

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA**



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DE INICIACION  
ELECTRÓNICA EN PERU - SEGURIDAD Y VERSATILIDAD”**

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

**PRESENTADO POR:**

**BENJAMÍN AUGUSTO HUAMÁN UBILLÚS**

**Lima - Perú  
2010**

El presente trabajo se lo dedico a mis padres Benjamín y Mirtha, a mis hermanos Paulo y Juan, por el apoyo incondicional que me brindaron en los años como estudiante y porque aún hasta ahora siguen siendo de gran ayuda en mi vida profesional.

## AGRADECIMIENTO

Mis mayores agradecimientos son para EXSA S.A. por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de Titulación, en especial al ingeniero Ronald Añazco, Jefe de Asistencia Técnica Tajo, por haber depositado en mi la confianza para poder llevar a cabo las diferentes pruebas a nivel nacional, de las cuales he podido recopilar toda la información que vuelco en este trabajo.

Así mismo un agradecimiento eterno hacia la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalurgica de la Universidad Nacional de Ingeniería por haberme provisto de los recursos y herramientas que me han valido para poder adaptarme y desarrollarme en el ámbito profesional.

## **RESUMEN**

Actualmente la tecnología en explosivos ha alcanzado niveles que años atrás no se pensaba. Prueba de ello es el desarrollo de los detonadores electrónicos y sus propios sistemas de control.

En el mercado encontramos tres sistemas de iniciación electrónica, los cuales cuentan con una reputación intachable a nivel mundial. En este trabajo quiero presentar uno de ellos y con los cuales mi actual empresa tiene vínculos comerciales, el sistema sudafricano Smartshot.

El objetivo principal de este estudio es mostrar las características de este sistema, demostrando su seguridad y versatilidad a través de experiencias prácticas en campo. Así mismo destacar que para que un sistema de este tipo sea capaz de trabajar adecuadamente, las empresas mineras debieran identificar las oportunidades de mejoras y nosotros como empresa de servicios satisfacer a nuestros clientes entregándoles un servicio de calidad y con la plena confianza de que se les está brindando una herramienta moderna y segura.

## INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Motivos que dan origen al estudio .....	8
1.2. Objetivos.....	8
1.2.1. Objetivos Generales.....	8
1.2.1. Objetivos Específicos.....	8
1.3. Metodología de trabajo.....	9
1.4. Alcances y Limitaciones.....	9
 CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES.....	 10
2.1. Antecedentes del Sistema Smartshot.....	10
 CAPÍTULO III: VISUALIZACIÓN DEL NEGOCIO MINERO.....	 12
3.1. Contexto Principal.....	12
3.2.1. Enfoque de Negocios.....	13
3.2.2. Gestión del negocio minero.....	14
3.3. Influencia de la voladura en el negocio minero.....	17
 CAPÍTULO IV: TECNOLOGÍA DEL DETONADOR ELECTRÓNICO HOTSHOT.....	  20
4.1. Introducción.....	20
4.2. Ensamblaje del detonador Serie Shot.....	20
4.2.1. Ensamblaje interno del detonador Serie Shot.....	21
4.2.1.1. Plug de crispado.....	22
4.2.1.2. La placa de circuito impreso.....	22
4.2.1.3. H-plug de seguridad.....	24
4.3. Control de calidad de los cables utilizados.....	24
4.3.1. Prueba de Resistencia a la Presión Hidrostática – Diesel.....	26
4.3.2. Prueba a la Tensión.....	27
4.3.3. Prueba a la Abrasión.....	27
 CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT.....	 30
5.1. Componentes y accesorios del Sistema.....	31
5.1.1. Iniciador de Línea (String Starter).....	31
5.1.2. Tagger.....	32
5.1.3. Bench Box.....	33

5.1.4. Bloque de conexión.....	34
5.1.5. Base Station.....	36
5.1.6. Llaves de disparo.....	36
5.1.7. Cables Extensores.....	37
5.1.8. Cable de disparo de 2 vías.....	38
5.1.9. Conector Terminal (End Plug).....	39
5.1.10. Kit de reemplazo.....	40
5.2. Visión General del Sistema.....	41
5.2.1. Disparo Remoto vía Radiofrecuencia.....	42
5.2.1.1. Resumen de Riesgos asociados a la RF.....	43
5.2.1.2. Implicancias médicas de la radiación RF.....	44
5.2.2. Disparo Remoto vía cable de disparo.....	45
5.2.3. Disparo Local.....	45
5.3. Sistema de seguridad.....	46
5.3.1. La seguridad inherente de los componentes físicos.....	46
5.3.1.1. Seguridad inherente.....	47
5.3.1.2. Protección contra descargas electrostáticas.....	48
5.3.1.3. Protección contra sobre voltajes.....	49
5.3.1.4. Interferencias Electromagnéticas.....	49
5.3.2. Seguridad proporcionada por el software y hardware.....	50
CAPÍTULO VI: PROTOCOLO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT EN PERÚ.....	52
6.1. Organización del Proyecto.....	52
6.2. Forma de proceder.....	53
6.2.1. Construcción de Línea Base.....	53
6.2.2. Elaboración del Procedimiento de Trabajo Seguro E IPER.....	53
6.2.3. Planificación y Ejecución de Voladuras Electrónicas Masivas.....	53
6.2.4. Análisis Pre y Post Voladura.....	54
CAPÍTULO VII: PROTOCOLO DE CAPACITACIÓN.....	56
7.1. Curso Básico para manipuladores.....	57
7.2. Curso para usuarios.....	58
CAPÍTULO VIII: APLICACIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT EN PERÚ.....	60
8.1. Antecedentes Generales.....	60
8.1.1. Geología Local.....	60
8.1.2. Procesos de Mina Antamina.....	64
8.1.2.1. Perforación.....	64
8.1.2.2. Acarreo de material.....	65
8.2. Estudios Realizados.....	67
8.2.1. Reducción de tiempos.....	67
8.2.2. Comparación de velocidad de carguío.....	73
8.2.3. Aplicación del Sistema Smartshot en Fase 5 Antamina...	76

8.2.4. Voladura Controlada en Estribo Derecho de Presa	
De Relaves – Antamina.....	86
8.2.4.1. Antecedentes.....	86
8.2.4.2. Parámetros Geológicos.....	86
8.2.4.3. Diseño de malla y carga.....	87
8.2.4.4. Resultados obtenidos.....	91
CAPÍTULO IX: EVOLUCIÓN DE CONSUMO DEL DETONADOR ELECTRÓNICO SMARTSHOT.....	99
CONCLUSIONES.....	102
RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	110
APENDICES.....	111
APENDICE A.....	112
APENDICE B.....	125

## **CAPITULO I: INTRODUCCION**

### **1.1. MOTIVOS QUE DAN ORIGEN AL ESTUDIO.**

El propósito de este estudio es mostrar las bondades en seguridad y versatilidad del nuevo sistema de iniciación electrónica SmartShot, concientizando a los clientes de los múltiples beneficios en el uso de este producto, principalmente en temas de seguridad.

### **1.2. OBJETIVOS.**

#### **1.2.1. Objetivos Generales.**

El objetivo principal es mostrar las características del sistema electrónico Smartshot.

Así al final de este estudio entregar una muestra potencial del valor agregado de esta nueva tecnología, demostrando los erróneos cuestionamientos acerca de la implementación de esta tecnología, basados principalmente en los costos, sin tomar en cuenta la seguridad y por ende la productividad que se desprende del uso de este sistema.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos.**

En forma particular se analizará y estudiará las variables más importantes que se deben tomar en cuenta para potenciar la utilidad y beneficio del uso de



detonadores electrónicos Hotshot. Dando a conocer las herramientas, técnicas y procedimientos correctos que se deben seguir para obtener el mejor resultado de la implementación de este sistema.

### **1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.**

Para llevar a cabo este trabajo se revisará la bibliografía relacionada a los detonadores electrónicos, haciendo referencia específicamente al detonador Hotshot y al sistema Smartshot. Se recopilará información de las operaciones donde se viene utilizando el sistema, mostrando en forma práctica la seguridad y versatilidad del sistema.

### **1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.**

Los alcances y limitaciones que se consideraran en este estudio base, utilizable por los Equipos de Soporte Técnico de EXSA, guardan relación con no limitar los beneficios y utilización de los detonadores electrónicos a una sola mina ó a un solo tipo de minería, sino más bien proporcionar un campo de visión y análisis mucho más amplio, es decir evaluar su implementación considerando todo tipo de características y condiciones asociadas a la minería y construcción.

## **CAPITULO II. ANTECEDENTES GENERALES**

EXSA S.A. es una empresa de capitales peruanos, sus actividades se concentran en la fabricación y comercialización de explosivos industriales así mismo presta servicios asociados a las operaciones de voladura en las distintas unidades mineras a nivel nacional, operando tanto en minería subterránea como superficial.

DetNet es una empresa de origen sudafricano, la cual se origina como un Joint Venture entre DynoNobel y African Explosives. Su actividad principal es la fabricación y comercialización de sistemas de iniciación electrónica. Actualmente ofrece al mercado mundial cuatro Sistemas para las diferentes necesidades de los clientes, estos son: Smart Shot; Digishot; HotShot +; Quickshot.

En el año 2008 EXSA S.A. decide comercializar los detonadores electrónicos HotShot, ingresando inicialmente a Volcan y Antamina, así mismo se han realizado pruebas en Toquepala, Lagunas Norte y Yanacocha, demostrándose la seguridad y versatilidad del Sistema Smartshot.

### **2.1. ANTECEDENTES DEL SISTEMA SMARTSHOT.**

El sistema SmartShot es otra optimización tecnológica para los sistemas de disparo, en términos del número de detonaciones que pueden ser efectuadas, así

como también en el método de iniciación. En función de brindar más aplicaciones para la minería, fue necesario desarrollar un sistema fácil y rápido de operar, con la capacidad de iniciar un gran número de detonaciones, donde cualquier retardo es asignado a un detonador. Además de ser completamente flexible, al sistema se le ha agregado el beneficio de la seguridad de disparo remoto. La programación de los retardos se puede llevar a cabo después de que el sistema ha sido conectado o en cada taladro donde se ubican los detonadores, lo que simplifica el método de conexión al igual que el tiempo de programación inicial y los eventuales retrasos que podrían suscitarse.

### **CAPITULO III: VISUALIZACIÓN DEL NEGOCIO MINERO**

#### **3.1. CONTEXTO PRINCIPAL.**

En la actualidad la Industria minera está reaccionando ante señales que implican mejorar la rentabilidad del negocio. En estos días, por ejemplo, ya no es suficiente para el cliente ser el mejor productor de algún mineral, sino a su vez mejorar la rentabilidad del negocio, y es aquí donde recae una responsabilidad mayor en términos de creación de valor hacia el cliente, por medio de los productos, ingeniería, teoría y estudios que se puedan proporcionar para conseguir los objetivos que el cliente se propone.

Para que se pueda entender de mejor forma la idea que se quiere expresar, podemos analizar las palabras de un antiguo pensamiento judío que realiza la siguiente pregunta y que a la vez insita a responder rápido; “¿Usted prefiere recibir como regalo un caballo que corra rápido o lento?”. La mayoría responde rápidamente “claro que quiero un caballo que corra rápido”. A lo que este pensamiento responde con sabiduría: “Depende de la dirección en que se va”. Por lo que responder esta pregunta tiene mucho sentido para quienes se están vinculando a la minería con un enfoque integral de negocios, o lo pretenden realizar.

Y justamente esa es la pregunta que se deben realizar todos los involucrados a esta Industria, ¿En que dirección se va? Analizando esta pregunta desde un punto de vista de proveedor de soluciones como lo es EXSA y en especial con introducir el detonador electrónico Hotshot en el mercado minero; “¿Qué tan importante es decirle al cliente, con este detonador Usted obtendrá la mejor fragmentación?”, muchos responderán “es súper importante”, claro que es importante, pero solo para aquel que esta interesado en obtener la mejor fragmentación, y ese no es el mayor objetivo del principal cliente, que tiene esta empresa, “la minería”.

Antes de entregar una respuesta más certera a “¿Porqué es tan importante el uso del detonador electrónico?”, cabe señalar que la minería, en sus operaciones de extracción y procesamiento de minerales, posee una serie de etapas productivas que permiten aprovechar el mineral contenido en su yacimiento. Históricamente el objetivo de las etapas productivas de una mina ha sido la optimización de cada operación por separado al más bajo costo posible. Y es ésta la principal barrera que se encuentra al querer introducir el detonador electrónico, que así comparado con sus pares es de costo elevado (detonadores convencionales de retardo).

### **3.2.1. Enfoque de negocios.**

El propósito real en términos generales de un negocio es:

**Atraer y Retener Clientes satisfechos rentablemente**

Ahora visualizándolo desde una perspectiva local, si se logra a través de la creación de valor, en especial con la implementación del detonador electrónico

Hotshot, hacer que el cliente (entendiendo por cliente, y como se mencionó en párrafos anteriores, “la minería”) aumente su rentabilidad, al lograr reducir gastos significativos, como es el caso del chancado por ejemplo, lo lógico es retenerlo como consumidor del producto, al estar satisfecho con la mejora provocada. Sin dejar de lado que la rentabilidad de todo negocio, sobre todo el minero (por el riesgo que involucran sus operaciones) es consecuencia de la productividad cuyo componente intrínseco es la seguridad.

### **3.2.2. Gestión del negocio minero.**

Si se logra entender que el negocio minero debe focalizarse en la creación de valor para el cliente, se debe partir de la pregunta “¿Por qué nos pagan?”, y la mejor respuesta que se debe dar es “nos pagan por generar valor a los recursos donde nuestros productos estén involucrados”. De ahí viene una segunda pregunta y quizás un poco más compleja “¿Cómo lo hacemos?”. En el cómo lo hacemos aparecen técnicas o herramientas, que se deben entender desde una perspectiva conceptual.

A escala conceptual inevitablemente es muy importante como profesional mejorar el nivel de conocimientos microeconómicos, conceptos de costo de oportunidad, funcionamiento de los mercados, costo marginal, elasticidad, etc. En síntesis, conceptos básicos como se menciona en párrafos anteriores, que bien entendidos e incorporados en nuestro conocimiento en forma natural, hacen de la gestión de un negocio, y en particular el negocio minero, sea más ventajoso a través de esta mirada conceptual económica respecto al uso de los recursos.

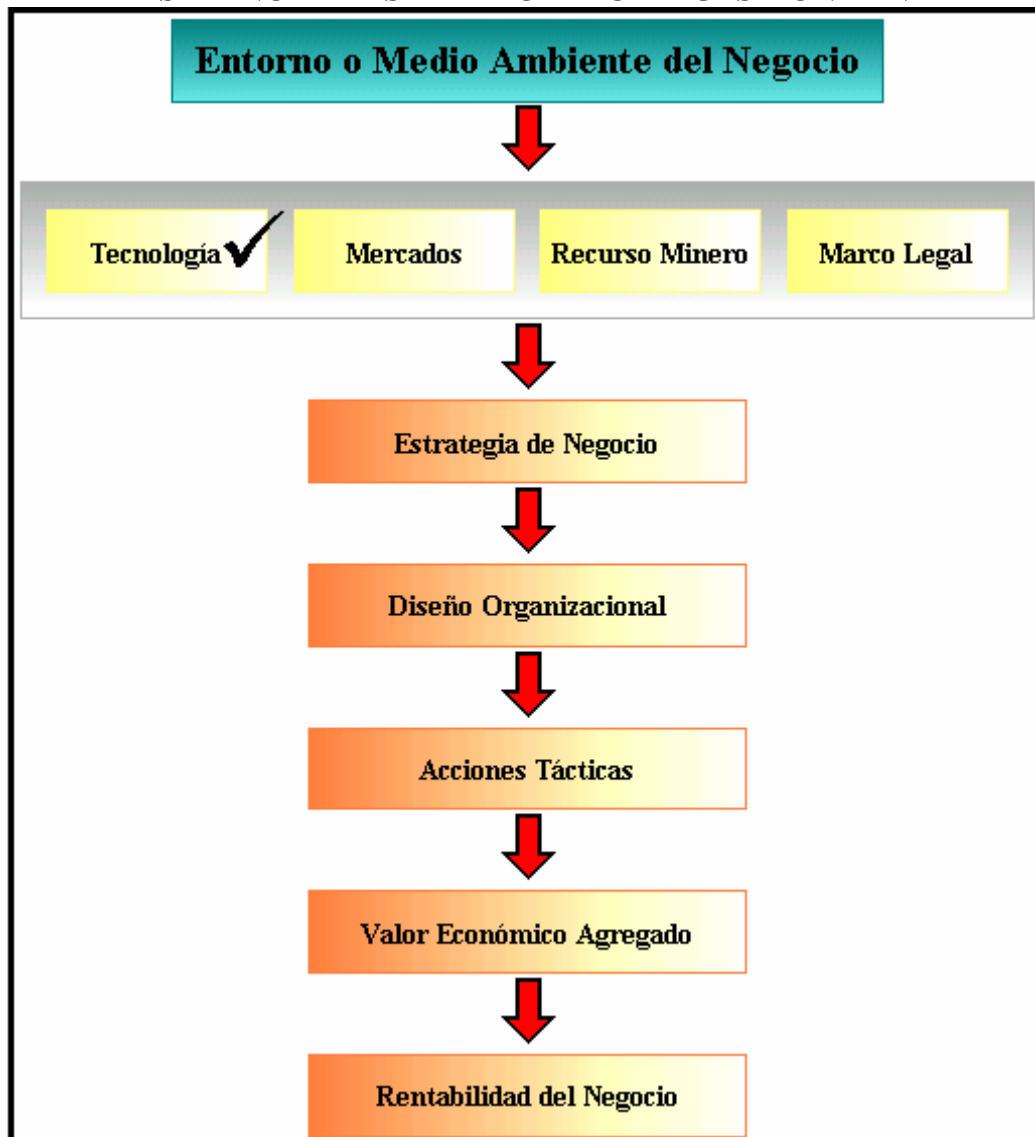
Por lo tanto, para responder a la segunda pregunta “¿Cómo lo hacemos?”, la respuesta sería “tenemos que generar o agregar valor”, pero lo primero que se debe hacer es preguntarse “¿Cuánto vale lo que tenemos?” y para determinarlo hay que utilizar los conceptos de economía propuestos y así poder valorizarlo bien.

Una vez que se tiene valorizados los recursos, se podrá distinguir donde se esta generando valor y donde no se esta generando valor, y a continuación se entra en el tema de los procesos.

Al tener valorizados los recursos se debe observar que actividades o procesos realizar, y se debe empezar a ver si este proceso definido anteriormente genera o no genera. Un alcance importante es definir el proceso como proceso de negocio, es decir, las ofertas y niveles de satisfacción que requiere el cliente.

A continuación se muestra un modelo de gestión utilizado en Minería:

**CUADRO 1: SE DESTACA LA TECNOLOGÍA COMO UNO DE LOS ITEMS PRINCIPALES DEL MODELO DE GESTIÓN MINERA**



**Fuente: Minera Los Pelambres - Chile**

Como se puede observar la Tecnología es una de las llaves del entorno minero, es de esta forma que para EXSA el detonador electrónico representa la llave para abrir la puerta de estrategia de negocios, ahora ¿A que manejo pertenece esta llave?



Obviamente el detonador electrónico pertenece al manejo de Voladura, y es aquí donde EXSA destina sus recursos y el Equipo de Soporte.

### **3.3. INFLUENCIA DE LA VOLADURA EN EL NEGOCIO MINERO.**

La voladura, como primera etapa del proceso de conminución de la roca, tiene como misión el preacondicionamiento o preparación de ésta para su posterior procesamiento, a fin de obtener un producto comercializable, en la forma más económica.

El desafío, entonces, es transferir la energía del explosivo en la forma más eficiente para iniciar este proceso, propendiendo a que las etapas siguientes se vean favorecidas.

El enfoque tradicional de la voladura, sin embargo, ha sido el de minimizar sus propios costos: una óptima gestión implicaba cumplir con los presupuestos pre-establecidos para esta área, sin considerarla como una parte del proceso de agregar de valor. Por el contrario, si se considera la voladura como una etapa de la cadena de valor, el objetivo primordial es fragmentar, pero no buscando la tonelada rota más barata, sino la más económica, es decir, la que cumpla con los requerimientos del proceso global.

Esto implica no sólo definir los requerimientos del o los productos generados por ella, sino también las características de los insumos. Hoy se sabe que

empleando explosivos adecuados y sistemas de iniciación de alta precisión se puede impactar sobre aspectos relevantes, como la eficiencia de la lixiviación.

De esta forma, una de las tecnologías que cada día adquiere más relevancia y mayor presencia lo constituyen los detonadores de retardo electrónico, especialmente por las presiones de diversa índole que actualmente enfrenta la industria minera. Y si bien el uso de estos sistemas implica un mayor costo y un cuidado especial, su inversión genera beneficios.

Al respecto, un reciente estudio de Claude Cunningham ("Los detonadores electrónicos: éxito creciente en la transformación de la fragmentación de roca"), precisa que un requisito básico de la minería moderna es reducir el consumo de energía y dos vías para lograrlo son: (a) mejorar la productividad del equipo de minería mediante el mejoramiento de la facilidad de excavación, facilitar el chancado, la trituración, y el ritmo de producción de un tonelaje determinado; (b) reducir el uso de explosivo sin comprometer las operaciones aguas abajo. El balance correcto entre estas opciones potencialmente conflictivas requiere de un alto nivel de conocimiento de la conexión en toda la operación. Asimismo, es vital controlar el daño posterior, puesto que es muy costoso remediar la roca dañada y afecta no sólo la seguridad sino también la relación desmonte/ mineral, la que a su vez tiene grandes consecuencias de viabilidad.

En términos del impacto humano, es necesario controlar los niveles de vibración y golpe de aire, lo que normalmente significa un control estrecho sobre las operaciones de voladura.

Por otro lado, debido a las restricciones de rendimiento de planta y una tendencia a subestimar el poder del diseño de voladura de cambiar las propiedades de flujo de roca desde la mina, existe una tendencia general a aumentar la escala de inversión en los circuitos convencionales de chancado y trituración. Los costos de capital, alimentación y mantenimiento para tales instalaciones hacen parecer pequeño cualquier gasto que asegure una fragmentación más fina del mineral volado (como sería la inversión en los detonadores electrónicos).

De todo lo anterior se desprende que un requisito claro es el mejor control sobre las operaciones de voladura a un costo razonable, y Cunningham sostiene que la llegada de sistemas de detonadores electrónicos confiables y fáciles de usar representa una solución para abordar la mayoría de estos aspectos, si no todos ellos.

## **CAPITULO IV: TECNOLOGÍA DEL DETONADOR ELECTRÓNICO HOTSHOT**

### **4.1. INTRODUCCIÓN.**

La introducción de los detonadores electrónicos a la minería y la capacidad de precisión de disparo que estos poseen, han proporcionado a la industria minera una herramienta de optimización para las voladuras, que antes no estaba disponible con los sistemas pirotécnicos. Esto, ha proporcionado a los usuarios por primera vez, refinar los resultados de las voladuras para satisfacer las necesidades operacionales específicas o para superar restricciones en sus procesos. Este control ha optimizado la productividad y la eficiencia de los procesos mineros tales como carguío, transporte, molienda y procesamiento. Además del beneficio económico, la electrónica ha traído un mayor nivel de confianza a la voladura, posibilitando a los usuarios revisar la funcionalidad del sistema completo antes de disparar, ayudando de este modo a la prevención de errores en la voladura y las consecuencias a partir de ahí.

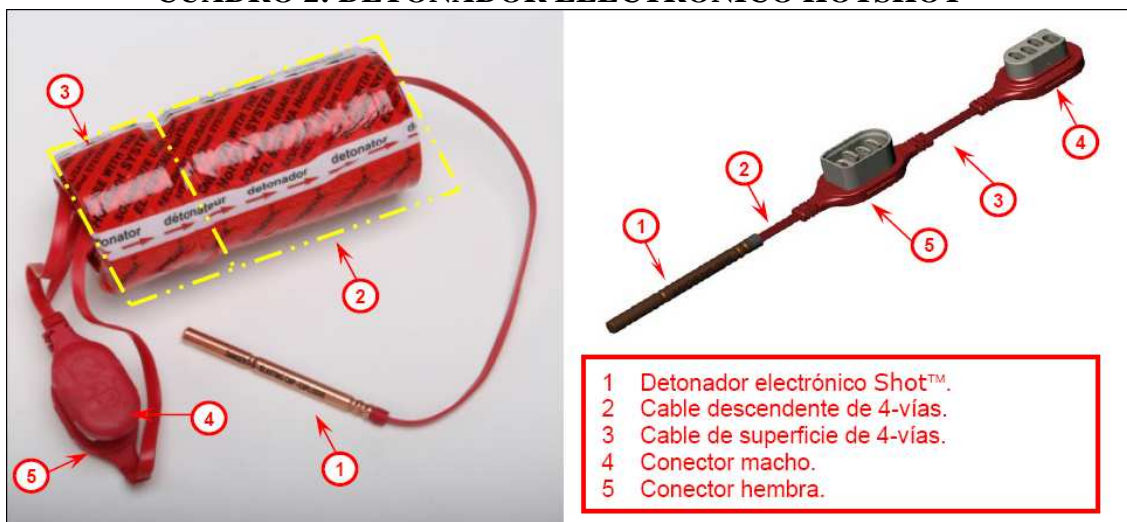
### **4.2. ENSAMBLAJE DEL DETONADOR SERIE SHOT.**

El ensamblaje del detonador Shot consiste en los siguientes sub-componentes:

- Detonador serie Shot.
- Cable descendente serie shot de 4 vías.
- Cable de superficie serie shot de 4 vías.

- Conector macho.
- Conector hembra.

