

Tacos de alto rendimiento TN – Una Innovación probada para la Minería Subterránea

J. Bastías

Nutrirat, San Juan, Argentina.

G. Escribá

Nutrirat, San Juan, Argentina.

I. Ormeño

ATC, Rancagua, Chile.

M. Villalobos

3Fractal Mining Services, Santiago, Chile.

ABSTRACT: Almost 20% of the 5.7 million tons of copper produced by Chile come from underground mines, a figure that will increase in the coming years due to the incorporation of deposits that are currently exploited in open pit. For this reason, there is a need to build hundreds of kilometers of tunnels and galleries, to reach the work fronts where the mineral is extracted. In Chile, mining tunnels are built according to a conventional excavation methodology, with the use of drilling and blasting following the mining cycle. The overall efficiency of the mining cycle depends on several factors, but one of the most relevant is blast efficiency. This article includes a theoretical discussion that establishes the importance of confinement of the explosive in the detonation process and the effects on the efficiency of proper explosive energy distribution along the blast design pattern; this includes the performance of the stemming material and its operational response to the thermochemical process of the detonation process. Finally, the preliminary results of industrial tests carried out with the TN High Efficiency Clay Mixture Compound Stemming on horizontal development in mines in Argentina and in Codelco's El Teniente Division are presented. These preliminary results show an increase in efficiency of the advance rate, besides reducing the overbreaking and in the quality of the material broken by blasting, positively impacting the productivity of the mining cycle.

RESUMEN: Casi un 20% de las 5,7 millones de toneladas de cobre que produce Chile provienen de explotaciones en minas subterráneas, cifra que aumentará en los próximos años debido a la incorporación de yacimientos que hoy son explotados en rajo abierto. Por esta razón, existe la necesidad de construir cientos de kilómetros de túneles y galerías, para llegar a las frentes de trabajo donde se extrae el mineral. En Chile, los túneles mineros se construyen según una metodología de excavación convencional, con el uso de perforación y tronadura, siguiendo el ciclo minero. La eficiencia global del ciclo minero depende de varios factores, pero uno de los más relevantes es la eficiencia de la tronadura. En el presente artículo se incluye una discusión teórica que fundamenta la importancia del confinamiento del explosivo en los tiros y los efectos en la eficiencia de la tronadura de un adecuado diseño y fabricación de los Tacos Retenedores. Finalmente, se presentan los resultados preliminares de pruebas industriales realizadas con los Tacos Retenedores de Alto Rendimiento TN en frentes de desarrollo horizontal en minas de Argentina y en la División El Teniente de Codelco. Estos resultados preliminares muestran importantes mejoras en la eficiencia del avance de cada disparo, en reducir la sobre excavación y en la calidad de las minas, impactando en forma positiva en la productividad del ciclo minero.

Keywords: Taco, retenedor, aluminosilicatos, confinamiento, tiempo de retención, termofusión

1. INTRODUCCION

1.1 *Panorama General de la Minería en Chile*

Según el Informe “Cifras actualizadas de la minería - junio 2021” del Consejo Minero, la minería es la principal generadora de divisas para nuestro país, constituyendo con sus más de 40 mil millones de dólares anuales más del 55% de las exportaciones que realiza Chile (56% el año 2020 y 61% a junio del 2021).

El PIB del sector minero representó el 12% del PIB Nominal en el año 2020 y a junio del 2021 ya alcanza una participación del 14%. Con su aporte de más de 3 mil millones de dólares, representa más del 5% de los ingresos fiscales, cifra que va en alza debido a la positiva evolución del precio del cobre durante el año 2021.

El empleo directo de la minería en Chile, que incluye a trabajadores propios más contratistas, alcanzó al 10 de julio del 2021 recién pasado un total de 217 mil puestos de trabajo, generando otros 553 mil empleos indirectos en otros sectores de la economía, lo que representa el 9,2% de participación del empleo en el país.

Las inversiones de la gran minería en el año 2019 en Chile superaron los 10.000 millones de dólares, de los cuales casi 6.000 millones correspondieron a la minería privada y poco más de 4.000 millones de dólares a Codelco.

Sin duda, estas cifras comprueban que la industria minera es el principal impulsor de la economía nacional, incluso hoy con todas las limitaciones que ha generado la pandemia del Covid-19.

1.2 *Presente y Futuro del Negocio del Cobre en Chile*

Actualmente, Chile con sus 5,7 millones de toneladas de producción anual es el mayor productor y exportador de cobre del mundo, con una participación del 28,5% de la producción mundial, y el segundo productor de molibdeno, con una participación de un 20% de la producción global.

Las expectativas de reactivación de la economía mundial post-pandemia, las políticas monetarias del gigante chino, más la creciente ola de la economía verde y la electro-movilidad, han incrementado la demanda de cobre en el mundo, permitiendo que su precio alcance un nuevo récord histórico, al cotizarse el 7 de mayo

de 2021 a 4,7 US\$/lb en la Bolsa de Metales de Londres.

