

Túneles: Optimización de Voladuras para obtener avances del 100%, con una sobre y sub excavación inferior al 5%

Calidad al ciclo de trabajo, la mejora directa de la eficiencia y rentabilidad de una obra subterránea

*Consortio Constructor Chavimochic (CCCH) Ing. Ernesto SALAS GARCIA
DNA-Blast Latinoamérica S.A.C. (DNA-Blast) M.Sc. Alan DÍAZ BUTRÓN*

RESUMEN: ¿Es posible controlar los efectos de una voladura en beneficio del avance?, es una pregunta constante y un desafío para todos aquellos que buscan resultados óptimos cada vez más certeros en tunelería. Presentaremos el caso del proyecto Chavimochic, en su tercera etapa, ejecutado por Consorcio constructor Chavimochic, con la colaboración en la excavación de túneles de la empresa DNA-Blast. Con secciones de túneles hidráulicos entre 25 m² y 41 m², los objetivos trazados eran obtener el mejor avance por voladura ($\geq 95\%$) minimizando el daño en las excavaciones. Es en este contexto, que la utilización de técnicas avanzadas, precisas y que no generen riesgo en su empleo cotidiano, se hace necesario. La magia no existe, pero la tecnología sí. Estando a la vanguardia en las herramientas para simulación de efectos de voladuras, Consorcio Constructor Chavimochic aplica en su proyecto la tecnología DNA-Blast acompañado de equipos y técnicas de vanguardia en busca de lograr sus objetivos. Desde el diseño del plan de voladura a “medida”, basándose en una adecuada distribución de explosivo y una secuencia de iniciación, hasta cálculos más complejos como el control de vibraciones, para evitar cualquier daño en el túnel, combinada con la contribución de parámetros geomecánicos y geofísicos, permiten alcanzar nuestros objetivos de avance con adecuada fragmentación. No existiendo mayor sobre ni sub excavación en el túnel ($\leq 5\%$), respetando la clasificación del macizo rocoso y la profundidad de taladros. Este documento ilustra el proceso de optimización continua, desde el inicio de las excavaciones de túneles, así como las técnicas aplicadas para conquistar los objetivos requeridos.

1. CONTEXTO : PROYECTO CHAVIMOCHIC III ETAPA - EXCAVACION DE TUNELES

Situado al nor-oeste del Perú, el proyecto especial Chavimochic se encuentra entre la margen derecha del río Santa por el sur, hasta las Pampas de Urricape por el norte. Este se viene desarrollando en tres etapas con el objetivo de garantizar el agua de riego en los valles de Chao, Virú, Moche y Chicama para un total de 144,385 Hectáreas.

La tercera etapa es ejecutada por Consorcio Constructor Chavimochic (CCCH) quien tiene a cargo la construcción de la infraestructura hidráulica, operar y dar mantenimiento a las obras nuevas y existentes, así como prestar suministro de agua a los usuarios del proyecto, la cual incluye a su vez una primera y segunda etapa.

Es en este contexto, que en la actualidad se viene desarrollando con una altura final de 95m la construcción de la presa “Palo Redondo” (figura 1) para la cual es necesaria la excavación de túneles (hidráulicos y uno vial) con secciones que varían de

25 m² a 41 m² y longitudes que van desde 350 m a 2600 m.

La excavación de túneles fue prevista con el método de Perforación y Voladura, así como bajo un control de reconocimiento geológico en el transcurso de los avances de los túneles que pudiera permitir el “resguardo” del proyecto previsto en el proceso constructivo.

Para afrontar estas obras, Consorcio Constructor Chavimochic (CCCH) podía optar por los métodos clásicos o tradicionales, o poder consultar y aplicar métodos no convencionales basados en cálculos matemáticos y físicos interactuando entre sí, para optimizar el proceso constructivo, fundados esencialmente en lograr una mayor eficiencia o rendimiento de cada voladura por tipo de roca, minimizando el daño en la sección final y bajo los estándares de seguridad que pudieran asegurar el éxito de la operación.

En particular lo que “rodea” a las voladuras, ha evolucionado gracias a mejores procesos técnicos y al desarrollo de buenas prácticas ambientales,

buscando interrelacionar también en el proceso datos geológicos y métodos geofísicos, permitiendo controlar más parámetros del ciclo de explotación, reflejándose en los resultados de avance, aumentando la producción y de esta forma también mejorando los costos globales.



Figura 1: Presa Palo Redondo (mayo 2016)

Es en esta búsqueda que Consorcio Constructor Chavimochic decide aplicar y dar su entera confianza a la tecnología DNA-BLAST (figura 2), la misma que puede ser aplicada para diseño, simulación y optimización de voladuras, de esta forma poner en práctica procedimientos de extracción ejemplares desde el punto de vista técnico, económico, social y medioambiental. Así mismo, el desarrollo en interno y empleo del software I-Blast, integrado en el seno de un protocolo ad hoc de medidas y de ingeniería de campo, contribuyen a mejorar la aceptación, seguridad y productividad de técnicas de voladura actuales, a través de la simulación numérica de voladuras al explosivo.

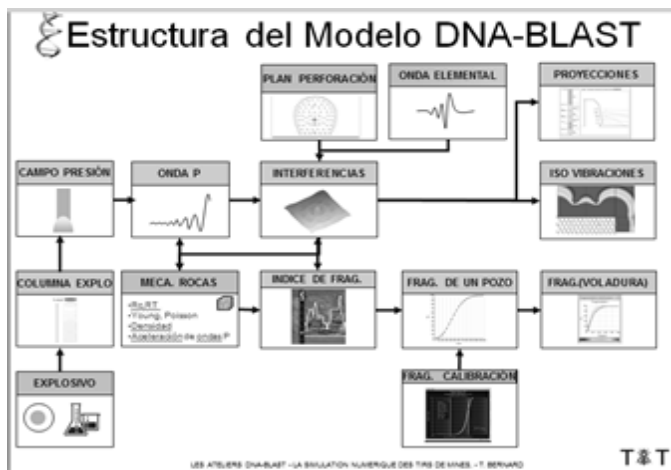


Figura 2: Estructura del modelo DNA - Blast

El objetivo esencial de la propuesta de ingeniería por parte de la empresa DNA-BLAST consiste en asegurar una eficiencia mínima de 95% en voladura de manera ponderada para todos los tipos de rocas y secciones, así por ejemplo: si tenemos una sección de 30 m² y perforamos con barra de 13' debemos obtener 118.95 m³, es así que si obtenemos luego de la voladura 114 m³, nos indicará que la eficiencia de la misma fue de 95,84%, siendo en este caso superior a la eficiencia mínima "exigida"

Los tipos de roca están dados por la clasificación de Bieniawski (R.M.R.), Z. T. Bieniawski (1979), y la longitud de perforación permitida ligada al tiempo de auto sostenimiento una vez producida la voladura en el túnel, por estudios estructurales ya efectuados.

Los límites de avance por tipo de roca establecidos por del departamento de geomecánica son:

- Tipo II: 4.5 m
- Tipo III: 4 m
- Tipo IV: 2.5 m
- Tipo V: 1.5 m

El equipo de perforación previsto un Jumbo DT 820 (figura 3) de Sandvik de dos brazos semiautomatizado, para secciones de 12 a 110 m².



Figura 3: Control de perforación Jumbo DT820

La complejidad en este proyecto radica también en poder obtener una sobre y sub excavación no mayor al 5%, es así que el diseño y el control de cada voladura debe ser efectuada con un alto grado de precisión, que permita poder alcanzar los objetivos trazados y sobre todo mantener el mismo estándar a lo largo de los trabajos de excavación.

2. OBJETIVOS: METAS A ALCANZAR

Adicionalmente y no menos importante, este servicio de ingeniería debe ser cubierto con el ahorro en costo que debe obtenerse por mejorar la eficiencia de la excavación por voladura, esto entendiéndose que cualquier mejora tecnológica, será viable sí representa una disminución en los costos operativos que pueda cubrir su propia aplicación y dejar un margen que sustente la ejecución de dichos métodos.

Es así, que el mayor indicador de la efectividad de la aplicación de métodos de ingeniería, será la reducción de costos operativos, por ello lo incluimos también como un objetivo directo de esta propuesta.

3. ¿QUÉ ES EL AVANCE Y LA SOBRE-SUB EXCAVACIÓN?: METODO DE MEDIDA

El avance como indicado en el punto 2 estará limitado por la longitud máxima permisible según el tipo de roca que encontraremos voladura a voladura.

Esta longitud equivaldrá al 100% permitido, el requerimiento principal nos lleva entonces a poder mantener una productividad constante, contando con diseños de mallas performantes, que permitan también resguardar el costo previsto.

3.1. El avance – método de medida

El avance será medido según el tipo de roca en cada voladura por el departamento de topografía, el cual una vez evacuado el material, podrá medir el resultado final en el frente de avance.

Es esencial para la estabilidad, ciclo de producción y costo directo, el controlar el daño en la sección y obtener la menor sobre y sub excavación posible, las cuales serán consideradas como penalidades al avance obtenido.

Mediante una conversión a metros lineales, la sobre y sub excavación restará de forma directa el rendimiento obtenido. Es así que de forma mensual, como mostrado en la figura 4, se evaluará los avances obtenidos por cada voladura según el tipo de roca, descontando al avance medido la cantidad en metros superior al 5% permitido para la sobre y sub excavación, así mismo respetando los costos previstos.