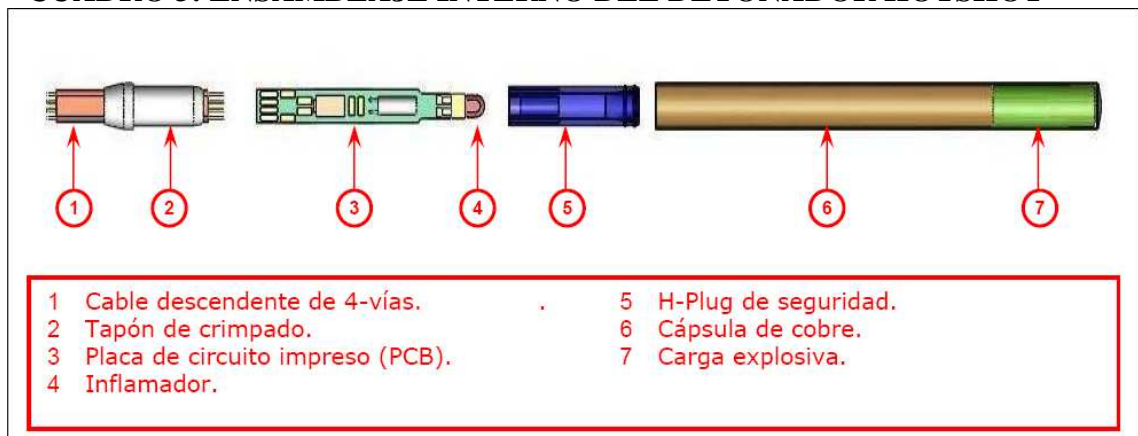
**CUADRO 2: DETONADOR ELECTRÓNICO HOTSHOT**



#### 4.2.1. Ensamblaje interno del detonador serie Shot.

El detonador serie shot consiste en los siguientes sub-componentes principales:

- Cable descendente de 4 vías
- Tapón de crimpado.
- Placa de circuito impreso (PCB).
- Inflamador.
- H-plug de seguridad.
- Cápsula de cobre.
- Carga explosiva.

**CUADRO 3: ENSAMBLAJE INTERNO DEL DETONADOR HOTSHOT**

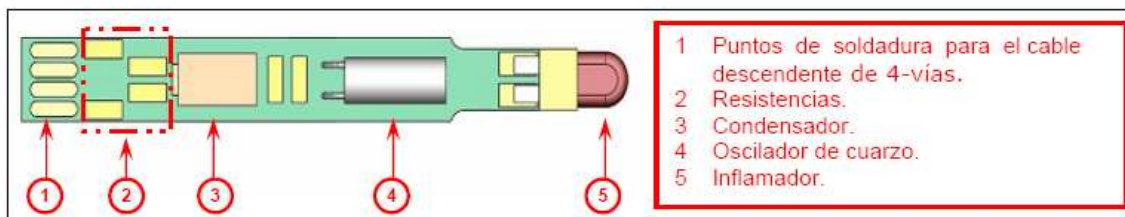
#### **4.2.1.1. Plug de crimpado.**

El Tapón de crimpado es un sello de PVC que está amoldado sobre el cable descendente. Sirve como un sello para asegurar que no ingrese ningún agente externo en la cápsula del detonador. El sello entre la cápsula del detonador y el exterior se hace permanente, cuando los detonadores son crimpados durante la producción.

#### **4.2.1.2. La placa de circuito impreso (PCB).**

La placa de circuito impreso (PCB) es un módulo electrónico que contiene los siguientes componentes:

- Puntos de soldadura para el Cable descendente de 4-vías.
- Resistencias.
- Condensador.
- Oscilador de cuarzo.
- Inflamador.

**CUADRO 4: ENSAMBLAJE DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO****Puntos de soldadura.**

Los puntos de soldadura cumplen con la siguiente función:

Sirven para unir el cable descendente de 4-vías y la placa de circuito impreso (PCB), de modo que pueda existir comunicación entre el detonador y el sistema ShotTM.

**Resistencias.**

Las resistencias cumplen con las siguientes funciones:

Protección del circuito electrónico del detonador contra influencias externas como:

- Sobre voltaje.
- Sobre corriente.
- Descargas electrostáticas (ESD).
- Pulsos electromagnéticos (EMP).

Facilita la comunicación entre el detonador y equipo controlador.

**El condensador.**

El condensador es un dispositivo de almacenamiento de energía, que guarda la energía necesaria para iniciar el detonador ShotTM, después de dar la orden de disparo.

### **El oscilador de cuarzo.**

El oscilador de cuarzo es un dispositivo electrónico digital que genera un pulso a una frecuencia precisa y predeterminada, eliminando la necesidad de calibrar los detonadores Shot™.

### **Inflamador.**

El inflamador es un dispositivo explosivo incendiario, que actúa como interfaz entre la parte electrónica y la carga explosiva del detonador.

#### **4.2.1.3. H-Plug de seguridad.**

La función del H-Plug de seguridad es centralizar la placa de circuito impreso (PCB) y separar la carga explosiva de los componentes electrónicos, previniendo su migración. El material del H-Plug de seguridad es anti-estático y tiene incorporado en su exterior un anillo limpiador. La función de éste es limpiar la parte interna de la cápsula del detonador serie Shot™, de cualquier carga explosiva remanente durante el ensamblado del detonador. Para fijar el H-Plug de seguridad y para que el PCB permanezca centralizado, se realiza un segundo crimpado en la parte central externa del detonador.

### **4.3. CONTROL DE CALIDAD DE LOS CABLES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DEL DETONADOR SERIE SHOT.**

Detnet a nivel mundial ofrece tres alternativas en cables de acuerdo a las condiciones de cada operación:



- **Dancor:** Presenta una franja amarilla a uno de los lados, la cual permite reconocerlo, este cable no debería ser usado cuando las temperaturas están por debajo de los 0 grados por el hecho que este cable es quebradizo a dichas temperaturas (EXSA no usa este cable). Es excelente para temperaturas moderadas.
- **PVC N90:** Presenta una franja negra a uno de los lados. Puede ser usado para temperaturas hasta los -20 grados Celsius. No tiene buenas propiedades en temperaturas cálidas, tiende a volverse muy elástico.
- **Arctic:** Presenta una franja blanca. Puede ser usado para temperaturas hasta los (-) 30 grados Celsius. Tiene buenas propiedades en climas cálidos y fríos.

Actualmente en Perú estamos empleando el detonador electrónico con cable **Arctic**, el cual ha dado muy buenos resultados y se ha acoplado satisfactoriamente a las condiciones climáticas de nuestro país.

A continuación se procederá a detallar algunas de las pruebas de control de calidad a las cuales se someten dichos cables. Dichas pruebas fueron realizadas en los laboratorios de Detnet en Sudáfrica.

#### **4.3.1 Prueba de Resistencia a la Presión Hidrostática – Diesel.**

Treinta muestras fueron colocadas dentro de un recipiente a una presión de 500 Kpa. El diesel fue calentado hasta +55°C antes que las muestras fueran sumergidas. Luego de sumergidas las muestras, la presión de 500Kpa fue mantenida por un periodo de 24 horas. La temperatura final de la prueba fue de +25°C.

**CUADRO 5: EQUIPO PARA TEST DE PRESIÓN**



Finalmente se pudo comprobar que las muestras sometidas a prueba no presentaron ninguna falla debido a la presión.

### 4.3.2 Prueba a la Tensión.

Cinco muestras de cable de 500 mm. Cada una fue probada a una temperatura ambiente. El equipo Zwick Tensile Tester fue empleado y se muestra a continuación.

**CUADRO 6: EQUIPO DENOMINADO ZWICK TENSILE TESTER**



Cuadro de resultados:

Tamaño de muestra	Temperatura	Fuerza Promedio (N)	Fuerza Mínima (N)	Fuerza Máxima (N)
HS 5	Ambiente	252	245.5	258.8

Como se observa, la fuerza a la tensión promedio que pueden soportar estos cables antes de romperse es de 252 N que equivale a 25.69 kilogramos fuerza.

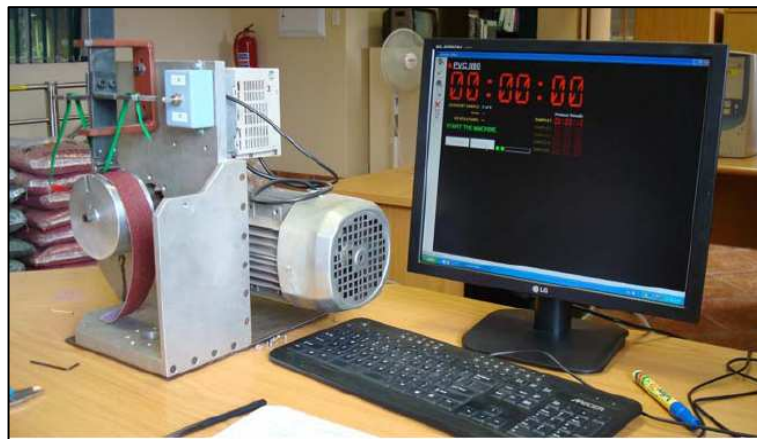
### 4.3.3 Prueba a la abrasión.

Esta prueba fue diseñada para comparar la resistencia a la abrasión de los diferentes tipos de cobertura empleada en los cables que desarrolla Detnet, para

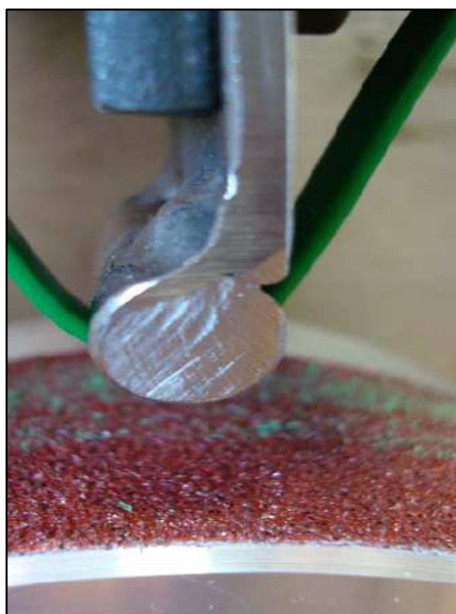
ello es común emplear como línea base una cobertura primaria, es decir de las primeras que se desarrollaron. En este caso se comparará la el material denominado PVC versus el HD.

A continuación se muestra el layout de la prueba, en el cual se ve el equipo rotor, que cuenta con un material abrasivo, el que estará en contacto con el cable empleado. Así mismo estará conectado a una computadora, la cual registrará los datos de la prueba.

#### **CUADRO 7: EQUIPO DE PRUEBA A LA ABRASIÓN**

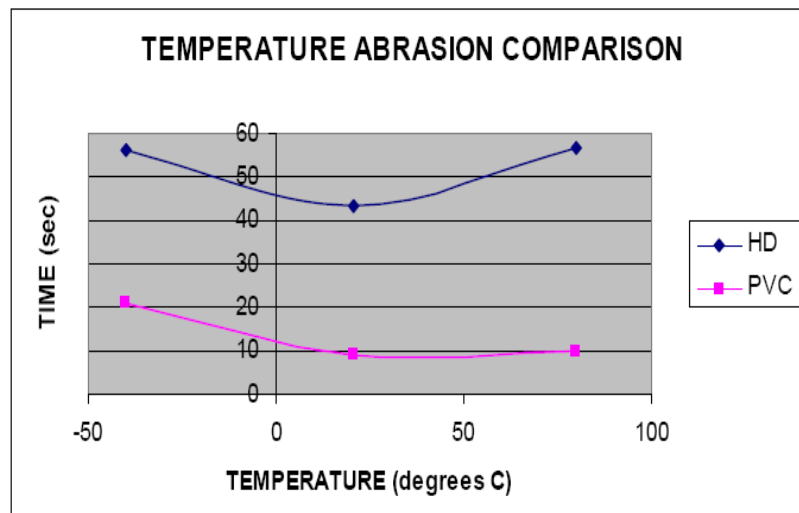


#### **CUADRO 8: MATERIAL ABRASIVO EMPLEADO**

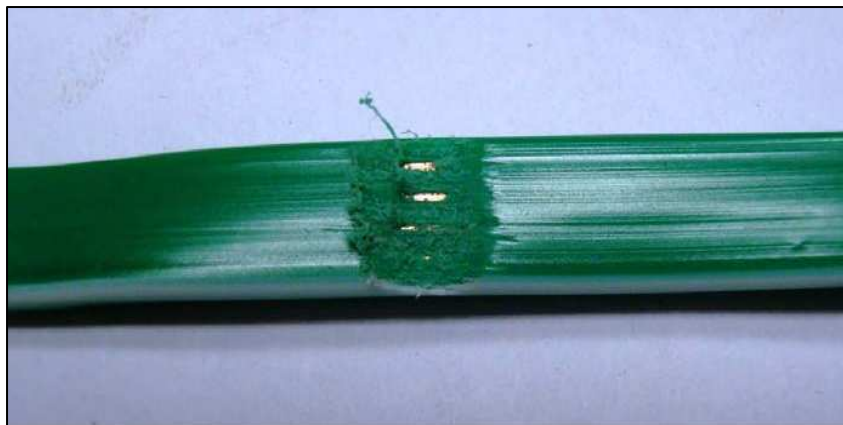


Los resultados de la prueba fueron los siguientes:

Wire Type	Samples Tested	Test Temperature (°C)	Average Wire Thickness (mm) (Spec 1.60±0.1)	Average Abrasion Time (sec)
PVC	30	+21	1.70	9.2
HD	30	+21	1.66	43.2
PVC	30	-40	1.68	20.8
HD	30	-40	1.64	56.4
PVC	30	+80	1.67	9.8
HD	30	+80	1.66	56.9



#### CUADRO 9: ESTADO DE LA COBERTURA LUEGO DE LA PRUEBA



De acuerdo a los resultados obtenidos la cobertura HD presenta un mejor comportamiento a la abrasión que la cobertura de PVC.

## **CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT.**

SmartShot es el último avance en la cartera de productos en sistemas de iniciación electrónica de voladuras DetNet, tanto para la minería de superficie como subterránea.

El sistema SmartShot ofrece nuevas características, incluyendo la red de iniciación remota inalámbrica y una completa flexibilidad en la asignación de retardos. Conectores especiales a prueba de agentes externos (agua y polvo) aseguran una rápida, fácil y confiable conexión, previniendo fugas.

Las características del Sistema SmartShot que lo hacen un sistema seguro, flexible, confiable y fácil de usar.

- **Sistema de detonación remota inalámbrica:** el sistema puede ser detonado en forma remota hasta 3000 m. La versatilidad del sistema incluye la posibilidad de utilizar cable cuando sea

requerido. Múltiples características de seguridad entregan al usuario una voladura segura y libre de errores.

- **Flexibilidad en la Programación:** el sistema Smartshot ofrece al usuario múltiples opciones de programación según la aplicación, pudiendo programar cada detonador en forma individual, auto-programar filas de detonadores o bien una combinación de los dos. La programación es realizada después que el amarre completo ha sido realizado. Un software moderno e intuitivo elimina la necesidad de programar cada detonador individualmente mientras se amarra y utiliza la auto-programabilidad cuando los parámetros de tronadura son los mismos, reduciendo el tiempo de programación.

## **5.1. COMPONENTES Y ACCESORIOS DEL SISTEMA.**

### **5.1.1. Iniciador de Línea (String Starter).**

- El Iniciador de línea se utiliza para conectar una línea de detonadores de 4 vías y convertir las comunicaciones de 4-vías en 2-vías y viceversa.
- Los Iniciadores de línea vienen con el conector terminal incluido, que sirve para cerrar el circuito de una línea de detonadores.

- Todos los Iniciadores de líneas vienen asignado con el número 0 de fábrica, por lo que antes de ser utilizado, debe ser asignado con un número de identificación específica entre el 1 al 50.
- Cada Iniciador de línea tiene capacidad para un máximo de 200 detonadores ShotTM.

### CUADRO 10: STRING STARTER



#### 5.1.2. Tagger.

Se utiliza para:

- Probar detonadores de forma individual.
- Probar líneas de detonadores.
- Seleccionar configuraciones de primado;
- Asignar retardos entre taladros, entre filas y entre decks.
- Visualizar los tiempos programados en un listado.



- Asignar los detonadores para indicar un cambio en la programación, configuración de primado una ubicación específica dentro de la malla de voladura.
- Asignar Iniciadores de líneas.

**CUADRO 11: TAGGER**

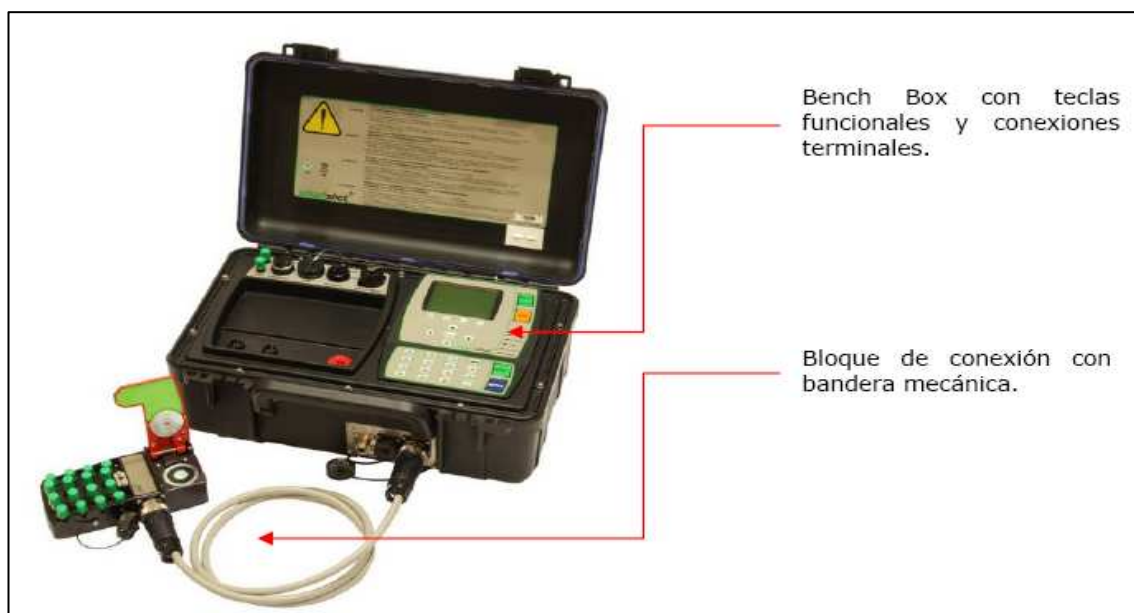


### **5.1.3. Bench Box.**

- El Bench Box es la unidad de poder que se utiliza en conjunto con el Bloque de conexión, la Llave de disparo y los Iniciadores de línea para iniciar una voladura.
- Cuando se necesita de una mayor distancia para iniciar la voladura, se requiere usar el Bench Box en conjunto con la Estación Base, utilizando comunicación inalámbrica por radio frecuencia o vía de cables de disparo.

- El Bench Box se utiliza también para probar todos los detonadores y los Iniciadores de línea en la malla de voladura (la instalación completa).
- El Bench Box puede iniciar 1600 detonadores usando un Bloque de conexión que tiene 8 canales en total, con una capacidad de 200 detonadores y un máximo de 20 iniciadores de línea por canal.
- Si se utiliza un Bloque de expansión agregando otros 4 canales al sistema, la capacidad aumentará a 2400 detonadores.

**CUADRO 12: BENCH BOX**



#### **5.1.4. Bloque de Conexión.**

- El Bloque de conexión conecta los Iniciadores de líneas con el Bench Box a través de los cables de disparo de 2-vías.
- Cada par de conectores ubicados en el Bloque de conexión, se llaman canales. Estos no son sensibles a la polaridad del cable de disparo de 2-vías.

- El Bloque de conexión también tiene una bandera mecánica, que es acoplada al contacto circular mediante electromagnetismo. El acoplamiento tiene lugar cuando se va iniciar el proceso de programación, armado y disparo. A su vez, la bandera mecánica actúa como dispositivo de seguridad, que se desacopla cuando existe un error durante el proceso de programación y armado. También se desacopla después del disparo, quedando la bandera en posición vertical, indicando que se puede aproximar a la malla de voladura.
- Existen 8 canales en el Bloque de conexión.
- Cada canal puede alojar 200 detonadores Shot™ y 20 Iniciadores de línea.
- El Bloque de conexión puede por lo tanto alojar un total de 1600 detonadores y sin embargo hay 20 iniciadores de línea por canal, el sistema completo está limitado a un máximo de 50 iniciadores de línea para asegurar que se mantenga una comunicación eficiente.

**CUADRO 13: BLOQUE DE CONEXIÓN (LLAMADO TAMBIÉN BANDERA)**



### **5.1.5. Base Station.**

- La Estación Base es una interfaz en conjunto con el Bench Box que permiten al usuario iniciar una voladura desde una distancia remota utilizando radio frecuencia (RF) o mediante un Cable de disparo de 2-vías.
- La Estación Base tiene la capacidad de armar e iniciar los detonadores electrónicos Shot™ desde distancia a través del Bench Box.

**CUADRO 14: BASE STATION**



### **5.1.6. Llaves de Disparo (Smart Key).**

- Existen dos Llaves de disparo: una es utilizada para activar el Bench Box y la otra para activar la Estación Base.
- Las Llaves de disparo contienen un enlace físico sin el cual no es posible enviar el voltaje hacia los detonadores. También alojan los dispositivos electrónicos requeridos para generar las señales de disparo, como también habilitar la comunicación entre los equipos.

- Si el disparo es realizado desde el Bench Box y no desde la Estación Base, entonces se requiere solo de la Llave de disparo roja para el Bench Box.
- Si el disparo es realizado de forma remota mediante RF o cable de disparo de 2-vías, entonces se requerirá la Llave de disparo amarilla en el Bench Box y la Llave de disparo roja en la Estación Base.
- La Llave de disparo roja contiene las decodificaciones que habilitan los comandos de disparo y debe ser utilizado desde el equipo que ejecutará la orden de disparo.

#### **CUADRO 15: LLAVES DE DISPARO**



#### **5.1.7. Cables Extensores.**

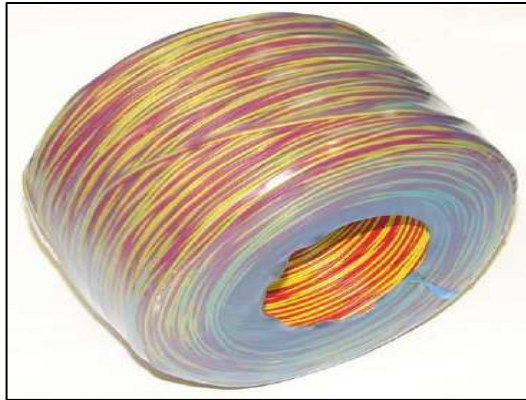
- Nos permite extender la longitud de los cables de superficie de los detonadores, en mallas cuyo espaciado sea mayor.
- Ayuda a conectar otros disparos, ya sean electrónicos o pirotécnicos (precortes, producción, bolonería, etc.).

### CUADRO 16: CABLES EXTENSORES



#### 5.1.8 Cable de disparo de 2 – vías.

- El cable de disparo de 2-vías se utiliza para conectar el Tagger con el o los Iniciadores de líneas, para realizar el testeo en 2-vías final.
- El cable de disparo de 2-vías también se utiliza para conectar el Bloque de conexión y expansión, para realizar el testeo, la programación, el armado y disparo de la malla de voladura desde el Bench Box.
- La longitud máxima del cable de disparo de 2-vías que se puede utilizar va a depender de la cantidad de detonadores Shot™ conectados a la malla de voladura y la longitud de su cable de superficie. Se debe considerar que el límite máximo es de 2.000 m entre el cable de disparo de 2-vías y los cables de 4-vías de superficie de la línea más distante de detonadores en la malla de voladura.

**CUADRO 17: CABLE DE DISPARO DE 2 VÍAS****5.1.9 Conector Terminal (End Plug).**

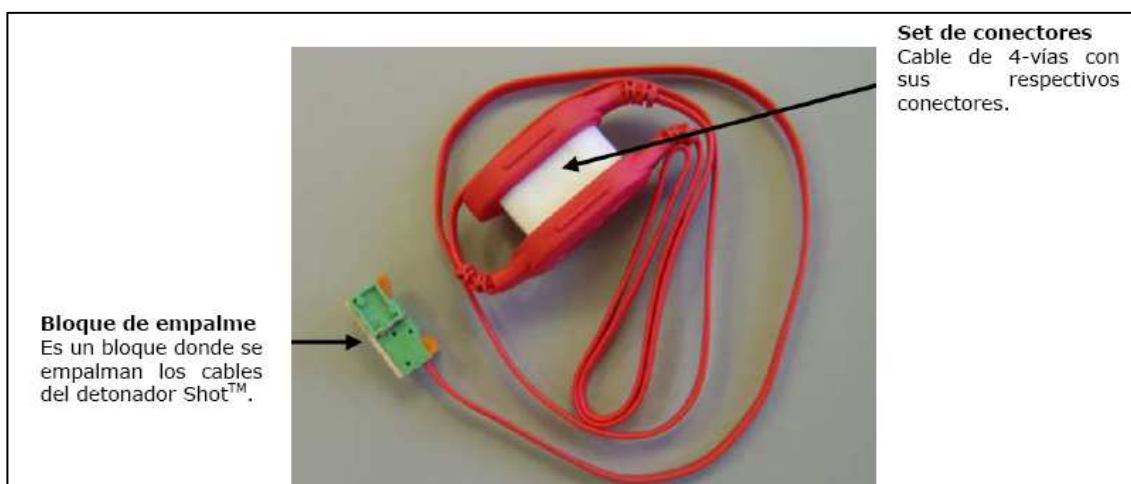
- El Conector terminal es usado para indicar los extremos o límites de una malla de voladura. El Conector terminal cumple la función de cerrar el circuito electrónico.
- Se colocan al final de cada línea de detonadores.

**CUADRO 18: END PLUG**

### 5.1.10 Kit de reemplazo.

- El Kit de reemplazo, se utiliza para reemplazar los conectores o los cables de los detonadores dañados. El Kit de reemplazo consiste en un bloque de empalme y un set de conectores con sus respectivos cables descendente y de superficie.