Sin embargo, es necesario mirar con prudencia estas cifras, ya que por otro lado la minería del cobre ha visto incrementados sus costos de producción al doble en los últimos 10 años, pasando de 110 cUS\$/lb a cerca de 220 cUS\$/lb. En efecto, el año 2018 los costos de la libra de cobre (definido como C3, que incluye los Costos de Caja + Depreciación + Intereses + Costos Indirectos), alcanzaron un promedio anual de 215 cUS\$/lb, que es más de un 15% por sobre el costo promedio del resto del mundo.

1.3 *Las Inversiones en Proyectos Mineros en Chile*

En la década de 2000 a 2009 se invirtieron en Chile un promedio de US\$ 4.319 millones anuales en proyectos mineros y en la década siguiente el promedio fue más del doble: US\$ 10.577 millones por año. La consultora especializada en proyectos mineros GEM (Gestión y Economía Minera) estima que, para producir el año 2040 la misma cantidad de cobre que se produjo el año 2020, será necesario invertir del orden de US\$ 105.000 millones, esto es casi US\$ 5.000 millones anuales, sólo para mantener la producción de 5,7 millones de toneladas.

Por otro lado, si se ejecutan todos los proyectos mineros en carpeta, la producción anual de cobre en Chile podría pasar de las 5,7 millones de toneladas en el año 2020 a más de 8 millones de toneladas a partir del año 2026.

No obstante, las nuevas inversiones deberán afrontar factores adversos de competitividad relevantes. Según datos de la consultora GEM, en 1990 la ley promedio de cobre de las minas del país era de 1,29%, la que se ha venido reduciendo de manera continua hasta niveles de 0,70% en el año 2020. Por otra parte, el costo promedio de la hora hombre (HH) en minería, en 1990 estaba en US\$12,4, algo por debajo de los 15,7 US\$/HH que tenía en promedio la minería en el resto del mundo. En 2018, el valor de la hora hombre en Chile alcanzó los US\$ 28, muy por sobre los 19,8 US\$/HH que registró el resto del mundo.

A modo de referencia, se puede decir que el desarrollo de un proyecto minero de la gran minería del cobre puede tomar fácilmente 10 años, con una producción media de 100.000 toneladas anuales y una vida útil entre 20 y 30 años.

1.4 Explotación de Minería Subterránea en Chile

De las 5,7 millones de toneladas que produjo Chile en el año 2020, tan solo 1,1 millones provienen de explotaciones en minas subterráneas. Es por ello que en Chile estamos habituados a pensar más en términos de la gran minería en rajo abierto que en minería subterránea.

Sin embargo, esta situación está empezando a cambiar ya que, como consecuencia del envejecimiento de sus depósitos y la mayor profundización del mineral, muchos yacimientos han empezado a migrar a una explotación subterránea, como es el caso del megaproyecto de Chuquicamata Subterráneo, el cual a partir del año 2021 comenzará a agregar una producción en régimen de más de 0,35 millones de toneladas al año.

La minería subterránea de carácter masivo tiene principios, métodos y prácticas de explotación muy distintos a los de rajo abierto, donde se requiere un mayor involucramiento de disciplinas como la geología, la mecánica de rocas y la perforación y tronadura.

Existen diversos métodos de explotación subterránea, sin embargo, aquellos que han adquirido mayor relevancia en Chile son los métodos por Hundimiento Masivo o *Caving*, dentro de los cuales se encuentran diferentes variantes, como lo son el *Block Caving* y *Panel Caving*.

Todos estos sistemas de explotación subterráneo masivo, basados en la gravedad, requieren de la construcción de muchos kilómetros de túneles y galerías hasta llegar a las frentes de trabajo donde se ejecutan las actividades de explotación del mineral.

1.5 Los Túneles Mineros

En Chile, los túneles mineros se construyen según una metodología de excavación convencional, con el uso de la perforación y tronadura (*drill & blast*), en la cual se aprovecha la fuerza rompedora del explosivo para arrancar la roca de la frente, obteniendo como resultado un avance en la excavación del túnel.

El conjunto total de actividades necesarias para realizar una tronadura de la frente se conoce como ciclo de avance o ciclo minero. El avance se logra una vez que se realiza una tronadura en la frente, algunas de las actividades del ciclo son la perforación, el transporte de marinas y fortificación de la galería.

Cada ciclo minero genera un avance de entre 3 y 5 metros, dependiendo del largo de la perforación de los tiros y de la eficiencia de la tronadura, cuyos valores aceptados en la industria varían entre 85% y 95%.

La eficiencia global del ciclo minero depende de varios factores, pero uno de los más relevantes es precisamente la eficiencia de la tronadura, que es la materia de la cual nos ocuparemos en el presente artículo.

2. MARCO TEORICO

2.1 La Tronadura y la Detonación

La tronadura representa una de las operaciones unitarias de mayor relevancia en toda operación de extracción de minerales. Su objetivo es lograr un adecuado grado de excavación y fragmentación de la roca, de tal modo de tener el mínimo costo combinado de las operaciones de perforación, tronadura, carguío, transporte y chancado primario del material, produciendo a la vez el menor daño posible en el entorno.