TUNEL	
Longitud teórica (m)	198.40
Longitud Real (m)	204.28
Castigo (m)	4.35
Eficiencia de Servicio total	102.96%
Eficiencia de Servicio Efectiva	100.77%

Figura 4: Ejemplo de tabla recapitulativa de avance mensual

El ejemplo de la figura 4 muestra una evaluación mensual típica basada en la longitud acumulada por tipo de roca del periodo, la longitud real obtenida, el castigo resultado de la sobre y sub excavación, la eficiencia real producto del avance mensual y para finalizar la eficiencia efectiva descontando “el castigo” a la longitud real. Como mencionado en el párrafo anterior, también se incluye el costo de las mallas diseñadas el cual no debe ser superior al estimado para el proyecto el cual fue considerado inicialmente bajo el método tradicional de excavación por voladura.

3.2. Sobre y sub excavación

Podemos definir sobre excavación u *overbreak* como la excavación de roca no deseada “exterior” al perfil teórico especificado, del mismo modo la sub excavación o *underbreak* es la falta de excavación sobre el perfil teórico requerido.

Ambos resultados generan un aumento de costos como también, una mayor duración al ciclo de producción. Al producirse “sobre excavación” se requiere a menudo de hormigón proyectado (shotcrete) para “rellenar” la zona afectada. En el caso opuesto la necesidad de martillos neumáticos o voladura secundaria se hace imprescindible para poder “romper” la roca faltante y así llegar a la sección deseada.

En muchos casos la sobre excavación puede conducir a la inestabilidad del macizo rocoso generando un riesgo a la construcción del túnel.

La sobre y sub excavación son principalmente consecuencia del “daño” y las estructuras geológicas propias a lo largo de la longitud de los trabajos de excavación. Así también el factor de carga y la secuencia de la voladura juegan un rol importante.

El “daño” es medido en la sección a partir de los taladros de contorno donde el PPV (velocidad pico partícula) excede al PPV crítico de la roca in-situ.

El PPV crítico esta correlacionado a la Resistencia en compresión y la Velocidad de Onda P.

Estos efectos pueden reducirse o eliminarse efectuando un control meticuloso de los parámetros de voladura, tales como:

- control de la perforación
- diámetro de taladros
- espaciamiento adecuado
- distribución de carga
- secuencia de salida.

En la figura 5, podemos ver gráficamente como se muestra la sobre y sub excavación a partir de la línea de excavación teórica.

Delimitar voladura a voladura estos ítems permitirá efectuar un control de los objetivos requeridos, y hacer un balance continuo del costo real de construcción de los túneles contra el previsto.

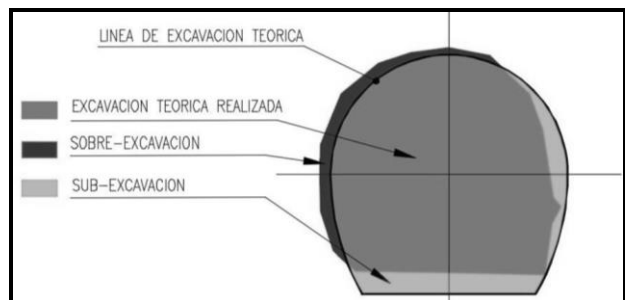


Figura 5: Gráfico de sobre y sub excavación en sección normal

4. MÉTODO DE EXCAVACIÓN POR VOLADURA EN TÚNELES

El trabajo de excavación de túneles es un campo especializado en la industria de la construcción, que requiere de profesionales capacitados. Efectuando una comparación con la extracción minera en donde el objetivo esencial es recuperar el mineral a partir de una voladura, en la excavación de túneles la roca extraída será generalmente destinada a desecho. En la construcción de túneles es primordial el avance del frente voladura a voladura, siempre y cuando la eficiencia y seguridad lo permitan.

Para la construcción de los túneles en proyecto Chavimochic se emplea el método de “Cara Completa”, este método como bien indica su nombre se basa en una malla de perforación para volar por completo la sección del túnel en un solo disparo o voladura como mostrado en la figura 6.

En la actualidad, el avance en equipos en especial de jumbos más grandes y eficientes, mejores brocas y el empleo de mejores máquinas para la limpieza del material hacen que esta técnica se aplique con más frecuencia siendo empleado generalmente en túneles de altura inferior a 9 m, salvo las condiciones de la roca nos lleve a efectuar voladuras pequeñas, en tal caso se optaría por el método del arranque superior con banco.

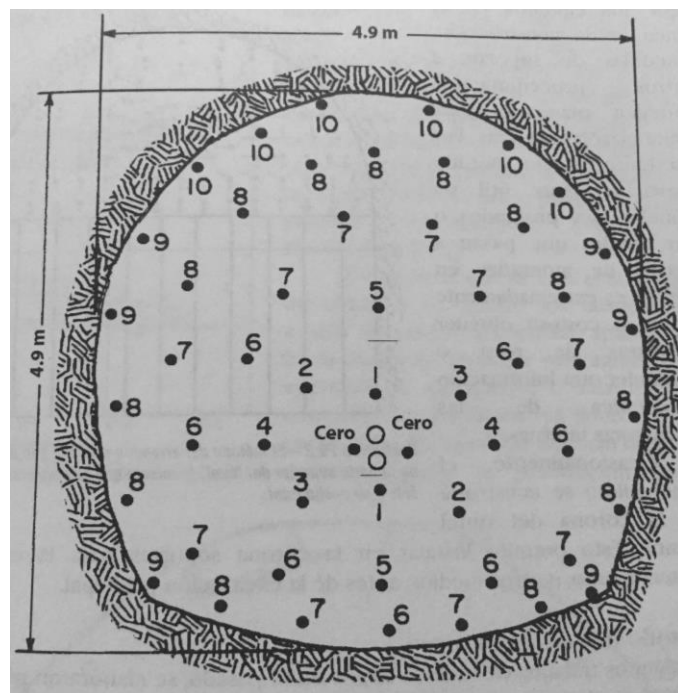


Figura 6: Ejemplo de método de cara completa (Manual del especialista en voladura, 2008).

La voladura en túneles está catalogada entre las más complejas ya que no se cuenta con una cara libre más que la del frente, a diferencia de la voladura superficial en donde podemos tener dos a tres caras libres.

4.1. Voladura Tradicional en túneles

En la actualidad y en muchos proyectos de construcción de túneles, el tema de excavación por voladura se sigue basando en la “experiencia” de sus colaboradores pero sin ninguna base científica.

¿Qué es la experiencia?, la experiencia (derivado del latín *experiri*, “comprobar”) es catalogada para algunos como una forma de conocimiento o habilidad proveniente de la observación, participación y de la vivencia de una situación o evento de forma constante. Este término está muy relacionado al ámbito laboral y es por esto que muchas empresas optan por profesionales que tienen más años trabajando que por jóvenes que están entrando a la vida laboral, claro está, este tipo de selección no se basa más que en el tiempo que una persona ha sido confrontada a ciertas situaciones o trabajos específicos, sin embargo no todas las personas saben capitalizar esta experiencia y transformarla en conocimientos aplicables. Es así que la experiencia está relacionada al “saber hacer algo” y de forma directa ligada a lo empírico.

Bajo esta premisa es que muchos túneles son construidos en la actualidad empleando la experiencia como punto clave, sin tomar muchas veces en cuenta por ejemplo los diversos cambios geológicos a lo largo de su excavación o más grave aun pretendiendo que de un túnel a otro no exista ninguna variación en los parámetros de diseño de la malla de voladura más que por un cambio de sección (más o menos taladros), o como en muchos de los casos efectuando un solo tipo de malla de voladura por tipo de roca.

Existen diferentes fórmulas empíricas (figura 7) relacionadas al diseño de mallas de voladura, las cuales van siendo adaptadas según la experiencia.

$$N = 10\sqrt{A} + 10$$

N= número de taladros
A= Área de la sección

Figura 7: Fórmula empírica para el cálculo de cantidad de taladros según la sección, empleada por Consorcio Constructor Chavimochic en su previsión inicial.

Es así que el método de “PRUEBA y ERROR” empleado para el diseño de mallas de perforación y voladura (figura 8) se convierte en una alternativa cotidiana para muchos constructores de túneles.

Aun así, esta metodología tradicional tiene algunas ventajas como:

- Permite construir su propia experiencia.
- No requiere de herramientas tecnológicas.
- Es fácil de aplicar.
- No tiene costo inicial.

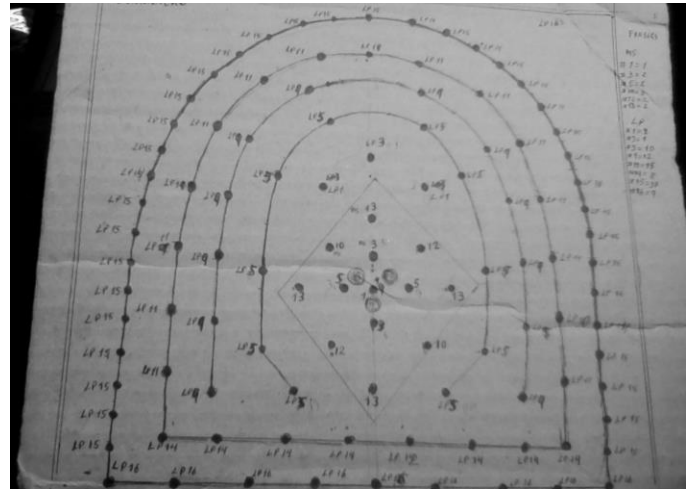


Figura 8: Diseño de malla de voladura “tipo” efectuada de forma empírica (método de prueba/error).La misma fue hecha en campo sobre un cartón restante de caja de explosivos.