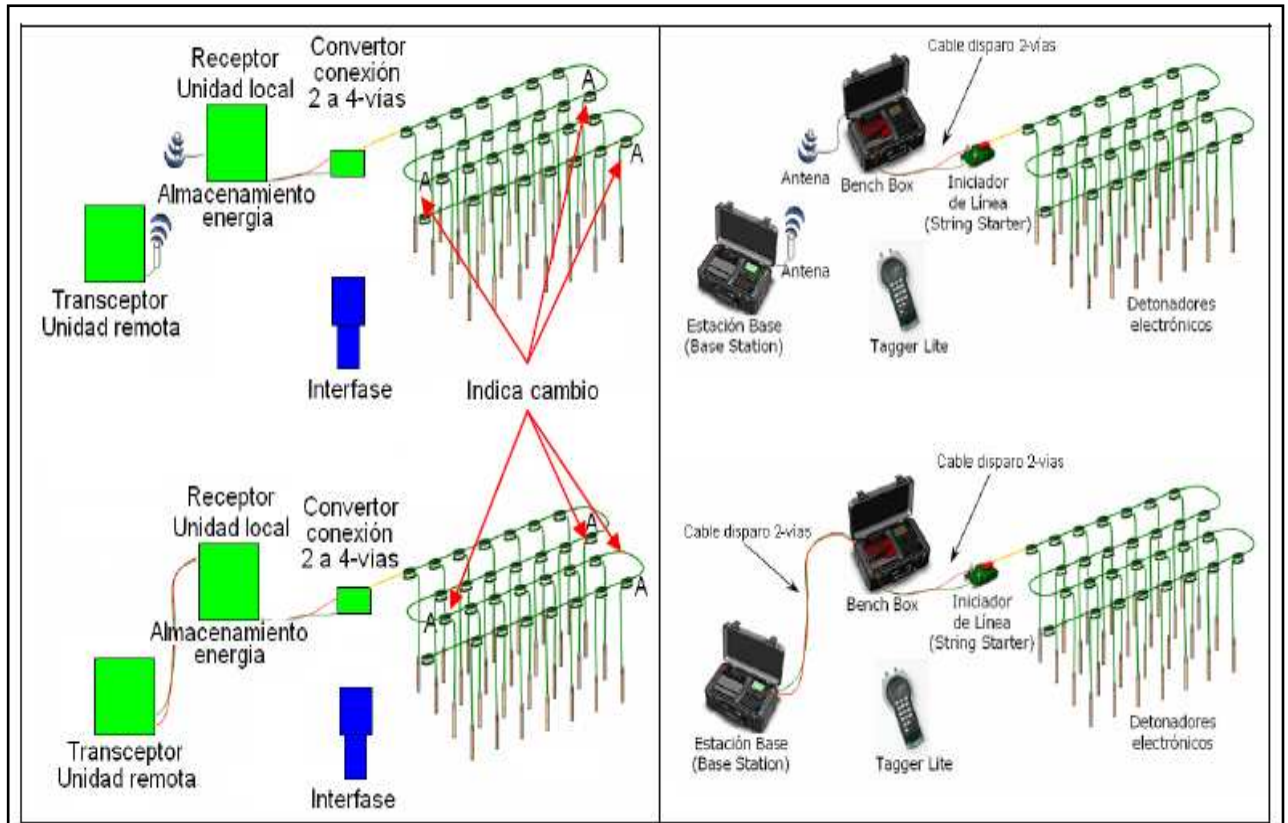
**CUADRO 19: KIT DE REEMPLAZO**





## 5.2 VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA.

**CUADRO 20: LAYOUT DEL SISTEMA**



La versatilidad del sistema Smartshot es tal que nos permite hasta 3 modos de disparo:

- Disparo Remoto vía Radiofrecuencia (utilización de antenas)
- Disparo Remoto vía cable de disparo
- Disparo Local

#### **5.2.1. Disparo Remoto vía Radiofrecuencia.**

Este modo de disparo es utilizando antenas, es decir inalámbricamente.

La distancia máxima de disparo es de 3 Km. Entre antenas y como condición crítica es que ambos dispositivos se vean en línea recta.

A continuación se muestra un cuadro comparativo de las frecuencias que utilizamos normalmente en la vida diaria versus la frecuencia de las antenas Smartshot.

**CUADRO 21: COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS SEGÚN TIPO DE ANTENAS**

<b>Antena Radio FM</b>	→	<b>100 MHz</b>	→	<b>98 cm</b>
<b>SmartShot™</b>	→	<b>915 MHz</b>	→	<b>12 cm</b>
<b>Tel. Celular</b>	→	<b>950 MHz</b>	→	<b>8-10 cm</b>
<b>Bluetooth</b>	→	<b>2.5 GHz</b>	→	<b>3 cm</b>

Como se puede observar las antenas con menor frecuencia serán mas largas, lo cual no es práctico para nuestro caso. Caso contrario con menor frecuencia es más fácil acceder a lugares más remotos y escondidos, lo cual en nuestra condición nos basta ceñirnos al protocolo de mantener las antenas en visual.

#### **5.2.1.1. Resumen de riesgos asociados a las RF**

- La luz es visible por lo tanto las RF pueden comprenderse usando la luz como parámetro de comparación.
- La radio frecuencia se mide en frecuencia y amplitud.
- La amplitud está representada por el poder de la señal.
- Las antenas se utilizan para focalizar la energía hacia y desde los transmisores y receptores.



- El foco ó fuerza de una antena se miden en dB, a más alto dB la antena está mejor enfocada y mejor y más fuerte será la señal hacia y desde ella dentro de su campo de acción.
- Si el foco o fuerza utilizada es alto se requerirá un mayor alineamiento entre antenas.
- Las señales reflejadas y señales multi-vías usualmente trabajan negativamente sobre la calidad de la señal.
- Riesgo de exposición = Tiempo \* energía
- Mientras más cerca de la antena, más exposición se recibe.

#### 5.2.1.2. Implicancias médicas de la radiación por RF.

El proceso de regeneración celular se ve afectado por las señales de RF y los hombres tienen mayor riesgo que las mujeres.

**PRECAUCIÓN: LA EXPOSICIÓN PROLONGADA A LAS RADIO FRECUENCIAS PODRÍA SER DAÑINA.**

#### CUADRO 22: ADVERTENCIAS SMARTSHOT™

	<p><b>ADVERTENCIA:</b> Este equipo ha sido aprobado para aplicaciones móviles donde el equipo debería ser usado a distancias mayores a 20 cm desde el cuerpo humano (con la excepción de manos, muñecas, pies y tobillos). La operación a distancias menores a 20 cm está estrictamente prohibida. Exposición excesiva debe ser evitada de todas formas.</p>
	<p><b>ADVERTENCIA:</b> Mantenga todos los detonadores al menos 1 metro alejados desde este aparato y cualquier antena externa. No operar teléfonos celulares o radiotransmisores a menos de 5 metros de un detonador electrónico o su equipo de control. Si se utilizan transmisores con una salida de poder superior a 4 Watts, o si se usan antenas con mayores unidades de recepción, el campo de fuerza debe ser medido para asegurar que no excede los 10 Voltmetro</p>

### **5.2.2. Disparo Remoto vía cable de disparo.**

- Está configuración es sólo cuando por motivos de falta de visual entre antenas se tenga que utilizar cable de dos vías entre el Bench Box y el Base Station.
- La distancia máxima de cable a emplear es de 2 Kilómetros.
- En ambos casos, ya sea vía radiofrecuencia o vía cable, el bench box siempre utilizará la llave amarilla y el base station la llave roja.

### **5.2.3. Disparo Local.**

- En este modo el disparo se realiza desde el bench box, es decir ya no se utiliza el base station, por lo tanto sólo se utilizará la llave roja.
- Por lo general este tipo de configuración es muy poco utilizada debido a que de por sí se va a tener que estar más cerca del disparo que en las otras opciones.
- Se recomienda al utilizar este modo de disparo ubicarse estratégicamente en un lugar seguro, puede ser detrás de un camión, detrás del cucharón de una pala, etc.

### **5.3 SISTEMA DE SEGURIDAD.**

Con respecto a los términos “seguridad y protección”, el término “seguridad” comprende el mejoramiento de la seguridad para el usuario como también la simplificación tecnológica y facilidad de uso de los sistemas, con el fin de reducir el margen de error operacional del usuario. El término “protección” en cambio, se refiere a la respuesta a la amenaza del robo y el uso desautorizado, como también a la capacidad de rastrear y localizar el equipo de voladura.

Existen dos aspectos de seguridad relacionados con el sistema de detonadores electrónicos HotShot: La seguridad física inherente del sistema y la seguridad proporcionada por el software y hardware de una plataforma digital.

#### **5.3.1 La seguridad inherente de los componentes físicos.**

Los sistemas de detonadores electrónicos actuales ofrecen varias características de seguridad sofisticadas, las cuales han llegado a ser un requisito básico para la tecnología. En aquellos países en donde se requiere la aprobación minuciosa del testeado y la certificación, el cumplimiento con estos aspectos de seguridad son pre-requisitos para su uso.

Es así como gracias a investigaciones extremadamente detalladas se han formado las bases para establecer estándares estrictos para sistemas de iniciación para detonadores electrónicos, que deben ser cumplidos en Sudáfrica (SANS1717-

I), Europa (CEN/TS 13763-27) y Canadá (CEAEC), para ver el nivel de tasación a que un sistema de detonador electrónico debe ser sometido para su aceptación.

El estándar común de protección de seguridad permitido para un detonador está relacionado con:

- Seguridad inherente,
- Protección contra descargas electrostáticas,
- Protección contra sobrevoltaje, e
- Inmunidad electromagnética.

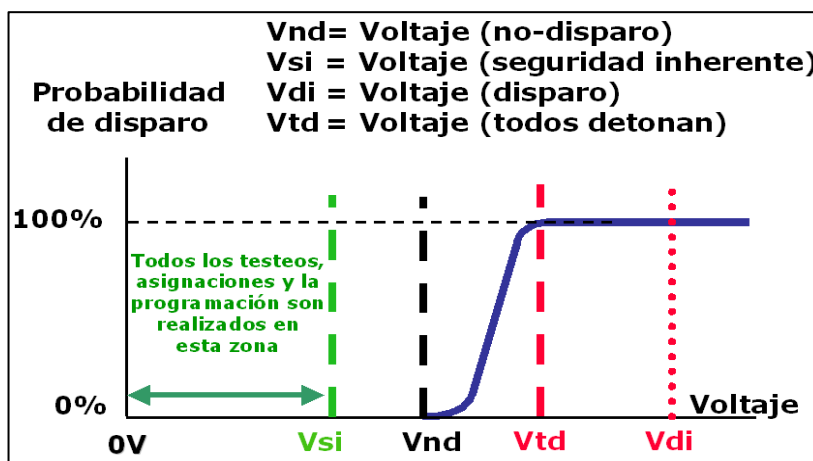
#### **5.3.1.1 Seguridad inherente.**

Es el término que se utiliza para aquellos equipos de comunicación que se utilizan sobre la malla de voladura y cuya seguridad garantiza que, a pesar de que estos equipos envían un voltaje a los detonadores con el propósito de comprobar y detectar fallas, estos no se pueden iniciar por si mismos durante el proceso.

Para asegurar que el voltaje generado por el dispositivo se mantenga siempre a un nivel seguro debajo del voltaje de disparo y de que las señales de disparo no pueden ser generados por los equipos utilizados en terreno, cada detonador es testado en la fábrica antes de ser embarcado.

La seguridad inherente se genera al introducir una serie de reguladores de voltajes y circuitos de fijación de nivel las cuales garantizan que la salida de voltaje del dispositivo de mano (Tagger), no puede exceder el  $V_{si}$ . Adicionalmente, a cada detonador se le aplica un voltaje  $V_{nd}$  y una secuencia completa de disparo durante su fabricación, y cualquier detonador fallido que logra iniciarse en este voltaje es destruido. Esto garantiza que todos los detonadores salen de la planta requerirán más que  $V_{nd}$ , cómo también de las señales de disparo, para poder iniciarse.

**CUADRO 23: GRÁFICO DE SEGURIDAD INHERENTE**



### 5.3.1.2 Protección contra descargas electrostáticas.

Las electrostáticas y sus consecuentes descargas se pueden encontrar a diario en nuestras vidas. Cuando se concentra en equipos o en individuos en un nivel suficientemente alto, la estática puede causar un golpe eléctrico.

Las descargas electrostáticas pueden causar serios riesgos de ignición de pólvoras explosivas al interior del detonador. También puede dañar los componentes electrónicos tales como microchips, placas de circuito impreso, etc.,



que se encuentran en los detonadores electrónicos. La solución al problema es entonces proveer de una protección adecuada contra las descargas electroestáticas al interior de los detonadores electrónicos.

Para realizar esto, se incluyen dentro de los módulos electrónicos circuitos preferenciales de descargas para conducir y alejar cualquier descarga del inflamador y de las composiciones explosivas sensibles. El detonador HotShot ha soportado la prueba de descargas múltiples de 30kV quedando posteriormente completamente funcional.

#### **5.3.1.3 Protección contra sobre voltaje.**

La protección de sobrevoltaje provee la protección de los detonadores electrónicos contra la iniciación deliberada o conexión accidental a dispositivos con salida eléctrica alta, tales como fuentes de poder, explosores para detonadores eléctricos, lámparas mineras y baterías eléctricas. Esta prueba está incluida en las normas sudafricanas (SANS 1717-1), pero no en las normas europeas (CEN/TS 13763-27). En el sistema HotShot, el daño y la iniciación prematura son prevenidas por un circuito de protección en la placa de circuito impreso del detonador.

#### **5.3.1.4 Interferencias Electromagnéticas.**

Las interferencias electromagnéticas emanan de multitudes de fuentes, tales como equipos mineros electro-hidráulicos, radios de dos vías, redes inalámbricas,

transmisores de teléfonos móviles, los mismos teléfonos móviles, transmisores de comunicaciones satelitales, emisores de fuente de poder, pulsos inducidos por luz y pulsos generados por detonaciones explosivas.

Cuando se prueban los detonadores durante la conexión (cuando el usuario está más expuesto al peligro), el detonador está calificado para asegurar que el voltaje del condensador no exceda los límites del voltaje de seguridad inherente durante la presencia de interferencias electromagnéticas.

Cuando se comienza con el proceso de disparo (después de que las personas estén en un lugar de seguridad), el sistema asume que está listo para disparar y las protecciones contra las interferencias electromagnéticas asumen que sólo los testeos, calibraciones, programación, señales de disparo, etc., son recibidas e interpretadas correctamente por el detonador.

### **5.3.2 Seguridad proporcionada por el software y hardware del sistema.**

Además de la seguridad inherente del sistema proporcionada por los componentes de fabricación del detonador HotShot, existe otra plataforma que entrega una seguridad adicional al sistema proporcionada por el software de testeo y programación contenido en los accesorios utilizados para el disparo. Esta seguridad viene dada por dos componentes principales:

- Seguridad contra uso no autorizado del sistema.

- Seguridad en el testeo de los detonadores que impide continuar el proceso de disparo si existe fuga, corte o falla en el circuito de amarre de los detonadores.

## **CAPÍTULO VI: PROTOCOLO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT EN PERU**

Con el fin de ampliar el servicio de Asistencia Técnica Tajo de EXSA, en el 2008 se tomó la decisión de introducir en el Perú un nuevo Sistema de Iniciación Electrónica, de tal forma de otorgar a los clientes mayores opciones en el mercado. Es así que se inicio una etapa de demostraciones del Sistema.

Dichas demostraciones tenían que contar con un protocolo, de tal forma de poder trabajar en forma ordenada y segura, adecuándonos a las condiciones de cada operación.

Esquema del Protocolo:

### **6.1. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.**

#### **Organigrama del Proyecto**

##### **Comité Directivo**

Departamento de Perforación y Voladura Mina X  
Jefe de Asistencia Técnica Exsa

##### **Jefe del Proyecto**

Técnico Exsa  
Técnico DetNet

##### **Soporte**

Departamento de Ingeniería  
Departamento de Geología y Geotecnia  
Operaciones Mina  
Planta

## **6.2 FORMA DE PROCEDER.**

### **6.2.1 Construcción de Línea Base.**

Exsa realizará el levantamiento de data de voladuras pirotécnicas, con la finalidad de determinar los estándares en cada parte del proceso para posteriormente compararlos con los resultados electrónicos: Perforación – voladura – fragmentación – vibraciones – rendimientos pala camión.

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

### **6.2.2 Elaboración del Procedimiento de Trabajo Seguro e IPER.**

Exsa DetNet enmarca sus operaciones bajo el concepto **100 %** seguridad, por tal motivo, antes de comenzar a realizar las operaciones con detonaciones electrónicas, es importante realizar un Procedimiento de Trabajo Seguro que norme y determine las obligaciones de cada una de las partes componentes del Sistema.

Por tal motivo, Exsa DetNet realizará el Procedimiento durante la primera semana del levantamiento de data en mina (Caso Base), el cual estará sometido a la aprobación de la Jefatura de Perforación y Voladura.

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

### **6.2.3 Planificación y Ejecución de Voladuras Electrónicas Masivas.**

Durante esta etapa se tendrá como objetivos a lograr:

**Minimizar el uso de Detonadores para Back Up y eliminar Tiros Cortados**

- Control exhaustivo al proceso de tapado de los taladros.

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

**Maximizar la estabilidad del Talud en Voladuras de Producción.**

- Se tendrá sumo cuidado en el acoplamiento de taladros.
- Control de vibración (VPP – indicador de daño)

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

**Maximizar Fragmentación**

- Se considerarán algoritmos teóricos de referencia como Bergman, Konya, Lagrange, etc., tratando de encontrar el tiempo óptimo entre taladros.
- Voladuras con Menor Burden Efectivo

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

#### **6.2.4. Análisis pre y post voladura.**

El análisis pre y post voladura será nuestro indicador de calidad de las voladuras realizadas con el Sistema SmartShot, buscando establecer en que grado estamos cumpliendo los objetivos planteados líneas arriba.

Este análisis se realizará en conjunto con el personal de Asistencia Técnica EXSA, el cual consistirá en esta primera fase:

- Simulaciones con software de diseño (JKSimblast, Winblast)
- Filmaciones de todos los disparos electrónicos.
- Análisis de Fragmentación (Wipfrag - SplitDesktop).
- Registro de vibraciones (Minimate Plus – InstanTel)

**Responsables: Técnicos Exsa DetNet – Jefe de Asistencia Técnica**

Al término del Periodo de Demostraciones, será opción de la Empresa Minera en estudio el implementar el Sistema en sus operaciones.

Actualmente se han realizado pruebas en Volcan, Antamina, Toquepala, Yanacocha y Lagunas Norte. De las cuales han implementado el uso del Sistema en Volcan, Antamina y Lagunas Norte.

## CAPITULO VII. PROTOCOLO DE CAPACITACIÓN

Fue necesario también generar un protocolo de capacitación para personal nuevo.

De acuerdo a Detnet los niveles de capacitación son para manipuladores, usuarios, entrenadores. De los cuales en Perú sólo capacitamos a nivel de manipuladores y usuarios.

Las diferencias son las siguientes:

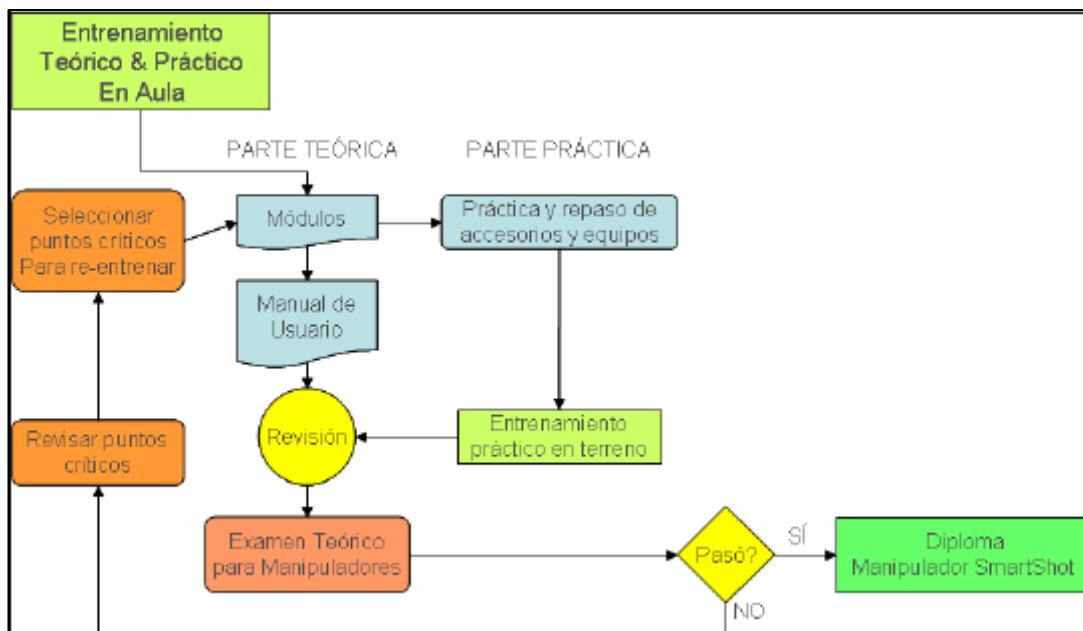
**Manipulador SmartShot™:** Es una persona que ha sido capacitada sólo como manipulador de detonadores electrónicos SmartShot™.

**Usuario SmartShot™:** Es una persona que trabaja empleando el sistema SmartShot™ o que conduce las operaciones de voladura SmartShot™.



## 7.1. CURSO BÁSICO PARA MANIPULADORES.

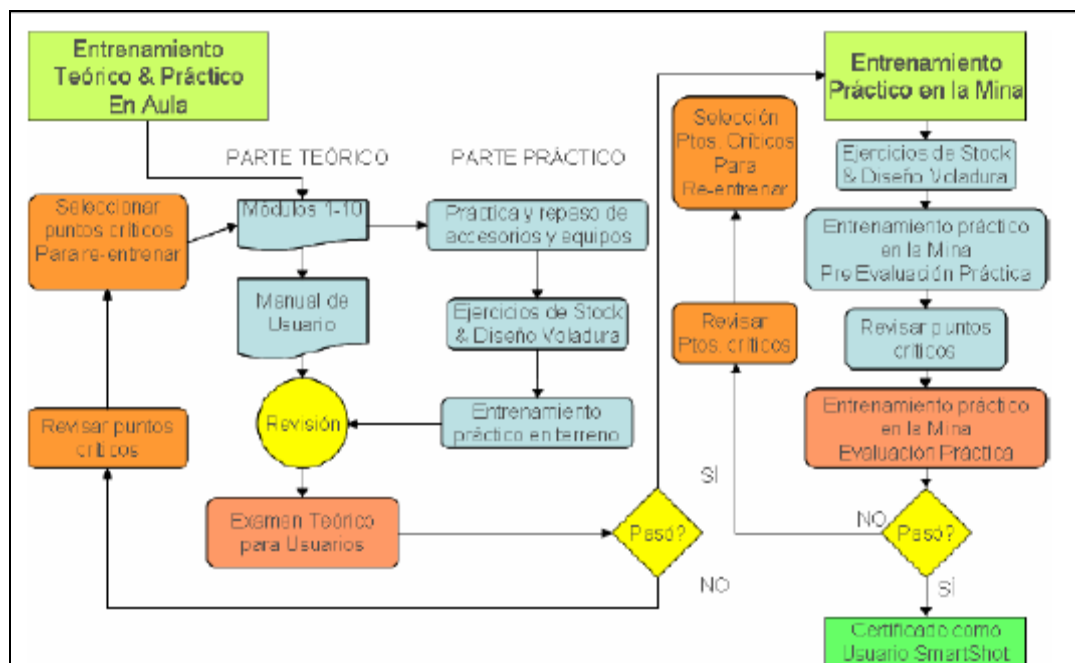
**CUADRO 24: DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE ENTRENAMIENTO PARA MANIPULADORES**



Tipo de curso	Básico
Método	Teórico y práctico
Duración	3 horas (Teórico: 2 horas; práctico: 1 hora)
Diploma/Certificado	Diploma Manipulador <b>SmartShot™</b>
Centro capacitación	Teórico – Lugar según previo acuerdo Práctico - Mina
Preparación como	Manipulador <b>SmartShot™</b>
Dirigido a	Personas que están directa o indirectamente involucradas en la manipulación con detonadores y explosivos en las operaciones de voladuras, almacenamiento y transporte de estos.
Temario	Antecedentes e introducción al sistema Visualización general del sistema Limitaciones del sistema Primado con detonadores <b>Hotshot™ / SmartShot™</b> Conexión del sistema Embalaje, transporte, almacenaje y destrucción de detonadores <b>Hotshot™ / SmartShot™</b>
Soporte	Manual <b>SmartShot™</b>
Proceso capacitación	Ver figura 24.

## 7.2. Curso Para Usuarios.

**CUADRO 25: DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE ENTRENAMIENTO PARA USUARIOS**



Tipo de curso	Avanzado para Usuarios
Método	Teórico y práctico
Duración	10 horas (Teórico: 10 horas; práctico: 3 voladuras mínimo)
Diploma/Certificado	Certificado como Usuario <b>SmartShot™</b>
Centro capacitación	Teórico – Lugar según previo acuerdo Práctico - Mina
Preparación como	Usuario <b>SmartShot™</b>
Dirigido a	Personas que están directamente involucradas en la conducción de las operaciones de voladuras, almacenamiento y transporte de estos.
Requisitos	Poseer Licencia para manipulador de explosivos al día
Temario	Antecedentes e introducción al sistema Visualización general del sistema Limitaciones del sistema Primado con detonadores <b>SmartShot™</b> Conexión, testeo y asignación de tiempos a los detonadores <b>SmartShot™</b> Resolviendo problemas durante la conexión Procedimiento de disparo Resolviendo problemas durante el proceso de disparo Embalaje, transporte, almacenaje y destrucción de detonadores <b>SmartShot™</b>

Soporte	Manual de Usuario <b>SmartShot™</b> Kit de entrenamiento
Proceso capacitación	Ver figura 25.

## **CAPITULO VIII. APLICACIÓN DEL SISTEMA SMARTSHOT EN PERU**

### **ANTAMINA – OPERACIONES MINA**

#### **8.1. ANTECEDENTES GENERALES.**

##### **8.1.1. Geología Local.**

Antamina es un depósito de skarn polimetalico con mineralización de cobre, Zinc, plata, molibdeno y Bismuto. El depósito se formó durante el emplazamiento de los intrusivos de roca ígnea de Antamina y los intrusivos porfiríticos relacionados en la caliza de la Celendin. El metasomatismo de contacto tuvo como resultado la formación del skarn mineralizados en las márgenes de los intrusivos de la caliza. La mineralización de la ley del mineral se produce aproximadamente el 90% del skarn y localmente dentro del intrusivo y de la caliza.

Las calizas del Celendin albergan el depósito y forman afloramientos prominentes en las crestas y paredes del valle de Antamina. El afloramiento se presenta en capas con lechos de 1m a 3m de espesor. La caliza es de color gris claro y se intemperiza a color blanco o cremoso. La estratificación es evidente en las perforaciones con taladros, en una escala de varios centímetros de espesor, sin contenido de fósiles, conchas u otro material biogénico. La caliza ha sido clasificada como micrita.