En la detonación la energía química del explosivo fractura la roca, debido al súbito aumento de volumen que experimenta la materia al transformarse violentamente en gases en un espacio de un diámetro muy reducido (del orden de 2") y al intenso calor desprendido en su reacción exotérmica.

2.2 Proceso de Fragmentación

Físicamente, el proceso de fragmentación de la roca en una tronadura se debe al impacto dinámico de una onda de choque al macizo rocoso y la presión o empuje posterior de los gases generados en la reacción termoquímica de descomposición del explosivo.

El proceso de fragmentación de la roca durante la detonación de un explosivo puede dividirse en tres fases secuenciales:

Fase 1: La presión de la onda de choque -que viaja a una velocidad entre los 3.000 y 5.000 [m/s]- supera la resistencia a la compresión de la roca, produciéndose un fenómeno de trituración en la zona circundante al pozo, debido a los esfuerzos tangenciales en el pozo.

Fase 2: La onda de compresión se propaga por la roca y cuando alcanza una cara libre, se refleja como onda de tracción. Esta onda de tracción se devuelve hacia el macizo y como la roca es menos resistente a la tracción que a la

compresión (menos de la décima parte), debido al esfuerzo de tracción de la onda reflejada empiezan a desarrollarse las primeras fisuras.

Fase 3: Bajo la influencia de la presión exorbitantemente alta de los gases, las primeras grietas se ven aumentadas y expandidas por el efecto combinado del esfuerzo de tracción inducido por la compresión radial y la fuerza de expansión de los gases.

2.3 Eficiencia en la Tronadura

El proceso de tronadura dista por mucho de ser eficiente en términos de conversión de trabajo útil versus el potencial disponible en el explosivo (MJ/kg teóricos). Distintos autores hacen referencia a la poca parte de la energía disponible que realmente contribuye a la fragmentación de la roca. Por ejemplo, Lownds and Du Plessis (1984); Finn et al (2004); Singh and Verma (2010) estiman que en una tronadura sólo una pequeña parte de la energía potencial disponible en el explosivo se manifiesta efectivamente en trabajo útil; es decir, en fracturamiento, fragmentación y desplazamiento del macizo rocoso. La proporción de energía convertida en trabajo útil varía entre el 4% y el 22 % de la energía disponible. Las pérdidas de energía están siempre presentes y empiezan al momento de la detonación.

Según múltiples estudios, las principales variables controlables por el operador para obtener la mayor eficiencia posible de la tronadura, dentro del rango indicado (4 a 22%), son: (i) la cantidad de carga explosiva por retardo; (ii) el tipo y distribución del explosivo; (iii) los tiempos de cada retardo y (iv) el confinamiento de la carga explosiva.

En el presente artículo desarrollaremos en profundidad la justificación teórica, y mostraremos algunos ensayos en terreno que prueban empíricamente, las ventajas que significa la incorporación de un producto retenedor innovador -incorporado al mercado con el nombre comercial de Tacos Retenedores de Alto Rendimiento TN-, los cuales permiten mejorar en forma significativa el confinamiento de la carga explosiva dentro de los tiros, propiciando un incremento relevante en la eficiencia de las tronaduras, mejorando en forma importante la productividad en la construcción de túneles y galerías para la minería subterránea.

2.4 Rol del Taco Retenedor

Son muchos los respaldos que indican la poca energía liberada del explosivo que es realmente útil para fracturar la roca y que, con un mejor control de la energía útil liberada, pudiesen alcanzarse diferenciales significativos en términos de fragmentación. Estos estudios relevan la necesidad de utilizar agentes retenedores que generen un confinamiento eficaz del tiro, con el fin de aprovechar una mayor parte de la energía disponible del explosivo, lo que es muy importante desde el punto de vista de la operación de una faena minera de desarrollo horizontal.

El objetivo central del Taco Retenedor en la tronadura es maximizar el aprovechamiento de la energía del explosivo, generando el adecuado confinamiento de la carga dentro del tiro, de manera de obtener la mayor eficiencia posible de la tronadura; lo más cercano que se pueda al 22% de la energía potencial disponible en el explosivo.

La teoría de la detonación establece que los fenómenos activos (ondas de choque y presión de los gases), están en relación directa con la energía química contenida en el explosivo, pero especialmente con la forma y velocidad con que es liberada.

En efecto, como se ha señalado, en la primera fase de la tronadura la función de la energía de la onda de choque es pre-acondicionar la roca, a través de la inducción de numerosas fracturas radiales. Las primeras grietas radiales se forman en un lapso de 1-2 milisegundos.

Lo relevante en este punto es reconocer que, cuando la onda de choque enfrenta la interfaz del Taco Retenedor, se generan fenómenos de reflexión y transmisión de ondas de tracción que dan el inicio a la fragmentación del macizo.

La onda de choque no es por sí sola responsable de la fragmentación de la roca, pero sí provee las condiciones básicas para la última etapa del proceso, que es donde la masa de roca comprendida entre los tiros y la cara libre cede, liberándose violentamente la energía de deformación almacenada en la roca, de un modo similar a como lo haría un resorte que se suelta súbitamente.

