	7	361	7	FM50		
M17	2550	02	7	7	404	7	FA65		

La malla utilizada que en un principio fue de burden 7 y espaciamiento 9 metros, se modificó en el banco 2565 y 2550 a una más pequeña de burden y espaciamiento 7 metros. El explosivo Anfo, empleado en el banco 2580 se cambió por uno más energético como es el caso del Fortan Mex 50, posteriormente en el banco 2550, se utilizó uno no alterable por el agua, el Fortan Advantage 65 (FA65).

Debido al cambio de explosivo aumento al doble el factor de carga, lo que implica más kilos de explosivo por pozo y mayores costos, sin embargo el resultado de la tronadura arrojó buenos resultados lográndose gran porcentaje de finos.

La configuración con la que se cargaron los pozos en las tres tronaduras muestreadas se muestra a continuación en la figura III.8

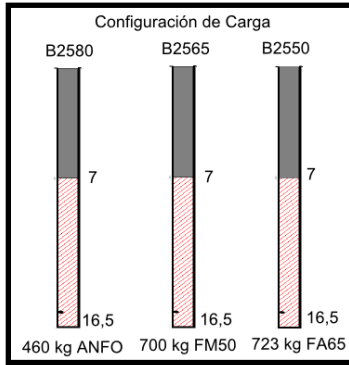


Figura III.8 Configuración de carga Estudio 4

Los pozos de las distintas tronaduras estudiadas en bancos diferentes, se cargaron con los kilogramos de explosivo determinados en la figura III.8

La comparación de las curvas obtenidas a partir del análisis granulométrico se ven en la figura III.9.

Malla	% Pasante M5 2580	% Pasante M9 2565	% Pasante M17 2550
10"	100.00	95.93	98.98
8"	96.62	89.79	97.06
5"	86.99	73.97	90.22
2 1/2"	71.10	60.08	78.29
2"	61.21	53.01	70.34
1"	37.75	38.10	54.26
3/4"	29.13	32.47	49.14
5/8"	26.25	30.63	44.05
1/2"	20.87	26.78	38.53
3/8"	17.19	23.96	34.38
1/4"	13.57	19.16	28.72
5	11.04	14.78	24.22
10	8.14	11.28	15.67
50	3.26	4.66	2.63
100	1.99	2.62	1.59
-100	0.00	0.00	0.00

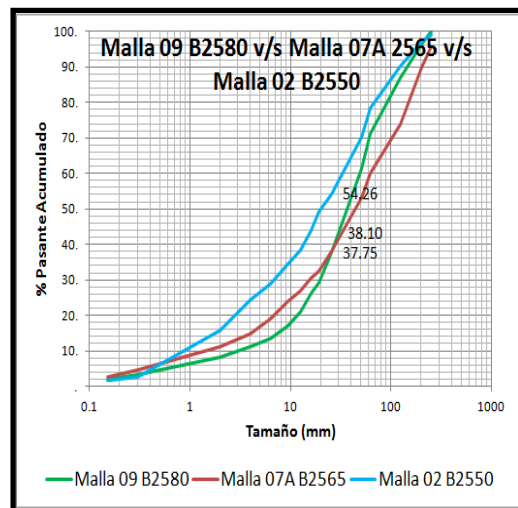


Figura III.9 Gráfico Curvas Granulométricas Estudio 4, Malla 09 B2580, Malla 07A B2565 y Malla 02 B2550.

La gráfica obtenida da cuenta de que los dos primeros muestreos (malla 09 banco 2580 y malla 07A banco 2565), generaron curvas granulométricas finas (porcentaje de finos cercano al 40% requerido), desde el tamaño de 1/2 pulgada hasta el tamaño de 10", la variabilidad es muy baja entre los porcentajes de material pasante de las curvas.

Sin embargo utilizando el explosivo más energético Fortan Advantage 65, se obtuvieron mejores resultados logrando un 54,26% de finos en el tercer muestreo (malla 02 banco 2550).

En general, se mantuvo la fragmentación obtenida en el banco 2580, en el muestreo del banco 2565, esto cambiando las dimensiones de la malla de perforación y de explosivo, mientras que para el banco 2550 al mantener la malla pequeña y utilizar el explosivo no alterable por el agua mejoro considerablemente.

El porcentaje de finos desde el inicio del estudio 4 (malla 09 banco 2580) al último muestreo del sector (malla 02 banco 2550), aumento en un 16,51%.

Los costos por tonelada removida variaron de 0.14 US\$/t para la malla 09 del banco 2580, a 0,26 US\$/t en el banco 2565 y finalmente en la malla 02, donde se obtuvo la mejor fragmentación el costo fue de 0,28 US\$/t. Mientras mejor fue la granulometría, mayor fue el costo.

III.1.5 Caso de Estudio 5

El estudio se localizó en la zona Oeste, hacia la punta Norte de la fase. Las tronaduras muestreadas correspondieron a la malla 15C_24A del banco 2565 y la malla 08 del banco 2550.

El objetivo de este análisis fue mejorar los malos resultados obtenidos en esa zona en el banco 2565, y controlar si la nueva configuración de malla y explosivo generaba los resultados esperados.

El porcentaje de material pasante bajo una pulgada fue 24,13% en el banco 2565, en el siguiente muestreo del sector se obtuvo 52,43%.

Las tronaduras consideraron los siguientes parámetros determinados en la tabla III.5:

Tabla III.5 Parámetros Perforación y Tronadura Malla 15C_24A B2565 y Malla 08 B2550

Muestreo	Banco	Tronadura	B	S	FC	Taco	Explosivo	Litología	Zona
M15	2565	15C_24A	7	7	293	7	FA50	PT-BH	Oeste
M18	2550	08	8	8	291	7	FA65		

La malla aplicada para el banco 2580, varió a una de mayor dimensión por necesidades de perforación (se necesitaba perforar los pozos en menor tiempo, por ello al ser más grande la malla, es menor la cantidad de pozos a perforar), no obstante el explosivo Fortan Advantage 65 es más energético que el Fortan Advantage 50, lo que produjo una mayor fragmentación de la roca.

Los pozos fueron cargados con la configuración ilustrada en la Figura III.10.

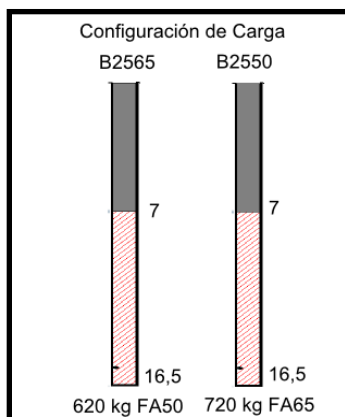


Figura III.10 Configuración carga estudio 5

En la malla 15C_24A del banco 2565 se utilizaron 620 kg de Fortan Advantage 50 por pozo, mientras que en malla 08 del banco 2550 se emplearon 720 kg de Fortan Advantage 65 por pozo.

Cabe destacar que la cantidad de kilogramos por pozo utilizado, es un promedio entre todos los pozos, puesto que en algunos se utiliza más explosivo por tener una longitud mayor (superan los 16,5 m), o al contrario pueden ser levemente más cortos y necesitar menos explosivo para igualar el taco de un pozo normal.

Las curvas granulométricas obtenidas de los muestreos realizados pueden observarse en la figura III.11.

La granulometría obtenida, es mucho más fina en la segunda tronadura muestreada (malla 08 banco 2550), el porcentaje de finos aumento de 24,13% a 52,43%.

El gráfico da cuenta de que la curva del muestreo 18 (malla 08 banco 2550), en general se ubicó varios puntos más arriba que la del muestreo 15 (malla 15C_24A banco 2565),

teniendo su mayor amplitud entre 1 y 2 pulgadas; sin embargo no todo el material se encontró bajo las 10 pulgadas en el segundo muestreo del sector.

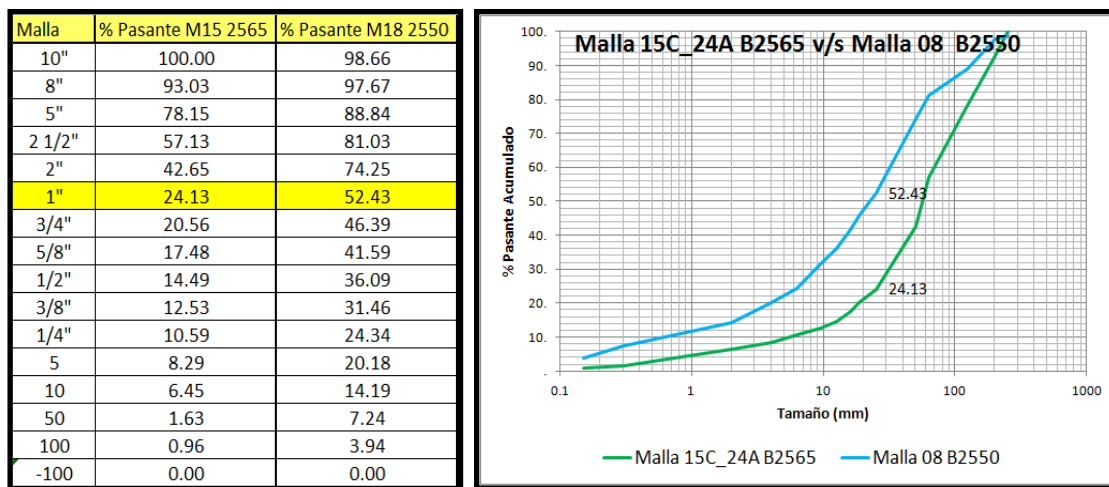


Figura III.11 Gráfico Curvas Granulométricas Estudio 5, Malla 15C_24A B2565 y Malla 08 B2550.

Para los casos estudiados en el mismo sector, muestreados en diferentes bancos, en los cuales en el capítulo II (punto II.1 Caracterización Geológica de la fase 4) se demuestra que existe una mínima variación geológica, por lo que los factores más influyentes en la fragmentación obtenida son los relacionados a la perforación y tronadura; se determinó que variando la malla de perforación y el explosivo por alguno más energético se logran mejores resultados y mayor porcentaje de finos.

Para tronaduras en que los pozos contengan agua la elección del explosivo a utilizar se ve restringida a solo un producto que el Fortan Advantage 65, el único no alterable por el agua dentro de la gama de explosivos.

Otros parámetros como taco, sistema de iniciación, diámetros de perforación, etc., no fueron modificados, por lo que el estudio se acoto solo a los factores anteriormente descritos.

En general la decisión de cambiar la malla de perforación o el explosivo, depende de las experiencias realizadas anteriormente y los resultados obtenidos, además de las asesorías realizadas por los técnicos consultores de la empresa contratada que en conjunto con la Superintendencia del área proponen y modifican los diseños a utilizar en las tronaduras.

CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS

Cada una de las tronaduras muestreadas posee una combinación de características única, la fragmentación obtenida dependerá de diversos factores, entre ellos conocer las particularidades de la zona a tronar.

Puesto que en algunas de las mallas estudiadas los parámetros de perforación y tronadura utilizados eran los mismos (igual burden, taco, explosivo, espaciamento, etc.) fue posible analizar la influencia de la geología del sector en la fragmentación obtenida; siendo la litología y alteración los principales aspectos que determinaban cambios notorios en el nivel de granulometría lograda.

En relación a las curvas granulométricas obtenidas con cada muestreo, estas cuando tienden a ser lineales indican una mejor fragmentación, es decir, el material analizado está más fino. Mientras que cuando se genera una curva cercana a los 10 mm (entre 1/2" y 3/8"). El material analizado se encuentra más grueso, se concentra en los tamaños de tamices mayores (Mayor a 1")

Además, en un universo de 16 muestras 16 tronaduras, de los bancos 2580 y 2565 se han realizado dos muestreos más en el banco 2550, para determinar si los cambios generados mejoraron la fragmentación obtenida (muestreo 17 y muestreo 18). (Ver anexo N°4 **Parámetros de Perforación y Tronadura y características Geológicas en tronaduras muestreadas**).

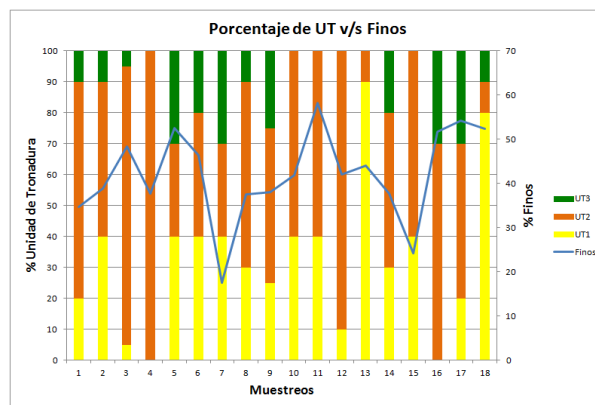


Figura IV.1 Grafico Porcentaje de unidad de tronadura en área muestreada v/s finos obtenidos

En relación a las unidades de tronadura definidas en División Gabriela Mistral, con los muestreos realizados se determinó que no existe relación directa entre la cantidad de UT definida en el área, con la fragmentación obtenida, como se puede ver en el figura IV.1 en donde el grafico de barras señala el porcentaje de unidad de tronadura por sector tronado que fue muestreado y la línea indica el porcentaje de finos de cada sector.

El porcentaje de finos generados no está vinculado con que haya más porcentaje de una UT que de otra.

De esta forma, el análisis de resultados para las alternativas al proceso se basa particularmente en la siguiente sectorización de la zona de estudio (Fase 4, bancos 2580-2565-2550) como lo indica la Figura IV.2.

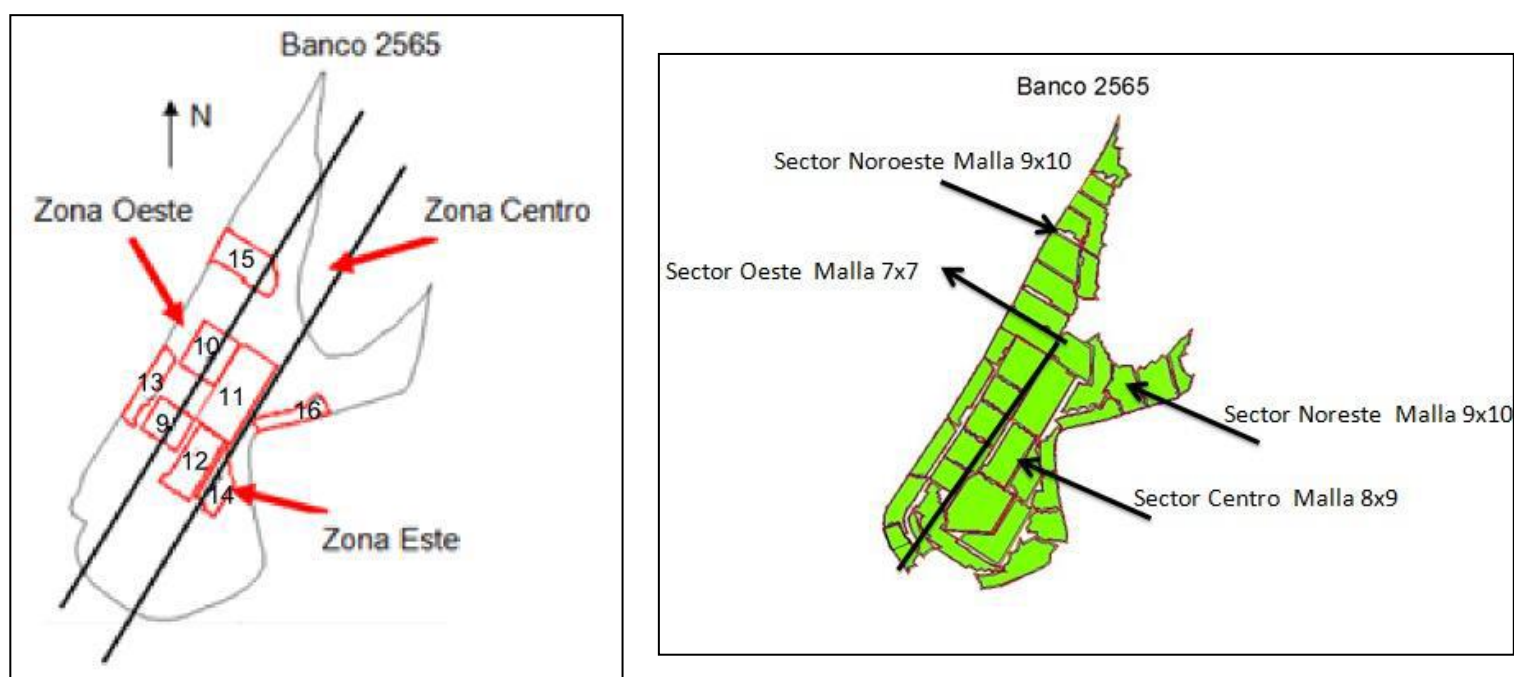


Figura IV.2 Sectorización de la zona de estudio en base a litología, alteración y UT banco 2565.