La mineralización esta limitada a pequeñas cantidades de pirita en las calizas, aunque es común encontrar vetas y mantos de skarn dentro de la caliza mineralizadas y no mineralizadas. La caliza es susceptible a la intemperización del karst, la cual se origina por la disolución de la caliza, generalmente en las fracturas (rutas de flujo). Esto origina cavidades y cuevas dentro de las unidades de caliza. En el área del deposito de Antamina (tajo abierto), no hay características de karst en la superficie. Sin embargo se observaron cavidades subterráneas con flujo de agua al norte y al este del depósito en la unidad de caliza de Jumasha.

Las principales unidades de roca utilizada para la clasificación del mineral y del desmonte se resumen de la siguiente manera:

**Mineral:** consta principalmente de mineral de cobre (Skarn de granate marrón) y mineral de cobre – zinc (Skarn de granate verde) en proporciones aproximadamente iguales, con algunos intrusivos generalizados y mármol.

**Caliza, Mármol y hornfels:** consta de caliza no mineralizada y, cerca al contacto con el skarn, mármol/hornfels, las cuales conforma en conjunto alrededor de 75% del desmonte minado.

**Intrusivos:** consta principalmente de cuarzo – monzonita con baja mineralización y forma alrededor del 15% del desmonte.

**Skarn:** contiene baja mineralización y forma alrededor del 10% del desmonte.

**Material de cubierta:** suelos y roca oxidada cercanos a la superficie. El análisis mineralógico realizado utilizando espectrometría de difracción con rayos x indica que la composición general de los tipos individuales de roca es la siguiente:

**Hornfels** – principalmente calcita con augita y cantidades menores de cuarzo, moscovita, albita, rutilo, plagioclasa microclino, feldespato de potasio, biotita, granate y trazas de pirita, pirrotita, magnetita y novelita.

**Mármol** – predominantemente calcita con cuarzo, moscovita y plagioclasa en cantidades menores de mica y clorita, pirrotita, diopsido, y trazas de molibdenita.

Intrusivos – principalmente cuarzo y feldespato de potasio con cantidades menores de plagioclasa, moscovita, biotita, calcita y trazas de molibdenita y pirita.

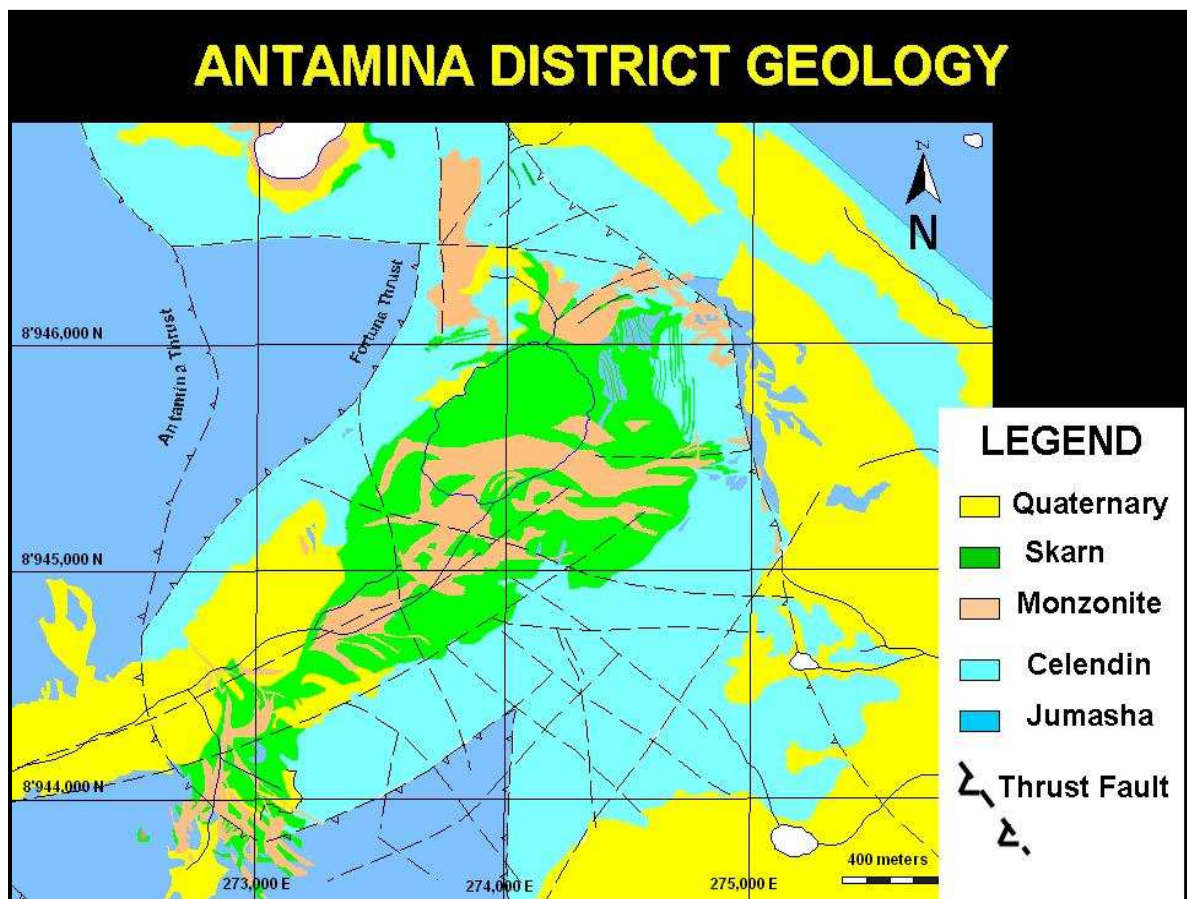
**Endoskarn** – mayormente feldespato de potasio, cuarzo, plagioclasa, granates (grosularia y andradita), calcita, diopsido con cantidades menores de mica, clorita, diopsido, calcita, pirrotita, ilmenita, moscovita y morilonita, y trazas de molibdenita.

**Exoskarn** – mayormente calcita y granate con cuarzo y cantidades menores de feldespato de potasio, microclino, albita, moscovita, calcita, andradita, biotita, ilmenita y trazas de magnetita, fluorita, molibdenita, pirita y posiblemente galena.

La Formación Jumasha tiene una cantidad significativa de karst mientras que la Formación Celendín Inferior tiene menor cantidad de karst en el área del depósito de relaves. La formación de karst en Jumasha se presenta a lo largo de la

estratificación y parece ser karst vadoso. Dentro de la vista de planta del depósito de relaves y aguas abajo, existen características de karst del orden de 1 a 2m de diámetro. Las depresiones en la Formación Jumasha al norte y este del depósito de relaves podrían interpretarse como características de colapso de karst.

**CUADRO 26: GEOLOGÍA LOCAL ANTAMINA**



## **8.1.2. Procesos de Mina Antamina.**

### **8.1.2.1. Perforación:**

La necesidad de la perforación y voladura está ligada a la velocidad de minado del equipo de carguío, lo que obliga a tener una reserva mínima de material fracturado. El reto principal de la perforación y voladura es obtener un material óptimamente fracturado.

Antamina cuenta con cuatro tipos de perforadoras para realizar sus perforaciones:

- **Bucyrus BE 49R-III:** diámetro de taladro 12 ¼”, usadas principalmente para voladuras primarias, Antamina cuenta con 05 equipos de estas características
- **IR DMM2:** Diámetro de taladro 9 7/8”, usadas para mallas pequeñas y precortes, Antamina cuenta con 02 equipos con estas características.
- **TITON 600:** Usadas netamente para voladuras de pre corte son de 5” de diámetro, Antamina cuenta con 01 equipo con esta característica
- **ECM 690:** Diámetro de taladro 4 1/2“, usadas básicamente para voladuras secundarias, a su vez son las 02 perforadoras pioneras de Antamina.



### **8.1.2.2. Acarreo del material.**

Fragmentado el material, se inicia la actividad de minado. Para el material ya chancado se usa una faja transportadora a lo largo de un túnel de 2.6 Km., que atraviesa la montaña entre las quebradas Antamina y Yanacancha.

Luego, el mineral transportado, es acumulado en pilas (stockpile) de acuerdo a las características del mismo. El material de desmonte es llevado a los botaderos respectivos.

El material almacenado en los stockpiles es acarreado hacia la chancadora primaria, marca Fuller, con capacidad promedio de 80,000 toneladas por día. Esta reduce los grandes bloques de mineral hasta en cinco pulgadas y quedan listos para ingresar a la Planta Concentradora.

#### **Maquinaria empleada:**

- **Palas BE 495B**, con capacidad de 56 yd<sup>3</sup>. Antamina cuenta con 4 unidades.
- **Camiones Cat 793C**, con una capacidad de 240TM, su función principal es la de acarrear el material volado ya sea mineral o desmonte, Antamina cuenta con 43 unidades con estas características.

- **Camiones Cat 793D**, con una capacidad de 240TM, su función es similar al de los 793C, pero con mayor tecnología, cuenta con 11 camiones con estas características.
- **Cargadores Cat 994 D/F**, 04 unidades de 27 yd<sup>3</sup>.
- **Tractor Cat D6R**, se cuenta con un equipo.
- **Tractores Cat D10R**, su función es la apoyar en los pisos de las palas a si como en los botaderos, Antamina cuanta con 08 equipos con estas características.
- **Tractores Cat D11R**, se cuenta con 2 equipos.
- **Cisterna Cat 777D**, su función es la de abastecer agua a las perforadoras y opacar el polvo en temporadas secas en la mina, cuenta con 02 equipos de 20000 galones cada uno.
- **Tractores sobre llantas 834 B y 854 G**, cumplen una función importante en la nivelación de los pisos para las mallas de perforación y limpieza de las vías de acceso y rampas principales.
- **Un cama baja Cat 777D**, para traslado de equipo Diesel.

- **Un semirremolque Volvo FM 400**, cuenta con un grupo electrógeno móvil para traslado de equipos eléctricos.

## **8.2. ESTUDIOS REALIZADOS.**

### **8.2.1. Reducción de tiempos.**

En Julio del 2009 se realizaron tres voladuras en Fase 3 y Fase 4 de Mina, zonas de mineral. El estudio se realizó ya que desde que se implementó el uso de detonadores electrónicos en 2008, los tiempos de retardo asignados mantenían el mismo patrón que los usados con pirotécnicos (17 ms.).

Con la reducción de tiempos se busca mejorar la fragmentación, tratando de mantener los niveles de vibración dentro de los parámetros de PPV críticos establecidos por Geotecnia.

**Proyecto: 3-NP-4163-01**

Fecha: 25/07/2009

Malla: 6.0 m. X 7.5 m.

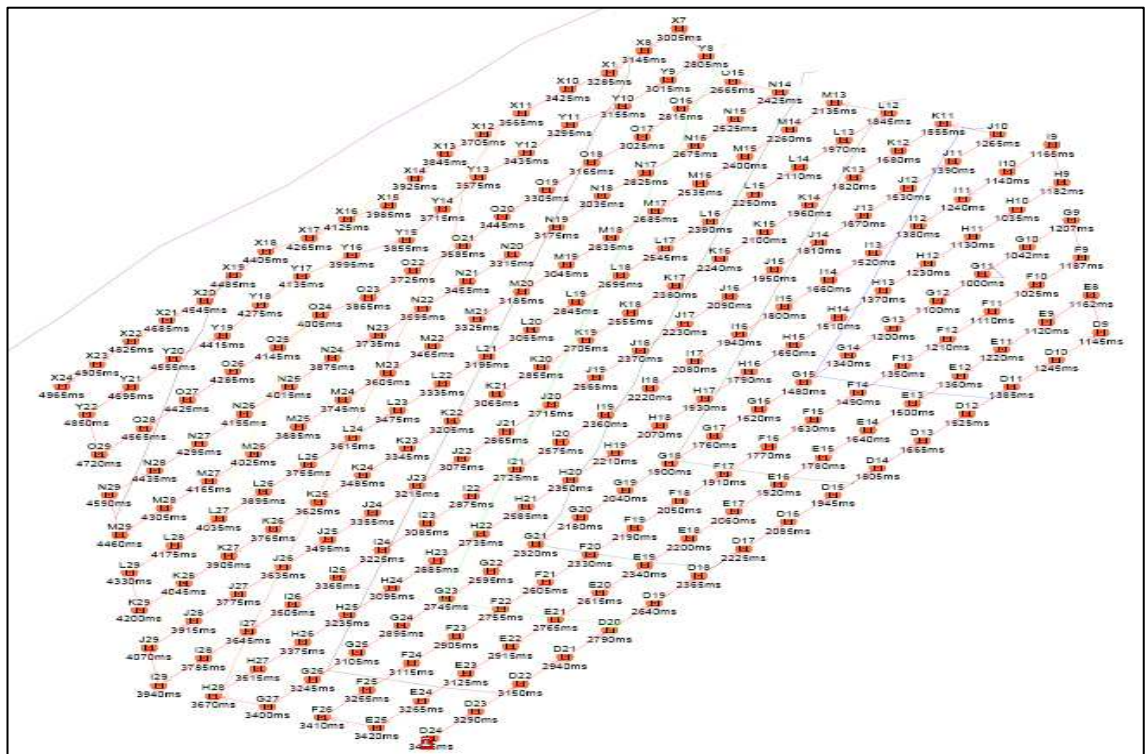
Taladros: 249

Detonadores: 274

Tiempo entre taladros: 10 ms.

Tiempo entre filas: 140 ms.

Tipo de material: Mineral

**CUADRO 27: PROYECTO 3-NP-4163-01**

**Resultados Post-Voladura:****Vibración**

Malla	Taladros	Tiempo / Taladros (ms.)	Kg. De Explosivos	Distancia de medición (m.)	PPV (mm/seg.)
3-NP-4163-01	249	10	232 073	120	92.60

**Fragmentación**

Fecha	Hora	D25 (cm.)	D50 (cm.)	D75 (cm.)	D90 (cm.)
06/08/2009	1:30 PM.	0.0216	0.0355	0.0531	0.0781
07/08/2009	1:30 PM.	0.0344	0.0532	0.0823	0.1236
07/08/2009	1:30 PM.	0.0243	0.0393	0.0580	0.0608

**Proyecto: 4-NP-4208-20**

Fecha: 27/07/2009

Malla: 6.0 m. X 7.5 m.

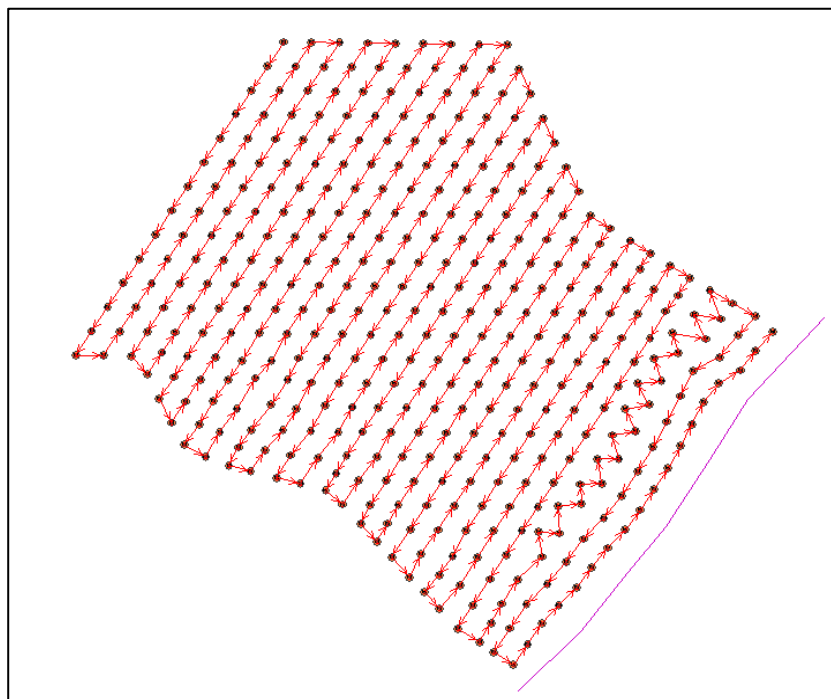
Taladros: 394

Detonadores: 417

Tiempo entre taladros: 10 ms.

Tiempo entre filas: 140 ms.

Tipo de material: Mineral

**CUADRO 28: PROYECTO 4-NP-4208-20**

## Resultados Post-Voladura:

### Vibración

Malla	Taladros	Tiempo / Taladros (ms.)	Kg. De Explosivos	Distancia de medición (m.)	PPV (mm/seg.)
4-NP-4208-20	394	10	359784	100	132

### Fragmentación

Fecha	Hora	D25 (cm.)	D50 (cm.)	D75 (cm.)	D90 (cm.)
14/08/2009	1:30 PM.	0.0319	0.0432	0.0575	0.0748
17/08/2009	1:30 PM.	0.0200	0.0347	0.0544	0.0811
23/08/2009	1:30 PM.	0.0135	0.0202	0.0309	0.0443

### Proyecto: 4-NP-4208-22

Fecha: 29/07/2009

Malla: 6.0 m. X 7.5 m.

Taladros: 183

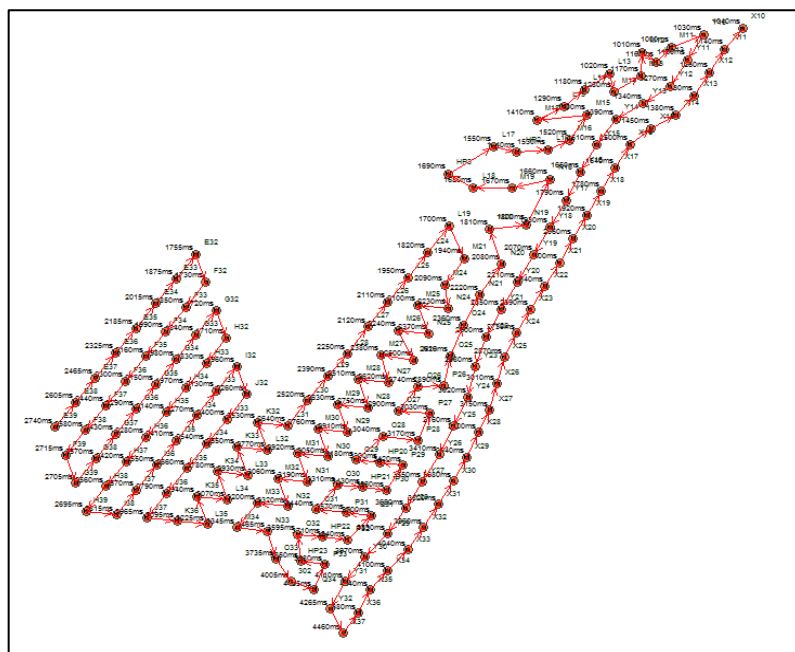
Detonadores: 212

Tiempo entre taladros: 10 ms.

Tiempo entre filas: 140 ms.

Tipo de material: Desmonte

**CUADRO 29: PROYECTO 4-NP-4208-22**



**Resultados Post-Voladura:****Vibración**

<b>Malla</b>	<b>Taladros</b>	<b>Tiempo / Taladros (ms.)</b>	<b>Kg. De Explosivos</b>	<b>Distancia de medición (m.)</b>	<b>PPV (mm/seg.)</b>
4-NP-4208-22	183	10	146854	70	217

**Fragmentación**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>D25 (cm.)</b>	<b>D50 (cm.)</b>	<b>D75 (cm.)</b>	<b>D90 (cm.)</b>
06/08/2009	1:30 PM.	0.0269	0.0430	0.0655	0.0860
07/08/2009	1:30 PM.	0.0231	0.0355	0.0544	0.0718
08/08/2009	1:30 PM.	0.0313	0.0458	0.0662	0.0872

**Comparación de Resultados.****Vibración**

Según un estudio Geotécnico que se realizó en Antamina se determinó lo siguiente:

<b>Criterio de Daño</b>	<b>Intrusivo Qz. Monzonítico (Fase 2) Mm/s</b>	<b>Exo – Diopsido (Fase 3) Mm/s</b>	<b>Hornfels Gris (fase 4) Mm/s</b>
<b>Intenso Fracturamiento</b>	3009	3287	3730
<b>Creación de nuevas fracturas</b>	752	822	933
<b>Extensión de fracturas pré-existentes</b>	188	205	233

De este cuadro los valores que más nos interesan son aquellos que generan nuevas fracturas, por tanto:

ID Voladura	Zona	PPV obtenido (mm/seg.)	Criterio de daño según Fase
3-NP-4163-01	FASE 03	92.60	822
4-NP-4208-20	FASE 04	132	933
4-NP-4208-22	FASE 04	217	933

### Fragmentación.

Como referencia tomaremos el valor correspondiente al D90, esto es, compararemos la fragmentación del 90% del material roto de estos 3 disparos versus el promedio de todos los meses del año 2009.

Mes (2009)	Fase 3 (D90 - cm)	Fase 4 (D90 - cm)
Enero	0.1547	0.2010
Febrero	0.1533	0.2134
Marzo	0.1550	0.2432
Abril	0.1830	0.2508
Mayo	0.0982	0.1048
Junio	0.1282	0.1062
Julio	0.0883	0.0949
<b>Agosto</b>	<b>0.0710</b>	<b>0.0915</b>
Setiembre	0.0975	0.1569
Octubre	0.2484	0.1571
Noviembre	0.1235	0.1010
Diciembre	0.0963	0.1306
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.1331</b>	<b>0.1543</b>

3-NP-4163-01	Fase 3 (Promedio D90)
0.0948	0.1331

4-NP-4208-01 / 4-NP-4208-22	Fase 4 (Promedio D90)
0.07415	0.1543

Como se observa el resultado de fragmentación de las voladuras ejecutadas en Julio con tiempos de 10 ms. entre taladros muestra una mejora considerable, lo



cual se ve en el promedio de Agosto (se ejecutaron en Julio pero el análisis se hizo en Agosto cuando los equipos de carguío ingresaron a las zonas en estudio).

### **8.2.2. Comparación de Velocidad de Carguío.**

La velocidad de carguío también es un indicador importante para saber si la fragmentación y el esponjamiento del material volado es el adecuado para los equipos de carguío. En esta oportunidad se hizo la comparación entre dos disparos contiguos, uno con detonadores pirotécnicos y el otro con electrónicos.

#### **Antecedentes**

En el presente documento se expone la comparación de velocidades de excavación realizada a los disparos 4-NP-4238-18 (Electrónico) y 4-NP-4238-19 (Pirotécnico). Ambos proyectos han mantenido los mismos patrones de carguío, variando el sistema de iniciación y tiempos entre taladros.

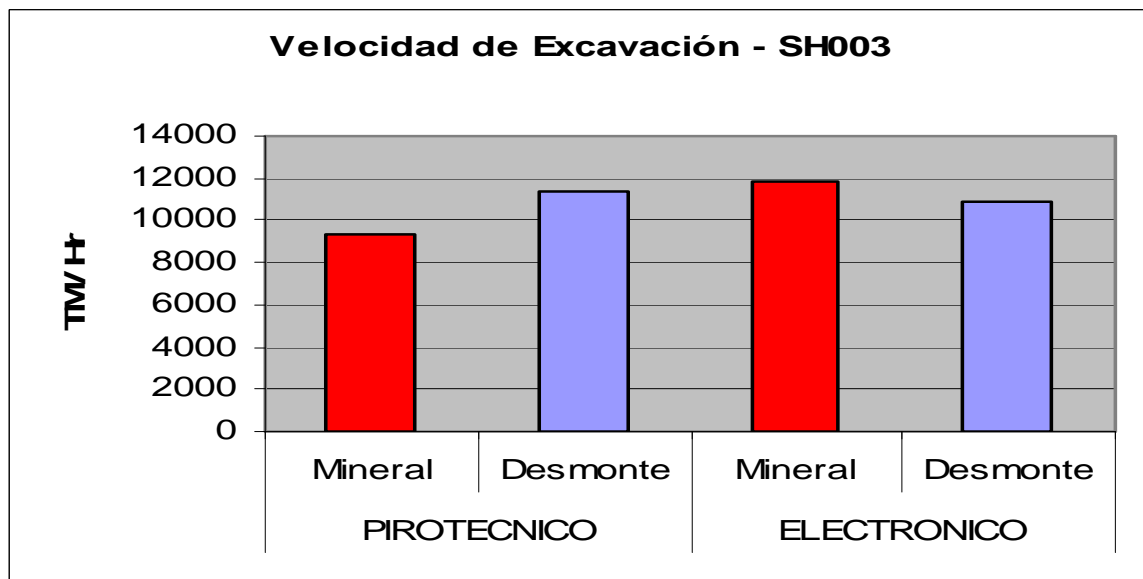
<b>Proyecto</b>	<b>Sistema de Iniciación</b>	<b>Tiempo entre taladros</b>
4-NP-4238-18	Electrónico	10 ms
4-NP-4238-19	Pirotécnico	17 ms

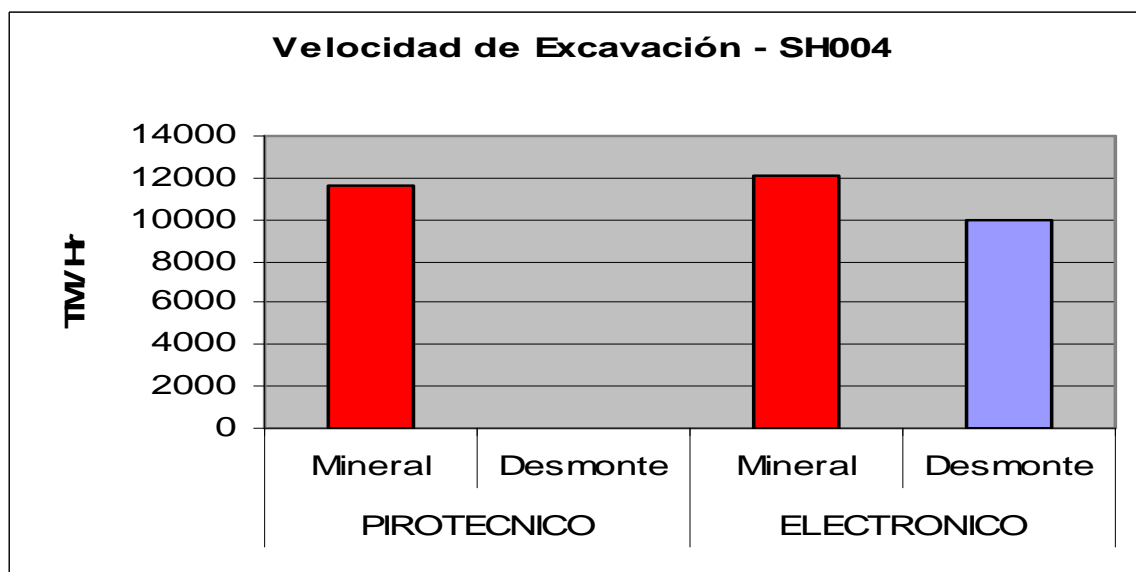
A continuación se muestran los cuadros comparativos de las palas Bucyrus 3 y 4:

**CUADRO 30: COMPARACIÓN POR EQUIPO DE CARGUÍO Y POR MATERIAL**

		SH003		SH004	
		Vel. Excavación (Tm/Hr)	T. carguío prom (seg.)	Vel. Excavación (Tm/Hr)	T. carguío prom (seg.)
PIROTECNICO	Mineral	9356.789841	94.257	11591.38136	75.2778
	Desmante	11387.71892	77.742	0	0
ELECTRONICO	Mineral	11895.12242	74.6928	12070.93254	72.576
	Desmante	10846.27295	81.378	9954.686582	85.8024

**CUADRO 31: VELOCIDAD DE EXCAVACIÓN PALA 3**



**CUADRO 32: VELOCIDAD DE EXCAVACIÓN PALA 4****CUADRO 33: RESUMEN**

Equipo	Material	VELOCIDAD DE EXCAVACIÓN	
		MEJOR RESULTADO	% DIFERENCIAL
SH003	mineral	ELECTRONICO	27.13%
	desmorte	PIROTECNICO	4.99%
SH004	mineral	ELECTRONICO	4.14%
	desmorte		

De lo mostrado la velocidad de excavación en ambos equipos (SH003 y SH004) en mineral ha sido superior en el proyecto disparado con iniciación electrónica.