2.5 Partición de energía en una detonación confinada

La energía del explosivo puede ser dividida en dos partes:

1. La energía de choque
2. La energía de los gases

Cuando el explosivo es iniciado, este comienza a incrementar la presión de barreno en un tiempo proporcional a la razón entre el largo de columna y la Velocidad de Detonación (VoD) del explosivo en reacción.

La VoD corresponde a la velocidad con que se propaga la reacción química a lo largo de la columna explosiva durante el proceso de detonación. De ella depende la potencia que alcanza el explosivo para romper la roca y está determinada principalmente por la composición del explosivo, diámetro del tiro, densidad del explosivo, grado de confinamiento de la carga, iniciación y envejecimiento del explosivo

Esto implica que el tiempo mínimo de retención que debe tener un Taco Retenedor es al menos:

$$T_{min}(s) = Lc(m)/VoD\left(\frac{m}{s}\right)$$

Este tiempo mínimo implica que el Taco Retenedor debe estar debidamente diseñado para soportar temperaturas del orden de 1400°C hasta los 2400°C y presiones de detonación desde 1 a 8 [GPa].

2.6 Relevancia del Material del Taco Retenedor

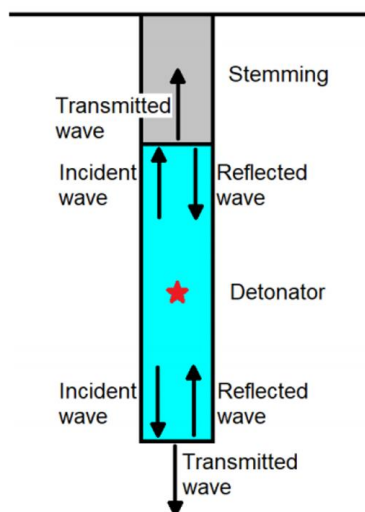


Figura 1 Reforzamiento de ondas, asociado a uso de Taco Retenedor

En la figura 1, se puede observar que, cuando la onda transmitida atraviesa el material del Taco Retenedor y llega a la cara libre, cierta cantidad de esa energía retorna al pozo, en formas de ondas Taylor o de rarefacción. Estas interacciones son las encargadas de focalizar y reforzar las amplitudes que se generan en la historia de presión-tiempo del pozo.

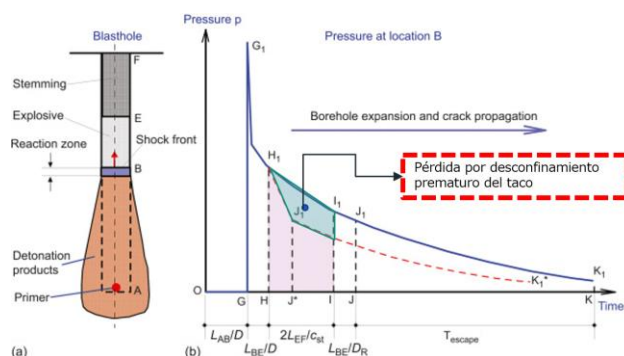


Figura 2 Historia Presión-Tiempo. Detonación de un pozo de control

En la figura 2, se aprecia una curva de Presión – Tiempo, en la cual se evidencia el trabajo de un buen elemento retenedor.

El área encerrada por los puntos H1, J1 e I1 representan el costo de oportunidad que se genera cuando no se gestiona adecuadamente el tiempo de retención, el cual es directamente proporcional con la eficiencia energética que puede lograrse al interior de un pozo; es decir, aprovechar un porcentaje de la energía potencial del explosivo mucho más cercano a valores del 22%, que del 4%.

Esto demuestra, en forma teórica, la enorme importancia que tiene un comportamiento adecuado del material del Taco Retenedor. Para obtener la máxima eficacia posible de cada tronadura, no da lo mismo el cómo y con qué materiales están contruidos los Tacos Retenedores que confinan la carga en el pozo.

El desafío es, entonces, buscar los materiales y la forma de construir los Tacos Retenedores de manera tal que aseguren un Alto Rendimiento en la fase de la detonación donde debe reflejar las energías de choque y presión, con el fin de aprovechar el máximo de la energía del explosivo en romper la roca hacia adelante del tiro, evitando las fugas de las ondas de choque desde el interior del pozo.

Con los Tacos Retenedores de un diseño y material adecuado se logra no sólo una mayor eficiencia del explosivo en cada disparo,

también se traduce en mayores avances por cada Ciclo Minero, lo que a la larga implican significativos ahorros de tiempo y costos en los desarrollos horizontales, impactando directamente en las utilidades de las empresas contratistas que realizan esta labor y beneficiando a los propietarios de los yacimientos por los menores plazos en que pueden iniciar su explotación y, con ello, a la sociedad en su conjunto.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Alcance y Objetivo del Caso de Estudio

La propuesta en este Caso de Estudio es exponer algunos detalles sobre: (i) el diseño de los Tacos de Alto Rendimiento TN, el cual está basado en evidencia científica, para mejorar el tiempo y tipo de confinamiento de los tiros; (ii) la fabricación en forma industrial de los Tacos de Alto Rendimiento TN, en base a una mezcla controlada de arcillas y fluidos, utilizando la mejor tecnología disponible; y (iii) los resultados preliminares de pruebas industriales realizadas con los Tacos de Alto Rendimiento TN, en frentes de desarrollo horizontal de minas subterráneas de la mediana y gran minería del cobre y oro, de Chile y Argentina.