Del resultado de los muestreos realizados en tres bancos de explotación se puede determinar la tendencia de la granulometría, lo que puede verse en la figura IV.3 en donde:

En la **zona este** (curvas rojas) se genera una fragmentación más fina, aunque se varíen las condiciones de diseño de la tronadura, generalmente se obtiene de igual modo una granulometría fina.

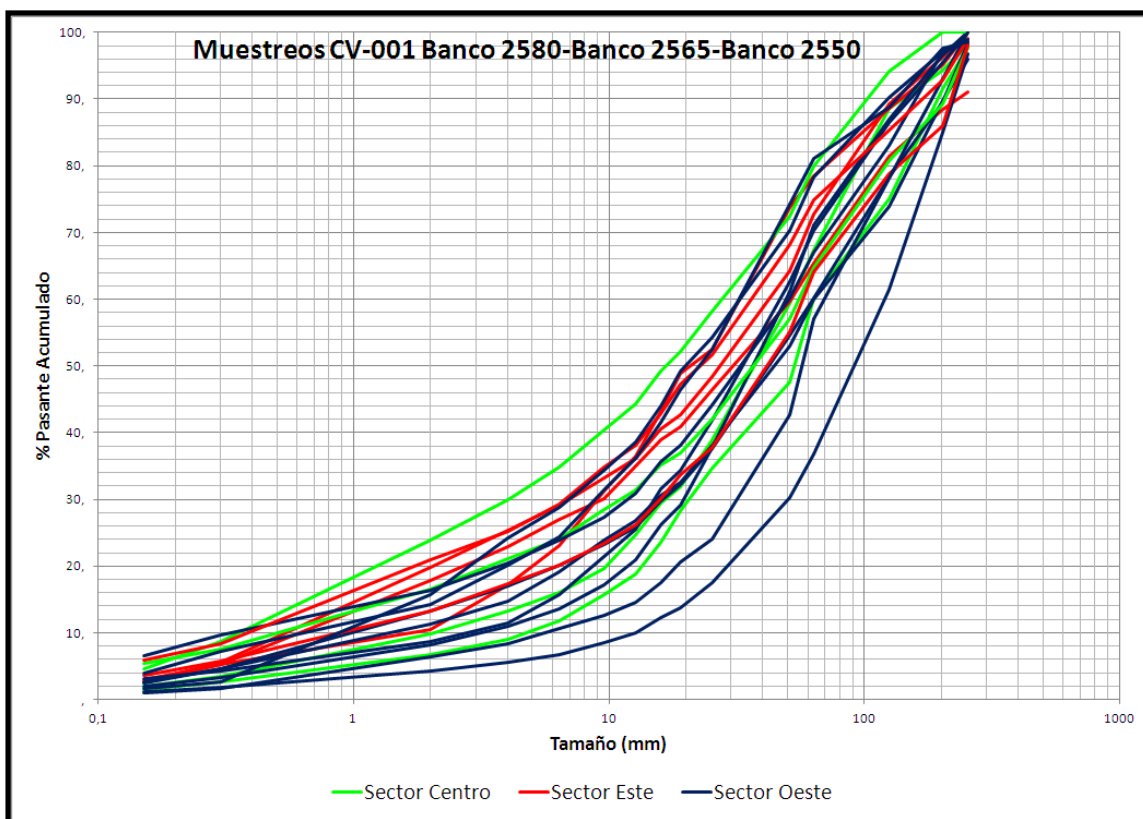


Figura IV.3 Gráfico Curvas Granulométricas Fase 4; Muestras Banco 2580, Banco 2565 separados por sectores.

Los muestreos realizados en la **zona central** de la fase también tienen una inclinación, con curvas granulométricas más gruesas que las generadas en el sector este, aunque comúnmente superando el 40% de finos requeridos. Además con la descripción de las tronaduras se pudo percibir que esta área tiene potencial para conseguir un porcentaje de finos mayor, como es el caso observado en el muestreo 11 (**Ver anexo N°4**), en donde el porcentaje de finos llegó a ser de 58.24%. Al igual que la **zona este** aunque varíe el diseño de la tronadura, los resultados obtenidos no presentan cambios drásticos.

La **zona oeste** presenta mayor dispersión y variabilidad de resultados. El rango en que se mueven las curvas es más amplio. Denota mayor dependencia de los parámetros de perforación y tronadura utilizados. En esta zona se obtienen grandes resultados cuando la tronadura se realiza buscando lograr los objetivos, es decir, se emplean mallas especiales para el sector y el explosivo es más energético.

Para obtener una tendencia más clara se determinan las curvas promediadas de los muestreos realizados por zona, se pueden observar en la figura IV.4.

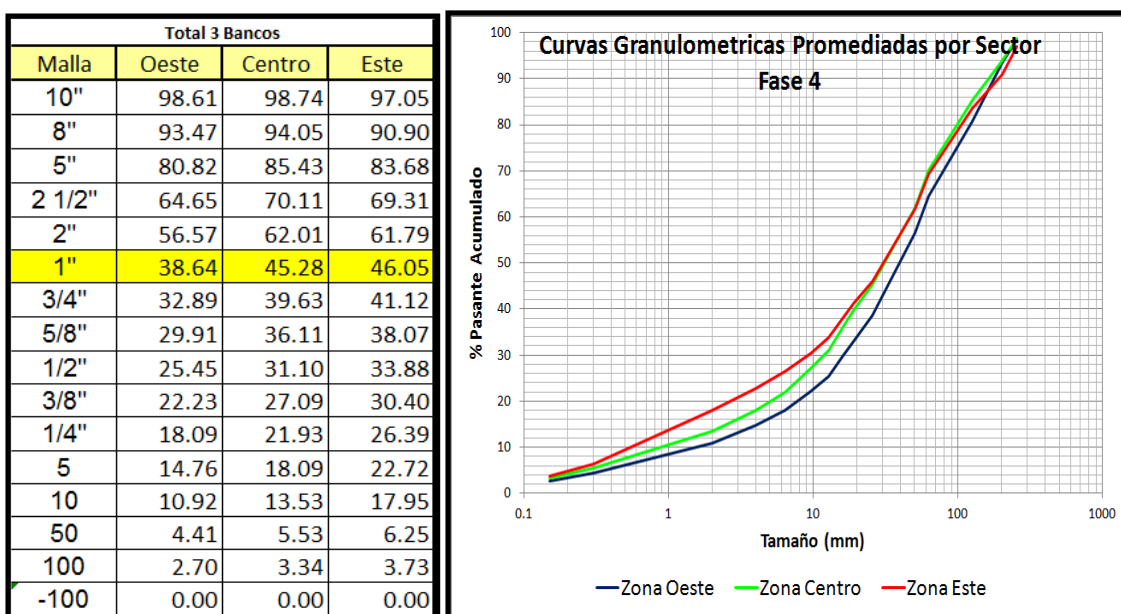


Figura IV4 Gráfico Curvas granulométricas promediadas por sectores en Fase 4, (18 muestreos)

Las tres zonas determinadas en la fase 4 poseen las siguientes características:

Zona Este

Se caracteriza por presentar una unidad litológica dominante, Granodiorita con alteración Potásica principalmente, y Sericítica hacia el sur.

Las menas localizadas en el área corresponden mayormente a Lixiviado, Arcillas con cobre y Atacamita.

Se encuentran algunas fallas principales y mayores rumbos NE y NW.

Se determinaron tres unidades de tronadura en el sector siendo la UT2, rocas duras fracturamiento intenso, la de mayor extensión. La UT3 se localiza hacia el sector norte y la UT1, hacia la parte sur.

Zona Central

También es dominada por la litología granodiorita, pero ésta se encuentra en contacto con Brechas (Ígnea e Hidrotermal) y en menor cantidad Pórfido Crowded.

La alteración Potásica cubre la mayor parte del área, hacia el norte se localiza alteración Potásica-Sericítica y al sur la alteración Sericítica.

Arcillas con cobre, Lixiviado y Óxidos negros son las menas más abundantes. Las estructuras presentes, principales y mayores poseen rumbo NE, EW Y NW.

En relación a las unidades de tronadura definidas en el área, las más extensas corresponden a UT1 (Rocas blandas) y UT2.

Zona Oeste

La cantidad de contactos litológicos que se presentan, es la principal característica de esta zona, además de que es en donde el Pórfido Crowded se encuentra en mayor abundancia. Las litologías corresponden a Diorita, Granodiorita, Brechas Ígnea e Hidrotermal y Pórfido Crowded.

Las alteraciones determinadas son Potásica, Potásica-Sericítica, Sericítica y en menor proporción Argílica.

También existe una mayor variación en las menas, se localizan Arcillas con cobre, Atacamita y Crisocola de distintas intensidades, Lixiviado y Óxidos negros.

La zona denota una gran cantidad de estructuras (fallas principales y mayores), que poseen variados rumbos, ubicadas mayormente en la parte norte.

En lo que respecta a las unidades de tronadura, están definidas tres de ellas en la zona, siendo la UT3 (rocas duras fracturamiento moderado) la que sufrió una mayor variación en profundidad, aumentando su extensión, las otras unidades determinadas corresponden a UT2 y UT1.

La mejora en la fragmentación, el aumento del porcentaje de finos específicamente, está asociado a los cambios generados. La variación influenciada por los distintos explosivos utilizados en el transcurso del estudio puede observarse en el grafico IV.5.

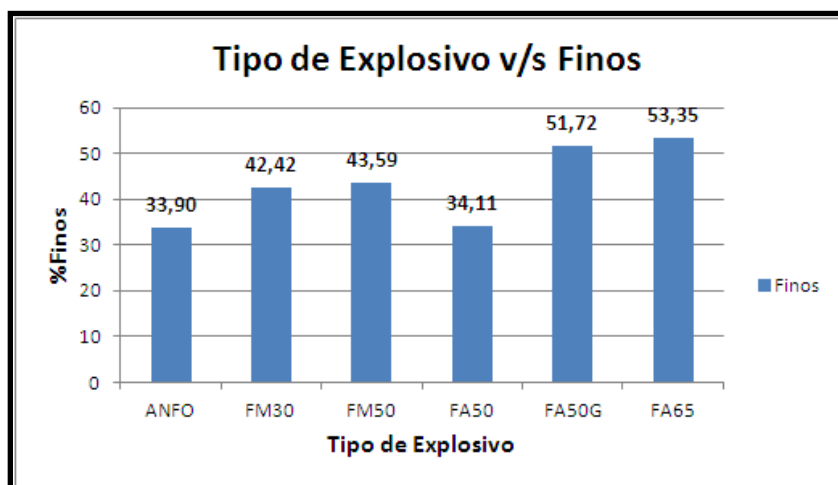


Figura IV.5 Gráfico Tipo de Explosivo v/s porcentaje de finos

Del gráfico se desprende que a medida que se varió de explosivo por uno más energético (más denso, mayor velocidad de detonación), el porcentaje promedio de finos aumento, a excepción de Fortan Advantage 50 (FA50), pero en general la tendencia fue al alza.

El nivel de fragmentación alcanzado también influye en los rendimientos de los equipos de carguío, en el siguiente grafico (IV.6) se determinan los rendimientos logrados en pala 02 (PA02), en las distintas tronaduras muestreadas, para mayor detalle del control de rendimientos operacionales (**ver anexo N°5 Control Rendimiento de Equipos de Carguío**).

Se puede afirmar que mientras más fino es el material, mayor es el rendimiento alcanzado por el equipo de carguío, en el caso del gráfico IV.6 se aprecia la tendencia al alza del rendimiento en toneladas por horas efectivas de la pala 02.

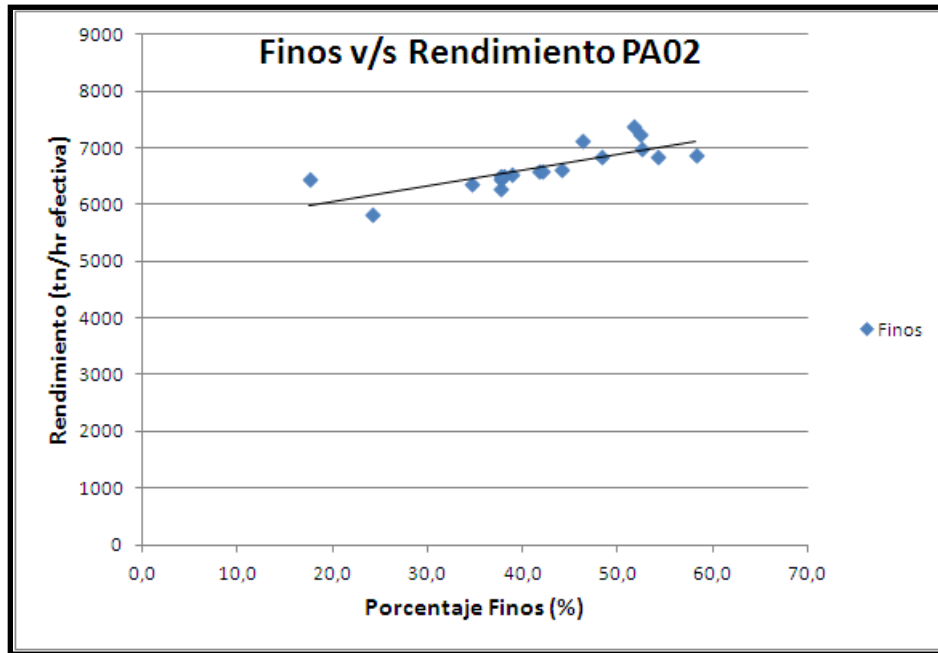


Figura IV.6 Gráfico Finos generados versus rendimiento pala 02 (toneladas por hora efectiva)

Las tablas IV.1 y IV.2 se realizan con el objetivo de determinar los mejores diseños dependiendo del sector que se tronará para fundamentar recomendaciones futuras.

En la Tabla IV.1 se distribuyen los muestreos realizados según la litología dominante, para determinar cuáles fueron los diseños de perforación y tronadura que generaron los mejores resultados, en particular para cada tipo de roca.

De ella se extrae que los mejores resultados de fragmentación tamaño 1", fueron obtenidos cuando el sector tronado corresponde a más de un 80% de Granodiorita, los diseños fueron variando sin afectar el 40% de finos considerado óptimo.

El problema se presenta cuando el área tronada corresponde a diferentes litologías que están en contacto, lo que provoca una mayor variación en los resultados obtenidos, haciendo indispensable encontrar la configuración adecuada de perforación y tronadura para estos sectores (que coinciden con la zona Oeste de fase 4); donde en general se utilizan mallas de perforación de dimensiones más pequeñas (7x7 u 8x8) y explosivos más energéticos.

Tabla IV.1 Tipo de roca principal, parámetros de perforación y tronadura y resultados obtenidos fragmentación 1”.

Tipo de Roca	Malla	Explosivo	FC	Finos (%)
Granodiorita >80%	7x9	FM30	291	34.70
	7X9	FM30	233	48.32
	7X9	FM30	280	52.52
	7X9	Anfo	232	46.37
	8x9	FM50	246	58.24
	9x10	FA50G	240	51.72
Granodiorita 50-80%	7X9	FM30	282	38.92
	7X7	FM50	249	41.80
	8X9	FM50	243	37.77
	7X7	FA65	404	54.26
Varias Litologías	7x9	Anfo	202	37.75
	7x7	FA50	293	24.13
	7x9	Anfo	195	17.58
	8x9	FM30	280	37.62
	7x7	FM50	361	38.10
	8x9	FM50	283	42.02
	7x7	FA50G	201	44.08
	8x8	FA65	291	52.43

En la Tabla IV.2 se distribuyen los muestreos realizados según Unidad de Tronadura dominante (más del 50% de la superficie tronada), para determinar los diseños que generaron mejores resultados.

Tabla IV.2 Unidad de tronadura dominante, parámetros de perforación y tronadura y resultados obtenidos fragmentación 1”.

UT	Malla	Explosivo	FC	Finos (%)
Rocas Blandas UT1 >50%	7x7	FA50	293	44.08
	7x9	FM30	282	38.92
	8x8	FA65	291	52.43
Rocas Duras Fracturamiento Intenso UT2 >50%	7x7	FA50	293	24.13
	7x9	FM30	291	34.7
	8x9	FM30	280	37.62
	8x9	FM50	243	37.77
	7x7	FM50	361	38.1
	7x7	FM50	249	41.8
	8x9	FM50	283	42.02
	7x9	FM30	233	48.32
	9x10	FA50G	240	51.72
	7x9	FM30	280	52.52
	7x7	FA65	404	54.26
	8x9	FM50	246	58.24
UT1-UT2-UT3	7x9	Anfo	195	17.58
	7x9	Anfo	202	37.75
	7x9	Anfo	232	46.37

Las unidades de tronadura definidas en División Gabriela Mistral, constituyen un parámetro de referencia para determinar cómo diseñar y tronar determinado sector, dependiendo de la composición del área, con los muestreos realizados (Tabla IV.2) no se puede establecer una configuración exacta para cada unidad de tronadura, puesto que no existe una tendencia clara que relacione porcentaje de unidad de tronadura con un diseño de perforación. Sin embargo se puede asegurar que los mejores resultados son obtenidos cuando existe una sola unidad de tronadura en el sector.