### **8.2.3. Aplicación del Sistema Smartshot en Fase 5 (Zona Crítica)**

Fase 5 es una de las zonas más críticas de Antamina esto debido a que las voladuras realizadas en dicho lugar están directamente encima de la chancadora primaria. Por este motivo se consideraron las siguientes razones para utilizar al 100% el Sistema de Iniciación Electrónica Smartshot.

#### **Las razones son:**

- Proyección hacia la chancadora primaria.
- Caída de masa rocosa a los bancos inferiores y que desplace el material hacia la chancadora.
- Vibración que incremente la dimensión de grietas pre existente.
- La presencia frecuente del personal de operaciones en la zona de riesgo.
- Presencia de túnel que transporta el mineral
- Fracturas pre existente en el pilar.

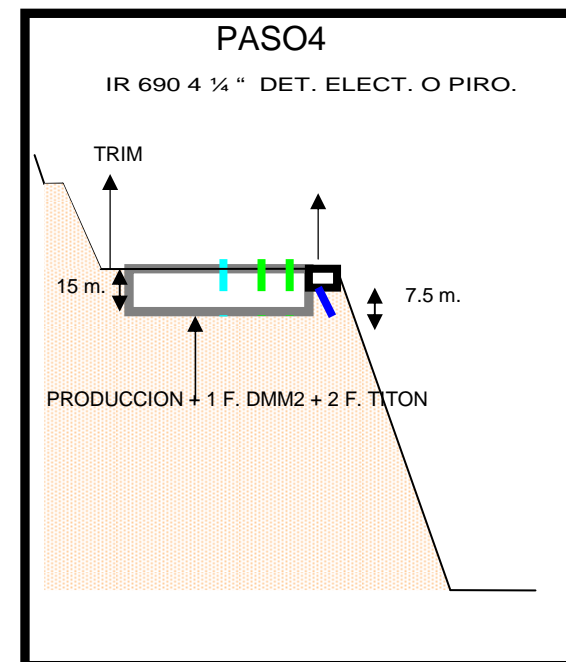
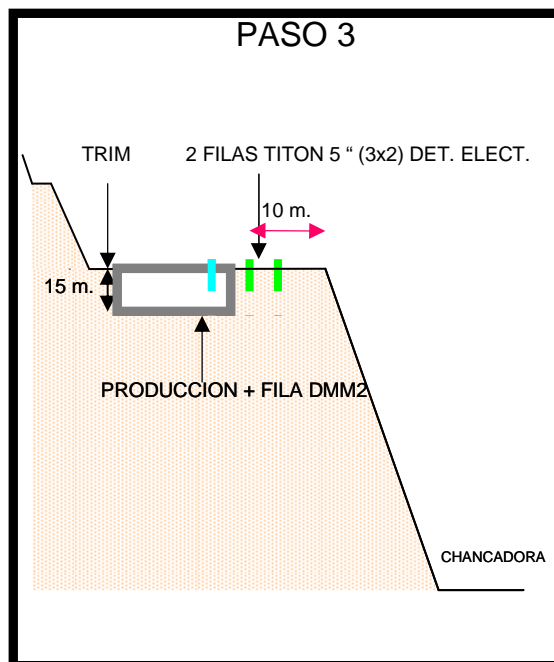
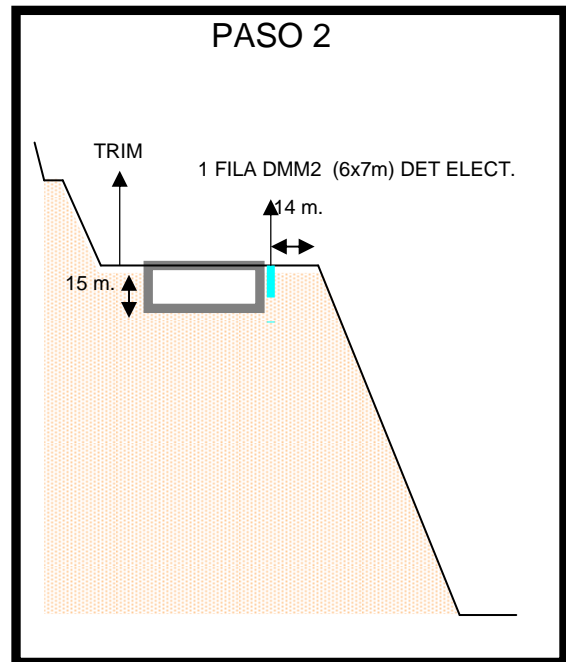
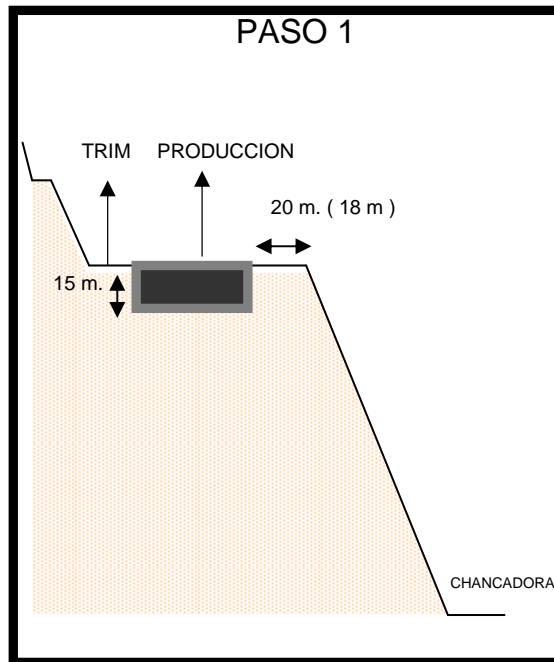
**CUADRO 34: INICIOS DE FASE 5**



**CUADRO 35: AVANCE DE FASE 5 A MARZO DEL 2010**



Para este trabajo se diseñó un procedimiento de disparo, que se dividió en 4 pasos.



**CUADRO 36: ISLA DEJADA EN FASE 5 PARA PROTECCIÓN DE CHANCADORA**



**Resultados obtenidos en Fase 5**

De Marzo de este año (como se observa las fotos) hasta ahora se han bajado 3 bancos y se ha logrado mantener la integridad de la chancadora como la del túnel, así mismo el área de Geotecnia muestrea continuamente los taludes, encontrando que se mantienen dentro de parámetros aceptables como se muestra a continuación.



**CUADRO 37: TALUD EN ZONA DE FASE 5 SUR**





## EVALUACIÓN DE GEOTÉCNICA DE TALUDES ROCOSOS

SECTOR	Fase5-S			FECHA		27-Feb-10
NIVEL	4553 (ventana 01)			GEOTÉCNICO	IQY	
	Valoraciones					
Altura del Talud	7	5	4	2	0	4
Ancho del Catch Bench	7	4	3	1	0	4
Efectividad del Catch Bench	7	5	4	1	0	4
Condición de la Cresta	7	5	3	1	0	3
Limitaciones de Acceso	5	4	2	1	0	5
Tamaño de Bloque	6	4	3	1	0	1
Limpieza del Talud	7	5	4	1	0	7
Resultados de la Voladura	7	6	4	2	0	6
GSI	6	6	5	3	0	5
Clima y Agua	5	4	2	1	0	4
Desprendimientos	6	4	3	2	0	4
						<b>47</b>

Muy Bueno	Bueno	Regular	Mala
61 a 70	46 a 60	26 a 45	0 a 25

CONDICIÓN DEL TALUD PARA LA ENTREGA DE BANCO	<b>BUENO</b>
--	--------------



Recomendaciones	Talud limpio se puede realizar los trabajos de perforación sin inconvenientes
-----------------	---

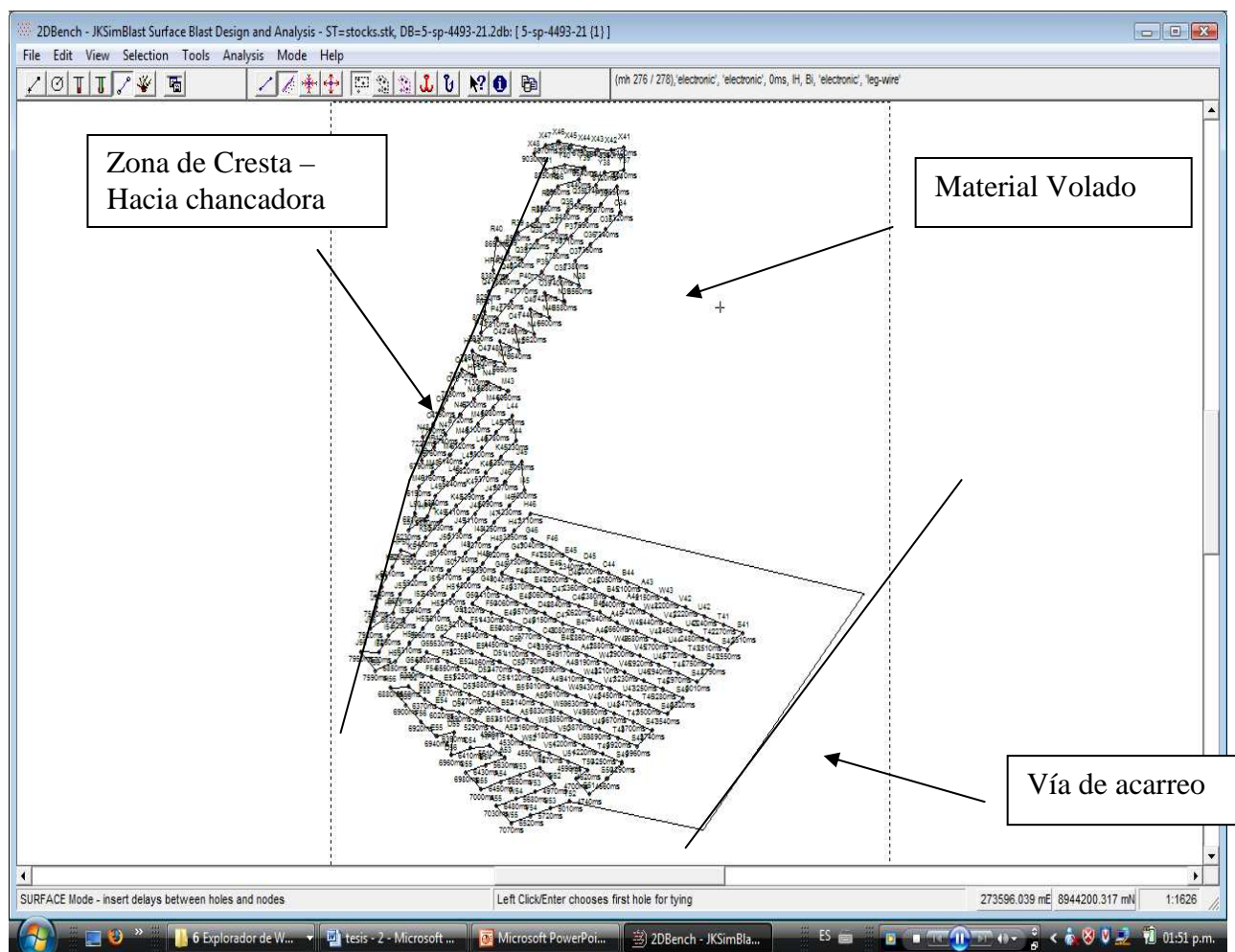
Para todos estos trabajos hemos utilizado una herramienta computacional de diseño y simulación como es el software JKSimblast, lo cual nos permite ver las isolíneas y los histogramas de tiempo antes de realizar un disparo, de tal forma de

anticiparnos ante cualquier eventualidad y asegurando que el diseño planteado es el más adecuado.

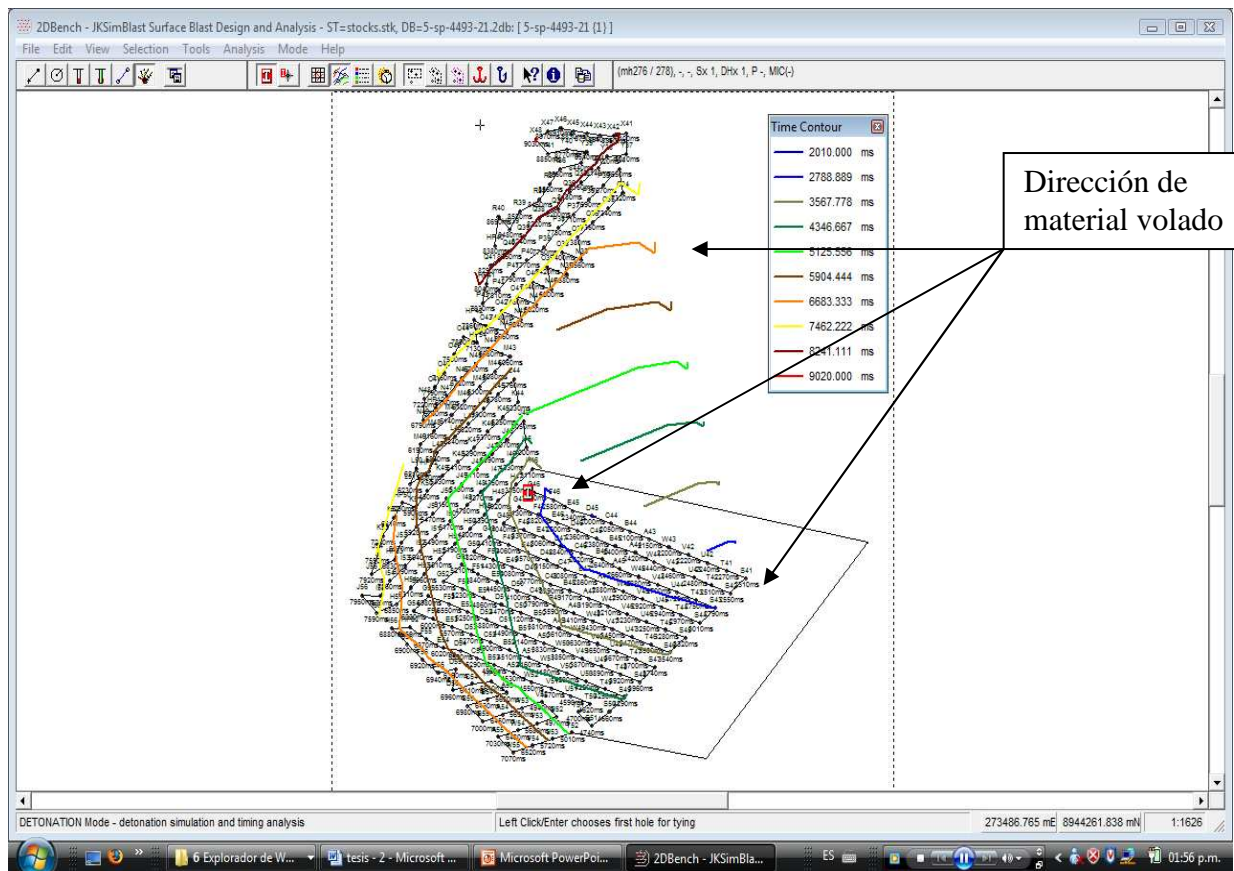
A continuación se mostrará la aplicación de este software en una de las tantas voladuras de fase 5 zona sur:

## Proyecto 5-SP-4493-21

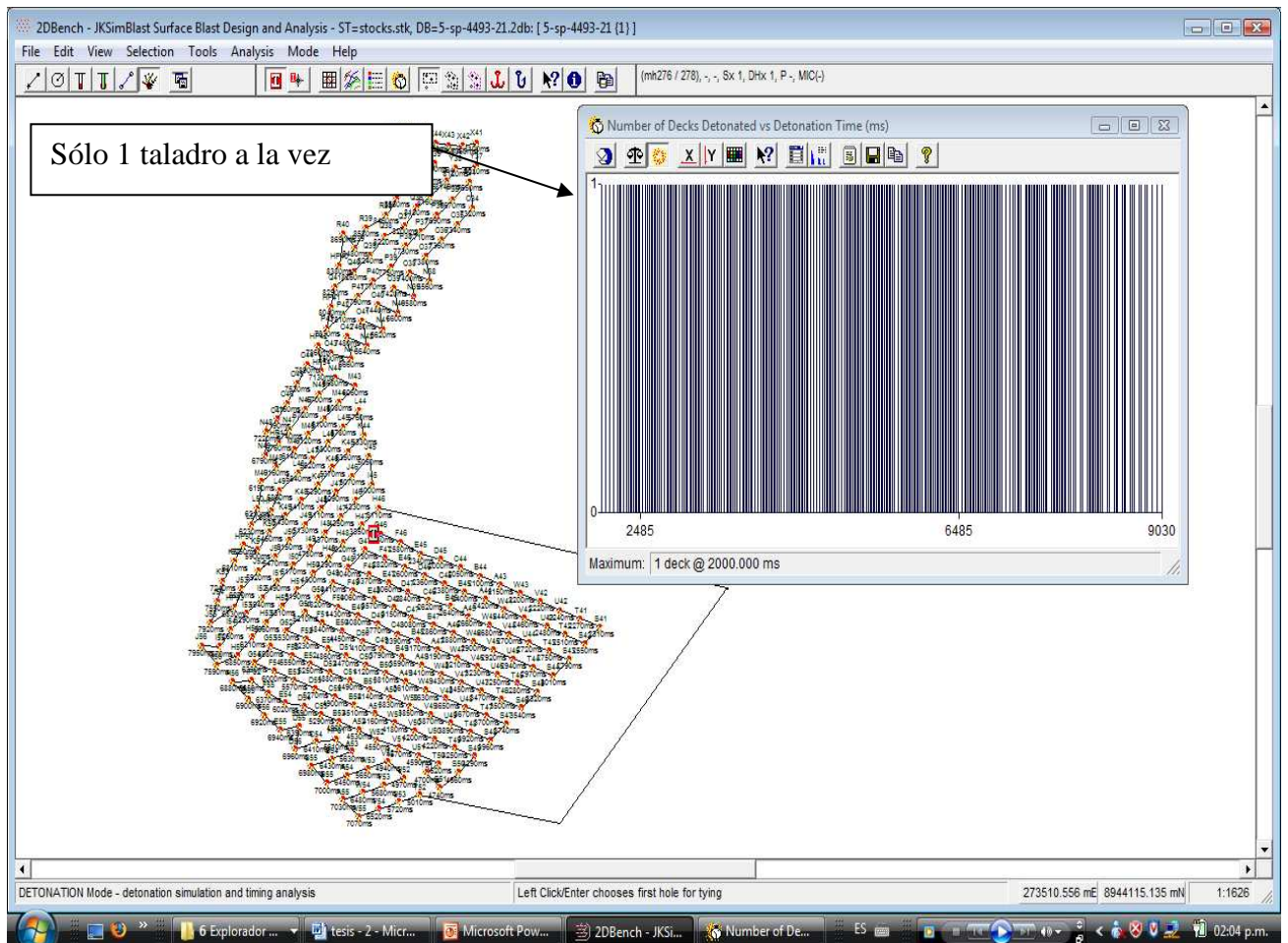
### 1.- Diseño de tiempos y amarre electrónico utilizando software JKSImblast



## 2.- Revisión de Isolíneas (Direccionamiento del material)



**3.- Revisión de Histograma de tiempos (Evitar que se acoplen 2 o más taladros – Tiempo mínimo de separación entre taladro debe ser mayor o igual a 8 ms.)**



## **8.2.4. Voladura Controlada en Estribo Derecho de Presa de Relaves – Antamina**

### **8.2.4.1. Antecedentes.**

En Mayo del año 2010 se presentó la propuesta para voladura en el estribo derecho de la presa de relaves. Debido al riesgo que exigía esta operación se optó por utilizar detonadores electrónicos, ya que como sabemos su probabilidad de acoplamiento es nula, y el manejo de tiempos es bastante flexible para un trabajo de tal precisión como este.

El objetivo de la operación era la voladura de rocas evitando, a su vez, el daño a la presa de relaves, esto mediante la generación de frecuencias altas (encima de los 20 Hz), Vpp bajas (no más de 12.7 mm/s), eliminación de flyrocks, tiros quedados, ruido, etc.

### **8.2.4.2. Parámetros Geológicos.**

Los datos proporcionados por Golder Associates nos indican que existen dos tipos de rocas en la zona. La primera una capa de limolitas en la parte superior del proyecto desde el nivel 4110 hasta el 4090 y debajo de esta en menor cantidad roca caliza. El promedio de resistencia uniaxial a la compresión de ambas rocas está entre 60 y 100 Mpa.

Existen contactos litológicos en forma transversal, así como juntas de 45 y 50 grados orientados hacia la presa de relaves, una falla geológica en el inicio del banqueo, nivel 4130 y que bordea de este a oeste el área a volar.

#### **8.2.4.3. Diseño de Malla y Carga.**

Partimos primero del equipamiento con el que cuenta Cosapi: Una perforadora Rock-Drill con broca de 3.5 pulgadas.

Segundo, el explosivo más adecuado para este trabajo y por su stock en polvorín es la Iremita 3 x 16, primada con un Booster de 1/3 libra. Así mismo la utilización al 100% del detonador electrónico HotShot.

Se ha optado por la generación de DECKS, tanto en los taladros de producción como en los de precorte, de tal forma de restringir la carga operante.

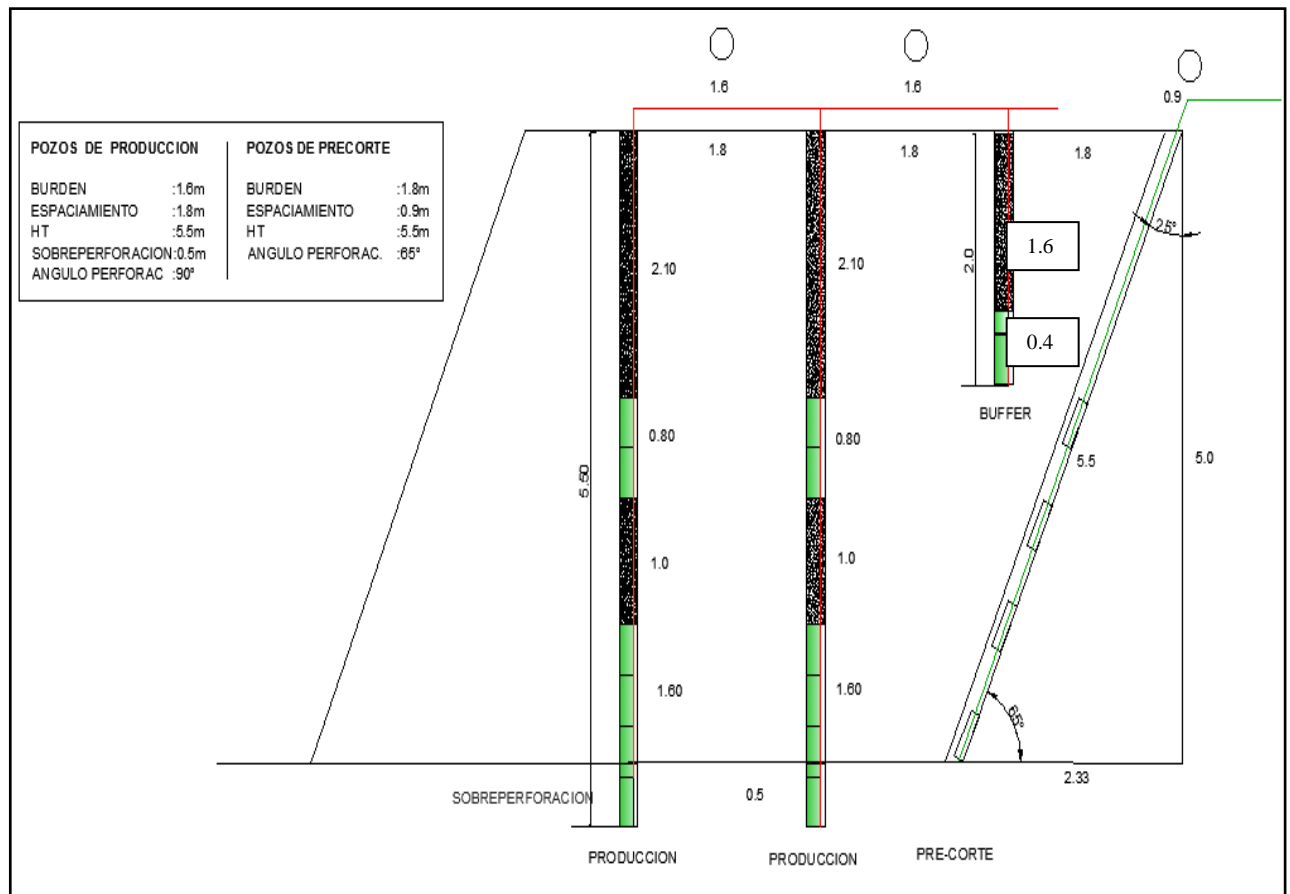
Las mallas a continuación son referenciales, ya que en cada proyecto se tomará diversas consideraciones para variar los parámetros.