Del mismo modo el método de “PRUEBA y ERROR” tiene desventajas, entre otras:

- Ninguna garantía de éxito, ya que no tiene ningún soporte científico.
- Puede durar mucho tiempo, ya que se va ajustando según la experiencia durante la excavación (ej. Poner un taladro de más o de menos para ver el resultado)
- Necesidad de comenzar a cada nueva configuración, ya que no toma en cuenta que las condiciones geológicas pueden ser muy variables.
- No se puede llegar a los resultados esperados de forma sistemática.
- Puede ser riesgoso, en tema de seguridad al no tener un control de los efectos de la voladura.
- Es costoso, ya que afecta al ciclo de producción al no tener controladas la sobre y sub excavación, dañando del mismo modo la autosostenibilidad del macizo rocoso.

En conclusión esta metodología que en principio no considera un costo más que la propia experiencia se puede tornar fácilmente en un problema para la ejecución y sostenibilidad de cualquier empresa constructora.

4.2. Voladura en base a fundamentos científicos para túneles

Podemos definir ciencia como un conjunto adecuado de técnicas y procesos que se emplean para generar conocimiento para el tratamiento de un tema específico.

El método científico está entonces relacionado de forma directa a una serie de etapas que hay que seguir con el fin de obtener un conocimiento que sea válido, empleando para esto instrumentos o medios que resulten fiables, evitando caer en la subjetividad para resolver o afrontar una situación y pasando de lo cualitativo a lo cuantitativo mediante medidas cada vez más precisas.

La construcción de túneles necesita de una detallada y extensa investigación antes y durante su ejecución. En cuanto a voladura, esto implicará poder prever y conocer de manera más precisa la variabilidad geológica en el transcurso de la excavación, mediante sondeos directos o indirectos, que permitan efectuar y poder ejecutar diseños de mallas de voladura a “medida”, ajustándose los parámetros a la situación del macizo rocoso a atravesar en ese momento.

Efectuar un trabajo sobre bases científicas permitirá alcanzar de manera rápida y segura los resultados y objetivos deseados.

Pese a que pueda verse como un “costo extra” en el proceso constructivo a diferencia del método tradicional, el tener control de los efectos por voladura permitirá a la larga un ahorro en tiempo y ganancias económicas tangibles.

Es por tal motivo que Consorcio Constructor Chavimochic (CCCH), decide emplear la tecnología DNA-BLAST para poder aplicar ingeniería de voladuras en sus trabajos de excavación de túneles, con el apoyo de la empresa que lleva el mismo nombre de la tecnología DNA-BLAST apostando por la innovación científica en el proceso constructivo de túneles en Perú.

De forma breve podemos indicar que el Modelo DNA-BLAST está basado en principios físicos y matemáticos puestos en ecuaciones para representar el mundo real. Este imita los mecanismos internos de la voladura con el fin de reproducir sus efectos,

es sin duda una alternativa real a los modelos estadísticos basados solamente en leyes experimentales.

La tecnología DNA-BLAST considera de manera independiente cada uno de los elementos (figura 9) que juntos constituyen el resultado de una voladura, efectuando una semejanza, sería como los genes que conforman el cuerpo humano. Dependiendo de cómo y en qué proporción estos se combinan, dichos llamados “genes de la voladura”, dan resultados distintos para una misma voladura, tal como se puede apreciar en la naturaleza, cada criatura o especie salen de una combinación original de genes distintos.

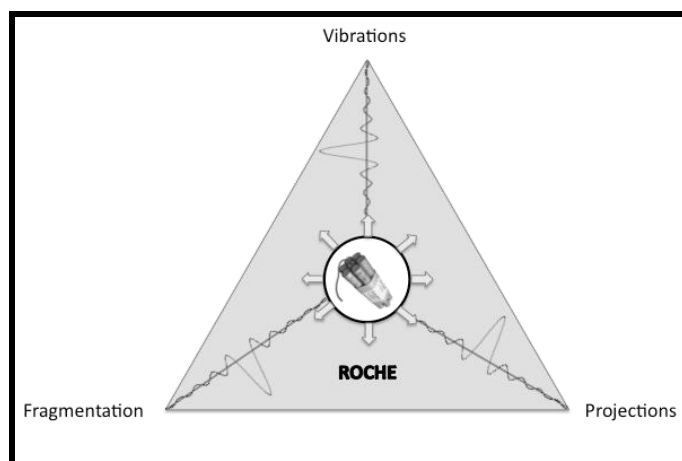


Figura 9: Tecnología DNA-BLAST, mecanismo global de la detonación.

La identificación de dichos genes y la comprensión de sus interacciones potenciales han permitido la creación de un protocolo de medidas y de softwares que permiten simular y optimizar la totalidad de los parámetros necesarios para la realización de una voladura tal como esperada.

Basado en el trabajo de investigación por más de 25 años del Dr. Thierry BERNARD (Francia 1965) y con una experiencia mundial en ingeniería de explosivos y voladura, esta tecnología permite integrar todos los parámetros que se interrelacionan al fenómeno (geología, carguío, geometría, secuencia, etc...), con el fin de poder procesar las interacciones entre estos parámetros, imitando de forma certera el fenómeno natural producido por una voladura, permitiendo así alimentar las ecuaciones físicas que constituyen el motor de esta tecnología.

5. PROTOCOLO DE MEDIDAS, CONTROL Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE VOLADURAS EN TUNELES

Las medidas de campo previas y post voladura son necesarias para poder efectuar un control como también un análisis de los resultados obtenidos y de esta forma poder de ser necesario optimizar nuestro diseño de voladura para obtener los resultados deseados.

Estas medidas serán complementadas también a lo largo del ciclo constructivo por pruebas de carácter geofísico, así como pruebas de perforación directa que nos permitirán poder reconstituir nuestro modelo geológico in-situ a lo largo del eje del túnel, permitiendo así mismo alimentar nuestro modelo con los parámetros geomecánicos obtenidos en estas pruebas.

Este trabajo es efectuado por un grupo de ingenieros de la empresa DNA-BLAST que interactúan y colaboran en proyecto Chavimochic directamente con los ingenieros del departamento de producción e ingeniería, con el fin de alcanzar los objetivos y resultados exigidos.

Cabe resaltar que el éxito de este protocolo de medidas no podría llevarse a cabalidad sin el real apoyo de los ingenieros y equipo humano de proyecto Chavimochic, que son partícipes y acompañan todo el proceso a aplicar.

5.1. Medidas y controles en campo

Para ser eficaz, la optimización y mejora continua no puede apoyarse solamente sobre una base teórica, si no de informaciones recopiladas diariamente durante el ciclo de trabajo.

Siendo una de las actividades esenciales dentro de nuestro proceso, un ingeniero desarrollará su actividad netamente en campo para poder alimentar nuestro modelo, siendo partícipe de todo el ciclo correspondiente a perforación y voladura.

Tendrá a cargo y participará de las siguientes etapas:

- Entregará al responsable del frente el documento de campo (figura 10) donde se

detalla la malla a ejecutar, así como el archivo digital para ingresar al jumbo para la voladura en curso.

- Controlar una adecuada perforación de la malla prevista en el frente del túnel (tiempo de perforación, cantidad de taladros, entre otros) y recuperará el archivo generado por el Jumbo después de la perforación, así verificar si se respetó o no lo previsto.

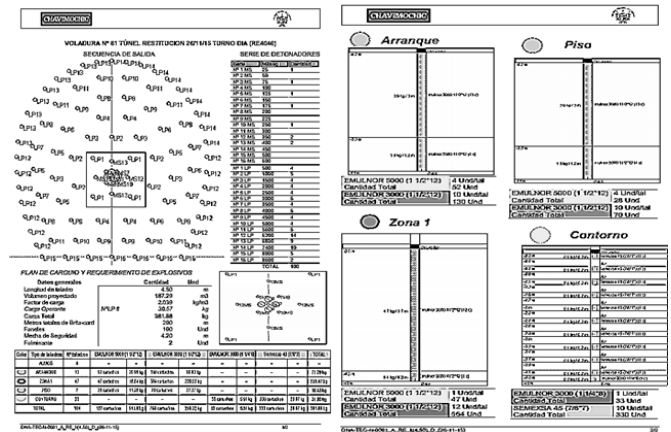


Figura 10: Documento de campo indicando a detalle la cantidad y posición de taladros, así como la cantidad y configuración de carga explosiva por tipo de taladro.

- Acompaña el carguío y secuenciamiento de la malla perforada verificando su correcta ejecución en campo.
- Coloca y configura sismógrafos para registro sísmico (figura 11).



Figura 11: Instalación y verificación de parámetros de un sismógrafo antes de la ejecución de la voladura.

- Tomará fotos del frente antes de la voladura.
- Una vez ejecutada la voladura tomará fotos para el análisis de fragmentación, proyección de roca.

- Una vez el frente limpio tomara fotos del resultado final para su análisis.
- Controla en el mismo frente la sobre y sub excavación. Registrará mediante fotos el número de medias cañas o *half barrel* (figura 12), del contorno como indicador del respeto y cuidado de la sección final.