Las mejoras en fragmentación generadas por zona gracias a los cambios en los diseños de tronadura (Ver Tabla IV.3), pueden revisarse en la figura IV.7.

Parámetros Perforación y Tronadura

Tabla IV.3 Malla de Perforación y Explosivos según banco de explotación y sector de fase 4.

Sector	Malla		Explosivos	
Banco	2580	2565	2580	2565
Oeste	8x9	7x7	ANFO FM30	FM50 FA50
Centro	7x9	8x9		
Este	7x9	9x10		

La figura IV.7 muestra las curvas granulométricas obtenidas al promediar los resultados de los muestreos realizados en el sector Oeste de fase 4 en los bancos 2580 y 2565.

Se puede apreciar que con al cambiar de malla de perforación de 8x9 a una 7x7 y el explosivo Anfo, Fortan Mex 30 por Fortan Mex 50 y Fortan Advantage 50, la curva en general del banco 2565 se ubicó unos puntos más arriba que la del banco 2580 aumentando homogéneamente, indicando que el material pasante se encontraba más fino.

El porcentaje de finos aumento de 30,98% obtenido en el banco 2580 a 37,03% en el banco 2565. Lo que constituye una mejora considerable, dando pie a generar nuevas modificaciones en los parámetros de perforación y tronadura en el banco 2550 para así obtener el 40% considerado óptimo.

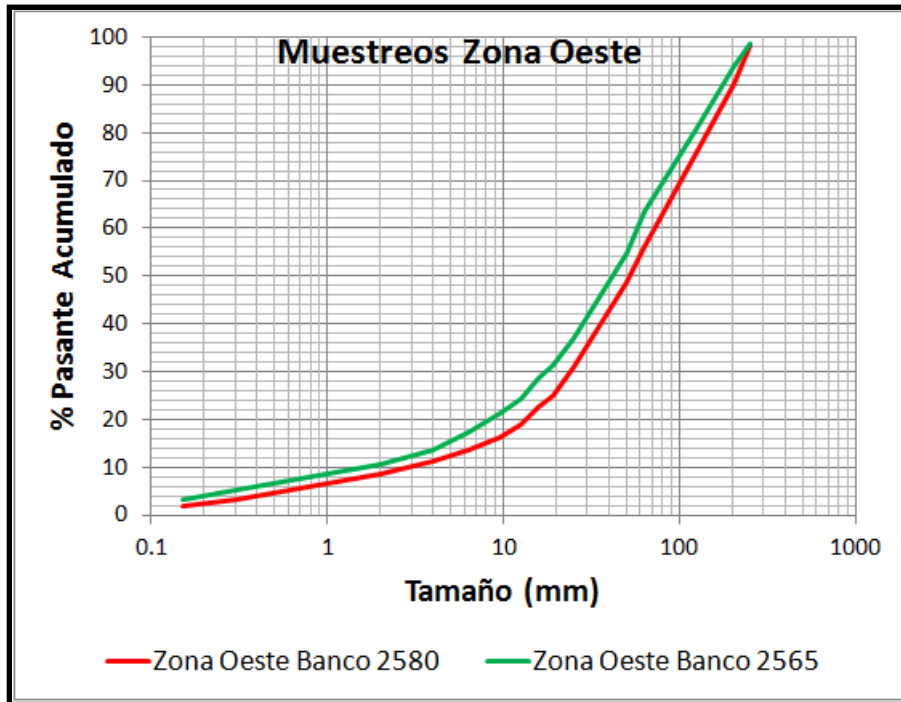


Figura IV.7 Gráfico comparación granulométrica Banco 2580 v/s Banco 2565 Zona Oeste Fase 4.

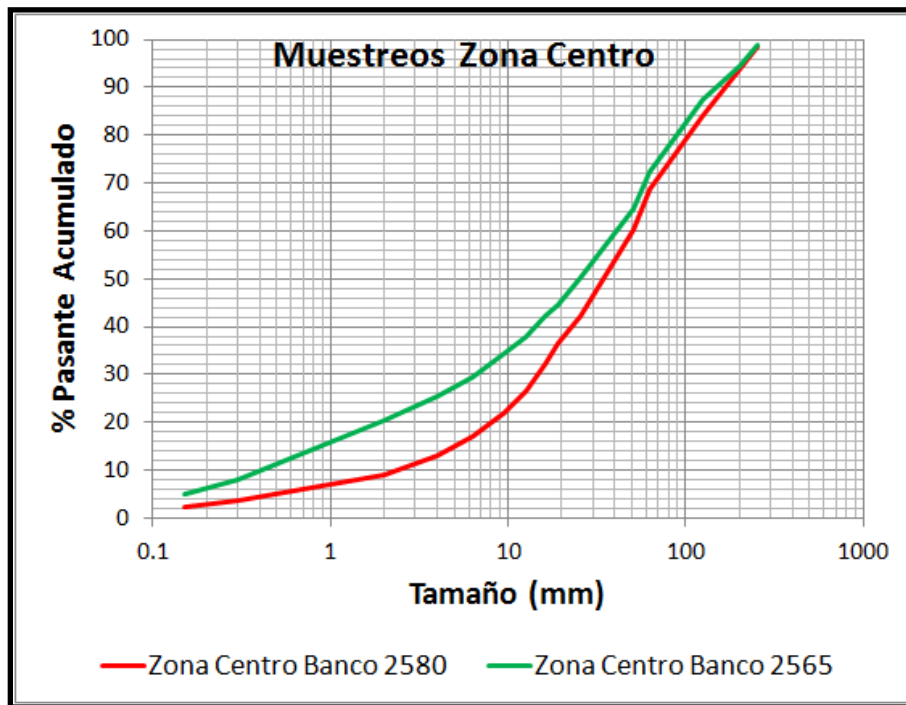


Figura IV.8 Gráfico comparación granulométrica Banco 2580 v/s Banco 2565 Zona Centro Fase 4.

En la figura IV.8 están graficadas las curvas granulométricas promediadas obtenidas en el sector Centro en el Banco 2580 y Banco 2565 de fase 4.

Donde principalmente influyo el cambio de explosivo en la mejora de la fragmentación, puesto que la dimensión de la malla de perforación fue ampliada de 7x9 a 8x9.

La curva tiene su mayor amplitud en los tamaños menores, manteniéndose la fragmentación del banco 2580, en los tamaños superiores (sobre 1”) en el banco 2565.

El porcentaje de finos aumento en 8%, de 42,03% en el banco 2580 a 50,13% en el banco 2565.

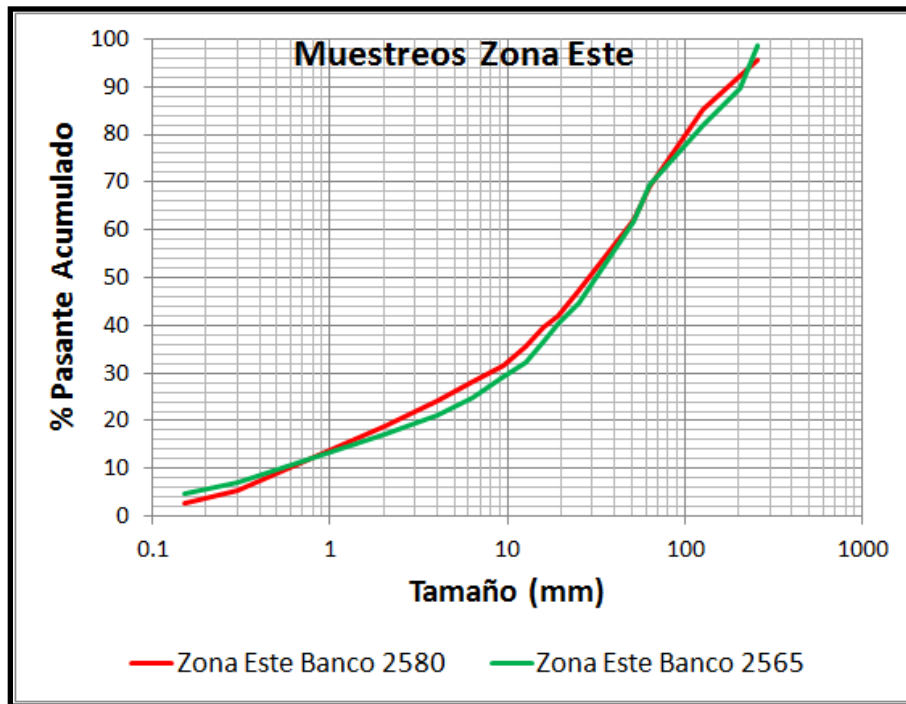


Figura IV.9 Grafico comparación granulometría Banco 2580 versus Banco 2565 Zona Este Fase 4.

En la figura IV.9 se aprecia que la variación entre las curvas granulométricas del sector Este de los bancos 2580 y 2565 es mínima.

El diseño de tronadura considero el cambio de malla de perforación de 7x9 a 9x10, puesto que los resultados obtenidos se consideraron muy buenos (porcentaje 1” cercanos al 45%). Sin embargo se varió de explosivo a uno más energético como es el caso de fortan mex 50.

El porcentaje de finos obtenidos tuvo una leve baja desde el banco 2580 al banco 2565, menos de un 3%, variando de 47,35% a 44,75%.

No obstante estos resultados continúan dentro del rango óptimo de 40% de finos.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

A partir de los estudios y análisis realizados en el presente estudio se puede concluir lo siguiente:

1) La fase está dividida en tres zonas, las cuales se caracterizan por curvas granulométricas similares, siendo la zona Este la que presentó mejores resultados, con un porcentaje promedio de finos de 25 mm (tamaño 1”) de 46.05%; proveniente de los muestreos realizados. Por el contrario la zona en que se detectó mayor dificultad para obtener la fragmentación requerida, corresponde a la zona Oeste de la fase, donde el porcentaje de finos alcanzó solo el 38.64%, no lográndose el 40% considerado óptimo, sin embargo los mejores resultados en este sector fueron obtenidos en el banco 2550 actualmente en explotación, lo que indica que los cambios generados están dando buenos resultados. Por otra parte los muestreos realizados en la zona Central indicaron una buena fragmentación, cercana a la de la zona Este, alcanzando un promedio de 45.28% de finos.

2) La generación de finos por la tronadura depende de factores controlables como taco, altura de banco, sistema de iniciación, diámetro de perforación, malla de perforación, explosivo; siendo estos dos últimos los más influyentes.

3) La geología presente en la fase 4, es un factor no controlable pero muy influyente en los resultados de fragmentación obtenidos, por ello es de vital importancia conocer las características específicas del sector a tronar, principalmente los contactos litológicos donde se puede generar pérdidas de energía del explosivo por cambios bruscos de litología. Lo que se determinó que ocurre cuando entra en contacto el Pórfido Crowded con las Brechas Hidrotermal o Ígnea.

4) Se determinó que la fragmentación tamaño 1” al comparar el banco 2580 con el banco 2565, mejoro un 6% en la zona Oeste, un 8% en la zona Centro y la zona Este se mantuvo el alto porcentaje de finos logrado, al realizar los cambios en la dimensión del burden,

espaciamiento y explosivos. Se consiguieron mejores resultados con mallas de menores dimensiones y explosivos más energéticos.

5) La geología entre un banco y otro no presenta mayores cambios, puesto que los cuerpos geológicos tienen una disposición subvertical (manteo 80°), por lo que su posición banco a banco casi no varía, por ello guiándose con la información respaldada y detallada de tronaduras anteriores, se puede estimar el comportamiento que tendrá algún determinado sector.

6) La base de información con las características de cada tronadura realizada, servirá de apoyo y respaldo para tronaduras posteriores, además de crear la posibilidad de mejorar a través del aprendizaje que dejan los criterios utilizados, con los consiguientes resultados obtenidos.

7) Los costos por toneladas removidas están directamente relacionados al explosivo utilizado. El costo en fase 4, varió desde US\$ 0.14 con Anfo en el banco 2580 a US\$ 0.26 por tonelada removida con Fortan Advantage 65 en el banco 2550, actualmente en explotación.

8) El entender cómo generar más finos en la mina, no solo influye en esta etapa del proceso, también en las fases posteriores, puesto que al mejorar la fragmentación aumentan los rendimientos de equipos de carguío (mayor ton mina removido-costos mina) y se utiliza menos energía en el proceso de chancado lo que afecta directamente en los costos globales de la operación DGM.

9) No existe relación directa entre el porcentaje de unidad de tronadura presente en el sector estudiado con la generación de finos, es decir, no hay tendencia alguna que indique que una u otra unidad definida produzca un porcentaje mayor de finos.

V.2 RECOMENDACIONES

1) Es recomendado asumir escenarios diferentes dependiendo del sector donde se encuentra la tronadura, puesto que como se determinó en el estudio, la fase 4 presenta tres sectores con características distintas y que deben ser diseñadas teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente.

2) Se recomienda seguir utilizando mallas de perforación más pequeñas en el sector Oeste de fase 4 (7x7 u 8x8). Las mallas en el sector Centro y Este de dimensiones 8x9 o 9x10, generan buenos resultados por lo que son ideales para esos sectores.

3) En relación al explosivo, se recomienda utilizar Fortan Advantage 65 para pozos con agua y Fortan Advantage 50 Gasificado para pozos sin agua, por generar los mejores resultados de fragmentación.

4) Determinar el tipo de roca del sector a tronar, puesto que si existe más de 80% de granodiorita no es necesario aplicar un explosivo demasiado energético, basta con Fortan Mex 30 y una malla de dimensiones 7x9. Cuando la litología es granodiorita entre un 50 a 80% es necesario un explosivo más energético al ya nombrado como es el caso de Fortan Mex 50 y una malla más pequeña que la anterior. Si existen varias litologías en el área tronada es de vital importancia una malla pequeña (7x7 u 8x8), en combinación con explosivos más energéticos (Fortan Advantage 50 Gasificado o Fortan Advantage 65 en pozos con agua).

5) También se recomienda considerar la base de datos generada para facilitar el proceso de diseño de la tronadura, asegurar buenos resultados y estimar la fragmentación que se obtendrá, dado que la variación geológica es mínima entre un banco y otro.

6) Se debe tener presente que la cantidad de finos generados también puede generar algunos problemas como desgaste en la cóncava de chancado primario, por ello se recomienda

continuar con el nivel actual (alrededor de 40-45% finos) y no seguir aumentando este valor.

7) Es de vital importancia mantener la información actualizada y respaldar cada una de las tronaduras realizadas, se recomienda tener información de los protocolos de tronadura, planos geológicos, planos de material tronado, archivos de imágenes y videos, para facilitar el proceso que genera los cambios en los diseños de tronadura.

8) Se recomienda considerar para futuros estudios, factores que afectan a la fragmentación de los cuales no se posee aun información respaldada, tales como tiempos de iniciación, secuencia de salida, durezas, índice de chancabilidad, etc. Para determinar la influencia de estos en los resultados obtenidos.

9) Propuesta Técnico – Económica sistema de Optimización de tamaño característico en procesos Tronadura Mina Planta de Chancado.

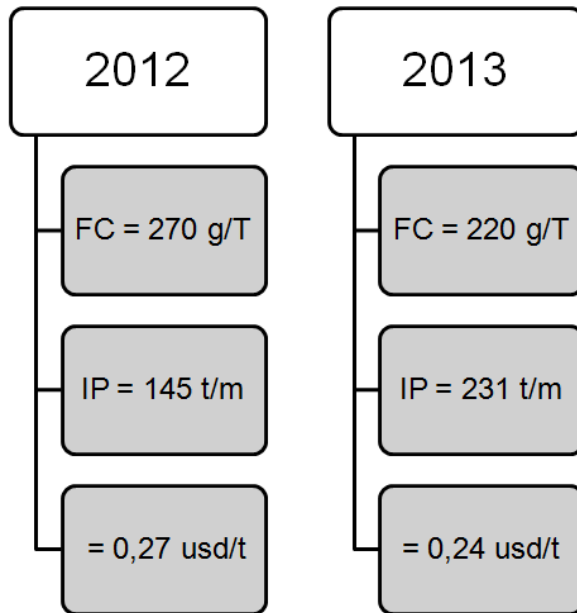
El modelo propuesto se proyecta en la siguiente secuencia de actividades:

PERFORACION Y TRONADURA:

Comparación año 2012 y año 2013 para parámetros fundamentales en perforación y tronadura.