Todo esto, con el objetivo de dar a conocer a un público especialista y actores relevantes de la industria de la minería subterránea, cómo este nuevo producto fabricado en Argentina y disponible para el mercado chileno e internacional, puede incrementar en forma significativa la productividad del ciclo minero, maximizando el trabajo de las energías de choque y gases que se producen en la descomposición del explosivo utilizado en la tronadura.

3.2 Consideraciones Iniciales

3.2.1. Oportunidad de Innovar en el Diseño y Fabricación de Tacos Retenedores

Para partir, diremos que el nulo costo de los materiales que frecuentemente se utilizan para el confinamiento de la carga de explosivo en las tronaduras de desarrollos horizontales, tales como: cartón mojado, barro, gravilla o *cuttings* de perforación (los que se encuentra de forma gratuita en la frente), y el bajo costo de los tacos de greda estándar utilizados en los casos más avanzados, no ha permitido el desarrollo de un mercado competitivo de Tacos Retenedores que

incentive la innovación y el desarrollo de nuevos productos, para incorporar mayor tecnología en el diseño y fabricación de este tipo de elementos de confinamiento empleados en tronaduras en la construcción de túneles y galerías.

Sin embargo, este razonamiento sobre los costos de los Tacos Retenedores es totalmente engañoso, puesto que un ahorro dentro de los costos del confinamiento en la tronadura que -según lo hemos demostrado en el punto 2 de este artículo- es tan clave para mejorar la eficiencia del disparo, juega totalmente en contra del objetivo central de todo el ciclo minero, que es lograr el mayor avance, en el menor tiempo y al costo más bajo posible.

Es más, utilizando datos referenciales recopilados por los autores, se puede afirmar que en promedio el costo total del confinamiento de una frente con Tacos Retenedores de Alto Rendimiento es del orden del 1% del precio de venta de cada metro de avance logrado en la tronadura; por lo tanto, cualquier mejora en el avance o en otros parámetros de calidad de la tronadura por sobre este mínimo valor justifica plenamente la inversión ($ROI > 1$).

3.2.2. Decisión de Innovar y Emprender

De esta manera, los autores advirtieron una oportunidad de innovar en la ciencia detrás del diseño, fabricación, pruebas y comercialización de Tacos Retenedores de Alto Rendimiento, que habiliten el aprovechamiento de las unidades extras de energía potencial disponibles en el explosivo, asegurando mejoras en:

1. Tiempo de retención
2. Tipo y calidad de sellado

Cumpliendo estos dos parámetros, se puede asegurar un incremento en la capacidad de desarrollar más trabajo útil a partir del mismo explosivo, lo que se traduce rápidamente en un mayor nivel de fracturamiento, fragmentación y desplazamiento del macizo rocoso durante el evento de detonación, lo que trae consigo mejoras relevantes en la eficiencia de la tronadura y de todo el ciclo minero.

3.2.3 Algo de Historia

Conscientes de la importancia de un buen Taco Retenedor, fabricado de la forma correcta y con los materiales adecuados, e interesados en alcanzar mayores rendimientos de las tronaduras, dos de los autores de este artículo – uno, un experimentado Ingeniero en Minas con especialización en explosivos, y el otro, un

destacado empresario, académico y candidato a doctor en Geología-, iniciaron en el año 2014 en la República Argentina la elaboración y pruebas de un nuevo diseño de Taco Retenedor, que denominaron Taco de Alto Rendimiento TN, los cuales son fabricados en base a distintas arcillas y minerales disponibles en la zona de San Juan, Argentina.

Las primeras búsquedas para encontrar materiales adecuados para fabricar los tacos, se realizaron entre los distintos tipos de arcillas y materiales utilizados en la preparación de hormigón ligero para la construcción. Las investigaciones partieron por encontrar una mezcla específica de minerales que: (i) tuviera una estructura cristalina porosa; (ii) con una baja temperatura de fusión; (iii) que permitiera movilizar, es decir, retener y entregar, fácilmente la humedad; y (iv) que fueran mucho más ligero que la arena. Se evitó utilizar todo tipo de materiales que contuvieran barro, ya que éste disminuye la resistencia de la mezcla y su estructura no permite movilizar fácilmente la humedad.

Finalmente, después de innumerables intentos, el año 2019 llegaron a una mezcla óptima de arcillas, basada en aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos, que al deshidratarse desarrollan una estructura porosa con diámetros de poro de entre 3 y 10 Angstroms.