#### Mallas de perforación

Taladros de Producción	
Diámetro de perforación (pulg.)	3.5
Burden (m)	2.2
Espaciamiento (m)	2.5
Altura de banco (m)	5
Ángulo de perforación (°)	90
Taladros de Precorte	
Diámetro de perforación (pulg.)	3.5

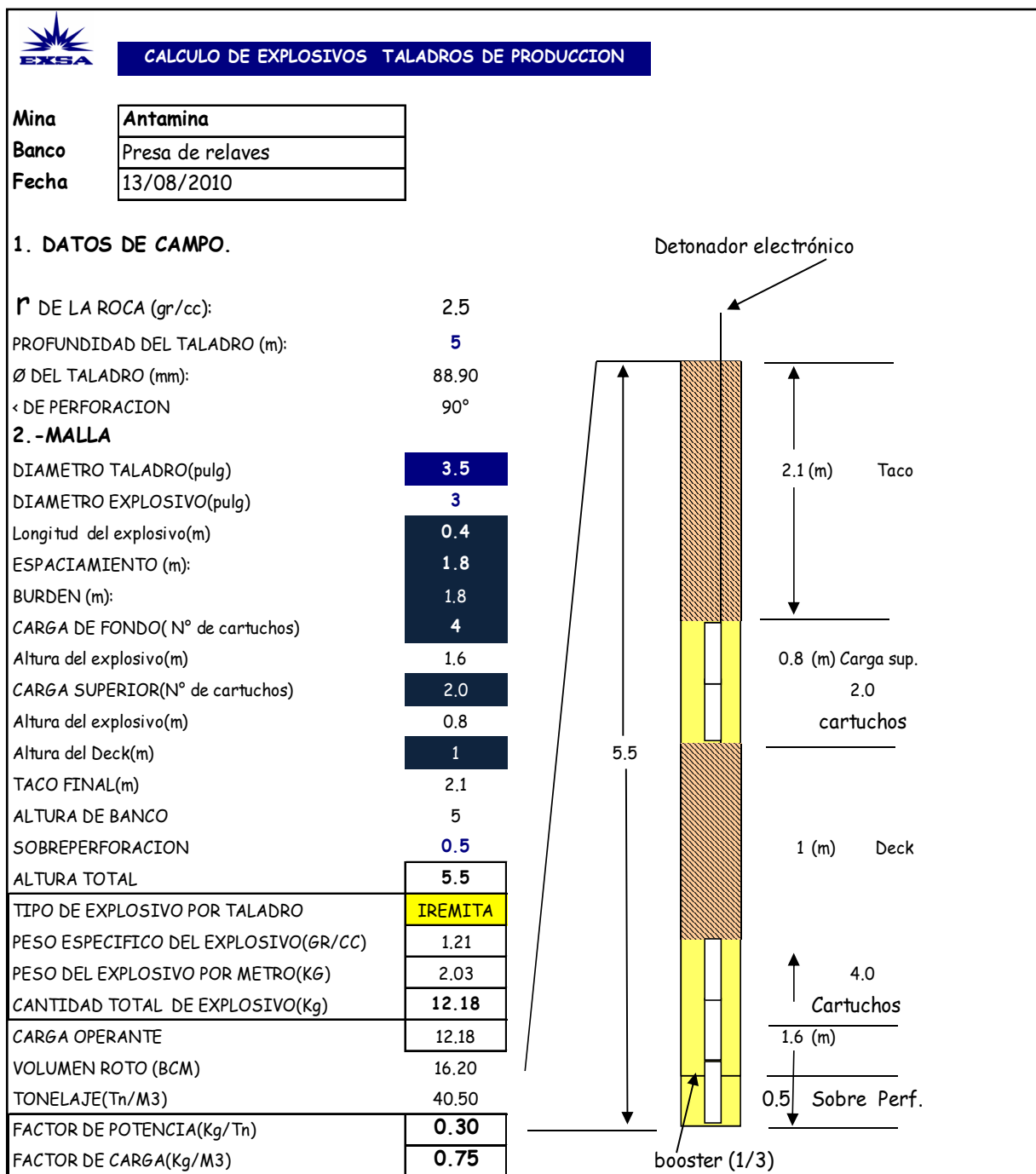
Burden (m)	1.8
Espaciamiento (m)	1.4
Altura de banco (m)	5
Ángulo de perforación (°)	65

**CUADRO 38: EJEMPLO DE MALLA EMPLEADA EN UNO DE LOS PROYECTOS**






### CUADRO 39: DISEÑO DE CARGA – TALADRO DE PRODUCCIÓN



**CUADRO 40: DISEÑO DE CARGA – TALADRO BUFFER**



**CALCULO DE EXPLOSIVOS TALADROS DE BUFFER**

<b>Mina</b>	Antamina
<b>Banco</b>	Presas de relaves
<b>Fecha</b>	13/08/2010

**1. DATOS DE CAMPO.**

$\rho$  DE LA ROCA (gr/cc): 2.5

PROFUNDIDAD DEL TALADRO (m): 2

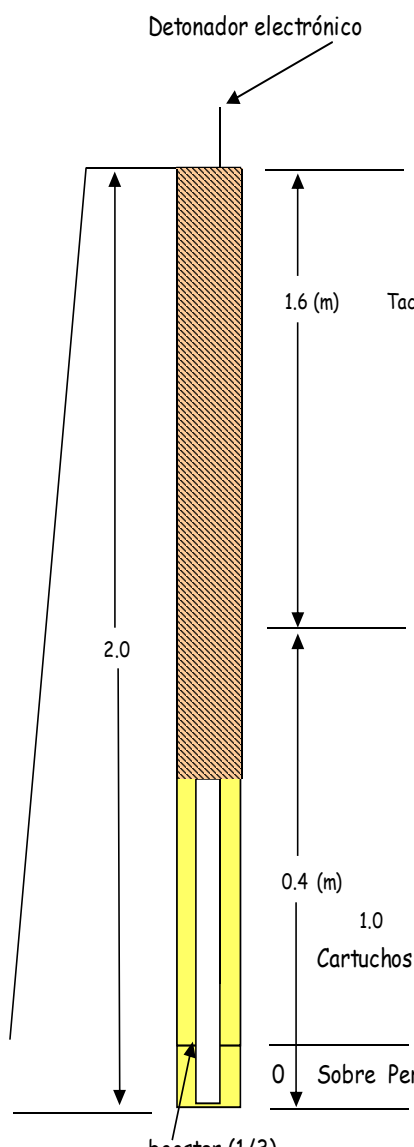
Ø DEL TALADRO (mm): 88.90

∠ DE PERFORACION: 90°

**2. - MALLA**

DIAMETRO TALADRO(pulg)	3.5
DIAMETRO EXPLOSIVO(pulg)	3
Longitud del explosivo(m)	0.4
ESPACIAMIENTO (m):	1.8
BURDEN (m):	1.8
CARGA DE FONDO(N° de cartuchos)	1
Altura del explosivo(m)	0.4
CARGA SUPERIOR(N° de cartuchos)	0.0
Altura del explosivo(m)	0
Altura del Deck(m)	0
TACO FINAL(m)	1.6
ALTURA DE BANCO	2
SOBREPERFORACION	0
ALTURA TOTAL	2

TIPO DE EXPLOSIVO POR TALADRO	IREMITA
PESO ESPECIFICO DEL EXPLOSIVO(GR/CC)	1.21
PESO DEL EXPLOSIVO POR METRO(KG)	2.03
CANTIDAD TOTAL DE EXPLOSIVO(Kg)	2.03
CARGA OPERANTE	2.03
VOLUMEN ROTO (BCM)	6.48
TONELAJE(Tn/M3)	16.20
FACTOR DE POTENCIA(Kg/Tn)	0.13
FACTOR DE CARGA(Kg/M3)	0.31



Detonador electrónico

2.0

1.6 (m) Taco

0.4 (m)

1.0

Cartuchos

0

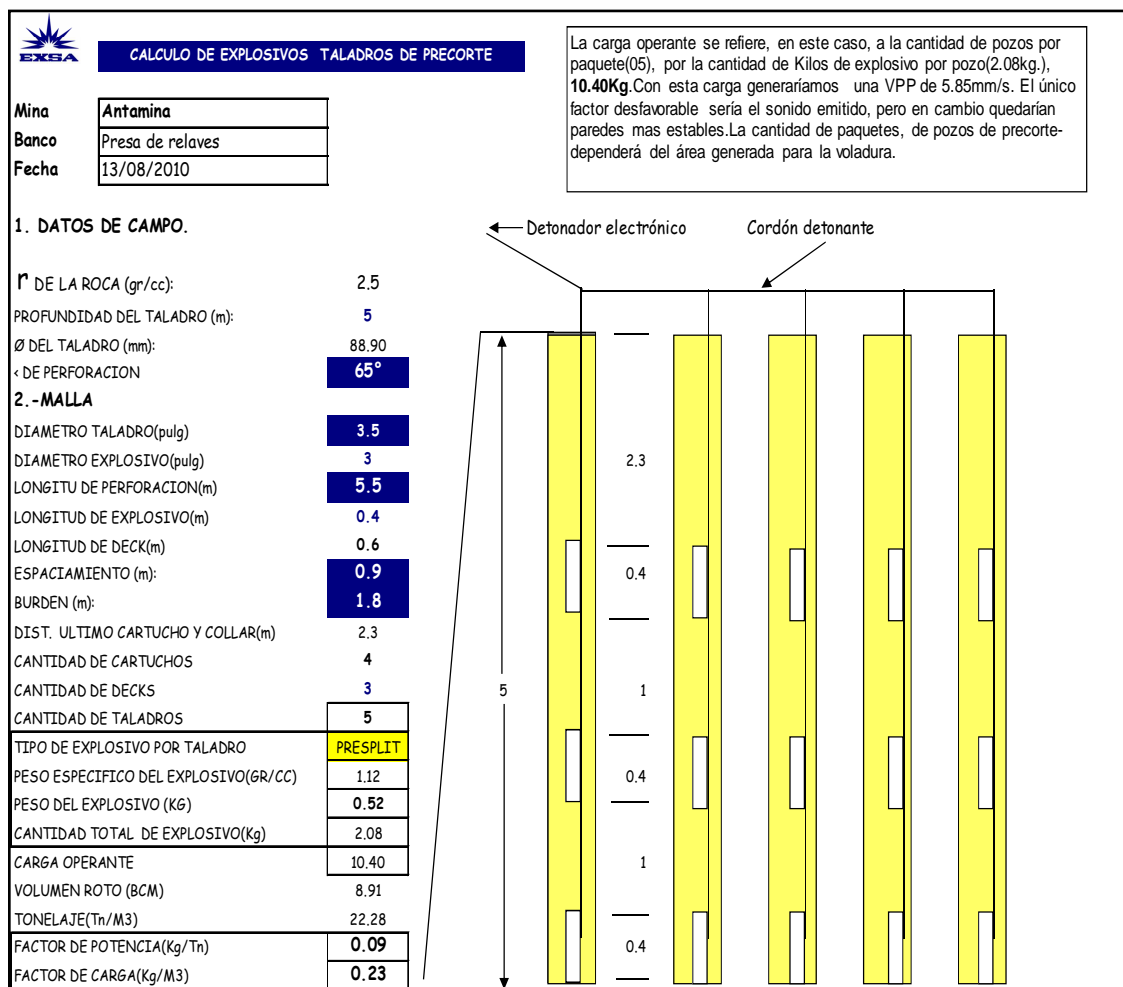
Sobre Perf.

booster (1/3)

1.58

mm/s

## CUADRO 41: DISEÑO DE CARGA – TALADRO PRECORTE



### 8.2.4.4. Resultados obtenidos.

Al tratarse de voladuras cercanas a una construcción tan importante como es la presa de relaves, que a parte de su estructura en sí cuenta con una serie de instrumentos sensibles y delicados, se optó por tomar todas las medidas de seguridad.

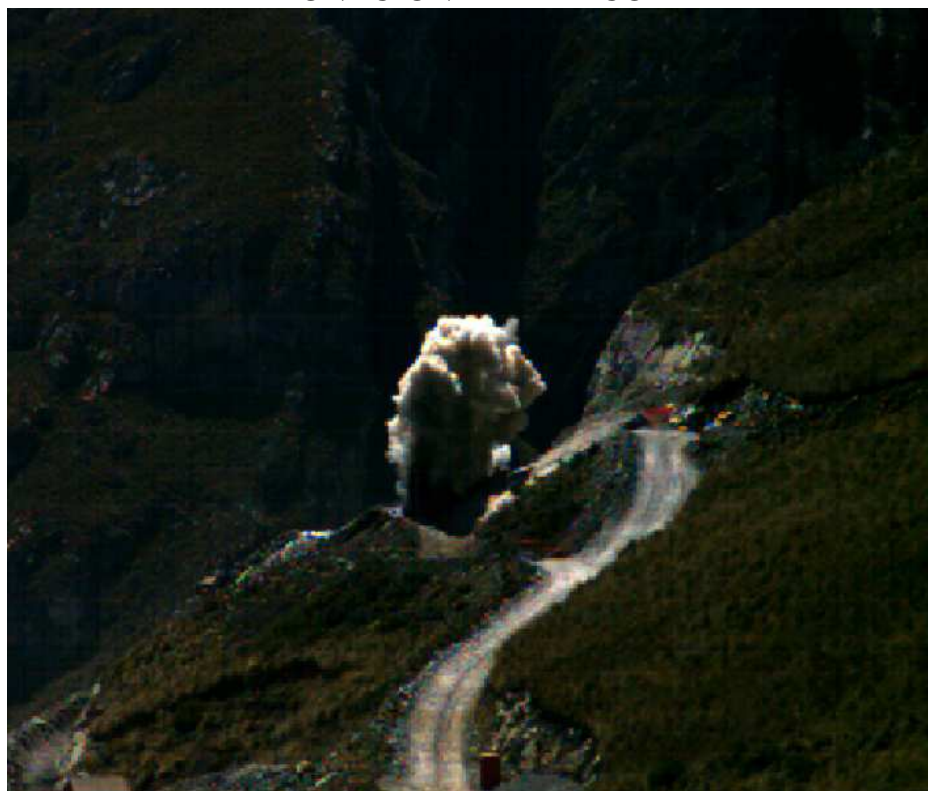
Estos controles contemplaron: La toma de fotografías antes y después de la voladura; la filmación de la voladura con cámara de alta velocidad; el monitoreo

de vibraciones; la utilización de software de simulación como es el caso del JKSimblast, el recubrimiento con mallas de la zona a volar para evitar proyección de rocas a la geomembrana y el seguimiento de la fragmentación utilizando el software Split.

A continuación se muestran algunos de estos resultados:

### **Filmaciones con cámara de alta velocidad**

#### **CUADRO 42: FILMACIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD – DETONACIÓN DEL PRECORTE**



**CUADRO 43: FILMACIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD –  
DETONACIÓN TALADROS DE PRODUCCIÓN**



### **Análisis Vibracional**

Por lo general se tomaron dos puntos sobre el dique de la presa para la ubicación de los sismógrafos, a las distancias que se muestran a continuación:

PUNTO	DIST. HORIZONTAL	DIST. INCLINADA
P1	126.2	132.4
P2	96.3	104.3

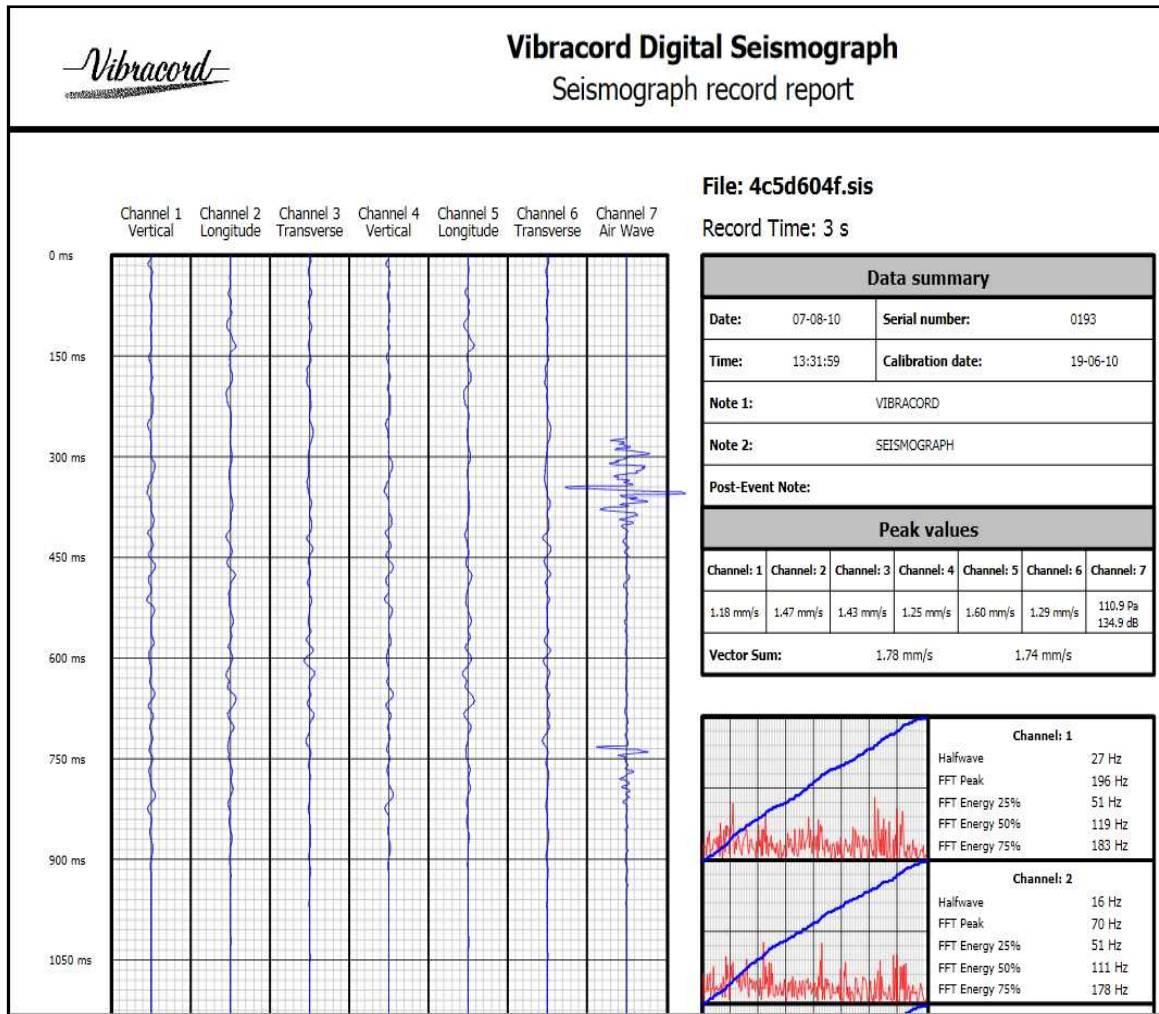
**Sismógrafo P1:** Se colocaron dos geófonos triaxiales con un sismógrafo de ocho canales, generando los siguientes datos:

#### **VPP**

Geófono 1: 1.78 mm/s.

Geófono 2: 1.74 mm/s.

**CUADRO 44: HOJA DE RESULTADOS MEDIANTE SISMOGRAFO  
VIBRACORD**

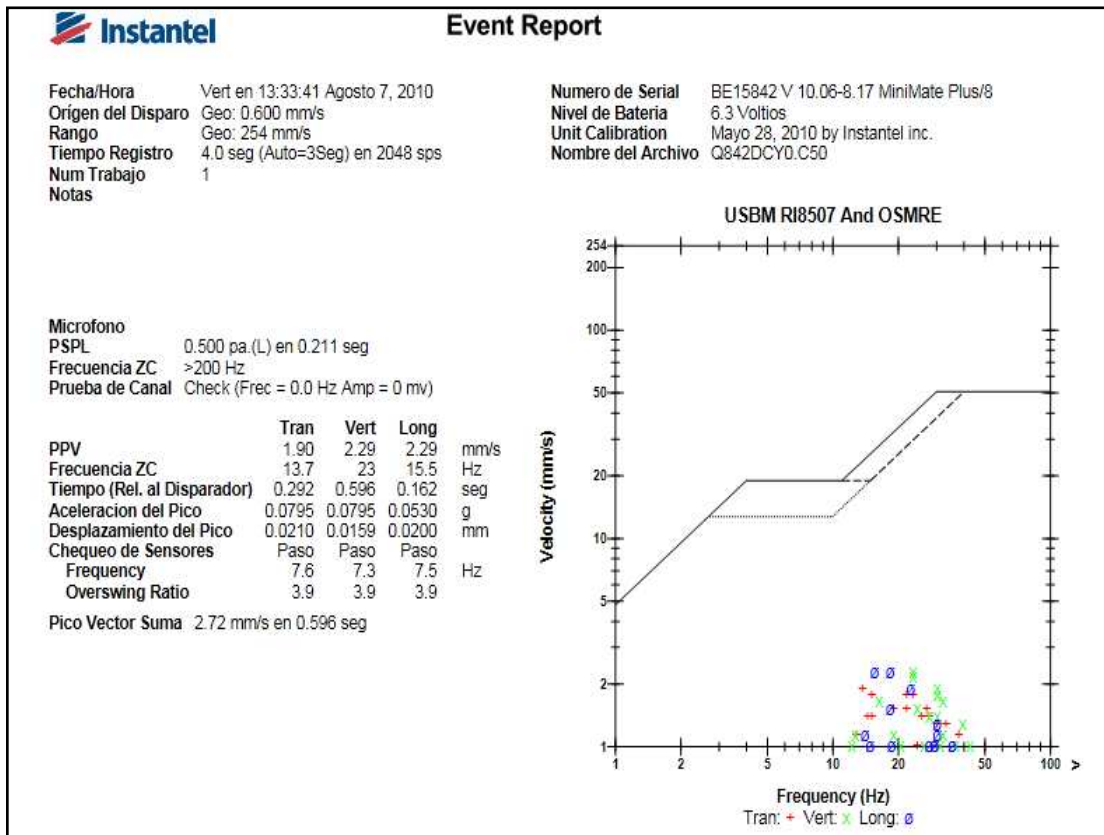


**Sismógrafo P2:** Se colocó un geófono triaxial, con un sismógrafo de 8 canales:

**VPP:** 2.72mm/s.

**Frecuencia:** 13.7 Hz (trans), 23 Hz (Vert.), 15.5 Hz (Long).

## CUADRO 45: HOJA DE RESULTADOS MEDIANTE SISMOGRAFO INSTANTEL



### Análisis de fragmentación.

Para el análisis de fragmentación se tomaron fotos de la pila de material, luego de la voladura, las cuales fueron analizadas mediante el software Split Desktop.

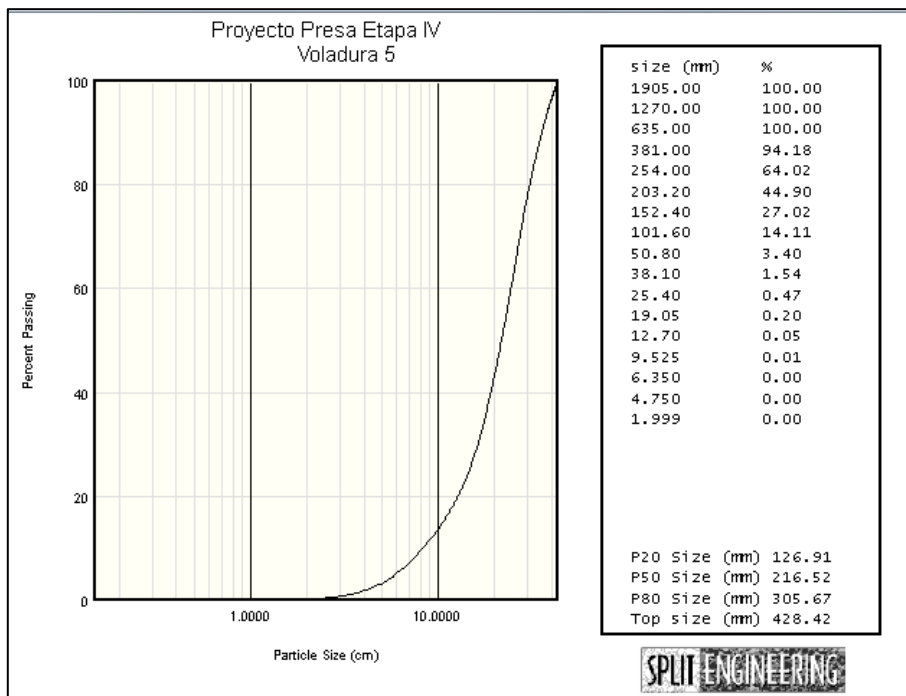
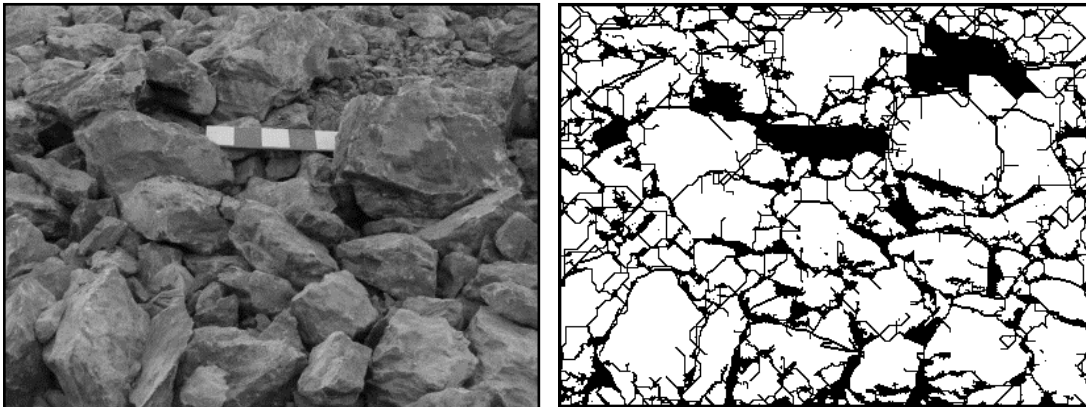
Los resultados fueron los siguientes:

**% Pasante P80 : 305.67 mm. (12.03 Pulg.)**

**Tamaño Máximo : 428.42 mm. (16.86 Pulg.)**



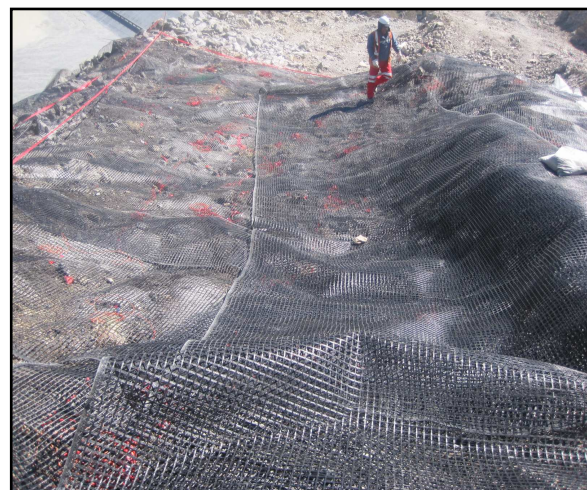
**CUADRO 46: ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN MEDIANTE SOFTWARE SPLIT DESKTOP**



### **Tapado y colocación de malla Geogrid.**

Como medida de seguridad para evitar la proyección de rocas hacia la presa, en especial hacia la geomembrana se optó como procedimiento colocar mallas sobre cada proyecto, teniendo cuidado de no dañar los cables superficiales de los detonadores electrónicos.