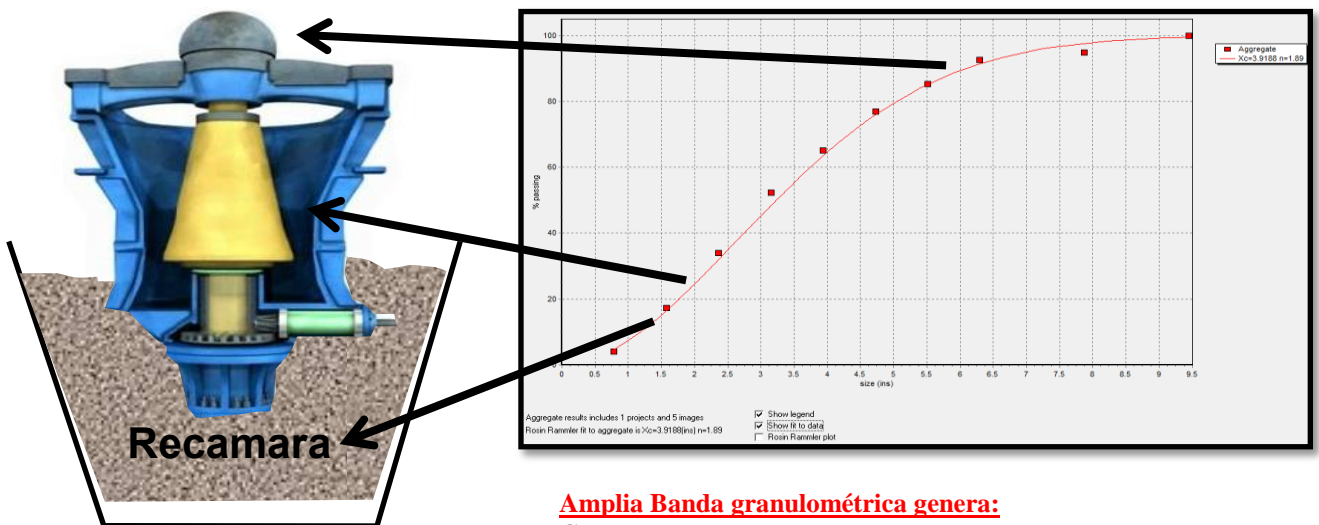
Ventajas comparativas:

- Explosivos de alta energía.
- Mejor distribución de la carga explosiva.
- Voladuras de mayor envergadura.
- Ampliación de patrón de perforación.
- Tecnologías de retención.
- Menor número de evacuaciones.
- Mayor flexibilidad operacional.



CHANCADO PRIMARIO:

Situación sin efecto de la optimización:



Amplia Banda granulométrica genera:

Gruesos

→Uso de pica rocas, detenciones menores.

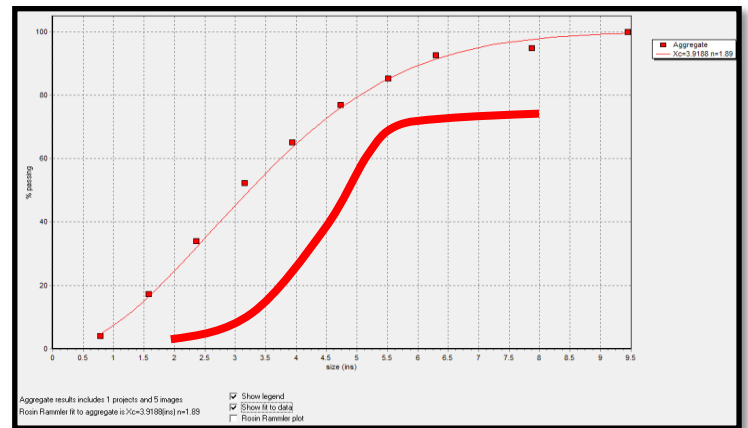
Finos

→Mayor velocidad de desgaste en cóncavas y manto.

→Mayor llenado de recámara genera caídas por sensor.

Situación esperada con optimización:

Curva Mine to leach



Banda granulométrica acotada genera:

- Uso de pica rocas, detenciones menores.
- Menor velocidad de desgaste en cóncavas y manto.
- Rápido vaciado de recámara evita caídas por sensor.
- Menor tiempo de residencia en zona de trituración

Análisis Económico propuesto año 2013.

Consideraciones de material a tronar:

Millones toneladas por año	Mineral	Blando	Seco	20,1	
			Agua	8,6	
	Duro	Seco	8,6		
		Agua	3,7		
	Total Mineral			41,1	
	Lastre			33,3	
Total Material			74,4		

Resumen de beneficios económicos:

Tipo de Material		Toneladas 2013	Beneficio (USD)	IP (Aumento %)
Mineral Blando	Seco	20,1	769.933	28%
	Agua	8,6	278.193	28%
Mineral Duro	Seco	8,6	145.180	17%
	Agua	3,7	36.947	17%
Estéril	Seco	33,3	1.494.162	28%
TOTAL		74,4	2.724.415	23%

BASE DE DATOS PARA LOS ANALISIS ECONOMICOS PROPUESTOS:

Estéril:

MINE - Gaby

Proyect : Expansión de malla

Initiative: Increase the energy for pattern expansion

Customer : CODELCO

DATE nov-12

Parameter

Explosives	FN Adv 50	FN Ex 50	
Diameter (pulg)	10 5/8	10 5/8	
High of bench (m)	15	15	
Dens. Explosivo	1,22	1,22	
Rock's density	2,51	2,51	
Burden (m)	8,00	8,50	
Spacing (m)	10,00	12,00	28%
Sub drill (m)	1,0	1,0	
Stemming	6,0	6,5	
Explosives (kg)	698	663	
Lineal charge (kg/m)	69,8	69,8	
Powder Factor (g/t)	232	173	-26%
Energy Factor	0,64	0,50	-21%
tonne per meter (t/m)	188,3	240,0	28%
Relation S/B	1,25	1,41	

Energy ANFO (MJoule/t) over 100MPa 2.3 100MPa

Products	Mjoule/kg	Density	[US\$/cu]	RBS	VOD [m/s]	Gas (l/kg)
Fortan Advantage 50	2,75	1,22	748,93	178	5200	923
Fortan Extra 50	2,90	1,22	857,83	198	5500	997
Fortan Mex 50	2,75	1,22	0,00	178	5100	923
Fortis Advantage 65	2,62	1,25	748,50	171	5000	902
Fortis Extra 65	2,80	1,25	890,07	189	5200	955
Fortis Mex 65	2,62	1,25	0,00	171	4600	902
Drilling cost 9 7/8			10,00			
Drilling cost 10 5/8			12,00			
Drilling cost 11						
Drilling cost 12 1/4			12,00			
Handidet						
Exel Conectadet						
Exel MS			5,55			
i Kon			28,09			
Cordtec						
Pentex 450			5,47			
Device (Taponex)						
change	US\$	1				

Charge by blasthole diameter 10 5/8 inch FN Adv 50

Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	US\$	
Bottom charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22	12,6	881	660
column charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22	-2,6	-183	-137
Total			1,22	10,0	698	523
Volume by lineal meter 57						
Tonnes blasted	33.300.000					
Saving (US\$)	1.494.162					
Saving drilling (m)	38.153					
Blast holes (n°)	2.385					
Saving Explosives (t)	1.971					
Explosives cost	cUS\$/t				17,37	
Drilling cost	cUS\$/t				6,37	
Initiation system	cUS\$/t				2,60	
Devices	cUS\$/t				0,00	
Total drilling blasting	cUS\$/t				26,3	
Power	MJoule/ms				999	
Energy	MJoule/t				0,64	
Gas volume	l/t				214	

Charge by blasthole diameter 10 5/8 inch FN Ex 50

Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	US\$	
Bottom charge	Fortan Extra 50	2,90	1,22	4,3	300	257
column charge	Fortan Extra 50	2,90	1,22	5,2	363	312
Total			1,22	9,5	663	569
Volume by lineal meter 57						
Explosives cost	cUS\$/t				14,81	
Drilling cost	cUS\$/t				5,00	
Initiation system	cUS\$/t				2,04	
Devices	cUS\$/t				0,00	
Total drilling blasting	cUS\$/t				21,8	
Power	MJoule/ms				1.113	
Energy	MJoule/t				0,50	
Gas volume	l/t				172	
Diferencias Cost	cUS\$/t				4,49	
Powder Factor (g/t)	MJ/t				-59	
Energy Factor	MJ/t				-0,14	

Mineral Blando Seco

MINE - Gaby

Proyect : Expansión de malla

Initiative: Increase the energy for pattern expansion

Customer : CODELCO

DATE nov-12

Parameter

Explosives	FN Adv 50	FN Ex 50	
Diameter (pulg)	10 5/8	10 5/8	
High of bench (m)	15	15	
Dens. Explosivo	1,22	1,22	
Rock's density	2,51	2,51	
Burden (m)	8,00	8,50	
Spacing (m)	10,00	12,00	28%
Sub drill (m)	1,5	1,5	
Stemming	6,0	6,0	
Explosives (kg)	733	733	
Lineal charge (kg/m)	69,8	69,8	
Powder Factor (g/t)	243	191	-22%
Energy Factor	0,67	0,55	-17%
tonne per meter (t/m)	182,5	232,7	28%
Relation S/B	1,25	1,41	

Energy ANFO (MJoule/t) over 100MPa 2,3 100MPa

Products	Mjoule/kg	Density	[US\$/cu]	RBS	VOD [m/s]	Gas [l/kg]
Flexigel Control 80	1,88	0,80	937,90	81	3600	880
Fortan Advantage 50	2,75	1,22	748,93	178	5200	923
Fortan Extra 50	2,90	1,22	857,83	198	5500	997
Fortis Advantage 65	2,62	1,25	748,50	171	5000	902
Fortis Extra 65	2,80	1,25	890,07	189	5200	955
Fortis Mex 65	2,62	1,25	0,00	171	4600	902
Drilling cost 9 7/8			10,00			
Drilling cost 10 5/8			12,00			
Drilling cost 11						
Drilling cost 12 1/4			12,00			
Handidet						
Exel Conectadet						
Exel MS			5,55			
i Kon			28,09			
Cordtec						
Pentex 450			5,47			
Device (Taponex)						
change	US\$		1			

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Adv 50		US\$
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	
Bottom charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22	10,5	733	549
column charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22		0	0
Total			1,22	10,5	733	549
Volume by lineal meter	57					

Tonnes blasted	20.100.000	Explosives cost	cUS\$/t	18,23
Saving (US\$)	769.933	Drilling cost	cUS\$/t	6,57
Saving drilling (m)	23.749	Initiation system	cUS\$/t	2,60
Blast holes (n°)	1.439	Devices	cUS\$/t	0,00
Saving Explosives (t)	1.058	Total drilling blasting	cUS\$/t	27,4
		Power	MJoule/ms	999
		Energy	MJoule/t	0,67
		Gas volume	l/t	225

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Ex 50		US\$
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	
Bottom charge	Fortan Extra 50	2,90	1,22	10,5	733	629
column charge	Flexigel Control 80	1,88	0,80	0,0	0	0
Total			1,22	10,5	733	629
Volume by lineal meter	57					

Explosives cost	cUS\$/t	16,37
Drilling cost	cUS\$/t	5,16
Initiation system	cUS\$/t	2,04
Devices	cUS\$/t	0,00
Total drilling blasting	cUS\$/t	23,6

Power	MJoule/ms	1.113
Energy	MJoule/t	0,55
Gas volume	l/t	190

Diferencias	Cost	cUS\$/t	3,83
	Powder Factor (g/t)	MJ/t	-53

Energy Factor	MJ/t	-0,12
----------------------	------	--------------

Mineral Blando Agua

MINE - Gaby

Proyect : Expansi3n de malla

Initiative: Increase the energy for pattern expansion

Customer : CODELCO

DATE nov-12

Parameter

Explosives	FN Adv 65	FN Ex 65	
Diameter (pulg)	10 5/8	10 5/8	
High of bench (m)	15	15	
Dens. Explosivo	1,25	1,25	
Rock's density	2,51	2,51	
Burden (m)	8,00	8,50	
Spacemnt (m)	10,00	12,00	28%
Sub drill (m)	1,5	1,5	
Stemming	6,0	6,0	
Explosives (kg)	751	751	
Lineal charge (kg/m)	71,5	71,5	
Powder Factor (g/t)	249	196	-22%
Energy Factor	0,65	0,55	-16%
tonne per meter (t/m)	182,5	232,7	28%
Relation S/B	1,25	1,41	

Energy ANFO (MJoule/t) over 100MPa		2,3	100MPa			
Products	Mjoule/kg	Density	[US\$/cu]	RBS	VOD (m/s)	Gas (l/kg)
Flexigel Control 80	1,88	0,80	937,90	81	3600	880
Fortan Advantage 50	2,75	1,22	748,93	178	5200	923
Fortan Extra 50	2,90	1,22	857,83	198	5500	997
Fortis Advantage 65	2,62	1,25	748,50	171	5000	902
Fortis Extra 65	2,80	1,25	890,07	189	5200	955
Fortis Mex 65	2,62	1,25	0,00	171	4600	902
Drilling cost 9 7/8			10,00			
Drilling cost 10 5/8			12,00			
Drilling cost 11						
Drilling cost 12 1/4			12,00			
Handidet						
Exel Conectadet						
Exel MS			5,55			
i Kon			28,09			
Cordtec						
Pentex 450			5,47			
Device (Taponex)						
change	US\$	1				

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Adv 65		US\$
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	
Bottom charge	Fortis Advantage 65	2,62	1,25	10,5	751	562
column charge	Fortis Advantage 65	2,62	1,25	0,0	0	0
Total			1,25	10,5	751	562
Volume by lineal meter	57					

Tonnes blasted	8.600.000
Saving (US\$)	278.193

Saving drilling (m)	10.161	Explosives cost	cUS\$/t	18,66
Blast holes (n°)	616	Drilling cost	cUS\$/t	6,57
Saving Explosives (t)	464	Initiation system	cUS\$/t	2,60
		Devices	cUS\$/t	0,00
		Total drilling blasting	cUS\$/t	27,8

Power	MJoule/ms	937
Energy	MJoule/t	0,65
Gas volume	l/t	225

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Ex 65		
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	
Bottom charge	Fortis Extra 65	2,80	1,25	10,5	751	668
column charge	Flexigel Control 80	1,88	0,00	0,0	0	0
Total			1,25	10,5	751	668
Volume by lineal meter	57					

Explosives cost	cUS\$/t	17,41
Drilling cost	cUS\$/t	5,16
Initiation system	cUS\$/t	2,04
Devices	cUS\$/t	0,00
Total drilling blasting	cUS\$/t	24,6

Power	MJoule/ms	1.042
Energy	MJoule/t	0,55
Gas volume	l/t	187

Diferencias	Cost	cUS\$/t	3,23
	Powder Factor (g/t)	MJ/t	-54

Energy Factor	MJ/t	-0,11
---------------	------	--------------

Mineral Duro Seco

MINE - Gaby

Proyect : Expansi3n de malla

Initiative: Increase the energy for pattern expansion

Customer : CODELCO

DATE nov-12

Parameter

Explosives	FN Adv 50	FN Ex 50	
Diameter (pulg)	10 5/8	10 5/8	
High of bench (m)	15	15	
Dens. Explosivo	1,22	1,22	
Rock's density	2,51	2,51	
Burden (m)	8,00	8,50	
Spacing (m)	10,00	11,00	17%
Sub drill (m)	1,5	1,5	
Stemming	6,0	6,0	
Explosives (kg)	733	733	
Lineal charge (kg/m)	69,8	69,8	
Powder Factor (g/t)	243	208	-14%
Energy Factor	0,67	0,60	-10%
tonne per meter (t/m)	182,5	213,4	17%
Relation S/B	1,25	1,29	

Products	Mjoule/kg	Density	[US\$/cu]	RBS	VOD [m/s]	Gas [l/kg]
Flexigel Control 80	1,88	0,80	937,90	81	3600	880
Fortan Advantage 50	2,75	1,22	748,93	178	5200	923
Fortan Extra 50	2,90	1,22	857,83	198	5500	997
Fortis Advantage 65	2,62	1,25	748,50	171	5000	902
Fortis Extra 65	2,80	1,25	890,07	189	5200	955
Fortis Mex 65	2,62	1,25	0,00	171	4600	902
Drilling cost 9 7/8			10,00			
Drilling cost 10 5/8			12,00			
Drilling cost 11						
Drilling cost 12 1/4			12,00			
Handidet						
Exel Conectadet						
Exel MS			5,55			
i Kon			28,09			
Cordtec						
Pentex 450			5,47			
Device (Taponex)						
change	US\$	1				