3.3 Diseño de los Tacos Retenedores de Alto Rendimiento TN

Los cuatro elementos clave que, al menos a criterio de los autores, deben ser considerados en el diseño de un Taco Retenedor de fabricación industrial, que apunte a un Alto Rendimiento de la energía del explosivo, son:

1. Una granulometría específica conocida, de manera que pueda ser repetida y controlada durante el proceso de fabricación
2. Una mezcla de materiales que tenga un alto grado de adherencia a las paredes del tiro, lo que es particularmente útil al momento de introducir el material del taco al interior del pozo
3. Un bajo punto de fusión, de modo que, al momento de la detonación, el material pueda rápidamente fundirse e integrarse al macizo rocoso para asegurar el máximo sellado del tiro. Le denominamos “sellado térmico”.

4. Un cuerpo rígido que pueda ser fácilmente empaquetado y trasladado hasta la frente y para que pueda ser manipulado por operador al momento de introducir el taco en el pozo.

3.3.1. Granulometría

La importancia e impacto de la granulometría del material del Taco Retenedor obedece a un efecto de ralentización de la onda de choque, producto de la energía que le quitan las moléculas del material del Taco al paso de la onda (fricción interna). Este efecto es similar al que ocurre cuando medimos el trabajo que hace una persona cuando se desplaza en un camino de cemento versus una que camina o corre en una playa con arena muy fina (figura 3)

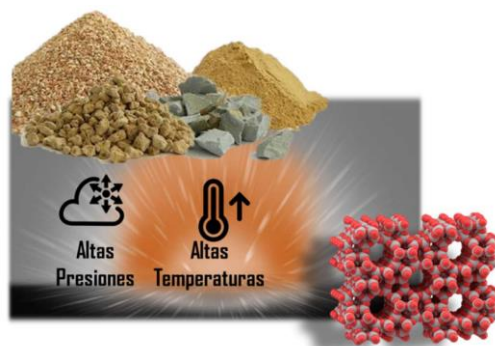


Figure 3 Materiales de estructura ordenada.

3.3.2. Adherencia a las Paredes del Tiro

Por su parte, la adherencia es una propiedad crítica en el correcto funcionamiento del Taco Retenedor, la cual se consigue reconociendo las características físicas y la estructura cristalina de la mezcla de materiales que componen el Taco. Se buscan materiales que tengan su estructura atómica ordenada y porosa, con diámetro de poro entre 3 y 10Å de diámetro.

3.3.3. Punto de Fusión y “Sellado Térmico”

El sellado térmico asociado a la mezcla específica de aluminosilicatos lograda en estos tacos retenedores, permite un control único de las reacciones ocurridas en el frente de detonación. El calor es gestionado por las moléculas de aluminio las cuales funcionan como puntos calientes que comunican este calor a moléculas de mayor tamaño y distinta capacidad calorífica. Este proceso se equipara con el calor del frente y expande el volumen de la sección transversal expuesta al contacto. De esta manera, se produce un sellado a alta presión, lo que permite que continúe actuando la energía que el explosivo sigue aportando al

macizo rocoso, lo que facilita los procesos de fractura, fragmentación y desplazamiento.

El bajo punto de fusión de la mezcla de arcillas es el encargado de maximizar aún más el tiempo de acción del sellado térmico de la cabeza del taco, ya que quita calor al sistema y lo convierte en tiempo de retención.

3.4. Fabricación

3.4.1. Composición de los tacos

Los Tacos Retenedores de Alto Rendimiento TN se fabrican industrialmente en base a un mix determinado de arcillas, extraídas de minas de la zona de San Juan (Argentina), que le otorgan un contenido mayoritario de óxidos de Silicio y Aluminio, en una proporción aproximada de 60% de SiO_2 y 15% de Al_2O_3 , con lo cual se aseguran las características de adherencia y sellado térmico buscadas; lo que se compara con la proporción de 30% de SiO_2 y 10% de Al_2O_3 que tienen los tacos de greda estándar.

Las características fisicoquímicas del mix arcilloso de aluminosilicatos con los cuales están diseñados los Tacos de Alto Rendimiento TN aseguran:

- Fusión y resistencia controlada
- Bajo contenido de residuos

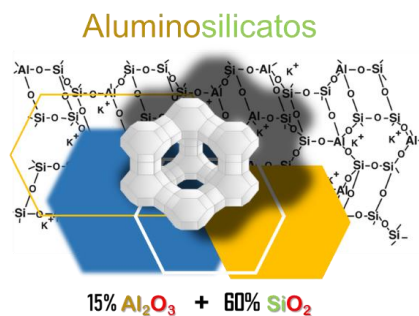


Figure 4 Proporción de aluminosilicatos en mezcla.

Además, en la elaboración de los Tacos TN se incluye un compost de agua y elementos fluidos biodegradables (hasta alcanzar un 25 - 30% de humedad) que le otorgan al producto terminado:

- Plasticidad
- Ductibilidad
- Avidez a los bordes de contacto

3.4.2. Morfología de los Tacos TN

Los Tacos TN están contruidos de manera tal de disponer de tres secciones totalmente diferenciadas, cada una de las cuales está

destinada a cumplir una función específica, tal como se ilustra en la figura 4.