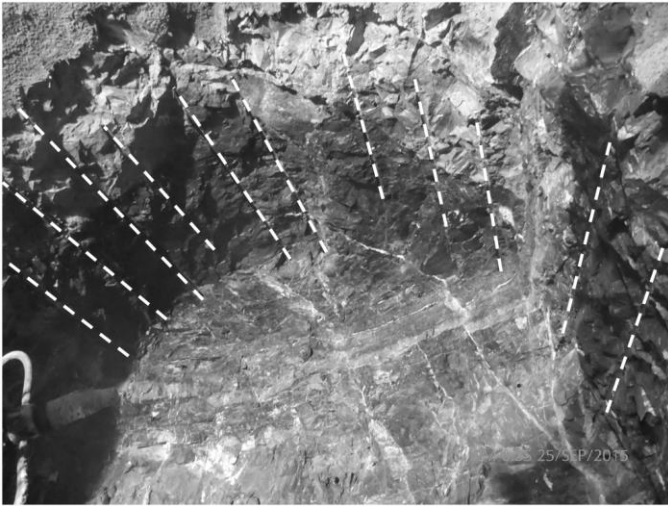


Figura 12: Fotografía para el control y análisis de medias cañas o *half barrel* relacionado a la sobre y sub excavación así como al respeto de la sección final.

- Recupera el registro sísmico para su adecuado análisis.
- Durante todo el proceso de perforación – voladura tomará nota de los datos relevantes del proceso en campo, indicando cualquier cambio o modificación in-situ.
- Entrega toda la información obtenida pre y post voladura para su respectivo estudio y análisis.

Esta fase del seguimiento en campo es imprescindible para asegurar un resultado óptimo, este debe efectuarse entonces día a día con la minuciosidad y detalle requerido.

5.2. Análisis de resultado de voladuras como aporte para la optimización continua

El ingeniero responsable del análisis de resultados post- voladura, es un profesional capacitado para el procesamiento, análisis e interpretación de los datos resultantes a las operaciones unitarias del proceso de perforación y voladura, para poder interrelacionarlas como parte esencial del proceso constructivo de túneles en proyecto Chavimochic. Este tratamiento de datos representa sin duda alguna el “puente” principal entre el trabajo diario en

campo, y la mejora continua para los futuros diseños de mallas de perforación y planes de voladura, con el objetivo de buscar que estos sean cada vez más eficientes y rentables.

Las actividades de análisis que se efectúan son:

- Analizar el registro de perforación real que proporcionan los equipos Jumbo, verificando así que se respetó la distribución, ángulo y longitud de la malla planificada (figura 13).

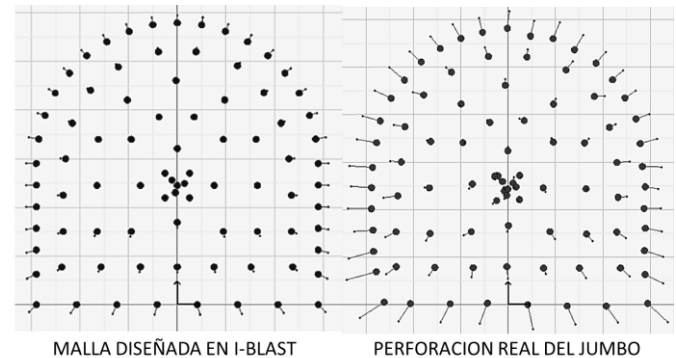


Figura 13: Análisis de malla diseñada y la perforación real efectuada por el Jumbo

- Análisis del nivel sísmico obtenido, como control de la performance de la voladura (más nivel sísmico indicará menor energía aprovechada en fragmentación).
- Mediante el análisis de la señal sísmica (figura 14), podremos verificar la adecuada salida de todos los taladros de la malla y el respeto de la secuencia diseñada, pudiendo inmediatamente señalar problemas a corregir en la siguiente voladura.

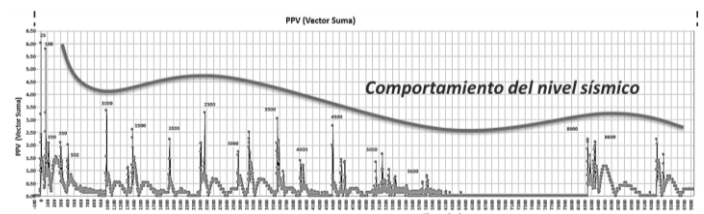


Figura 14: Análisis del comportamiento sísmico de una voladura

- Cálculo del daño real alrededor de la sección (figura 15) del túnel, empleando parámetros como:
 - el nivel sísmico obtenido.
 - la carga operante empleada
 - velocidad de onda P, a partir de los estudios geofísicos de sísmica para

túneles, efectuados en el mismo tramo donde se efectuó la voladura, pudiendo analizar el desplazamiento de onda en el macizo rocoso.

- Módulo de Young obtenido por prueba geofísica para el tramo a tratar.
- Densidad de la roca.
- Resistencia a la compresión obtenida de los parámetros de perforación a partir de una prueba de sondaje mecánico destructivo en el frente del túnel efectuado cada 30m empleando adicionalmente una cámara que permite catalogar la roca a atravesar de manera precisa.

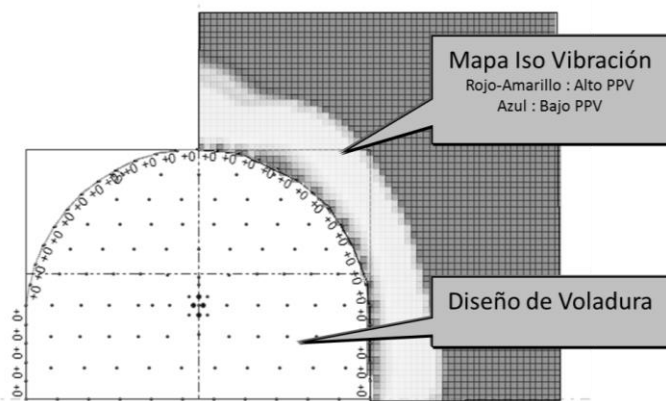


Figura 15: Control de daño, simulación efectuada en I-Blast

- Control del avance obtenido, así como de la sobre y sub excavación mediante la información entregada por topografía tomada después de la limpieza de la voladura respectiva.
- Análisis de fragmentación mediante imágenes con ayuda del software I-Blast (figura 16), revisando si se logró o no el objetivo trazado ($P 80 \leq 300 \text{ mm}$).

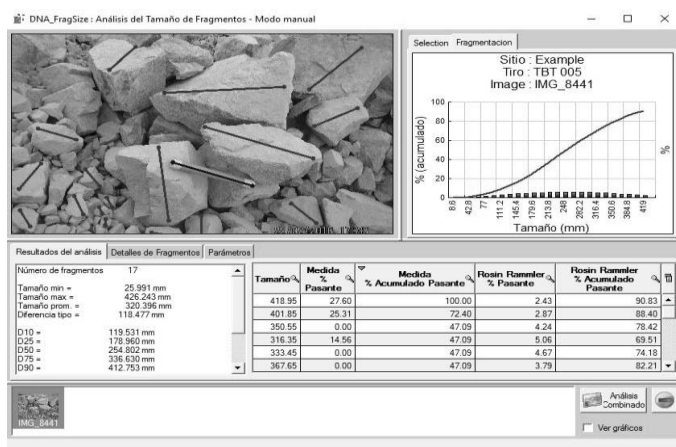


Figura 16: Análisis de fragmentación mediante fotos, software I-Blast

- Control de la distancia de proyección de roca real.
- Cálculo de medias cañas, siendo este un valor porcentual determinado por el cociente entre la cantidad de medias cañas en los taladros de contorno. Este valor es un indicador del buen cuidado de la sección a pesar del efecto destructivo de la detonación, y de esta manera saber si la sección se está llevando de acuerdo al diseño ejecutado y las condiciones propias del proceso constructivo.
- Control del factor de esponjamiento, empleando la cantidad de volquetes evacuados como dato, comparándolo con la sección excavada, adicionalmente y para compensar la heterogeneidad al momento del carguío de los volquetes (medición rápida), se toman mediciones topográficas (volúmenes) de los escombros para verificar estos datos. El factor de esponjamiento deberá ser comparado con la fragmentación obtenida ya antes mencionada, de tal forma que podamos corroborar la correcta interpretación de ambos análisis (cuando el P80 es mayor, mayor debería ser el esponjamiento en una relación directa). Al mejorar el factor de esponjamiento nos debe llevar a poder mejorar el tiempo de limpieza, como mejora continua de la productividad del túnel.

El análisis de cada voladura culminará con la redacción de un informe detallado, donde se apreciará los valores obtenidos más resaltantes, así como observaciones y recomendaciones para poder, de ser necesario optimizar la malla de voladura siguiente.

5.3. Diseño y optimización de mallas de voladura sobre bases científicas.

Una explosión es un fenómeno muy rápido en el curso de la cual se desprende en un tiempo extremadamente corto una energía importante. Esto es el resultado generalmente de la expansión de un gran volumen de gas, a menudo a altas temperaturas.

A partir de los datos de campo y los análisis de resultados y en base a cálculos, un ingeniero podrá bajo esta base “alimentada” diariamente, diseñar mallas a medida según las condiciones precisas en

campo, de esta manera poder obtener un avance sustentable a lo largo de la excavación de un túnel.

A diferencia del método tradicional, que hace variaciones de forma aleatoria y sin ninguna base técnica, al conocer y controlar una gran cantidad de parámetros que intervienen en el ciclo de perforación y voladura podremos optimizar de forma continua, identificando y ajustando los parámetros necesarios para poder alcanzar nuestros objetivos.