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Adv 50		US\$
Bottom charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22	10,5	733	549
column charge	Fortan Advantage 50	2,75	1,22	0,0	0	0
Total			1,22	10,5	733	549
Volume by lineal meter	57					
Explosives cost	cUS\$/t					18,23
Drilling cost	cUS\$/t					6,57
Initiation system	cUS\$/t					2,60
Devices	cUS\$/t					0,00
Total drilling blasting	cUS\$/t					27,4
Power	MJoule/ms					999
Energy	MJoule/t					0,67
Gas volume	l/t					225

Charge by blasthole	diameter	10 5/8	inch	FN Ex 50		US\$
Bottom charge	Fortan Extra 50	2,90	1,22	10,5	733	629
column charge	Flexigel Control 80	1,88	0,80	0,0	0	0
Total			1,22	10,5	733	629
Volume by lineal meter	57					
Explosives cost	cUS\$/t					17,86
Drilling cost	cUS\$/t					5,62
Initiation system	cUS\$/t					2,22
Devices	cUS\$/t					0,00
Total drilling blasting	cUS\$/t					25,7
Power	MJoule/ms					1.114
Energy	MJoule/t					0,60
Gas volume	l/t					208

Diferencias	Cost	cUS\$/t	1,69
Powder Factor (g/t)	MJ/t		-35
Energy Factor	MJ/t		-0,07

Mineral Duro Agua

MINE - Gaby

Proyect : Expansión de malla

Initiative: Increase the energy for pattern expansion

Customer : CODELCO

DATE nov-12

Parameter

Explosives	FN Adv 65	FN Ex 65	
Diameter (pulg)	10 5/8	10 5/8	
High of bench (m)	15	15	
Dens. Explosivo	1,25	1,25	
Rock's density	2,51	2,51	
Burden (m)	8,00	8,50	
Spacing (m)	10,00	11,00	17%
Sub drill (m)	1,5	1,5	
Stemming	6,0	6,0	
Explosives (kg)	751	751	
Lineal charge (kg/m)	71,5	71,5	
Powder Factor (g/t)	249	213	-14%
Energy Factor	0,65	0,60	-9%
tonne per meter (t/m)	182,5	213,4	17%
Relation S/B	1,25	1,29	

Energy ANFO (MJoule/t) over 100MPa		2,3		100MPa			
Products	Mjoule/kg	Density	[US\$/cu]	RBS	VOD [m/s]	Gas (l/kg)	
Flexigel Control 80	1,88	0,80	937,90	81	3600	880	
Fortan Advantage 50	2,75	1,22	748,93	178	5200	923	
Fortan Extra 50	2,90	1,22	857,83	198	5500	997	
Fortis Advantage 65	2,62	1,25	748,50	171	5000	902	
Fortis Extra 65	2,80	1,25	890,07	189	5200	955	
Fortis Mex 65	2,62	1,25	0,00	171	4600	902	
Drilling cost 9 7/8			10,00				
Drilling cost 10 5/8			12,00				
Drilling cost 11							
Drilling cost 12 1/4			12,00				
Handidet							
Exel Conectadet							
Exel MS			5,55				
i Kon			28,09				
Cordtec							
Pentex 450			5,47				
Device (Taponex)							
change	US\$	1					

Charge by blasthole		diameter	10 5/8	inch	FN Adv 65		
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	US\$	
Bottom charge	Fortis Advantage 65	2,62	1,25	10,5	751	562	
column charge	Fortis Advantage 65	2,62	1,25	0,0	0	0	
Total			1,25	10,5	751	562	
Volume by lineal meter		57					
Tonnes blasted		3.700.000					
Saving (US\$)		36.947					
Saving drilling (m)	2.927						
Blast holes (n°)	177						
Saving Explosives (t)	134						
Explosives cost	cUS\$/t					18,66	
Drilling cost	cUS\$/t					6,57	
Initiation system	cUS\$/t					2,60	
Devices	cUS\$/t					0,00	
Total drilling blasting	cUS\$/t					27,8	
Power	MJoule/ms					937	
Energy	MJoule/t					0,65	
Gas volume	l/t					225	

Charge by blasthole		diameter	10 5/8	inch	FN Ex 65		
	Explosives	PF equivalent	Density	L. of charge	Charge (kg)	US\$	
Bottom charge	Fortis Extra 65	2,80	1,25	10,5	751	668	
column charge	Flexigel Control 80	1,88	0,80	0,0	0	0	
Total			1,25	10,5	751	668	
Volume by lineal meter		57					
Explosives cost	cUS\$/t					18,99	
Drilling cost	cUS\$/t					5,62	
Initiation system	cUS\$/t					2,22	
Devices	cUS\$/t					0,00	
Total drilling blasting	cUS\$/t					26,8	
Power	MJoule/ms					1.042	
Energy	MJoule/t					0,60	
Gas volume	l/t					204	
Diferencias Cost	cUS\$/t					1,00	
Powder Factor (g/t)	MJ/t					-36	
Energy Factor	MJ/t					-0,06	

V1.-BIBLIOGRAFÍA

- 1) Menacho, J., Araneda, C., De Re Metallica Ingeniería Ltda (2011). Informe DRM-MGSA-355-12/11 Benchmarking: Herramientas de Optimización de Procesos Mina-Planta a Nivel Mundial
- 2) Rojas Gonzalo: “Modelo Geológico Yacimiento Gaby”, Informe Modelo Geológico; Codelco Chile, Unidad de Negocios Minera Gaby, 2004.
- 3) Informe PRO-T-09-C31-B “Modelamiento de Vibración y Revisión de Diseños de Tronaduras de Contorno en Minera Gaby”, Geoblast, 2009
- 4) Informe propiedades de roca intacta minera Gaby, 2009
- 5) Protocolos de Tronadura, Orica. Febrero –Septiembre,2012
- 6) López Jimeno C. Mecanismos de Rotura de la Roca. En: Manual de Perforación y Voladuras de Rocas. 2003. P.209-211.
- 7) Delgado Olivares M.: “Modelo de Predicción de Fragmentación Avalado por el Sistema de FotoanálisisWipfrag (Enaex S. A.)”, Trabajo de Titulación Universidad de Antofagasta, 2002. Profesor Guía: José Delgado Vega.
- 8) López Jimeno C.: Variables Controlables de las Voladuras. En: Manual de Perforación y Voladuras de Rocas. 2003. P. 243-255.
- 9) López Jimeno E.: “Influencia de las Propiedades de las Rocas y de los Macizos Rocosos en el Diseño y Resultado de las Voladuras”. 1982. P. 417-455.

V1.1.-PAGINAS DE INTERNET

- a) Minera Gaby <http://www.codelco.com/>
- b) Universidad de Chile <http://www.tesis.uchile.cl>
- c) Orica <http://www.oricachemic>

ANEXOS

ANEXO N°1: ANALISIS DE DISTRIBUCION GRANULOMETRICA.

Análisis de distribuciones granulométricas mediante los métodos de:

- 1) Visión Artificial de Distribución Granulométrica en correa (Split On Line)**
- 2) Análisis discreto de distribución granulométrica por muestreo en correa**
- 3) Análisis fotográfico sistema Wipfrag a frente de mineral tronado**
- 4) Análisis de resultados y correlaciones de los tres métodos**

- 1) Visión Artificial de Distribución Granulométrica en correa (Split On Line)**

Objetivo:

Determinar mediante un sistema de fotografías de alta resolución la distribución granulométrica del mineral en correa transportadora.

Alcances:

- 1) Determinar distribución granulométrica del producto del chancado primario.(correa transportadora CV 001 ver diagrama de planta)
- 2) Mediante cámara de alta resolución y luz artificial de alta luminosidad.
- 3) Sistema implementado desde Mayo de 2013.

Resultados:

- 1) Distribución de tamaños característicos del mineral
- 2) Gestión sobre Tronadura y Operación de chancado Primario

Figura 1:Esquema de Instalación:

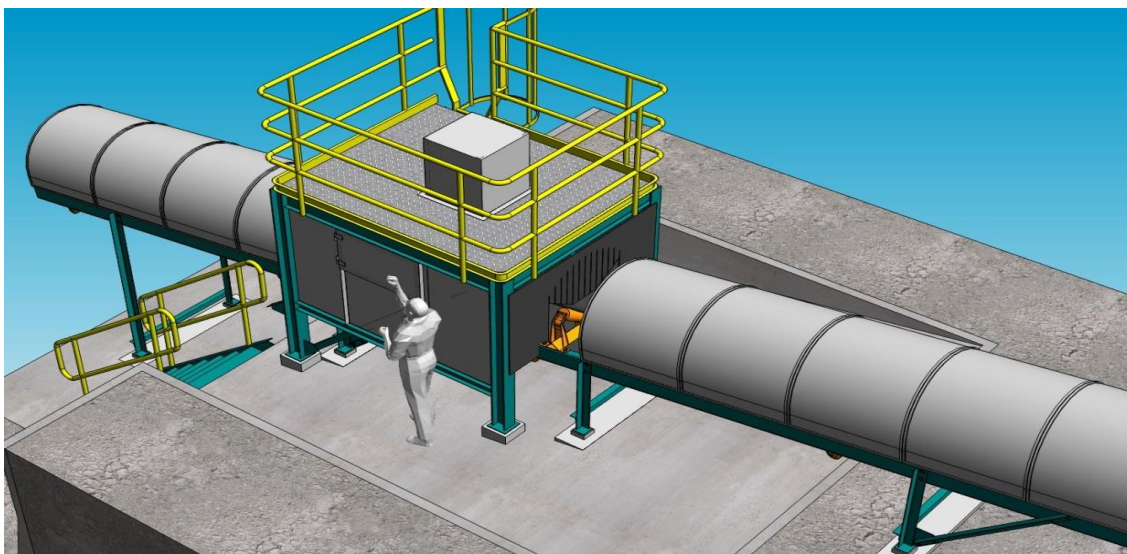
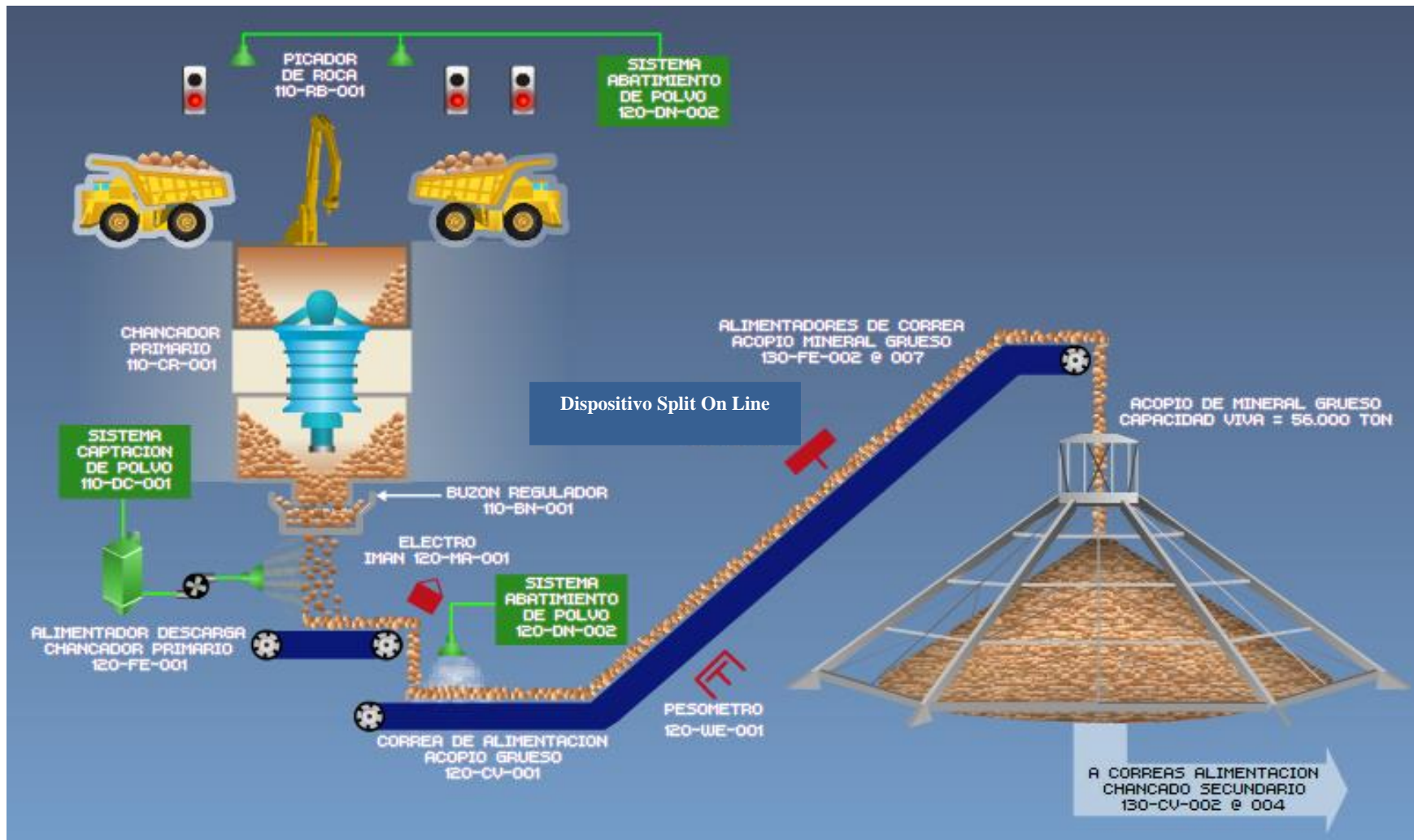


Diagrama de proceso sistema descarga de mineral a Chancador Primario y acopio de gruesos. (DGM)



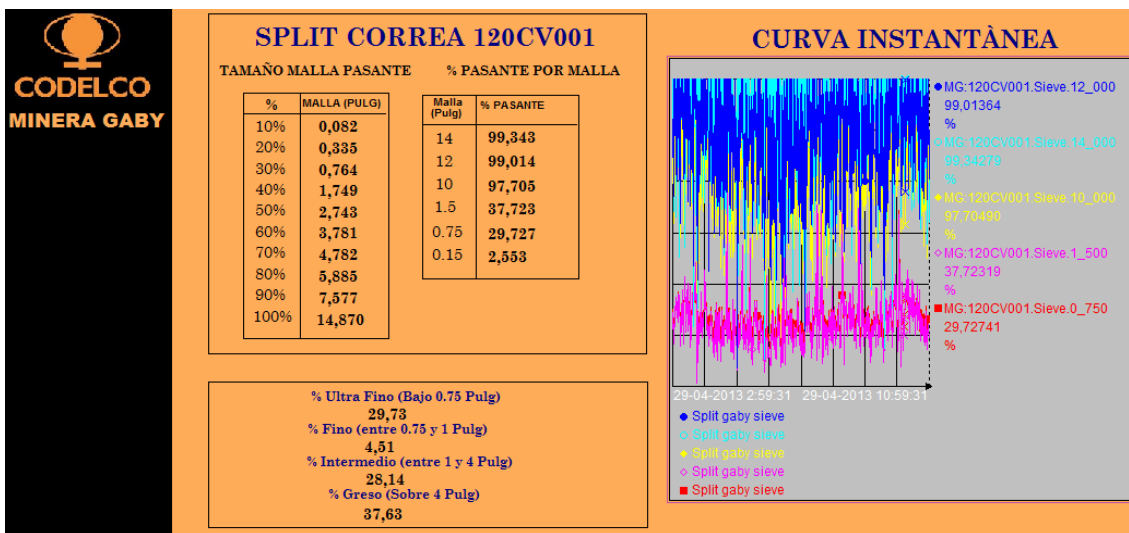
Fotografía N1: Sistema instalado en correa transportadora de gruesos (CV 001)



Fotografía 2: Vista del sistema de Visión Artificial (Split On Line) fotografías de alta resolución



Reportabilidad sistema Split On Line



Construcción de Distribuciones granulométricas periodo Abril – Diciembre 2013:

- 1) Los datos obtenidos son promedio día de cada clase (tamaño)
- 2) Las tablas son distribuciones granulométricas promedio de cada semana de los meses considerados.
- 3) Las bandas granulométricas se obtienen graficando las distribuciones de tamaños versus el porcentaje pasante de cada clase de tamaño.