Figure 4 Esquema Prototipo funcional de Tacos TN

La Cola del Taco: está construida de un material arcilloso totalmente seco, pensado tanto para facilitar la manipulación del operario -al colocar el taco-, como para asegurar la transferencia de la humedad hacia la boca del tiro, en el momento de la detonación. Con esto se logra mejorar la velocidad y calidad de la explosión sin perder temperatura.

El Cuerpo del Taco: está construido por un justo equilibrio entre material sólido (mix especial de arcillas) y fluido, de manera de alcanzar la mayor plasticidad, ductibilidad y avidez a los bordes, asegurando máxima adherencia del material de confinamiento a las paredes del tiro.

La Cabeza del Taco: siendo el área de fusión y deformación, está elaborada en base a una mezcla de mineral sólido y fluido, de manera que su rápida solidificación en la etapa de fusión provoca el “sellado térmico” reflejando la energía de las ondas de choque y gases hacia la roca.

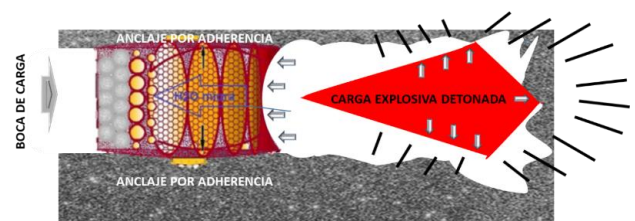


Figure 5 Esquema de Comportamiento durante la Detonación

Etapas en el momento de la detonación:

1. Fusión de la Cabeza y sellado instantáneo
2. Deformación plástica del Cuerpo
3. Contención de la energía
4. Reforzamiento de ondas.

3.5. Resultados Preliminares de Pruebas Industriales

3.5.1. Pruebas en Minas de Oro y Cobre – República Argentina

Las primeras pruebas con los Tacos de Alto Rendimiento TN (en adelante simplemente, Tacos TN) se comenzaron a realizar a partir del

año 2017, en frentes de desarrollo horizontal de minas subterráneas de cobre y oro en la República Argentina.

Sólo con un fin ilustrativo, en la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en mediciones de avance realizadas en una mina de oro de la provincia de Santa Cruz, Argentina, en el mes de noviembre de 2018.

Tabla 1 Resultados Obtenidos en Mediciones de Avance (Mina de oro, Provincia de Santa Cruz, Argentina)

| | Eficiencia Promedio | |
|-----------------|---------------------|----------|
| | Sin Tacos | Tacos TN |
| Nivel 1 | 88% | 96% |
| Acceso Nivel | 90% | 95% |
| Rampa Principal | 90% | 99% |
| PROMEDIO | 90% | 97% |

En este caso, los ensayos se hicieron en tres frentes diferentes, denominados aquí como Nivel 1, Acceso a Nivel y Rampa Principal. Se tomaron seis mediciones, tres sin la colocación de tacos y otras tres con los Tacos TN, sin modificar ninguna otra variable. Como conclusión, en todas las frentes se pudo constatar que el uso de los Tacos TN brinda un mayor avance. Las mediciones mostraron mayores avances de hasta un 9%, con un valor promedio sobre de 7,35% y un mínimo de 5,25%. Además, durante las pruebas se pudieron constatar otras importantes ventajas para el ciclo minero, tanto para el contratista como para el mandante: (i) marinas más homogéneas; (ii) menor proyección de material; (iv) menor tamaño de fragmentación; (iv) desaparición de restos de explosivo sin detonar, etc.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de ensayos realizados bajo condiciones controladas, para medir la velocidad con la que se propaga la reacción química a lo largo de la columna explosiva durante el proceso de detonación (VOD), comparando el resultado en el uso de tacos de greda tradicionales y los Tacos TN, utilizando como explosivo Emulsión Encartuchada y Emulsión a Granel. Las mediciones se realizaron con equipo Shot Track.

Tabla 2 Mediciones de VOD (m/s)

| | Explosivo | |
|--|-----------------------|-------------------|
| | Emulsión Encartuchada | Emulsión a Granel |
| | | |

| | | |
|----------------|-----------|-----------|
| Cartón | 3.708 m/s | 3.066 m/s |
| Tacos de Greda | 4.450 m/s | 3.679 m/s |
| Tacos TN | 5.512 m/s | 4.419 m/s |

3.5.2. Pruebas en la División El Teniente de Codelco – Chile

En marzo de 2021 comenzó a realizarse en Chile una campaña de pruebas (*demoblast*) con los Tacos TN. Específicamente, la campaña incluyó pruebas en tres minas de la División El Teniente de Codelco; una correspondiente a un proyecto de desarrollo minero, como es el caso de la mina Andesita y otras dos, en desarrollos horizontales de preparación minera, correspondientes a las minas Esmeralda y Recursos Norte. Las empresas contratistas que ejecutaron las pruebas fueron OSSA en Andesita y Constructora Gardilic en las minas Esmeralda y Recursos Norte.