El diseño de una malla de perforación y plan de voladura se desarrollara de la siguiente manera:

- Una vez los parámetros geológicos y geomecánicos obtenidos en campo, procedemos a integrarlos a nuestro modelo en el software I-Blast.
- El tipo, las características físico-químicas y las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes explosivos utilizados en proyecto serán ingresadas a nuestro modelo en el software I-Blast.
- Es así, que los modelos eventualmente adaptados (geológico, explosivos) y actualizados sobre la explotación o cuando exista necesidad, nos permiten ganar un tiempo precioso entre cada voladura, reutilizando la base de datos de elementos invariables propios del proyecto, permitiendo así seguir el ritmo de la tasa de producción de la excavación del túnel.
- Para el diseño de la malla de perforación debemos partir de:
 - La posición de los taladros
 - La dirección de perforación
 - La profundidad de la voladura
 - La cantidad de taladros
 - El tipo de taladro (arranque, piso, horizontales y verticales de producción, contornos, etc.) (figura 17).
- A diferencia de una voladura en superficie en este caso solo podemos desplazar el material hacia la parte ya excavada del túnel. Es por esta situación que debemos proceder en “dos tiempos” para una voladura en túnel. Es así que sobre una parte de la sección concentramos una cierta cantidad de taladros destinada a excavar una primera cavidad en el sentido del avance, que denominamos corrientemente arranque. Una vez generada esta cavidad, los demás taladros

“vuelan” el material sobre esta cavidad central continuando con la secuencia de salida. He aquí la importancia de la salida del arranque en una voladura de este tipo.

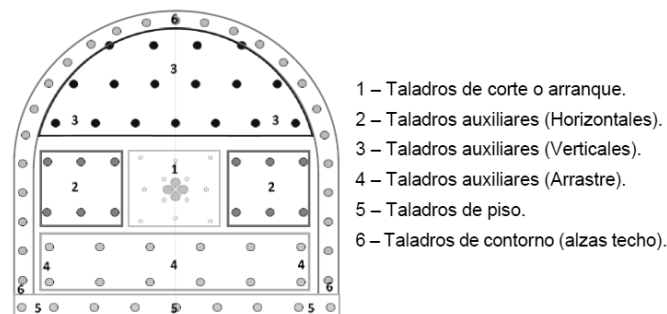


Figura 17: Tipos de taladros en una sección clásica de túnel.

- En cuanto a la distribución y posición de taladros en el frente de excavación, a diferencia del método tradicional que nos indica ya una cantidad de taladros predeterminada, en nuestro caso encontraremos una cantidad final, partiendo desde el primer taladro y adicionando taladros de forma geométrica (figura 18), tomando en cuenta el volumen de material a mover y/o desplazar entre el primer y segundo taladro, para posteriormente ajustar la carga explosiva necesaria. Este principio está ya integrado en el software I-Blast que nos permite diseñar las mallas en proyecto Chavimochic.

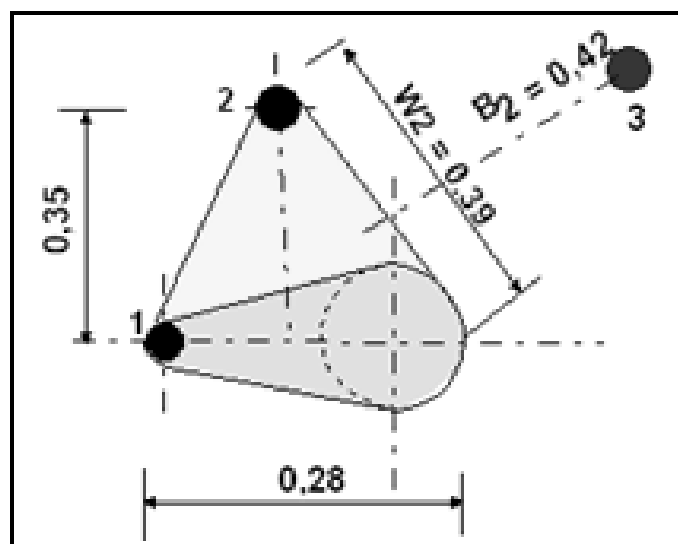


Figura 18: Ejemplo del cálculo de la posición de los 3 primeros taladros. (Thierry Bernard, 2003)

- Continuando con el diseño, debemos tener en cuenta los siguientes parámetros, los cuales serán calculados también por el software I-Blast empleando las bases de datos ingresadas (ej.

Explosivos del proyecto (figura 19), de forma automática, entre ellos:

- La carga por taladro (kg), varía según la posición del taladro en la malla de perforación. Esta decrece generalmente del centro hacia el exterior.

- La distribución de energía (figura 21), del mismo modo nos muestra la energía empleada por volumen volado (MJ/m^3)

Proveedor	Imagen	Nombre	W (kg)	ID Sitio	ID	Fuerza
EXSA		EXAGEL-E 80 (30/305mm)	1	6 89		1.28
EXSA		EXAGEL-E 65 (30/305mm)	1	6 88		1.24
EXSA		GELATINA ESP(30/305mm)	1	6 87		1.40
EXSA		SEMEKSA 80 (25/203mm)	1	6 86		1.16
EXSA		SEMEKSA 65 (30/305mm)	1	6 85		1.09
EXSA		SEMEKSA 45 (25/203mm)	1	6 84		1.01
FAMESSA		EMULNOR 5000 (25/203mm)	1	6 83		1.32
FAMESSA		EMULNOR 5000 (25/203mm)	1	6 82		1.32
FAMESSA		EMULNOR 5000 (25/178mm)	1	6 81		1.32
FAMESSA		EMULNOR 3000 (25/203mm)	1	6 80		1.35
FAMESSA		EMULNOR 3000 (25/203mm)	1	6 79		1.35

Figura 19: Ejemplo de base de datos de explosivos integrados al software I-Blast para el diseño de mallas.

- La carga lineal, es la cantidad de explosivo por metro de taladro cargado (Kg/ml).
- La carga operante, siendo esta la cantidad de explosivo que detona en un instante $t(\text{kg})$, Es un parámetro importante ya que es la carga operante quien condicionará el nivel de vibración emitido por la voladura, el cual tiene consecuencias directas sobre el resultado del plan de voladura y sobre el ciclo productivo del túnel.
- La carga total de explosivo empleada para la voladura en curso. (figura 20)
- El factor de carga, que es simplemente la cantidad de explosivo expresado por volumen de roca a volar (g/m^3).

Type	Charge	Charge Bottom	Ch. S.
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_horiz	1.97	0.83	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	
Abotraga_vert	1.39	0.59	

Figura 20: Diseño de voladura en el software I-Blast, podemos apreciar: cálculo de cantidad y posición de taladros, resumen de carga por tipo de taladro, tabla resumen del factor de carga y volumen por tipo de taladro y global a volar.

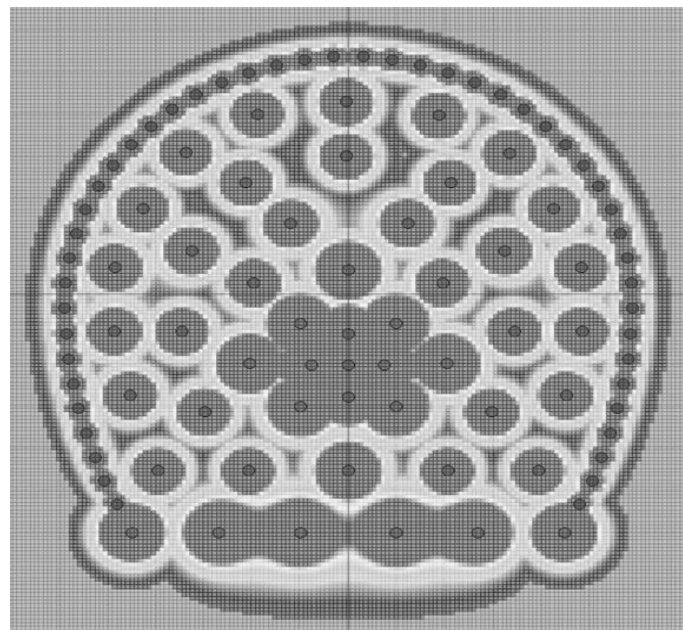


Figura 21: Distribución de energía en el software I-Blast para una voladura de roca tipo V con $F_c = 0.9 \text{ Kg}/\text{m}^3$

- Para diseñar la secuencia de salida, hay que tener en cuenta el objetivo de cada tipo de taladro, así tenemos:
 - El arranque, tendrá como objetivo el crear una cavidad central (cara libre) de sección suficiente y libre de todo material, es por eso que los tiempos de vaciado de volumen de material a partir de la velocidad de eyección (esta velocidad se encuentra en un promedio de 40 a 60 m/s) son importantes y prioritarios.
 - El objetivo de los taladros de producción, será hacer más grande esta cavidad hasta el siguiente « perfil » de taladro(s).
 - Los taladros de contorno, tienen por objetivo delimitar la sección final, teniendo en cuanto que debemos efectuar el mínimo daño al macizo rocoso. Normalmente salen al mismo tiempo.

Para la concepción de la secuencia (figura 22), es imprescindible crear caras libres a medida que la voladura va desarrollándose, para esto seleccionamos los mejores tiempos de retardo evitando en lo posible, tener una superposición de tiempos y taladros juntos, que pudieran

aumentar nuestra carga operante y como consecuencia generar un nivel de vibración elevado, esto se reflejaría directamente en el daño a la sección, la sobre y sub excavación.