Malla (")	Malla (mm)
12	305
10	250
8	200
5	125
2,5	62,5
2,0	50
1,5	38,1
1,0	25
0,7	18,75
0,6	15,625
0,492	12,5
0,369	9,375
0,246	6,25
0,156	3,962
0,079	2
0,012	0,3
0,006	0,15

Tabla de distribuciones granulométricas desde Abril a Diciembre 2013 desde sistema Split On Line

Malla (")	Malla (mm)	Prom Abril	Prom Mayo 1	Prom Mayo 2	Prom Mayo 3	Prom Mayo 4	Prom Mayo 5	Prom Junio 1	Prom Junio 2	Prom Junio 3	Prom Junio 4	Prom Julio 1	Prom Julio 2	Prom Julio 3	Prom Julio 4	Prom Agosto 1	Prom Agosto 2	Prom Agosto 3	Prom Agosto 4	Prom Agosto 5	Prom Septiembre 1	Prom Septiembre 2	Prom Septiembre 3	Prom Septiembre 4	Prom Octubre 1	Prom Octubre 2	Prom Octubre 3	Prom Octubre 4	Prom Octubre 5	Prom Noviembre 1	Prom Noviembre 2	Prom Noviembre 3	Prom Noviembre 4	Prom Diciembre 1	Prom Diciembre 2
12	305	99,29	90,77	90,61	90,99	96,50	99,50	99,40	96,24	92,57	99,23	99,05	99,04	90,44	90,92	90,45	99,20	90,30	90,55	99,02	96,36	99,31	99,40	99,19	99,40	99,65	99,49	99,22	90,25	90,31	90,04	90,52	90,50	90,94	90,04
10	250	97,70	96,74	96,52	97,08	95,33	90,31	90,04	94,73	90,92	97,62	97,06	97,00	96,76	96,52	96,15	97,30	94,06	95,94	96,89	94,05	97,71	90,26	97,51	90,29	90,83	90,20	97,52	95,67	96,01	95,19	96,41	96,25	97,00	97,23
8	200	93,46	91,19	91,28	91,05	92,21	94,60	94,12	90,33	86,61	92,93	91,75	92,56	92,00	90,50	90,26	92,17	86,56	89,21	91,15	88,85	93,36	94,64	92,82	94,57	95,81	94,10	92,67	89,71	90,45	88,72	91,30	90,69	92,22	92,90
5	125	75,42	70,34	71,52	76,22	70,14	78,26	76,60	71,76	60,69	72,63	70,80	73,42	72,65	69,82	69,40	71,62	62,38	66,33	69,80	69,76	75,73	79,91	73,42	76,08	80,10	75,36	72,90	69,03	70,45	66,49	71,72	70,19	72,99	74,97
2,5	60,5	51,10	46,63	47,18	52,70	56,23	53,66	52,00	47,49	45,36	47,38	46,26	49,49	48,29	46,14	45,36	47,93	41,21	42,40	45,57	45,50	51,92	57,33	48,42	52,34	56,89	50,07	48,96	45,80	46,97	43,06	48,41	46,76	49,61	50,92
2,0	50	46,06	41,80	42,28	47,55	51,40	48,16	46,74	43,57	40,74	42,53	41,55	44,70	43,48	41,71	41,57	43,12	37,80	38,29	41,10	41,11	46,83	52,13	43,58	47,40	51,02	45,17	44,34	41,47	42,56	38,92	43,81	42,41	45,26	46,32
1,5	38,1	41,17	37,25	37,75	42,54	46,25	42,04	41,66	38,00	36,40	38,18	37,30	40,29	39,03	37,50	37,48	38,40	34,90	34,50	37,03	37,03	41,94	47,04	39,16	42,83	45,77	40,70	39,99	37,52	38,49	35,16	39,62	38,46	41,40	42,11
1,0	25	36,64	33,19	33,62	37,80	41,42	37,94	36,90	33,92	32,57	34,32	33,48	36,07	35,08	33,90	33,84	34,65	32,57	31,26	33,50	33,39	37,43	42,10	35,32	38,71	41,29	36,85	36,19	34,04	34,67	31,95	35,85	34,98	38,05	38,31
0,7	18,75	31,90	28,85	29,23	32,92	36,08	32,90	32,15	29,40	28,31	29,83	29,10	32,72	33,33	32,27	32,23	33,04	31,30	29,80	31,94	31,69	35,38	39,84	33,66	36,90	39,03	35,19	34,49	32,51	33,01	30,57	34,16	33,46	36,61	36,54
0,6	15,625	29,22	26,39	26,75	30,15	33,04	30,18	29,41	26,96	25,89	27,28	26,63	30,35	31,35	30,39	30,34	31,09	29,58	28,06	30,07	29,76	33,24	37,41	31,69	34,76	36,68	33,15	32,49	30,65	31,06	28,82	32,19	31,55	34,59	34,42
0,492	12,5	26,23	23,67	23,99	27,06	29,66	27,06	26,57	24,17	23,21	24,46	23,88	27,23	28,11	27,25	27,20	27,88	26,56	25,15	26,96	26,60	29,80	33,55	28,42	31,19	32,89	29,74	29,16	27,54	27,87	25,85	28,91	28,33	31,13	30,91
0,389	9,375	22,82	20,56	20,85	23,54	25,80	23,50	22,90	20,99	20,16	21,25	20,75	23,67	24,41	23,68	23,63	24,21	23,11	21,84	23,41	23,17	25,89	29,15	24,70	27,13	28,56	25,84	25,36	23,90	24,23	22,48	25,17	24,67	27,17	26,91
0,246	6,25	18,74	16,65	17,09	19,32	21,17	19,25	18,76	17,19	16,51	17,41	17,01	19,41	20,00	19,42	19,37	19,84	19,00	17,89	19,19	18,99	21,22	23,88	20,25	22,27	23,41	21,20	20,82	19,73	19,89	18,45	20,69	20,23	22,42	22,12
0,156	3,902	16,16	14,60	14,82	16,76	18,36	16,68	16,26	14,89	14,31	15,10	14,75	16,94	17,34	16,94	16,80	17,20	16,50	15,51	16,68	16,46	18,39	20,70	17,57	19,33	20,29	18,39	18,08	17,15	17,26	16,01	17,98	17,62	19,53	19,22
0,079	2	11,47	10,28	10,44	11,82	12,99	11,73	11,43	10,48	10,07	10,63	10,39	11,67	12,21	11,67	11,83	12,10	11,68	10,93	11,72	11,59	12,95	14,56	12,39	13,66	14,28	12,97	12,77	12,15	12,19	11,30	12,72	12,47	13,89	13,59
0,012	0,3	4,06	3,63	3,69	4,16	4,54	4,12	4,02	3,70	3,55	3,76	3,68	4,20	4,33	4,21	4,19	4,17	4,17	3,88	4,15	4,10	4,58	5,13	4,40	4,86	5,05	4,61	4,54	4,34	4,33	4,02	4,53	4,44	4,99	4,84
0,006	0,15	2,75	2,46	2,50	2,82	3,07	2,79	2,72	2,50	2,40	2,55	2,49	2,85	2,94	2,86	2,84	2,89	2,83	2,63	2,82	2,78	3,10	3,47	2,98	3,30	3,48	3,13	3,08	2,94	2,94	2,73	3,07	3,02	3,38	3,38

Gráfico de distribuciones granulométricas desde Abril a Diciembre desde sistema Split On Line

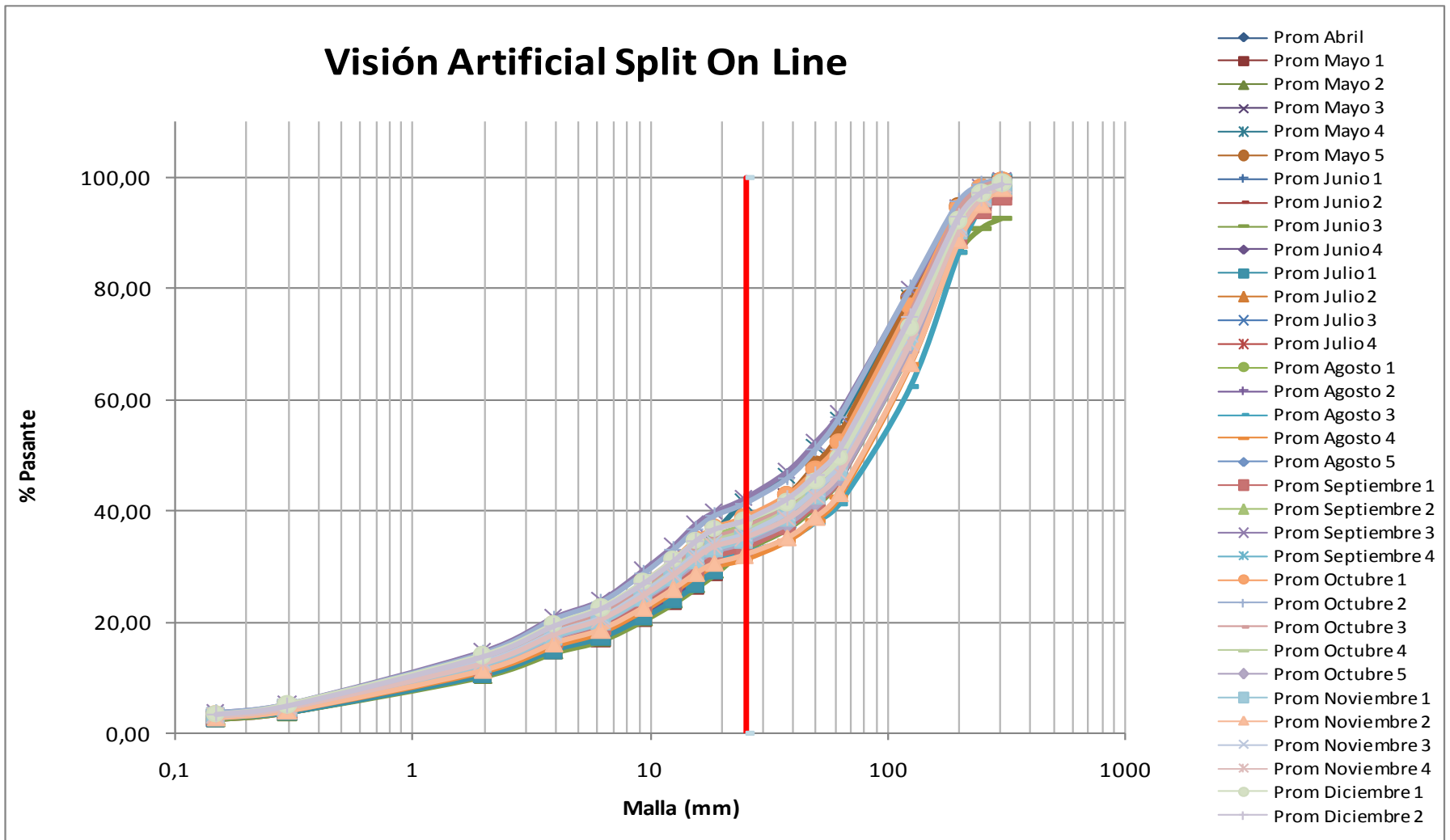
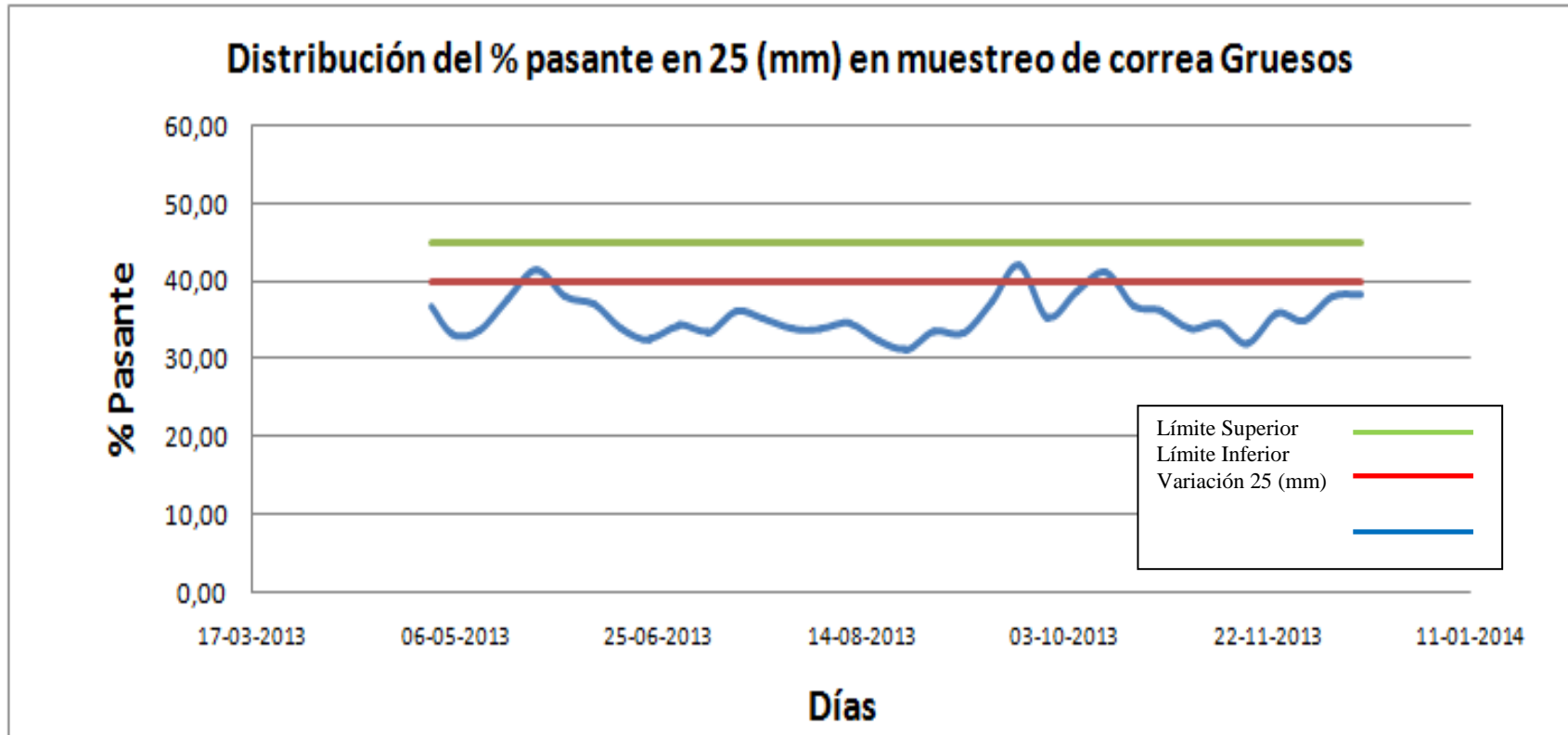


Gráfico de variabilidad del tamaño característico 25 (mm) desde Abril a Diciembre desde sistema Split On Line



2) Análisis discreto de distribución granulométrica por muestreo en correa

Objetivo:

Determinar mediante la ejecución de un protocolo de muestreo estándar la distribución granulométrica del mineral dispuesto en correa transportadora

Alcances:

- 1) Determinar distribución granulométrica del producto del chancado primario.(correa transportadora CV 001 ver diagrama de planta)
- 2) Muestreo manual mediante protocolo estándar de muestreo en tramo de 10 (m) de correa.
- 3) Masa característica aproximada de 1500 (kg).

Resultados:

- 1) Distribución de tamaños característicos del mineral.