Con el fin de tener un punto de comparativa se registraron datos de los disparos anteriores (sin el uso de Tacos TN), midiéndose el avance de cada disparo utilizando topografía y se evaluó en terreno la sobre excavación y la granulometría de las marinas. Las *demoblast* se realizaron reemplazando los tacos tradicionales de greda (en aquellas faenas que los utilizaban) por Tacos TN, manteniendo todas las demás variables constantes.

Es decir, las pruebas se hicieron manteniendo constantes el método de perforación y el explosivo que usan las empresas contratistas, por lo tanto, cualquier diferencia entre los disparos anteriores y posteriores al uso de los Tacos TN, son atribuibles al uso de tacos.

En la mina Andesita se hicieron disparos controlados usando como explosivo emulsión encartuchada. Además de la mejora en el avance, reflejada en la Tabla 2, se evidenció una mejora sustancial en la calidad y tamaño de las marinas. Además, se pudo constatar una disminución en los tiros quedados de contorno.

Tabla 3. El Teniente, Mina Andesita

| Mina | Eficiencia Promedio | |
|----------|---------------------|----------|
| | Tacos de greda | Tacos TN |
| Andesita | 95% | 99% |

En cuanto a los resultados preliminares, la empresa contratista Gardilic, con la que se hicieron alrededor de 30 disparos, reportó mejoras de hasta un 20% respecto a disparos anteriores, lográndose una mejora promedio entre todos los *demoblast* realizados en esta campaña entre un 4 y 8%. En sobre excavación se reportaron mejoras de hasta un 30% respecto a la sobre excavación que tenían sin el uso de Tacos TN.

Tabla 4. El Teniente, minas Esmeralda y Recursos Norte

| | Eficiencia promedio | |
|-----------------|---------------------|----------|
| | Sin tacos | Tacos TN |
| Esmeralda* | 95% | 99% |
| Esmeralda ** | 79,50% | 92% |
| Recursos Norte* | 90% | 98% |

* Emulsión bombeable

** Emulsión encartuchada

CONCLUSION

En el presente artículo se realizó una discusión de los fundamentos teóricos que relevan la importancia de un buen confinamiento de los tiros para obtener la máxima transferencia de trabajo útil de la energía potencial del explosivo, con el fin de obtener un mayor fracturamiento, fragmentación y desplazamiento del macizo rocoso durante la tronadura.

Luego se presentaron los fundamentos científicos que respaldan el diseño de los Tacos de Alto Rendimiento TN, así como la fabricación en forma industrial de este producto, realizado en base a una mezcla controlada de arcillas del tipo aluminosilicatos y fluidos biodegradables, para mejorar el rendimiento de la interfaz que se encarga de retener la energía del explosivo.

Finalmente, se presentan los resultados preliminares de pruebas industriales realizadas con los Tacos TN en frentes de desarrollo horizontal, principalmente en tres minas de la División El Teniente de Codelco. Durante estas pruebas se mantuvo el método de perforación y se utilizaron los mismos explosivos que las empresas venían utilizando con anterioridad. Los resultados muestran que el empleo de los tacos adecuados permite aprovechar de mejor manera la gran cantidad de energía presión que genera la detonación de diferentes explosivos comerciales.

En base a estos resultados preliminares, en los que se observan importantes mejoras en la eficiencia del avance de cada disparo, una reducción de la sobre excavación y buena calidad de las marinas, permiten concluir que la incorporación de este innovador producto, diseñado en forma científica y fabricado a escala industrial, es una excelente inversión, de muy bajo riesgo económico y que impacta en forma positiva en la productividad del ciclo minero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Instituto de Ingenieros de Minas de Chile por permitir difundir este importante desarrollo. A Armando Olavarría Couchot por su apoyo y confianza en nuestro equipo. Y a Patricio Arce y la División El Teniente de Codelco, por recibirnos para iniciar las pruebas en Chile.

REFERENCES

- Riika Ilitalo, 2015 *effect of detonator position on fragmentation at kevitsa open pit mine*. Thesis Mining engineer and mineral processing, 189 p.
- Holter, K.G. 2015. *Properties of sprayed concrete linings*. Thesis (PhD in Engineering geology), Norwegian University of Science and Technology, 235 p.
- Jakobsen, P.D., Olsen, V., Hauknes, I., Northug, J., Wetlesen, T. 2012. *Contour quality in blasted tunnels*. Norwegian Tunnelling Society NFF. Oslo: Helli Trykk. 52 p.
- Maidl, B. 2013. *Handbook of tunnel engineering I: Structures and methods*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn. 265 p.
- Nilsen, B., Henning, J.E. 2009. *Thirty years of experience with subsea road tunnels*. In: Proceedings of the 5th symposium on strait crossings, Trondheim: Tapir, pp 35-44.
- Nilsen, B. 2014. *Characteristics of water ingress in Norwegian subsea tunnels*. Rock Mechanics and Rock Engineering 47 (3), 933-945.