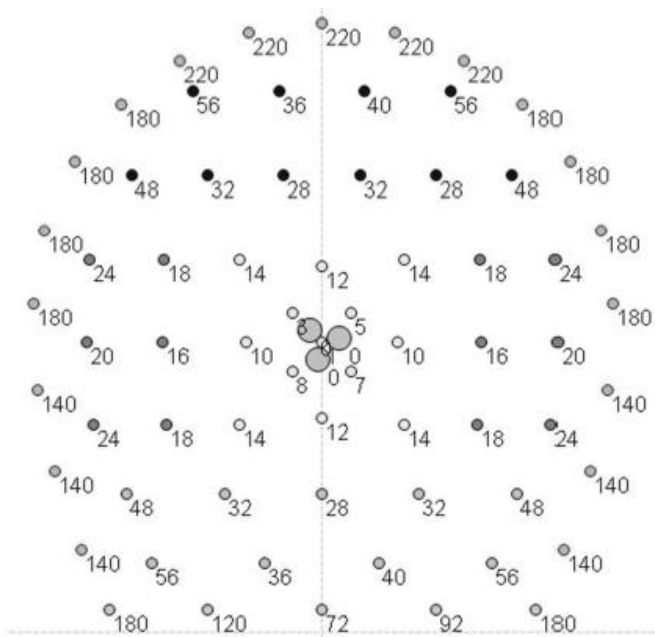


Figura 22: Diseño de plan de voladura y secuencia con el software I-Blast.

Hemos mencionado las principales etapas del proceso de diseño y optimización de mallas de voladura, así como la intervención del software I-Blast como herramienta de mejora continua, permitiendo ganar tiempo en el desarrollo del proceso.

5.4. Importancia de la geofísica y sondeos mecánicos como fuente de información geológica y geomecánica para el proceso de perforación y voladura

El método aplicado en proyecto Chavimochic es denominado “testigo virtual – TSP”. Nos permitirá alimentar de forma antelada y continua nuestra base de datos para poder a partir de los parámetros geomecánicos y estructuras geológicas diseñar y optimizar mallas de perforación y planes de voladura según las condiciones geológicas en curso, y de esta forma obtener avances iguales o superiores al 95% de la longitud perforada, y pudiendo mantener un nivel de daño, sobre y sub excavación controlada y estimada como máximo en un 5% de la sección excavada. Este método consta de dos pruebas:

- un primer sondeo mecánico de 30 m, que nos proporcionará informaciones geológicas, geomecánicas y esencialmente ligadas a la resistencia a la compresión de la roca. Este método consiste en una perforación horizontal en el frente del túnel donde mediante un sensor especial registramos parámetros de perforación (figura 23), en tiempo real, entre ellos: la velocidad de avance, torque, presión de avance, presión de inyección de fluidos.

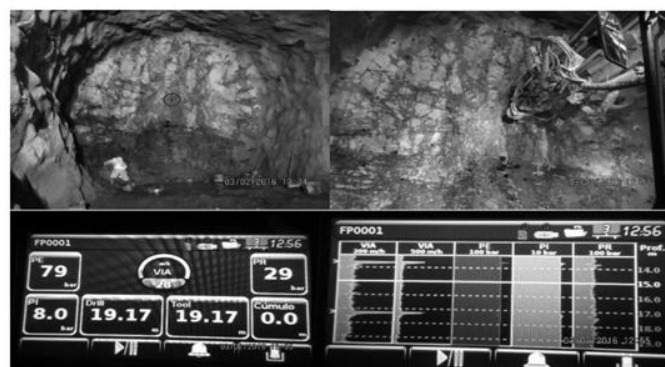


Figura 23: Registro de parámetros de perforación mediante sensor en equipos de perforación.

La velocidad instantánea de avance (VIA), es la velocidad a la que la herramienta avanza mientras perfora que también llamaremos “perforabilidad”. Hay que tener en cuenta que esta “perforabilidad” no nos indica la dureza de la formación geológica, pero si la resistencia a la compresión (índice de Somerton), mostrando una relación con RMR (Rock Mass Rating)

En el caso de la presión de inyección de fluidos nos indican las variaciones de la plasticidad de las formaciones geológicas que se perforan.

La presión de rotación expresa el esfuerzo necesario para que la broca rote en el taladro y nos da la información si es heterogénea o no. Esta información es muy importante para que combinadas con la presión de avance y la velocidad instantánea nos brinde información geológica mediante cortes litológicos y geomecánicos de la roca a partir del análisis de resistencia a la compresión para la ubicación de fallas y estructuras.

Con el empleo del software DNA-DRILL-LOG (figura 24), podremos mediante la combinación de estos parámetros y un ajuste al índice de Somerton, obtener una curva equivalente a la

resistencia a la compresión de la roca, la cual es situada en relación a la progresiva del túnel. Nuestro diseño será en función al avance que deseamos obtener.

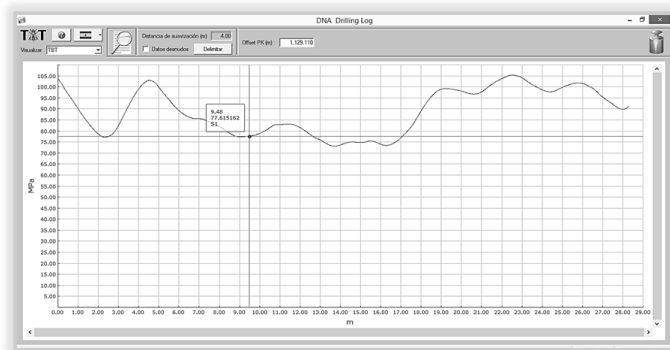


Figura 24: Curva equivalente a la resistencia en compresión de la roca, después de sondeo – Software DNA-DRILL-LOG

Una vez la perforación y recolección de datos terminados se podrá obtener una imagen del taladro introduciendo una cámara para poder modelizar nuestro testigo mecánico virtual (figura 25).



Figura 25: Cámara para modelización del testigo de forma virtual.

Una vez modelizado el testigo virtual, se corrobora cualquier evento geológico detectado al momento de efectuar la perforación (figura 26).

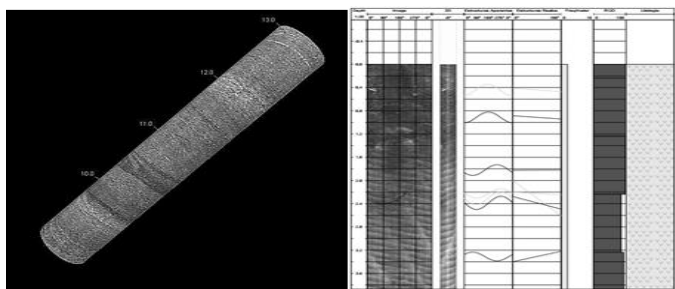


Figura 26: Testigo virtual y análisis del mismo.

Este sondeo nos permite saber que tipo de roca podremos encontrar antes de efectuar una voladura y así prever y optimizar nuestra malla, con el fin de obtener el avance deseado y minimizando los riesgos de daño a la sección.

- Una segunda prueba de predicción sísmica para túneles en inglés “*tunnel seismic prediction – TSP*”, nos dará información sobre las estructuras geológicas. Está diseñado para localizar y revelar cambios en la masa rocosa y/o formaciones geológicas tales como cavernas, fallas, zonas fracturadas, discontinuidades en el frente de avance.

Se le emplea de forma predictiva durante la excavación de túneles, empleando sísmica de reflexión mediante la detonación de hasta 24 pequeñas cargas de forma secuencial produciendo señales acústicas (ondas sísmicas) que son recibidas por sensores triaxiales anclados a la roca en la pared lateral del túnel (figura 27).

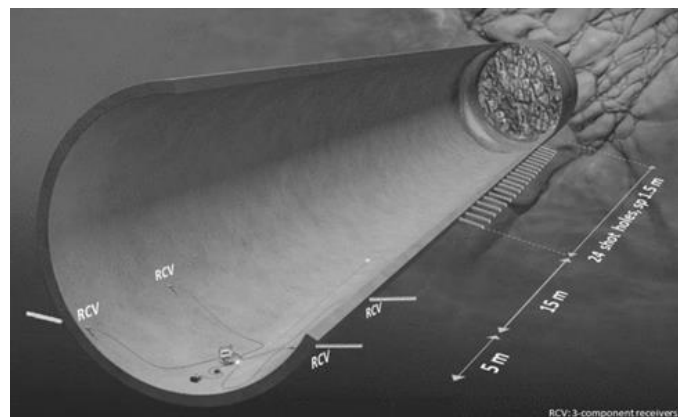


Figura 27: Posición de taladros y sensores para la prueba TSP. (Imagen Amberg Technologies)

Los sensores sísmicos captan las señales sísmicas producidas por los disparos y que han sido reflejadas por alguna forma de discontinuidad del macizo rocoso, las cuales serán registradas en un computador (figura 28).

El software Amberg TSP PLUS procesa la información recibida para poder determinar las características geomecánicas de la roca, tales como el módulo de Young, el coeficiente de poisson, la velocidad de ondas P y S. Esto se mostrará en el modelo a obtener mediante reflectividad, así como en valores (figura 29).

Esta aplicación tiene un alcance de más de 150 metros, sin embargo se recomienda efectuar el análisis cada 100 metros. Es aplicable en todo tipo de roca con contraste en sus propiedades físicas, excepto en suelos blandos donde el método no puede ser aplicado.



Figura 28: Ingeniero de la empresa DNA-BLAST registrando en túnel mediante el método de TSP.

Para este análisis se emplea la impedancia acústica, que es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este. La impedancia acústica es una función que varía con la frecuencia.

La impedancia a una frecuencia determinada indica cuanta presión es generada por la onda acústica de esa frecuencia. Mediante la impedancia acústica podemos determinar el coeficiente de reflexión empleado luego para detectar discontinuidades del macizo rocoso. Un contraste de impedancia acústica de al menos 20% es suficiente para detectar discontinuidades geológicas.