Ficha de muestreo manual estándar:

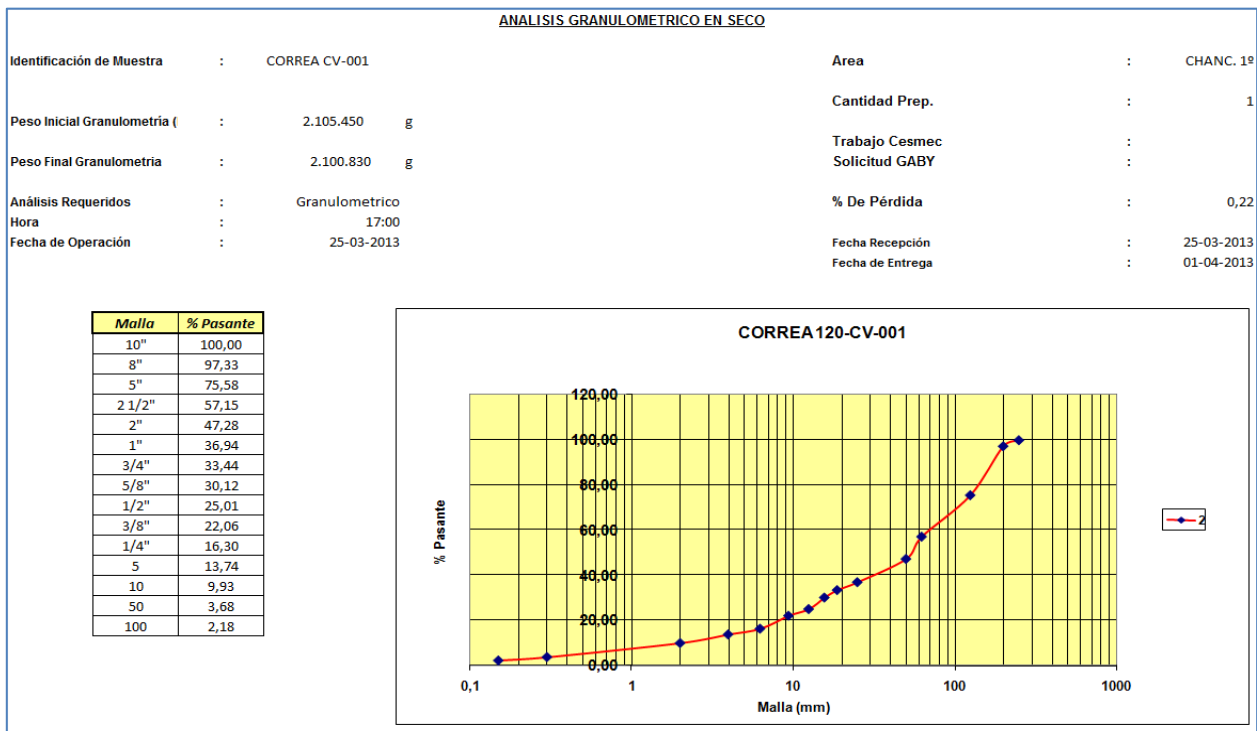


Tabla de distribuciones granulométricas muestreo año 2013

Muestras en Correa									
Malla (")	Malla (mm)	17-01-2013	16-02-2013	07-03-2013	21-03-2013	25-03-2013	04-04-2013	07-11-2013	16-11-2013
10"	250	96,47	97,82	100,00	99,10	100,00	94,61	97,94	96,01
8"	200	84,89	86,07	98,19	94,23	97,33	86,45	87,65	73,29
5"	125	51,49	68,25	84,04	81,08	75,58	79,71	71,23	53,01
2 1/2"	62,5	30,44	49,96	74,67	63,31	57,15	73,09	48,15	34,31
2"	50	24,20	41,84	65,48	53,57	47,28	67,90	40,83	28,56
1"	25	16,37	38,15	51,05	40,14	36,94	54,39	28,69	18,26
3/4"	18,75	14,41	30,00	46,78	35,57	33,44	50,36	24,91	15,31
5/8"	15,625	12,75	26,30	42,59	31,29	30,12	46,42	23,09	14,14
1/2"	12,5	11,09	22,97	38,41	26,93	25,01	42,68	21,03	11,86
3/8"	9,375	10,04	19,36	35,12	24,08	22,06	39,56	18,43	10,10
1/4"	6,25	8,23	16,30	29,86	20,81	16,30	34,65	16,61	8,32
5	3,962	6,65	13,71	24,76	17,77	13,74	30,56	14,42	6,53
10	2	4,45	9,69	19,06	13,05	9,93	23,96	11,86	4,80
50	0,3	1,72	8,71	7,40	3,96	3,68	7,52	3,54	1,73
100	0,15	0,99	4,77	3,97	2,16	2,18	5,42	2,22	1,15

Gráfico de distribuciones granulométricas año 2013

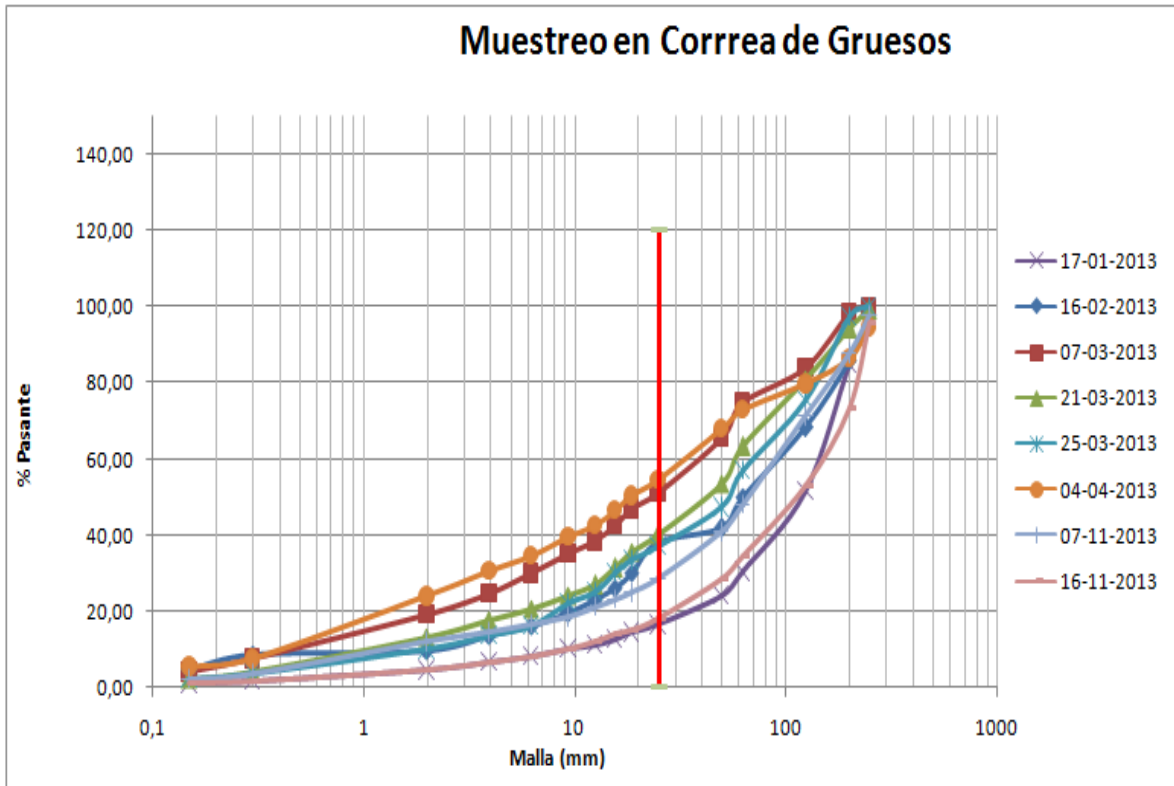
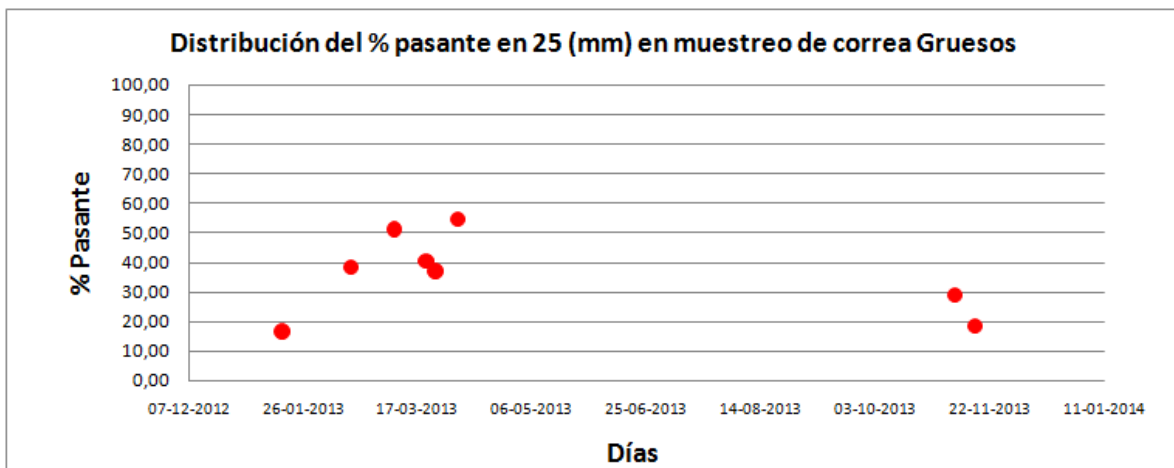


Gráfico de variabilidad del tamaño característico 25 (mm) muestreos en correa año 2013



3) Análisis fotográfico sistema Wipfrag a frente de mineral tronado

Objetivo:

Determinar mediante la ejecución de un protocolo de fotografías estáticas comparativas distribuciones granulométricas del mineral en el frente Tronado

Alcances:

- 1) Determinar distribución granulométrica del mineral en el frente tronado mediante análisis fotográficos estáticos
- 2) Análisis comparativos del mineral tronado versus tamaños definidos por esferas características

Resultados:

- 1) Distribución de tamaños característicos del mineral.
- 2) Análisis de mineral tronado en función de los parámetros de tronadura.

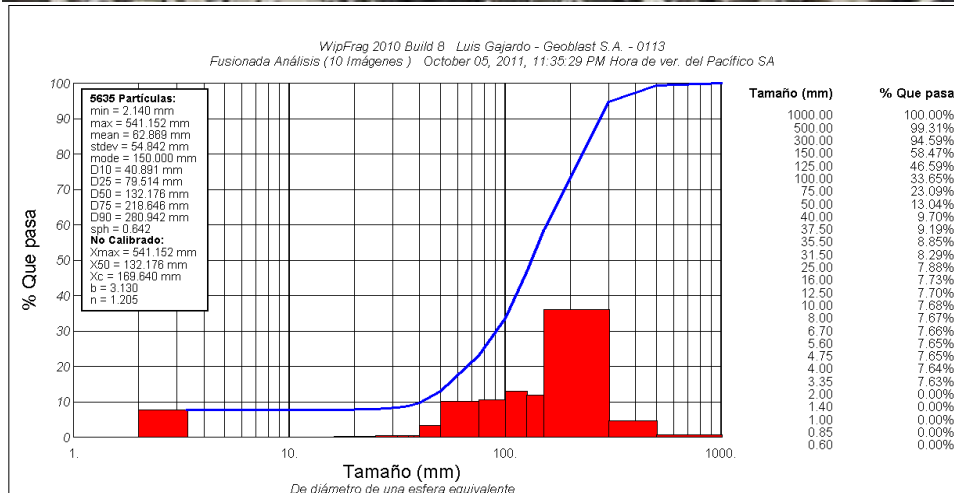


Tabla de distribuciones granulométricas en frente tronado año 2013

ANALISIS FRENTE TRONADO																									
Malla (")	Malla (mm)	28-03-2013	29-03-2013	30-03-2013	12-04-2013	14-04-2013	09-05-2013	11-05-2013	17-06-2013	18-06-2013	15-07-2013	24-08-2013	27-08-2013	05-09-2013	07-09-2013	17-09-2013	20-09-2013	21-09-2013	22-09-2013	22-10-2013	23-10-2013	26-10-2013	29-10-2013	03-11-2013	
0,4	10,16	14,90		23,50					23,00								13,00		12,00	37,60	15,00	13,30	13,30	15,40	
0,5	12,7	20,20	19,40		18,60	26,10	21,70	22,20	29,38	37,10	17,4	15,60	5,3	15,6	9,7	23,50		37,10							
0			42,84	51,85	27,69	44,66	31,00	38,95		50,99							35,70		36,00	75,40	36,00	36,20	36,20	31,70	
1	25,4	46,26	62,93	62,90	42,84	63,23	46,50	66,87	58,98	64,87	40,7	39,20	15,9	39,2	20,4	55,90	61,10	70,43	59,10	90,30	60,80	61,80	61,80	44,40	
1,5	38,1	70,17	84,40	79,17	71,20	80,04		81,86	79,70		64,6	64,70	32,3	64,7	35,3	76,90	79,00	96,98	77,20	95,20	74,80	79,50	79,50	54,90	
2	50,8	84,30	92,43	90,50	87,29	90,66	90,86	88,65	91,67	99,40	79,9	80,30	47,4	80,3	50,2	90,50	92,10	100,00	89,20	97,40	87,90	92,70	92,70	61,70	
0			96,98	96,08	91,72	96,27	97,10	94,40	96,32	100,00	90,5	89,30	62,2	89,3	62,4	95,50	97,30		95,30	100,00	91,20	96,90	96,90	66,80	
3	76,2	96,73	98,50	99,00	95,23	99,40	98,79	97,48	98,40		95,4	94,10	73,6	94,1	75,6	99,00	98,60		97,60		93,00	98,40	98,40	69,50	
3,5	88,9	98,95	99,20	100,00	97,13	100,00			100,00		98,3	96,10	84,6	96,1	82,3	100,00	100,00		100,00		93,30	98,50	98,50	73,80	
4	101,6	99,00	100,00		97,48			98,00			100	98,90	89,3	98,9	89,5						100,00	98,60	98,60	77,50	
4,5	114,3	99,60			98,98		100,00	98,33				100,00	92,2	100	95							100,00	100,00	79,70	
5	127	100,00			100,00			100,00						95,3		98,6								80,90	
5,5	139,7													97,2		100								80,90	
6	152,4													100										100,00	

Gráfico de distribuciones granulométricas frente tronado año 2013

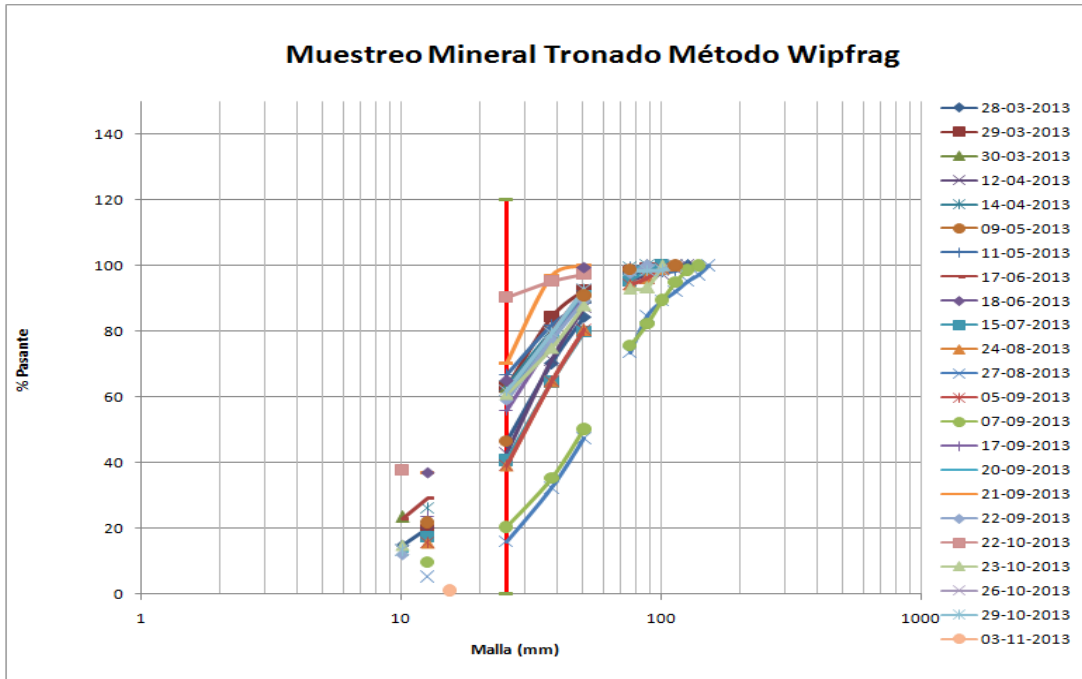
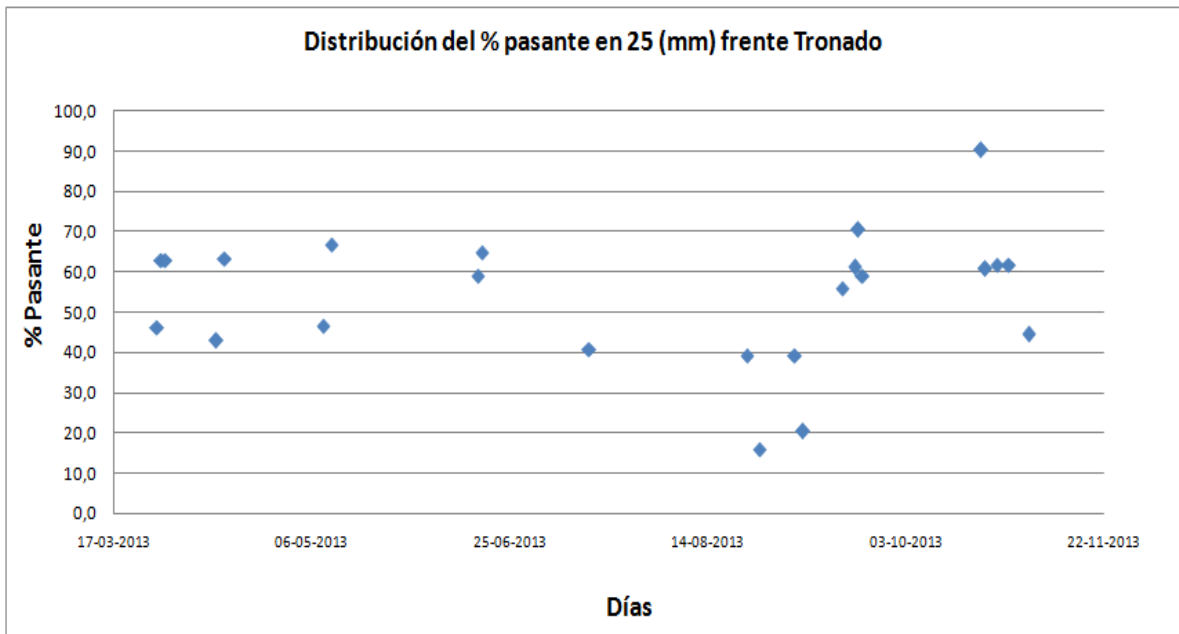