**CUADRO 47: COLOCACIÓN DE MALLA GEOGRID**

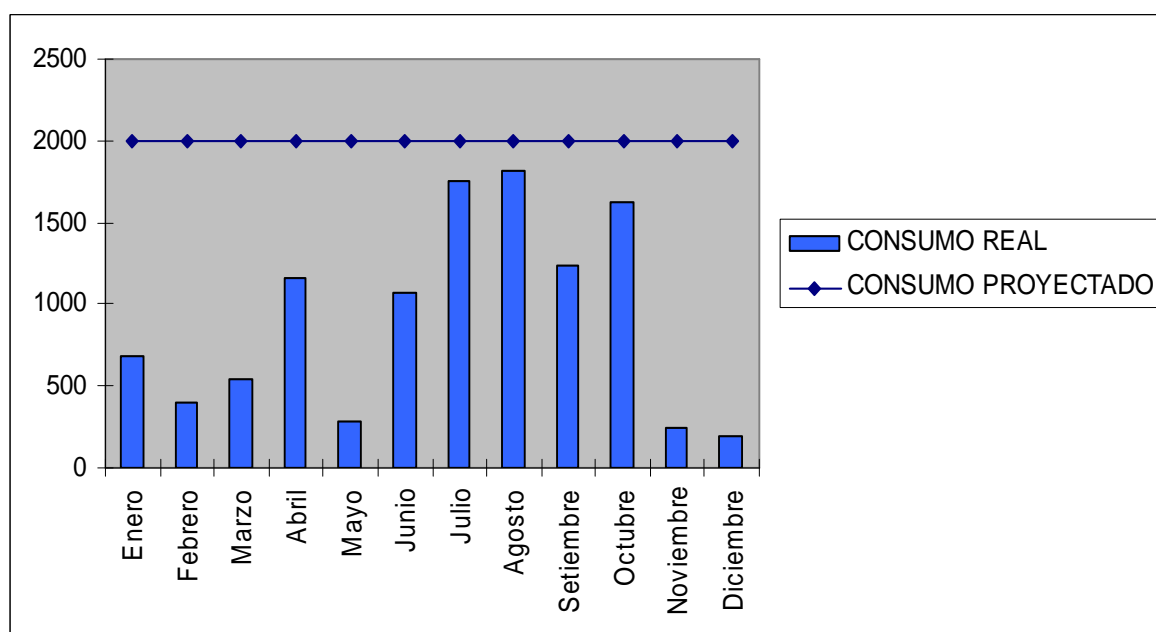


## **CAPÍTULO IX: EVOLUCIÓN DE CONSUMO DEL DETONADOR ELECTRÓNICO HOTSHOT**

En este capítulo se mostrarán algunos cuadros representativos de la evolución del consumo del detonador electrónico Hotshot. Si bien es cierto el sistema lo empleamos actualmente en Volcan y en Antamina, es en esta última operación donde la evolución en el consumo ha sido más drástica.

### **Consumo 2009**

En este año se consideró como KPI de consumo 2000 detonadores por mes.



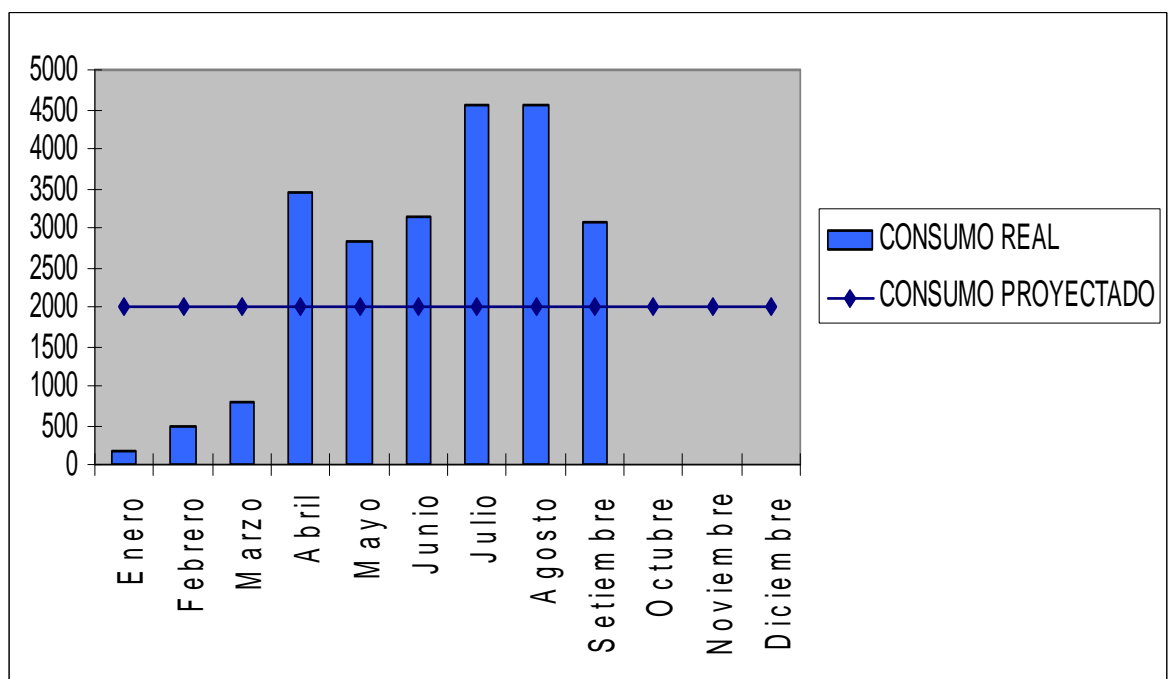
Como se observa en el cuadro en ninguno de los meses se logró llegar a lo proyectado.

Analizando este año se llegaron a dos razones fundamentales del bajo consumo:

- Desconfianza al utilizar un sistema totalmente nuevo.
- Presencia de errores que produjeron demoras en algunas voladuras sobre todo en los meses de lluvia (Setiembre – Abril).

### **Consumo 2010.**

Realmente el año 2009 fue un año bastante difícil, ya que fue el año en el que el sistema se puso a prueba en toda su magnitud y en el que obviamente aparecieron oportunidades de mejora que no debían pasar desapercibidas. Por tanto cada inconveniente fue documentado y analizado. Es así que en los primeros meses del 2010 se contó con la presencia en Perú de ingenieros sudafricanos especialistas del sistema, los cuales con el soporte de los documentos generados realizaron mejoras sustanciales al sistema y a los procedimientos.



Como se observa en el cuadro en lo que va del año el consumo ha superado grandemente lo proyectado llegando a incrementarse en un 150 por ciento, demostrando que cuando los problemas se ven desde la perspectiva de oportunidades de mejora se logran soluciones.

## **CONCLUSIONES**

La mayor ventaja de los detonadores electrónicos Hotshot, es su calidad de exactitud, precisión y flexibilidad de programación, a partir de esta base se deben construir las directrices para mejorar el proceso de extracción global de la minería, es decir, enmarcado en el concepto de voladura óptima, cuyo norte principal es conseguir excelentes resultados en esta operación, sin que ello signifique afectar el resto de las operaciones (carguío, transporte y chancado primario); constituyéndose en el objetivo principal al introducir la tecnología de los detonadores electrónicos Hotshot.

En relación con el diseño de la voladura, y principalmente con la secuencia de iniciación., hoy en día existe una variedad de sistemas que pueden dar inicio a la voladura, quizás con más de alguno de éstos se pueda obtener la mejor voladura, pero de ninguna manera la óptima voladura.

La calidad del disparo tiene influencia significativa sobre las etapas posteriores de manejo de material dentro del sistema de extracción de una mina. Es por esta

razón que una parte esencial de cualquier disparo es la evaluación crítica de la fragmentación y de las condiciones de excavación. A pesar de que la inspección consume tiempo y recursos, el costo de esta evaluación usualmente se justifica para poder desarrollar un sistema eficiente de disparo.

Como se ve, no son menores las consideraciones y precauciones que se deben adoptar respecto al sistema de iniciación que se utilice, aprovechar el potencial de precisión, exactitud y flexibilidad de programación de los detonadores electrónicos Hotshot de Detnet, lo hacen único comparado con sus pares y sistemas que utilizan retardos pirotécnicos. Podemos destacar las siguientes ventajas:

- Se reducen los problemas de fragmentación que se producen especialmente en zonas periféricas a las voladuras, tanto para minería de superficie como obras civiles.
- La granulometría de las pilas de material volado es más homogénea y con la geometría necesaria para mejorar el rendimiento del equipo de carguío.
- A raíz de la mejor excavabilidad de la pila de material volado, los tiempos de espera de los equipos de transporte son menores, aumentando de cierta manera el rendimiento de este proceso. A su vez, al alimentar al chancador primario con material más homogéneo, se reducen también los tiempos de espera en estos puntos, al no interrumpir la operación por bolones que puedan quedar atascados en estos equipos.



- La mayor exactitud de los detonadores electrónicos Hotshot, se traduce en menores dispersiones al momento de detonar las cargas explosivas y de esta manera producir los efectos programados, evitando acoplamientos los cuales aumentan las vibraciones con todas las implicancias que esto significa.
- Versatilidad en la programación de los tiempos de la secuencia de iniciación, más aún es posible cambiar la secuencia poco tiempo antes del disparo.
- Mejor manejo de polvorines, al tener un solo producto que reemplaza a una variedad de accesorios.
- Flexibilidad y seguridad a la hora de disparar ya que se cuenta con una gama de posibilidades de ubicación gracias a su modo “disparo remoto”.

Por otra parte, la principal desventaja que rodea el empleo de los detonadores electrónicos en general, es el económico, pues hasta que no se llegue a una fabricación masiva los costos unitarios serán altos. Pero si se logra demostrar todos sus potenciales apuntando a los mejoramientos que se puedan realizar sobre los procesos que si realmente aumentan los costos de extracción del los recursos mineros, su utilización se incrementará con la consiguiente estabilización y mejora de sus costos.

La implementación del detonador electrónico Hotshot y el sistema Smartshot en Perú está caminando a paso lento pero seguro, es así que en Antamina estamos a un 50% de utilización de este sistema siendo la intención de esta operación llegar al 100%.

## **RECOMENDACIONES**

Es recomendable antes de comenzar a utilizar los detonadores electrónicos Hotshot, tener una idea exacta del problema que se está tratando de resolver. No tener un entendimiento claro de las necesidades o metas asociadas con el uso de esta tecnología puede solamente provocar frustración y gastos excesivos.

Se debe tener claro para donde enfocar el mejoramiento, por ejemplo. Si el mejoramiento de la fragmentación es la meta que se quiere alcanzar; es sumamente importante definir primero el tamaño de alimentación óptima para el chancado de la operación en particular, si la reducción del backbreak o incrementar la estabilidad del talud es la meta; se debe conocer primero cual es el tiempo de retardo que es realmente necesario para realizar esta tarea evitando que se produzcan acoplamientos, si la eficiencia de los equipos de carguío y transporte es crítica y se quiere mejorar; se debe conocer primero el perfil geométrico exacto de la pila de material volado para obtener la máxima eficiencia en los equipos, especialmente de carguío.

Una vez que se tienen las metas claras y bien definidas, recién es tiempo de comenzar a evaluar su ejecución y no antes. Para justificar la inversión de cualquier tecnología se debe encontrar la mejor herramienta para medirla, apuntando a los factores claves que ayudarán a valorar lo que significó la implementación de la nueva tecnología, en este caso de los detonadores electrónicos Hotshot.

Por lo tanto una vez encontrada la mejor forma de evaluar los resultados que se persiguen, es igualmente importante diseñar el mejor plan de prueba para asegurar que se abarcaron todos los puntos del problema evaluado para de esta manera, obtener las conclusiones correctas sin verse en la necesidad de repetir la evaluación.

Por ejemplo, para controlar las vibraciones producto de las voladuras, el monitoreo de éstas es una técnica de evaluación que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de voladura, constituyéndose en una muy buena herramienta de diagnóstico, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones permitirá determinar el grado de interacción entre variables de la voladura, pudiéndose evaluar por ejemplo: cargas detonando en una secuencia de iniciación incorrecta; dispersión en los tiempos de retardo; detonación deficiente de cargas; detonaciones instantáneas; detonación de cargas adyacentes por simpatía; además de la cuantificación de los niveles de velocidad, frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas de roca, etc., en definitiva el rendimiento general del diseño.

Pero el problema esta en que no solamente se debería tener correctamente calibrado los sismógrafos o ubicados los geófonos como la única y primera herramienta de medición, también se deberían medir todas las otras variables que puedan afectar la vibración. Estas variables incluyen todos los aspectos de la geometría de la voladura; incluyendo perfiles, ubicación de los taladros (burden y espaciamiento), desviaciones de los barrenos, profundidad de los barrenos, etc. Un diseño inapropiado y mal trazado de la voladura puede ser una contribución significativa a una vibración no deseada. Se debe tener en claro, que los detonadores electrónicos nunca pueden compensar los diseños de voladura deficientes y mal planificados.

Por lo tanto, la única forma de desprestigiar las características y ventajas potenciales que poseen los detonadores electrónicos, es realizando un mal diseño de la voladura y una mala evaluación de su desempeño, el cual no depende en nada del producto, sino de las personas que la realizan.

Finalmente se recomienda realizar las pruebas necesarias, llevando un seguimiento completo del material que es volado, en cada uno de los procesos realizados con éste dentro de una mina, para de esta manera avalar y justificar de forma concreta toda la información expuesta en este trabajo, el cual puede servir como una muy buena carta de presentación para comenzar a realizar las pruebas necesarias y potenciar el uso de los detonadores electrónicos Hotshot, convirtiendo a EXSA una vez más en proveedor de soluciones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Aguilera, Paulo; Campos, Joao: “Predicción de la Fragmentación: El tiempo es Oro?”, ASIEX 2007
- Detnet: “Manual del Usuario Smartshot”
- DynoNobel: “Curso de Voladura de DynoConsult para Detnet”.
- Lopez Jimeno, Carlos: “Manual de perforación y voladura de rocas”, 1994.
- McKenzie, Cameron: “Voladura para Ingenieros”
- Split Engineering, LLC: “Manual de instrucciones”, 2001.
- Watson, John: “Safe introduction of electronic detonators”, Ensign – Bickford Company, 2002.
- Información recopilada en campo.

**APENDICES**

## **APÉNDICE A. MANUAL DE INSTRUCCIÓN EN TOMA DE IMÁGENES “SPLIT ENGINEERING”**

Para efectuar una excelente evaluación de la fragmentación resultante de la voladura y eliminar distorsiones de lado a lado, todas las imágenes deben de ser tomadas **perpendicularmente** a la pendiente del terreno. Para eliminar errores verticales de escalamiento, las pelotas de escalamiento (elementos guías para determinar la escala que fue tomada la imagen), deben de estar en distintos puntos **a lo largo de la pendiente** (eje vertical de la imagen) del material. Para pilas de material en bruto, es decir sin que haya sido perturbado por el equipo de excavación, se deben tomar las imágenes con **3 diferentes acercamientos**:

1. La escala amplia (imágenes de una área aproximada de 6 x 6 metros), incluyendo rocas grandes y áreas de finos, esta escala deberá dar resolución a material mayor a 8 pulgadas (Figura A.1).

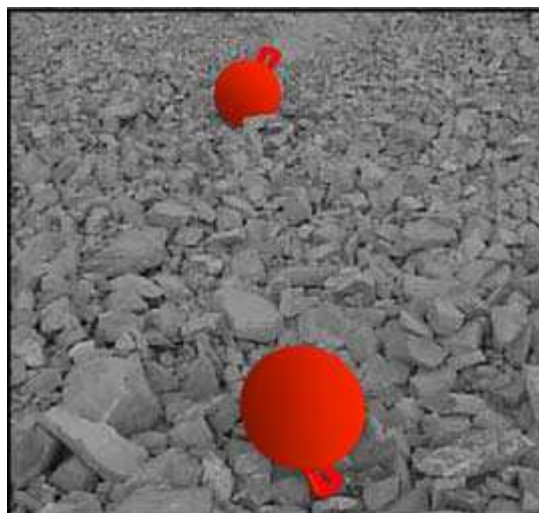


**Figura A.1. Escala amplia**



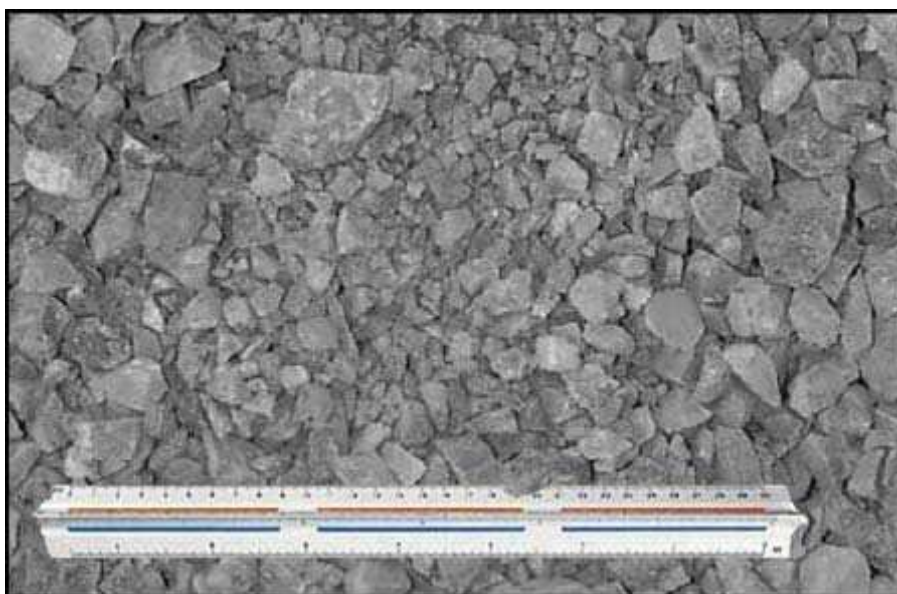
2. La escala media (3 x 3 metros) incluirá material de 2 a 10 pulgadas (Figura A.2).

**Figura A.2. Escala media**



3. La escala pequeña (0.45 x 0.45 metros), será un acercamiento a muestras representativas de material fino, típicamente menor a 2 pulgadas (Figura A.3).

**Figura A.3. Escala pequeña**



Tomar aproximadamente el mismo número de imágenes en cada escala. En caso de no estar interesado en la curva de tamaños del material fino y pudiendo aceptar la distribución Schuhmann o Rosin-Rammler dentro de este rango, entonces omitir las imágenes de escala pequeña.

**Rango de tamaños:** Asegurarse que las imágenes contengan todos los tamaños de partículas presentes. Incluir los finos que son visibles y no solamente las grandes rocas, de otra forma los resultados de los análisis tendrá una tendencia errónea hacia los tamaños más grandes.

**Iluminación de la Imagen:** Sombras muy grandes y luz directa que no interfieran con la apariencia general de la imagen son aceptables (en tanto que las sombras cubran totalmente las orillas de las partículas). Obviamente, días soleados proveen la mejor iluminación. Asegurarse que todas las imágenes estén bien enfocadas.

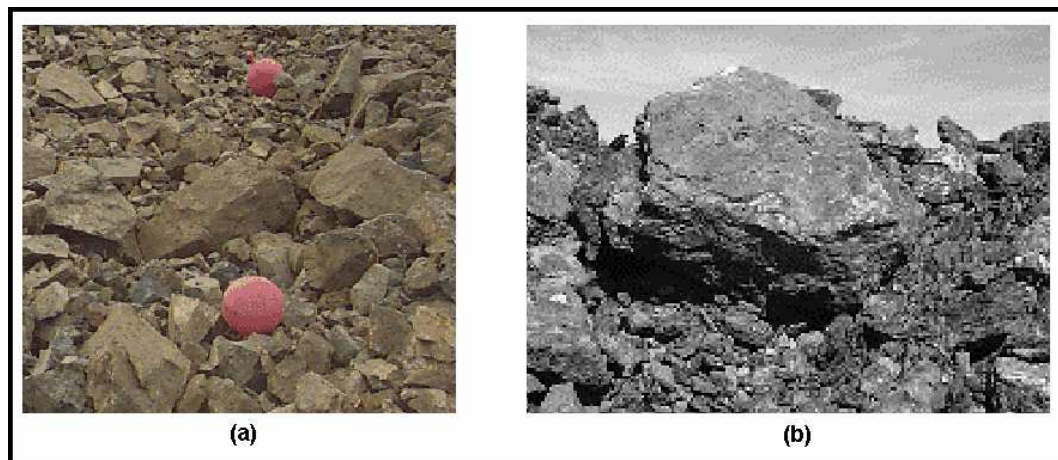
**Debe de existir un acercamiento suficiente en las imágenes de modo que los fragmentos de roca sean distinguibles:** La siguiente imagen fue tomada de una distancia muy lejana y no se distinguen las partículas correctamente. Además, se desperdicio demasiado espacio en la imagen como lo es el cielo o tierra firme (Figura A.4).

**Las imágenes deben de contener una gran cantidad de partículas:** La Figura A.5(a) muestra una **buena imagen**, los objetos de escalamiento muestran el tamaño de las rocas y la pendiente de la pila de material, muy pocas sombras y un buen rango de tamaños de rocas. La Figura A.5 (b) muestra una **mala imagen**, solamente se muestra una enorme roca de la pila, que solo distorsiona los resultados.

**Figura A.4. Imagen poco clara no se distinguen los fragmentos de roca**



**Figura A.5. Diferencia entre una imagen clara y otro poco clara con una roca de sobretamaño la cual distorsiona los resultados**



**Acercamiento:** Se debe acercar la imagen al material fino de este modo poder determinar la curva de tamaños de este material (Figura A.6).

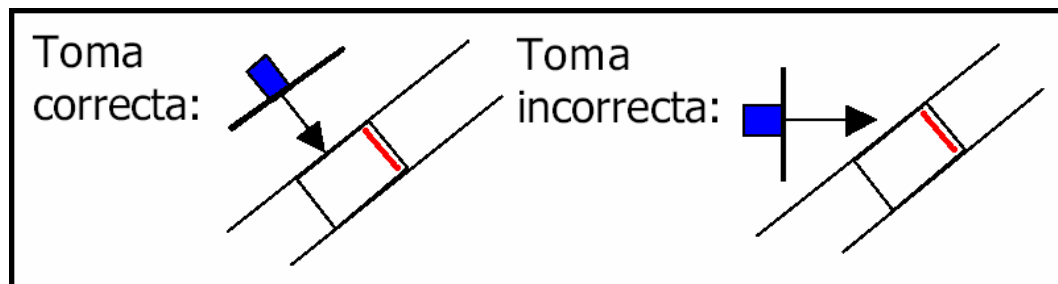
**Figura A.6. Acercamiento al material fino**



**Escalamiento:** Un objeto u objetos de escalamiento de dimensiones conocidas deberán estar presentes en todas las imágenes de modo de establecer la escala y la pendiente al momento del análisis. El cambio aparente del tamaño del objeto en la parte superior de la imagen con respecto al objeto de la parte inferior de la imagen se utiliza para determinar la pendiente (Figura A.5(a)).

- **Método de un objeto de escalamiento conocido:** Para imágenes con un gran acercamiento será necesario que se coloque una regla o escala como objeto conocido de escalamiento. En caso que solo haya un objeto de escalamiento conocido, y que la distancia y la pendiente no hayan sido tomadas, es necesario tomar la imagen perpendicular al plano del material que es medido. Al hacer esto, diferencias en escala y distorsiones por pendientes son grandemente reducidas. Por esto, la imagen debe ser tomada tan perpendicularmente como se pueda del objeto de escalamiento, especialmente si este objeto no es esférico (Figura A.7).

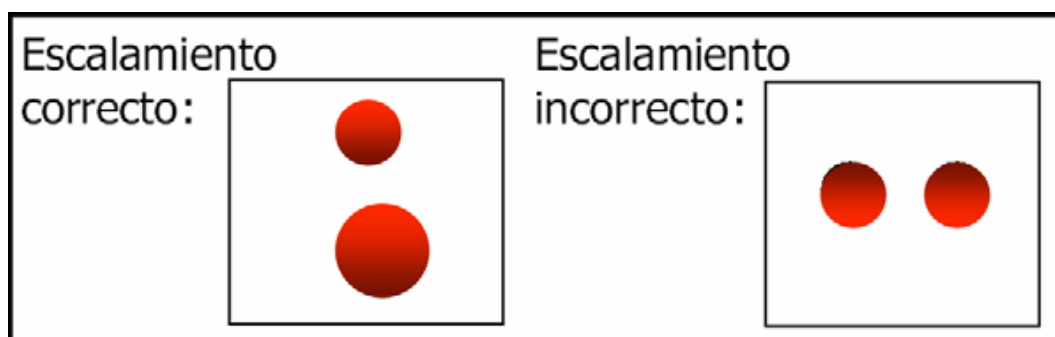
**Figura B.7. Forma de adquirir la imagen**



Este método también puede ser usado, cuando no se toma la imagen perpendicular al material, pero la distancia a la parte más baja de la imagen y el ángulo de la pendiente del material deben de ser conocidos. Es importante que el objeto de escalamiento sea colocado en la parte más baja de la imagen. Eso si, es un poco más difícil de implementar en terreno cuando se trata de imágenes con pendientes, por lo que se recomienda el método de dos objetos conocidos.