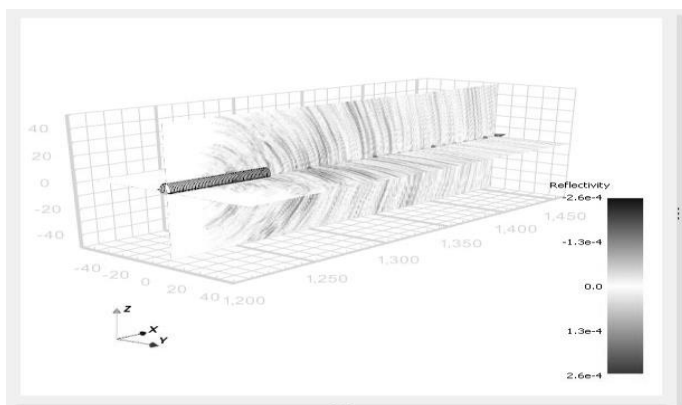


Figura 29: Reflectividad de ondas P según modelo obtenido de la prueba TSP.

Los parámetros obtenidos en el modelo (figura 30) mediante este método geofísico nos ayudan a predecir con antelación la calidad del macizo rocoso y obtener parámetros geomecánicos necesario para el diseño de mallas y planes de voladura.

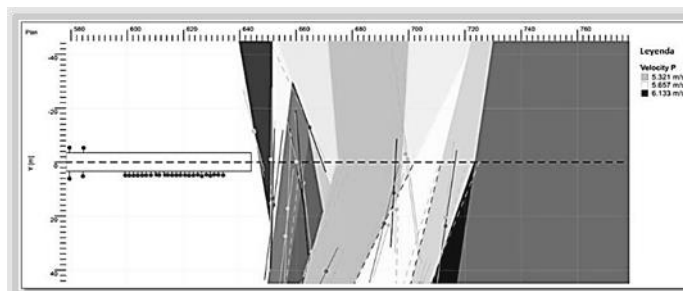


Figura 30: Modelo geológico a partir de la prueba de TSP

6. COSTOS - VALIDACION DEL METODO CIENTIFICO

Para validar la ejecución de este método, se comparó con mallas de perforación y planes de voladuras realizadas en proyecto Chavimochic sin el uso de los parámetros científicos necesarios para aplicar la tecnología de excavación de tuneles.

A partir de dicha comparación se obtuvo el siguiente análisis:

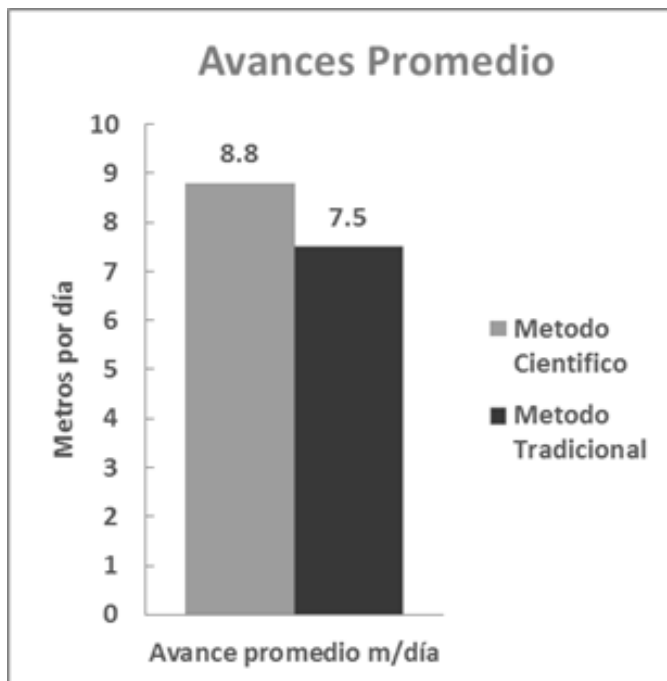


Figura 31: Diferencia en los avances promedio por día.

En la Figura 31 se observa un incremento en el avance promedio por día de un poco más de un metro, es decir, que cada 6 voladuras realizadas con

el método científico equivalen a 7 voladuras realizadas con el método tradicional.

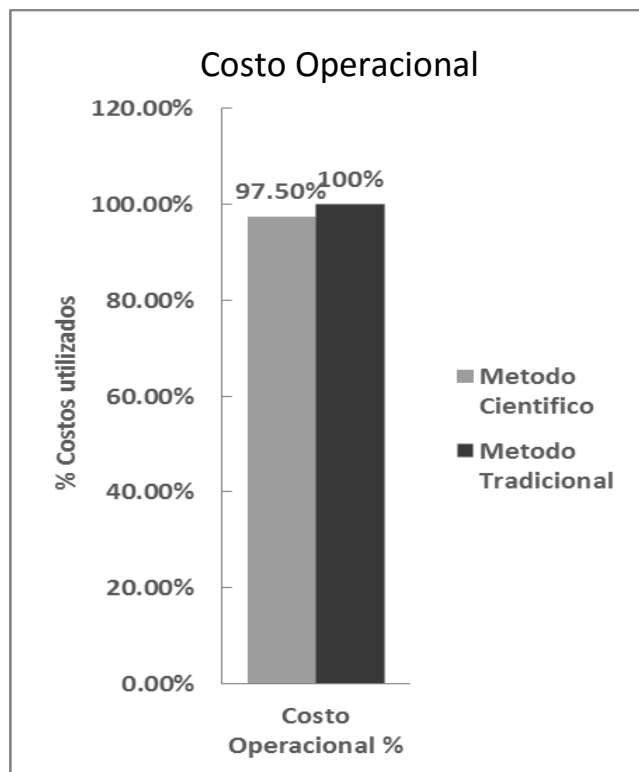


Figura 32: Comparación de los costos Operacionales

Como parte de la validación, se proyectó el uso del método tradicional y el método científico a una misma longitud. Así, luego de evaluar el costo operativo para esta longitud de túnel, incluyendo además los costos mismos de ejecución y servicio del método científico, se pudo alcanzar un ahorro de 2.5% con respecto al método tradicional (figura 32).

Como parte no medible del uso del método científico podemos considerar que con el control y reducción del factor de daño en el macizo rocoso construimos túneles con mayor estabilidad, proveyendo a todos los que intervienen día a día en la construcción de túneles un ambiente de trabajo seguro y en términos geomecánicos incrementando la autosostenibilidad del túnel, permitiendo mayores avances sin el uso de sostenimiento.

7. BENEFICIOS TECNICOS Y PRODUCTIVOS GRACIAS A LA APLICACIÓN DE INGENIERÍA EN VOLADURA

La aplicación de esta metodología de ingeniería como parte esencial del proceso constructivo de túneles para el proyecto Chavimochic, cuenta con diversos beneficios tanto técnicos como

productivos, ligados a una optimización constante y la interrelación con el cliente (figura 33).

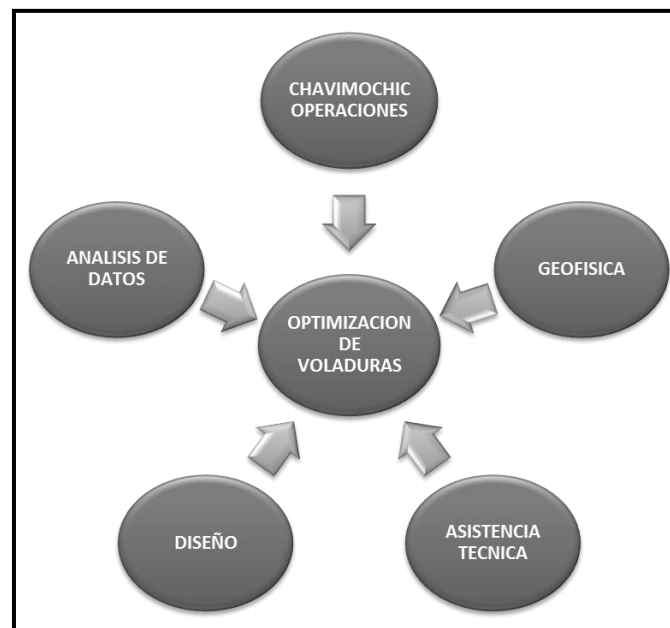


Figura 33: Interacción de las diferentes etapas para una optimización constante.

A continuación detallaremos los principales beneficios técnicos:

- La geofísica, nos otorga los siguientes beneficios técnicos:
 - Estimación de parámetros geomecánicos
 - Identificación de estructuras geológicas.
 - Identificación de zonas sísmicas (Vp).
 - Conocimiento del comportamiento de la roca antes de la excavación por voladura.
- El análisis de cada voladura nos permite:
 - Control del avance.
 - Control de la sección final.
 - Volúmenes por voladura.
 - Control de proyección de roca.
 - Adecuado nivel de vibración.
 - Mejora y control de la fragmentación.
 - Control de daño a la sección final.
 - Minimizar sobre y sub excavación.
- El diseño adecuado de planes de voladura, permite obtener:
 - Menor carga operante.
 - Cuidado al contorno de la sección.
 - Control y mejora de la fragmentación.
 - Reducción del factor de esponjamiento.
 - Secuencias óptimas de iniciación.
- Medidas de control en campo:
 - Monitoreo del proceso de perforación.
 - Control del proceso de carguío.

- Instalación del sismógrafo y registro de la vibración.
- Fotos para el control de fragmentación.
- Verificación de la sección y avance.