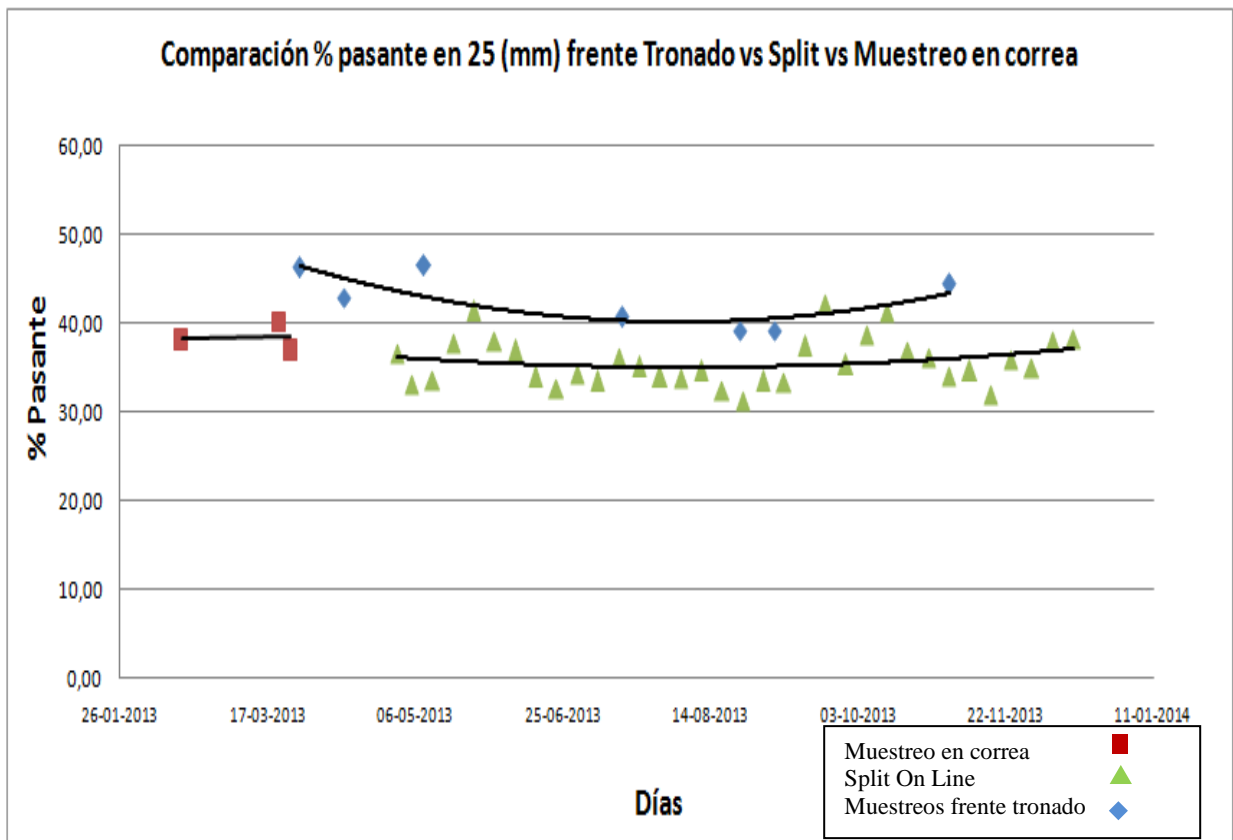
Gráfico de variabilidad del tamaño característico 25 (mm) en frente tronado año 2013




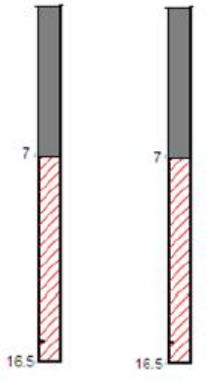
4) Análisis de resultados y correlaciones de los tres métodos

Del análisis de los tres métodos se concluye lo siguiente:

- 1) Se genera una limpieza de datos en función de las consideraciones operacionales al momento de realizar los procedimientos de muestreo en frente tronado (fotografías) y los muestreos manuales en correa.
- 2) El muestreo en correa discreto (batch) genera la calibración del sistema de visión artificial, esto se observa en la etapa inicial de los muestreos y dad las tendencias indicadas en el gráfico existe una correspondencia de ambos sistemas.
- 3) La comparación del sistema Split versus el sistema de fotografías de frente tonado tienen una correlación pero con una banda de desviación sistemática esta se debe generalmente a las desviaciones propias de ambos métodos el wipfrag no detecta mineral granular fino y el Split por el método subestima los finos por lo los métodos convergen a un % de finos cercano a los 40% pasante bajo los 25 (mm) esto nos indica que el modelo para optimizar por tronadura el tamaño característico va en la dirección correcta, faltando mejorar los análisis para optimizar los parámetros de tronadura y pasar la barrera de los 40% pasante en 25 (mm).



ANEXO N°2: PROTOCOLO DE TRONADURA.

PROTOCOLO TRONADURA F04_B2550_01						
UBICACIÓN DISPARO	PARAMETROS PERFORACION		PARAMETROS TRONADURA		CONFIGURACION DE CARGA	
 <p>LT: PT-DF-BI</p>	Fecha tronadura	31-Jul	Diámetro	10 5/8	 <p>7 16.5 7 16.5</p> <p>Borde Producción</p> <p>Taco 7 Taco 7</p> <p>435 kg FX80 636 kg FA50</p>	
	Fase	04	Tonelaje malla	391,108		
	Banco	2550				
	Malla	01	FX80	21,750		
	Densidad roca (gr/cc)	2.51	FA50G	103,060		
	Taco (m)	7	Carga total (kg)	124,810		
	Burden (m)	7	Factor carga (gr/t)	319		
	Spacing (m)	7	Cantidad boosters	212		
	Altura banco (m)	15	Cantidad I-kon	212		
	Pasadura (m)	1.5	Cantidad Exel	212		
	Mts a perforar	3,498				
	Indice Perforación (t/m)	112				
			COSTO TEORICO US\$/t	0.24		

HOJA CALCULO TRONADURA															
Fecha proyecto		31-Jul-12		Litología											
Fase		04		Densidad (gr/cm ³)		2.51									
Banco		2550		Tonelaje a tronar (t)		391,108									
Tronadura		01		Metros perforados (m)		3,498									
Altura de banco (m)		15		Total de explosivo (kg)		146,516									
Total de pozos		212		Factor de carga (gr/t)		375									
Tipo de tronadura		Contorno													
PERFORACION				CARGA DE FONDO				CARGA COLUMBIA			Tonelaje por peso		Factor de		
R" Pozos	Diám. (")	Burden (m)	Espec. (m)	Pasadura (m)	Long. Pozo (m)	Tipo de explosivo	Cantidad (kg)	Long. (m)	Taco (m)	Tipo de explosivo	Cantidad (kg)	Long. (m)	(t)	f. Cig(t)	
B1															
B2															
PA1	50	10 5/8	7	7	1.5	16.5	FX110	587	9.5	-	-	-	1,845	318	
P1	162	10 5/8	7	7	1.5	16.5	FA65	723	9.5	-	-	-	1,845	392	
P2														375	
Carga FX110		29,362		Densidades		Explosivo									
Carga FA65		117,154		1.08 Fortan Adv 30											
TOTAL		146,516		1.2 Fortan IREX 40											
				1.17 Fortan Adv 50G											
				1.33 Fortan Adv 65											
				0.8 AMFO											
				0.8 FX30											
				1.08 FX110											

ANEXO N°3: HOJA TECNICA DE EXPLOSIVOS.

Fortan Advantage

	Sistema Fortan Advantage			
Producto	20	30	40	50
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.85-1.0	1.05-1.2	1.1-1.25	1.25-1.38
Diámetro mínimo barrenos (mm)	89	89	102	150
Profundidad máxima barrenos (m)	30	30	30	30
Máxima longitud de carga (m)	25	25	25	25
Tipo de barrenos	Seco			Seco/ desaguado
Sistema de cargado	Vaciado			
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el Diámetro mínimo del barreno.	Pentex™ AP de 450g			
VOD típico (km/s) ⁽²⁾	2.5-5.8	2.8-6.1	3.1- 6.3	3.2-6.4
Energía Relativa Efectiva (REE) ⁽³⁾				
Fuerza Relativa en peso	107-108	110-112	116-118	118-120
Fuerza Relativa en volumen	134-135	151-154	185-190	204-207
Emisión CO ₂ (kg/ton) ⁽⁴⁾	172	172	158	149
Tiempo de Espera ⁽⁵⁾	7 días			

Fortan Mex

	Sistema Fortan Mex			
Producto	20	30	40	50
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.98-1.02	1.09-1.13	1.18-1.24	1.28-1.32
Diámetro mínimo barrenos (mm)	89	102	102	127
Profundidad máxima barrenos (m)	30	30	30	30
Máxima longitud de carga (m)	25	25	25	25
Tipo de barrenos	Seco			Seco/desa guado.
Sistema de cargado	Vaciado			
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el mínimo diámetro	Pentex™ de 450g			
VOD típico (km/s) ⁽²⁾	2.5-5.8	2.8-6.1	3.1- 6.3	3.2-6.4
Energía Relativa Efectiva (REE) ⁽³⁾				
Fuerza Relativa en peso	110-113	111-114	113-116	114 - 117
Fuerza Relativa en volumen	145-148	155-158	169-173	186-189
Emisión CO ₂ (kg/ton) ⁽⁴⁾	173	174	172	167
Tiempo de espera ⁽⁵⁾	3 días			

Flexigel

	Sistema Flexigel™ Control			
Propiedades	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	Sólo Barrenos Secos			Secos y Desaguados
Sistema de Carguío	vaciado			vaciado/ Bombeable
Booster Pentex™ recomendado para diámetro mínimo del barreno	Pentex™ 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⁾	179	169	168	163
Tiempo de Espera	7 días			

ANEXO N°4: PARAMETROS DE PERFORACION Y TRONADURA Y CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LAS TRONADURAS MUESTREADAS.

Ubicación				Perforación y Tronadura															
IDENTIFICACIÓN TRONADURA				PARAMETROS DE DISEÑO							EXPLOSIVO								
M	Fecha	Banco	Disparo	Tonelaje	B	S	FC	Diametro	Taco	FM30	FM50	Anfo	FX50	FX 80	FX110	FA50	FA50G	FA65	
1	11-feb	2580	03-03B-05A	515224	7	9	291	10 5/8	6.5	x									
2	14-feb	2580	03-05A-05B-06	457000	7	9	282	10 5/8	6.5	128916									
3	24-feb	2580	06.	487495	7	9	233	10 5/8	7	159098									
4	11-mar	2580	17	485000	7	9	265	10 5/8	6.5	70215		58295							
5	16-mar	2580	09.	178000	7	9	202	10 5/8	7			32052							
6	27-mar	2580	01B-04	401219	7	9	232	10 5/8	7			X							
7	20-mar	2580	10-11.	550000	7	9	195	10 5/8	6.5			110350							
8	11-abr	2580	11	248000	8	9	280	10 5/8	6.5	124659									
9	03-may	2565	07A	240187	7	7	361	10 5/8	7		59376			18270					
10	12-may	2565	09.	316500	7	7	249	10 5/8	6.5		69363			12477					
11	13-may	2565	11	503000	8	9	246	10 5/8	7		114445			16520					
12	20-may	2565	06.	327000	8	9	283	10 5/8	7		92545			10434					
13	03-jun	2565	08B-10A	206630	7	7	201	10 5/8	7					18074		40904			
14	08-jun	2565	06B	209588	8	9	243	10 5/8	7		82655			9999					
15	16-jun	2565	15C-24A	253100	7	7	293	10 5/8	7					17880		84190			
16	11-jul	2565	11-18.	184403	9	10	240	10 5/8	7				4300	21600				33610	
17	04-ago	2550	02_	320000	7	7	404	10 5/8	7										115707
18	20-sep	2550	08	254966	8	8	291	10 5/8	7						14183				60023

Geología																							
M	UT			LITOLOGÍA							ALTERACION			MENAS									
	UT1	UT2	UT3	8H	8I	PG	PT	DF	SV	GD	K	KSer	Ser	300	430	440	445	450	455	460	470	480	
1	20	70	10	5	5		5			85	50	20	30	50		30	10			10			
2	50	40	10	5	15		15	5		60	40	30	30	10	20	40					30		
3	5	90	5							100	50		50			70	10				10		10
4	20	80		10	10				60	20	90		10	40	10	30					10	10	
5	40	30	30	10			80			10	50	10	40	25		25	20				10		20
6	40	40	20				10			90	70		30	30	30	30	10						
7	40	30	30	10	30		30			30	40	30	30	10		20	40				30		
8	30	60	10		10		25	25		40	10	80	10	80	10	10							
9	25	50	25	5	5	5	40			45	70	10	20	5	10	60	15				5		5
10	40	60			30		10			60	10	50	40	10		40	10	25			15		
11	40	60		10	5		5			80	50	20	30	40	20	30	5	5					
12	10	90		10	30		30			30	90	5	5	20	10	70							
13	90	10		70	15					15	85		15	40			40					20	
14	30	50	20	15			15			70	100			20		70	10						
15	40	60		20	10		50	10		10		70	30	5		40	20	30			5		
16		70	30							100	100			30		40	10	10			10		
17	20	50	30		10	5	25			60	90		10	10		80	10						
18	80	10	10	35	20		30	10		5	10	30	60			20	25	25			10	20	

ANEXO N°5: CONTROL RENDIMIENTO DE EQUIPOS DE CARGUIO.

Reporte Categoría Cargas y Tiempo
11-FEB-13 D a 11-FEB-13 N -- 2 3 N -- 2

Pala	Mineral			Esteril			Total			Used Horas		Net/Used Hr
	Loads	Loads	Loads	Tons	Tons	Tons	Mineral	Esteril	Total	Mineral	Esteril	
PF_01 ST00X 1	40	0	40	11600	0	11600	6,4	0,0	6,4	1796,6		
PF_01 ST00X 2	20	0	20	5900	0	5900	2,9	0,0	2,9	1362,7		
Subtotal	60	0	60	17400	0	17400	9,4	0,0	9,4	3159,3		
PF_02 ST00X 1	40	0	40	11600	0	11600	5,3	0,0	5,3	2176,2		
PF_02 ST00X 2	66	0	66	19140	0	19140	7,3	0,0	7,3	2813,9		
Subtotal	106	0	106	30740	0	30740	12,6	0,0	12,6	4990,1		
PR_01 F5-2580-05a	239	0	239	68410	0	68410	16,2	0,0	16,2	4107,1		
PR_02 F5-2625-06	0	239	239	0	69310	69310	0,0	12,5	12,5	5926,4		
PC_01 F4-2520-02	16	0	16	4640	0	4640	1,1	0,0	1,1	4315,3		
PC_01 F4-2520-03	146	0	146	42340	0	42340	11,3	0,0	11,3	3746,2		
Subtotal	182	0	182	46980	0	46980	12,4	0,0	12,4	3790,2		
Total	557	239	796	161530,0	69310,0	230840,0	50,6	12,5	63,1	3887,3		

Turnos sin resúmenes actualizados:
Presione la barra espaciadora para continuar

Reporte Categoría Cargas y Tiempo
12-FEB-13 D a 12-FEB-13 N -- 2 3 N -- 2

Pala	Mineral			Esteril			Total			Used Horas		Net/Used Hr
	Loads	Loads	Loads	Tons	Tons	Tons	Mineral	Esteril	Total	Mineral	Esteril	
PF_01 ST00X 2	102	0	102	29960	0	29960	12,6	0,0	12,6	2995,4		
PF_02 F4-2635-23	24	0	24	6960	0	6960	3,2	0,0	3,2	2167,5		
PF_02 ST00X 1	29	0	29	8410	0	8410	4,3	0,0	4,3	1729,5		
Subtotal	55	0	55	15370	0	15370	9,1	0,0	9,1	3992,7		
PR_01 F5-2580-05a	188	0	188	54620	0	54620	12,3	0,0	12,3	4418,3		
PR_02 F5-2625-06	0	189	189	0	57710	57710	0,0	12,7	12,7	4643,5		
PC_01 F4-2520-03	170	0	170	49300	0	49300	12,0	0,0	12,0	4125,1		
Total	513	189	712	148770,0	57710,0	206480,0	44,9	12,7	57,6	3983,2		

Turnos sin resúmenes actualizados:
Presione la barra espaciadora para continuar