- **Método de dos objetos de escalamiento conocidos:** Para imágenes con acercamientos amplios y medios, y con pendientes pronunciadas, utilizar el método de dos objetos de escalamiento. Utilizando preferentemente esferas de diámetro conocido. Los objetos deberán estar separados en la imagen en un plano **vertical** lo más alineado que se pueda, para poder corregir el efecto de la pendiente. Los mejores objetos de escalamiento son bolas grandes de hule con agarraderas de modo de amarrar una cuerda entre ambas para que puedan ser retiradas y cambiadas de posición con facilidad (Figura A.8).

**Figura A.8. Forma correcta e incorrecta del escalamiento**



**Número de imágenes a ser adquiridas:** El número de imágenes requeridas para realizar el cálculo de tamaños de una muestra de material no es fijo y cambia dependiendo de la situación. El número de imágenes a ser adquirida depende de:

1. **El tamaño físico del material en cuestión:** Si se considera que el material que se encuentra en la superficie es representativo de todo el material,

entonces se deberán tomar imágenes que cubran toda la superficie. Una consideración clave en determinar el área a ser tomada es la homogeneidad del material en la superficie. Si todo el material se observa similar en tamaños en cada imagen, entonces un mayor número de imágenes no resultará en una mejor información de tamaños. Si la superficie expone material de diferentes tamaños, entonces se deberán tomar imágenes que cubran una mayor área. Es recomendable tomar las imágenes después de que el equipo de excavación ha avanzado hasta la mitad de la pila, ya que rara vez el material de la superficie es representativo de toda la pila.

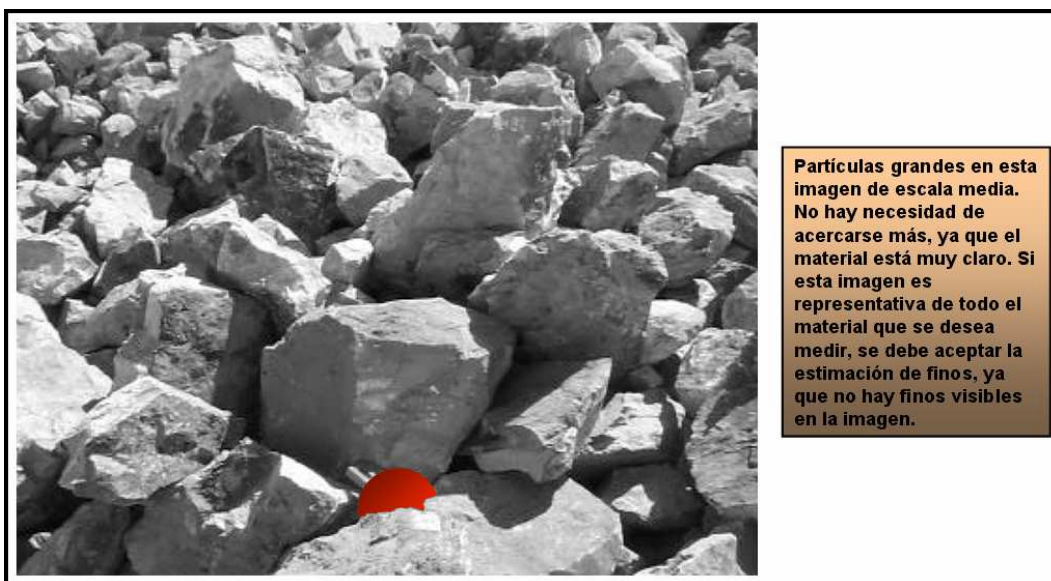
- 2. La fracción de tamaños de roca en los que se está interesado:** Imágenes de la superficie deberán ser adquiridas con los tres acercamientos (escala amplia, media y cercana). Esto permitirá al software analizar partículas de diferentes tamaños, las cuales se combinarán entre sí para generar una curva completa de tamaños.



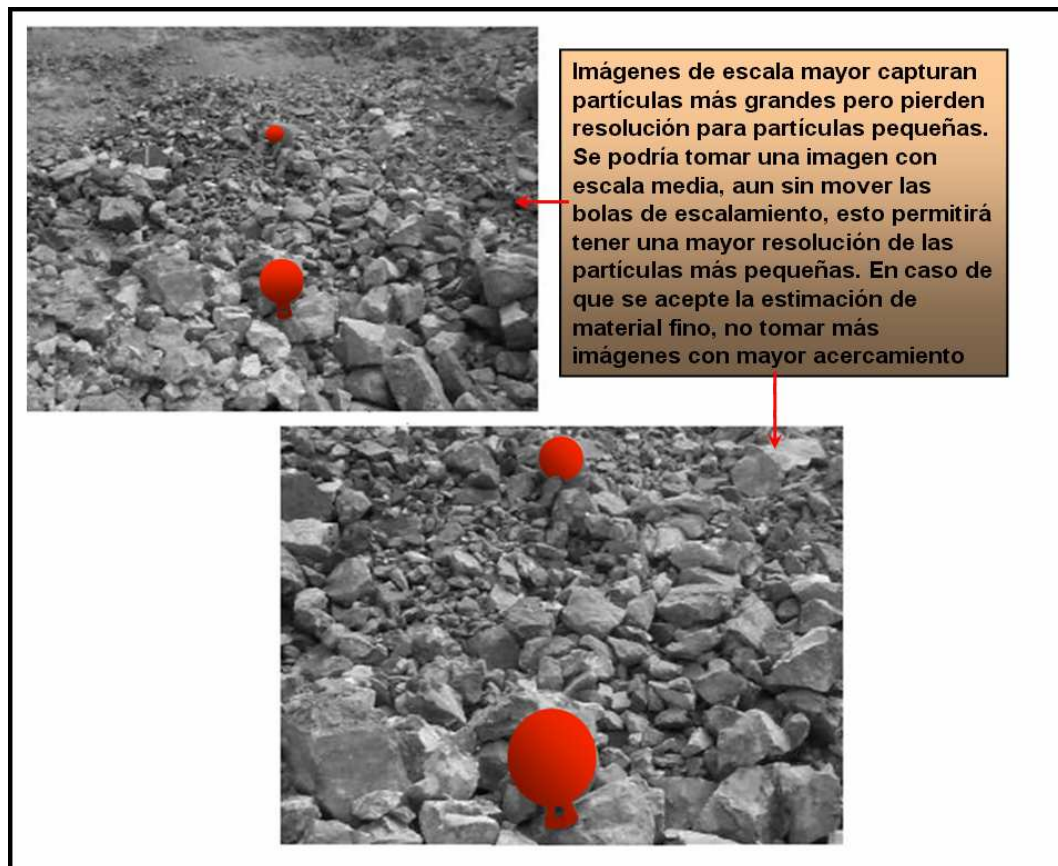
Por ejemplo, si solamente interesa el material mayor, se deben tomar imágenes con escala amplia para capturar todas (12 pulgadas o mayores). El software de Split no podrá detectar imágenes medias (mas o menos 5 - 8 pulgadas) o pequeñas con este acercamiento amplio y por lo tanto realizará una estimación para estos tamaños.

Para cada imagen con diferente acercamiento, existe un punto de corte mas allá del cual el software de Split no podrá detectar (delinear) partículas pequeñas. Más abajo de este punto se realiza la estimación de finos. Dependiendo de la escala de la imagen, la estimación de finos podría ser de partículas de un tamaño considerable y no solamente de los finos reales en la muestra. La estimación de finos se basa en la distribución Schumann o Rosin-Rammler y es una función de la pendiente de la curva antes del punto de corte (Figuras A.9 y A.10).

**Figura A.9. Solo una imagen al ser el material representativo de toda la pila**

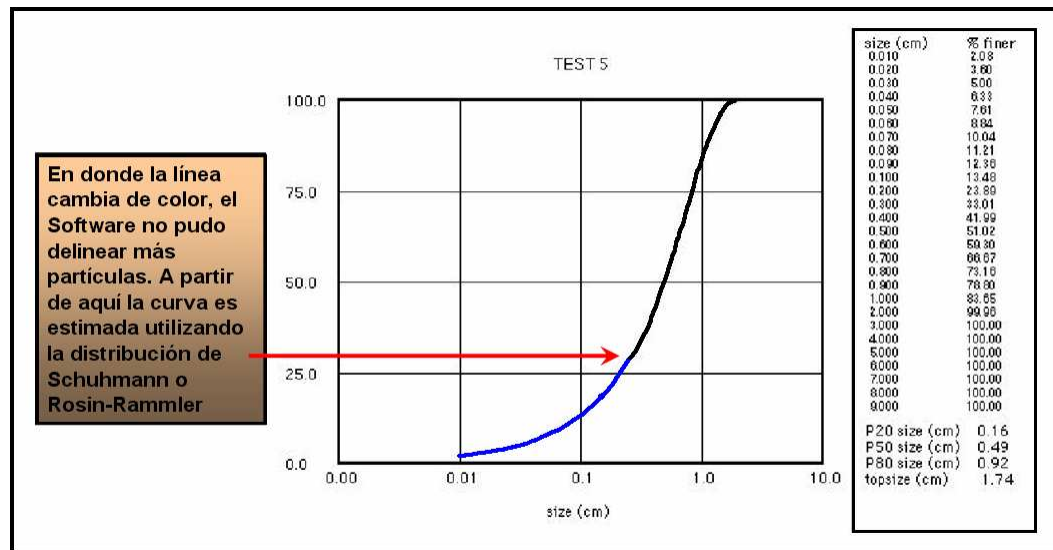


**Figura A.10. Varias imágenes al ser el material heterogéneo en la pila**



Básicamente, si no son aceptables estimaciones para los tamaños más pequeños, se deberá tomar imágenes con acercamientos medios y mayores. El software de Split unirá toda la muestra y el punto de corte para estimación de finos será mucho menor (Figura A.11).

**Figura A.11. Estimación gráfica del material analizado**



**Formato de Control de Imágenes:** Para conservar un registro, el formato de la Tabla A.1 debe ser llenado para cada una de las pruebas. Información como número de muestra, fotógrafo, fecha de la muestra, lugar de la muestra, tipo de geología, condiciones de la voladura, hora en que se tomó la imagen, resolución de la imagen, método de escalamiento, nombre de archivo y otros comentarios, son necesarios para un procesamiento adecuado de las imágenes. Este formato deberá acompañar las imágenes, si es mejor la información que se tenga, corresponderá a una mayor calidad en los resultados.

Tabla A.1. Registro de terreno recomendado

Muestra #	
Fotógrafo	
Fecha de la muestra	
Locación de la muestra	
Geología de la muestra	
Condiciones de Voladura	

### Información específica de las imágenes

#### Claves:

Localización de la imagen: **M**: Material sin remover; **C**: camión de acarreo; **P**: pila de material

**Método de escalamiento**: **B**: bolas de escalamiento; **E**: escala física; **B/E**: bolas y escala;

**C**: camión de acarreo; **Especificar las dimensiones de las bolas y escalas.**

Imagen #	Hora	Resolución de la Imagen	Localización (M,C,P)	Método de escala (B, E, B/E, C)	Comentarios	Nombre del archivo
NOTAS:						

## APÉNDICE B. CRITERIOS DE DAÑO

### 1. Oriard (1972 – 1982) (Tomado de Hustrulid, 1998)

Utilizado el modelo vibracional de Devine and Duvall (1963).

$$PPV = K \left[ \frac{d}{W^{1/2}} \right]^{\alpha} \quad \boxed{\text{B1}}$$

PPV: Velocidad de Partícula mm/s

K: factor de velocidad de partícula, el cual depende de la roca

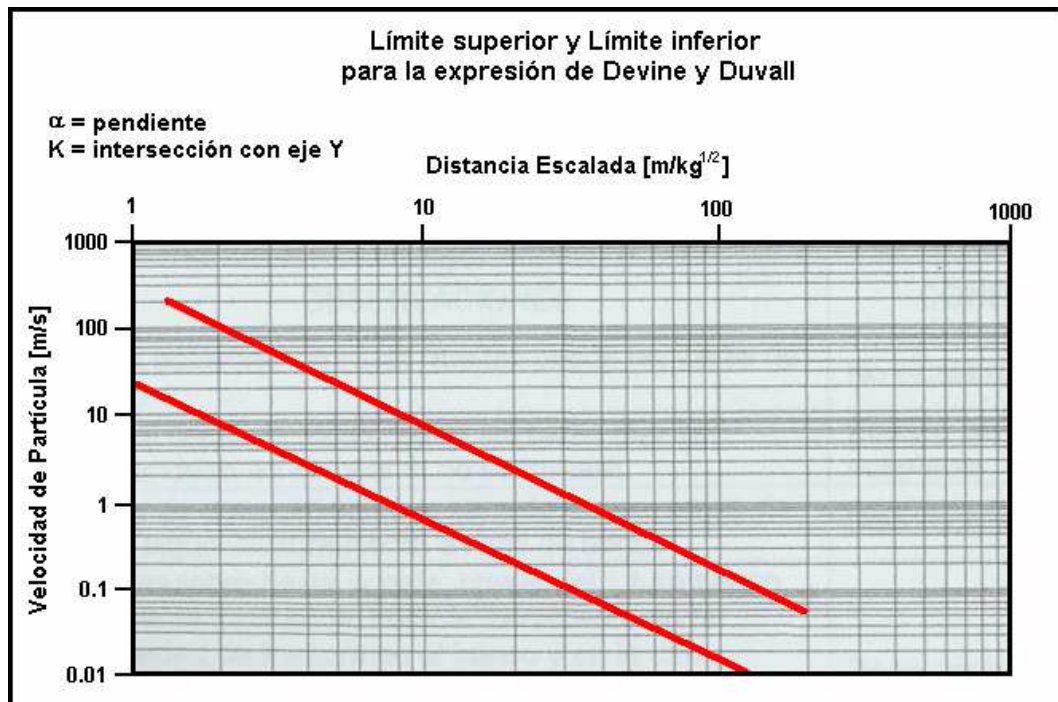
d : distancia escalada, da cuenta de la influencia de la distancia en mt. Y la cantidad de explosivo en Kg.

W: carga detonada en forma instantánea en Kg.

$\alpha$  : factor de decaimiento, el cual representa la pendiente entre la PPV y d, es decir, es el decaimiento de la velocidad de partícula con relación a la disminución de la distancia escalada.

Oriard presentó las curvas de límites inferior y superior de velocidades de partículas existentes, ilustradas en la Figura B.1.

**Figura B.1. Relación de decaimiento de la velocidad de partícula con respecto a la distancia escalada (Oriard; 1972-1982)**



Oriard, luego de un importante estudio y análisis a una gran cantidad de minas tipo pórfido cuprífero definió el exponente  $\alpha$  como -1.6. Este valor representa el factor de decaimiento (pendiente) de la velocidad de partícula con relación a la disminución de la distancia escalada.

Además, según Oriard, el umbral de daños en taludes de roca se sitúa en los 600 mm/s de velocidad de partícula. Las siguientes ecuaciones demuestran los límites inferior y superior correspondientes.

$$\text{Inferior : } PPV = 25 \left[ \frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-1.6} \quad \boxed{\text{B2}}$$

$$\text{Superior : } PPV = 225 \left[ \frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-1.6} \quad \boxed{\text{B3}}$$

## 2. Bauer and Calder (1971) (Tomado de López Jimeno; 1994)

Presentaron los criterios de daño según la velocidad de partícula. En la Tabla B.1 se resume este criterio de daño.

**Tabla B.1. Criterio de daño según la velocidad de la partícula**

Velocidad de Partícula (mm/s)	Observaciones
< 250	No existe daño
250 – 600	Puede aparecer descostramiento por rotura de tracción
600 – 2500	Grandes roturas por tracción y algunas grietas radiales
> 2500	Agrietamiento total del macizo rocoso

## 3. Savely (1986) (Tomado de Hustrulid; 1998)

Escribió un procedimiento para diseñar voladuras cerca de las paredes finales del Pit. Para generar el criterio de daño por tronadura, Savely se basó en el modelo de vibraciones de Devine and Duvall, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla B.2.

**Tabla B.2. Criterio de daño por voladura**

Velocidad de Partícula (mm/s)	Observaciones	Conclusiones
< 125	Caída ocasional de rocas sueltas desde las caras del banco	No existe daño
125 – 400	Parcial caída de rocas desde las caras que se mantendrían en el lugar si no se tronara	Posible daño, pero aceptable
400 – 635	Caída de una porción de la cara del banco, caída de roca, algún fracturamiento a nivel de banco	Daño por tronadura menor
> 635	Sobrequebre hasta la pata, cresta del futuro banco altamente fracturada, notable incremento en la intensidad de fractura en el banco y en la cara, bloques de roca suelta en al cara, creación de cráteres cerca de la pata del banco, levantamiento del suelo.	Daño por tronadura intenso

#### 4. C. K. Mckenzie (1998) (tomado de Scherpenisse; 1998)

Generó un criterio de daño a partir de la ecuación que define la velocidad de partícula crítica ( $PPV_c$ ).

$$PPV_c = \frac{\sigma_t \times Vp}{E}$$

El cálculo de  $PPV_c$  define el nivel sobre el cual se generará un daño produciendo nuevas fracturas a la roca. Se estima que un nivel equivalente a la cuarta parte, es decir, 25% del valor de  $PPV_c$  es suficiente para iniciar la extensión de fracturas preexistentes. Finalmente, una estimación del nivel de velocidad de partícula sobre el cual se produce el daño más intenso (trituración), puede ser estimada como el valor aproximado a 4 veces el nivel para el daño incipiente ( $4 \times PPV_c$ ).

Luego, el criterio para observar el daño producido por la voladura se resume en la Tabla B.3.

**Tabla B.3. Criterio para observar el daño producido por la voladura**

Valor del PPV	Observaciones
$< 0.25 PPV_c$	No se generan daños
$0.25 PPV_c - PPV_c$	Daño en cuanto a extensión o abertura de fracturas preexistentes
$PPV_c - 4 PPV_c$	Daño que produce nuevas fracturas
$> 4 PPV_c$	Daño más intenso, trituración

#### 5. William Hustrulid (1999)

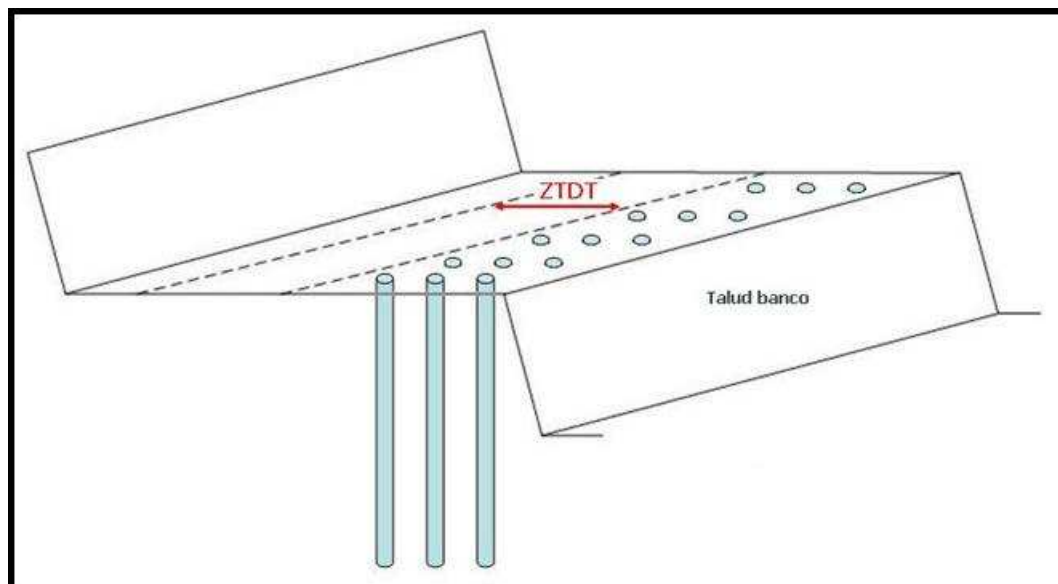
Una de las características de la detonación de pozos de voladura es la transmisión de la onda de choque desde el muro del pozo hasta una distancia determinada. Cuando se generan pozos de producción lo ideal es que la zona de influencia de la



voladura detrás de la malla en dirección de la pared final, sea lo más pequeña posible para que a su vez, el ángulo de talud sea mayor. Pero existe una zona de transición de daño por tronadura (ZTDT) que se ubica entre las zonas de máxima destrucción y cero o mínimo disturbio (Figura B.2).

Es necesario controlar el comportamiento de esta ZTDT, por lo que se dividió en tres zonas, cuyas extensiones dependen del diámetro del pozo ver Tabla B.5.

**Figura B.2. Vista en 3 dimensiones mostrando la zona de transición de daño por voladura (Adaptado de Hustrulid, 1999)**



**Tabla B.5. Zonas de daño por voladura  
en función del diámetro del barreno**

Zona de Daño	Extensión
Triturada (Rc)	4 – 6 D
Fracturada (Rf)	12 – 15 D
Influenciada (Ri)	50 – 60 D

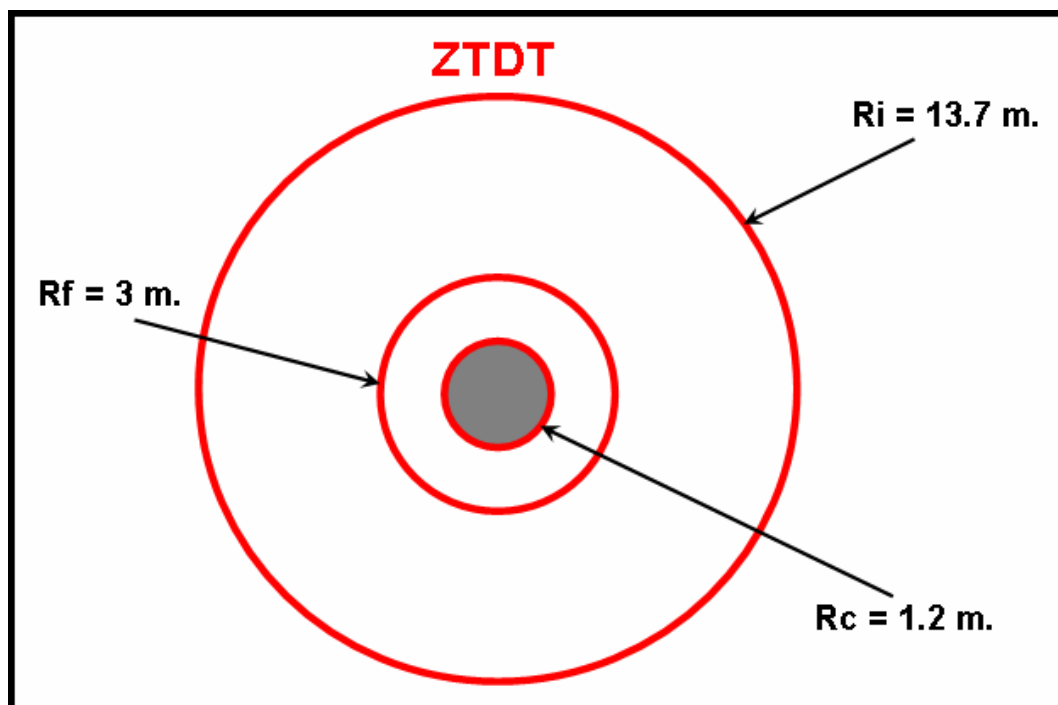
A modo de ejemplo, si se tiene un diámetro  $D = 9 \frac{7}{8}$ " y burden – espaciamento de 6 x 6 metros (Figura A.3), se tiene:

$$R_c = 5 D = 1.2 \text{ metros}$$

$$R_f = 12 D = 3 \text{ metros}$$

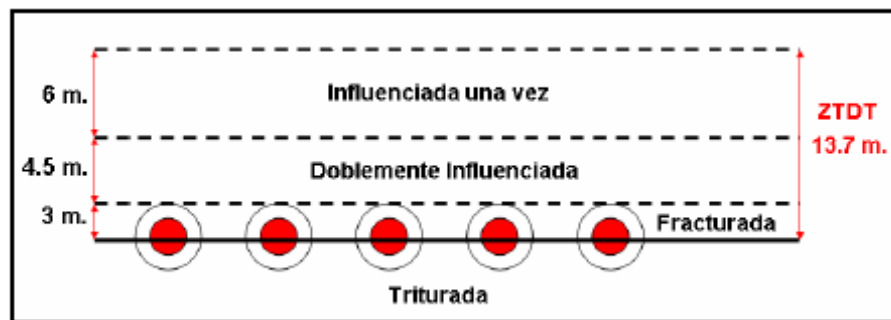
$$R_i = 55 D = 13.7 \text{ metros}$$

**Figura B.3. Diagrama de representación de la ZTDT  
para un barreno cargado (Hustrulid, 1999)**



Si existen dos filas de producción separadas por 6 metros y con taladros cargados, la voladura generará una zona doblemente influenciada, debido al Ri de ambas filas, y otra zona influenciada solamente por la última fila (Figura B.4).

**Figura B.4. ZTDT después de volar dos filas de producción (Hustrulid, 1999)**



## 6. Langerfors, Westerberg and Kihlstrom (1958)

La Tabla B.6 resume el criterio de daño de Langerfors, Westerberg and Kihlstrom.

**Tabla B.6. Criterio de daño**

Tipo de daño	mm/s
No hay daño	< 71
Finas grietas	109
Agrietamiento	160
Serio agrietamiento	231

En general, los valores de velocidad de partícula crítica ( $PPV_c$ ) pueden diferir de los mencionados habitualmente de la literatura técnica al respecto. Estas diferencias reflejan la gran importancia que tienen que establecer los límites de daño para cada tipo de macizo rocoso en particular, los que están directamente relacionados con sus propiedades geomecánicas y, por tanto, deben ser estimados

en forma independiente no sólo en cada mina, sino en cada dominio geomecánico de la misma. Los criterios de daño que tienen predefinidos valores de velocidad de partícula con sus respectivos niveles de daño (Oriard; 1972-1982, Bauer and Calder; 1971, Savely; 1986 y Langerfors et al; 1958) escapan de la realidad de los sectores a clasificar. Por otra parte, el criterio de Hustrulid; 1999 es interesante de aplicar, sin embargo, no considera la carga explosiva, la cual es un parámetro clave en el diseño de voladura, basándose sólo en el diámetro de perforación. Superando los inconvenientes anteriores, el criterio de daño de Mckenzie; 1998 puede ser aplicado a cualquier dominio geomecánico en particular además de ser uno de los más utilizados en la utilidad.