Así también encontramos beneficios productivos, entre ellos:

- En cuanto a geofísica:
 - Mallas de perforación eficientes.
 - Planes de voladura según tipo de roca.
 - Sostenimiento del túnel programado.
 - Menor riesgo de inestabilidad y demoras.
 - Reducción en los aceros de perforación.
 - Incremento de la productividad.
 - Menor tiempo de paradas para investigación.
- El análisis de datos tendrá como beneficios:
 - En cuanto al avance, tendremos mayor rendimiento y mayor longitud de taladros.
 - Menor tiempo de ejecución de los túneles.
 - Una buena fragmentación nos dará una mayor eficiencia en el equipo de carguío y por ende menor tiempo de limpieza.
 - Una proyección de roca controlada permitirá una limpieza del material más rápida, así como el desplazamiento uniforme del material volado.
 - Menor daño a la sección por seguridad, así como nivel de daño para controlar la fragmentación.
 - En cuanto a la sección, tendremos menor sobre y sub excavación.
- El diseño de voladura, aporta :
 - Reducción de la carga operante.
 - Menor nivel de vibración y daño.
 - Incremento del tiempo de apertura en el túnel.
 - Secuencias óptimas en campo, asegurando un buen avance, fragmentación y control de proyección.
- El trabajo de campo efectuado aporta de la siguiente manera :
 - Verificación de los planes de voladura, para evitar errores de ejecución y demoras.
 - Planes de contingencia adecuados.

- Las mediciones y registros nos permitirán ahorrar mucho tiempo, bajo un control de resultados minucioso.

Es necesario indicar que estos beneficios técnicos y productivos, tienen que estar reflejados y “soportados” por el costo previsto del proyecto para la excavación de túneles.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VOLADURA COMO FUENTE DE MEJORA CONTINUA

Después de iniciada la fase de excavación túneles en agosto del año 2015 para la tercera etapa del proyecto Chavimochic, se han efectuado un total de 730 voladuras con un avance global de 2565 m.

Concentraremos nuestros resultados en los últimos 5 meses, es decir de enero a mayo del año 2016. Conservando el objetivo inicial previsto de obtener una eficiencia igual o mayor al 95% en voladura con una sobre y sub excavación igual o inferior al 5%. En cuanto a la eficiencia en voladura, podemos indicar se obtuvo resultados superiores al 100%, siendo el “castigo” por la sobre y sub excavación inferior al 5 % (figura 34). Del mismo modo el costo previsto fue cubierto, sin incurrir en ningún sobre costo. Cabe resaltar que se efectúa como ya mencionado entre otros un control por voladura del daño y nivel de vibración a la sección y aunque se obtuvieron avances en algunos casos superiores al 100% por voladura, esto en ningún momento afecto la estabilidad del macizo, por los controles ya mencionados.

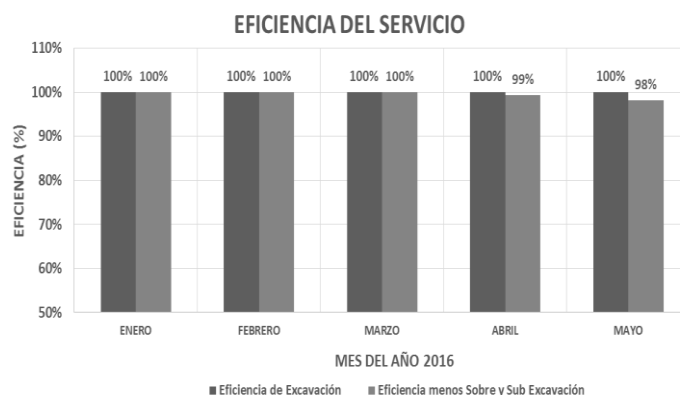


Figura 34: Resultado de la eficiencia por voladura – proyecto Chavimochic de enero a mayo 2016.

El objetivo de fragmentación es que sea inferior o igual a 300 mm, lo cual se cumple según los resultados obtenidos para cada tipo de roca entre enero y mayo del 2016. Se presenta un resultado promedio por tipo de roca (figura 35).

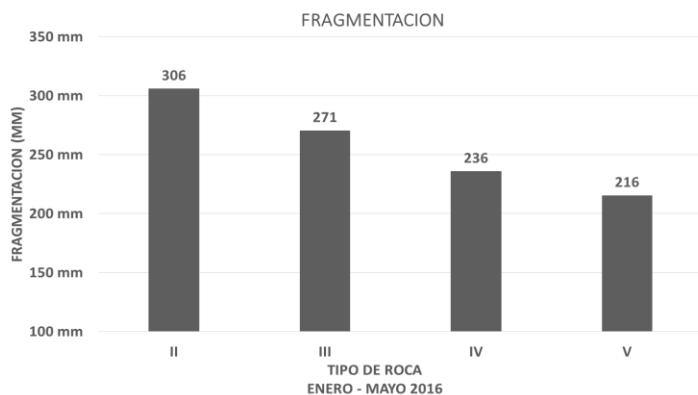


Figura 35: Resultado de la eficiencia por voladura – proyecto Chavimochic de enero a mayo 2016.

Una parte importante del proceso de optimización de voladura es sin duda alguna el ahorro de tiempo en el proceso de excavación, el cual está entrelazado directamente a la eficiencia de voladura efectiva. Es así que se pudo culminar a la fecha (junio 2016), con el proceso de excavación de 2 túneles, con longitudes entre 352 m y 590 m, obteniendo un ahorro de tiempo real al programado entre el 4 % y 15% (figura 36).

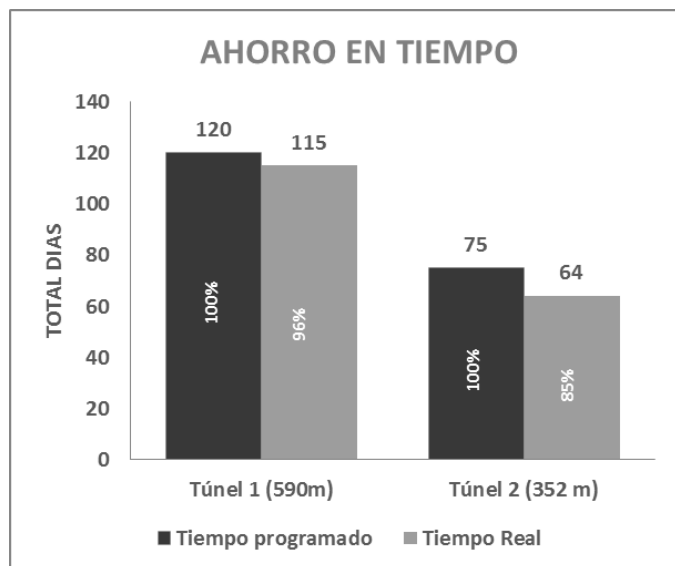


Figura 36: Resultado de la eficiencia relacionada al ahorro en tiempo de ejecución.

CONCLUSIÓN

El desempeño en conjunto del equipo CHAVIMOCHIC – DNA BLAST ha permitido obtener buenos resultados de productividad y avance en la ejecución de los túneles, logrando de enero a mayo del 2016, 326 voladuras y 1160.73m de excavación de túnel, y un total de 730 voladuras y 2565.17m en todo el proyecto.

Se ha podido sostener los indicadores de rendimiento de las voladuras, logrando un promedio del 100% en eficiencia, minimizando el daño a la sección y controlando la sobre y sub excavación manteniéndola menor al 5% previsto.

Al comparar los costos del método tradicional con la aplicación del método científico, se redujo durante la excavación de los túneles los costos operativos en 2.50%. Este porcentaje considera ya los costos mismos del servicio y empleo del método científico así como reducciones no cuantificables entre ellas el tema de seguridad gracias al control de daño en las estructuras del macizo rocoso.

Las pruebas geofísicas y el uso del software DNA Log, permite conocer el comportamiento geológico del entorno, para la realización de planes de voladura de mayor eficiencia.

Los resultados de simulaciones efectuadas en el software I-Blast empleado para el diseño de mallas de perforación y planes de voladura, son más precisos y los beneficios ligados a la optimización son aún mejores cuando el modelo es alimentado con medidas coherentes y completas, y realizadas con el más grande rigor. Con este fin, el equipo de DNA-BLAST en base a su tecnología y en coordinación con Consorcio Constructor Chavimochic, ha desarrollado un protocolo de medidas performante y compatible con el ciclo de producción en túneles y esto puede ser replicado para todo material a extraer y en cualquier ubicación geográfica.

Los beneficios aportados a proyecto Chavimochic tanto del punto de vista de la reducción de perjuicios como del aumento de su productividad, provienen de esta combinación única de experiencia y de tecnología forjada a lo largo de estos últimos 25 años.

Nuestra experiencia prueba que estos beneficios son igualmente reproducibles en cualquier tipo de construcción de túneles.

REFERENCES

Bernard, T. 2009. Explain to me why? *Proc. 5th EFEE Conf. on Explosives and Blasting*, Budapest, Hungary, 26-28 April. European Federation of Explosives Engineers.

Bernard, T. 2008. A "holistic" approach for blast fragmentation modeling. *Proc. ASIEX Conf.*, Pucón, Chile, 20-21 November.

Chapot, P. 1980. Study of the vibrations caused by the explosives in the rock solid masses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris

Dozolme. P. 2009. Resumen ejecutivo preparado por minera los pelambres, amsa, Chile. DNA-BLAST SOFTWARE.

Bernard. T., Dozolme. P, Díaz. A, 2011. Le Contrôle Total des Tirs de Mine en Carrière

International Society of Explosives Engineers. 2008. Manual del especialista en voladura 17a Edición

Bernard. T. 2003. Travaux souterrains: creusement à l'explosif