

Pedro Luis Lozada Paucar¹, Juan Manuel Prado Monge²

¹ Orica Peru, Lead Technical Services, Lima (Pedro.Lozada@orica.com)

² Orica Peru, Manager Technical Services, Lima (Juan.Prado@orica.com)

RESUMEN

El objetivo que hoy se les exige a las técnicas de voladuras controladas es el de minimizar el daño al macizo rocoso remanente protegiendo la integridad de las paredes de la mina y asegurando a la vez la calidad de la fragmentación del material volado facilitando su extracción.

Encontrar este equilibrio resulta estar entre los tres principales desafíos que enfrentan las grandes minas a cielo abierto, ya que deben lograr la estabilidad de la mina, dando cumplimiento al diseño de taludes, manteniendo al mismo tiempo buenos resultados en términos de fragmentación y productividad de sus equipos de carguío. Las principales restricciones tienen que ver con el manejo de condiciones geológicas desfavorables, presencia de agua, diámetros de perforación y productos explosivos limitados disponibles, así como la administración de los tiempos de perforación y programación de las voladuras, entre otros.

Para el control de taludes, adicional al precorte, por lo general los diseños de voladura incluyen filas amortiguadas (buffer), perforadas en menor diámetro y cargadas con menos kilos de explosivo que los taladros de producción, el objetivo es reducir el factor de carga (Kg/ton), para lograr una menor influencia energética sobre las paredes atenuando así el daño. Sin embargo, por lo general esto resulta en la necesidad de usar longitudes de cargas muy pequeñas respecto a la altura del banco (un tercio o menos), así como reducir la geometría de las mallas, incrementando la cantidad (m/ton) y los costes de perforación.

Esta técnica tradicional de reducir el factor de carga en las filas buffer, tiene la principal limitante de no poder distribuir la energía del explosivo a lo largo de toda la columna, generando problemas de fragmentación principalmente en la zona del taco, mediciones realizadas por Orica en sus operaciones hablan de un incremento en el P80 de al menos 30% en la zona buffer, asociado a esta condición. Para mejorar la distribución energética se pueden emplear técnicas de carguío en deck o cargas desacopladas verticalmente, no obstante, no se puede aplicar bajo

condiciones de agua y se requiere de un riguroso control en la calidad de la implementación para evitar desviaciones, lo cual incrementa los tiempos operacionales de carguío, así como el uso de recursos.

En este sentido, el uso de explosivos menos energéticos y de menor densidad, es una mejor alternativa, ya que por un lado permiten lograr columnas de carga completas en las filas buffer asegurando una fragmentación homogénea y por el otro reducen la influencia energética hacia los taludes disminuyendo considerablemente los niveles de vibraciones generados. Al tener disponible menos energía por kilo de explosivo (Mj/Kg) y menos carga por metro lineal (Kg/m), permite manejar mayores factores de carga y longitudes de columna explosiva, flexibilizando las opciones de diseño de perforación y carguío, sin comprometer el cuidado de los taludes.

1. Introducción

En el presente artículo, se muestra una metodología desarrollada por Orica para poder evaluar y cuantificar en forma experimental el comportamiento vibracional atenuado de los explosivos de baja energía, bajo las condiciones particulares de cada operación. Lo anterior junto con la aplicación de herramientas de modelamiento avanzado, permiten ajustar los diseños de voladura controlada, logrando un buen control en la estabilidad de taludes y al mismo tiempo manteniendo los resultados de fragmentación.

Con esta metodología se ha podido demostrar en terreno que los explosivos de menor energía dependiendo de su densidad, llegan a alcanzar valores energéticos (Mj/Kg) hasta 30% menores que los explosivos estándar y una reducción del nivel de vibraciones generados de hasta un 60% para ciertas condiciones de macizo rocoso, lo cual permite lograr taludes bien conformados, estables y sin daños.

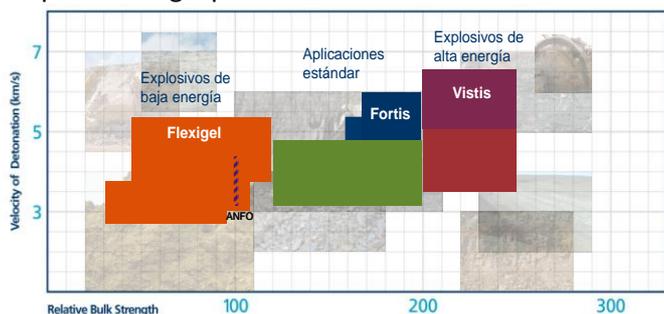
2. Explosivos de baja energía

Orica ha desarrollado explosivos de densidad variable orientado al control de paredes, como la línea

Flexigel™. Flexigel™, es un explosivo a granel, en base a emulsión pura y sensibilizador sólido de poliestireno expandido (EPS). En el mapa de energía de la Figura 1, donde se ordenan una gama de productos explosivos de acuerdo con su aplicabilidad y performance energético en términos de potencia relativa en volumen (RBS) y velocidad de detonación (VOD). Flexigel™ aparece detrás del ANFO con menores niveles energéticos.

Figura1.

Mapa de energía productos Orica MS.



Nota: Actualizado al 2020

Fuente: Technical data Orica MS

2.1. Características técnicas

- Su característica principal es que puede ser fabricado en un amplio rango de densidades. De 0.50 [g/cc] hasta 1.10 [g/cc]
- No es necesario hacer modificaciones de ningún tipo a los camiones fábrica (MMU).
- Es 100% resistente al agua.
- Puede utilizarse en taladros secos, con agua o desaguados.
- Producto que puede ser bombeado o vaciado, dependiendo de la densidad de trabajo.
- Alcanza velocidades de detonación entre 2,500 m/s a 4,600 m/s.
- No emplea Nitrato de Amonio, no usa Diesel.
- No necesita tiempo de gasificación para colocar el taco a los taladros (Versión no gasificado).

Figura2.

Imágenes Flexigel™ en densidades más comunes.



Fuente: Technical data Orica MS

2.2. Análisis comparativo

Tanto en términos de densidad (g/cc) así como de energía disponible (Mj/kg), Flexigel™ tiene una ventaja diferenciadora respecto de los explosivos estándar Heavy ANFO (HA). Las Figuras 3 y 4 muestran un análisis comparativo entre la mezcla HA64 (60% emulsión, 40% ANFO) y Flexigel™ en diferentes densidades, realizado bajo similares condiciones de perforación y terreno.

2.2.1. Densidad de carga lineal (Kg/m)

A medida que la densidad del explosivo decrece, la densidad de carga lineal se reduce dentro del taladro. En el ejemplo de la Tabla1 para un diámetro de 9 7/8" (251mm) la reducción se da hasta en 37%, pasando desde 63.3 hasta 39.6 kg/m al comparar el caso base con una densidad inicial de 1.28 con el caso 3 con Flexigel™ a una densidad de 0.8 g/cc. Es decir, esto permite lograr la misma longitud de carga utilizando menos kilos de explosivo en el taladro, lo cual se puede traducir en un ahorro si fuera el caso.

Tabla 1.

Análisis comparativo, densidad de explosivo (g/cc), longitud de carga (m), densidad de carga Lineal (kg/m).

COMPARACIÓN DE DISEÑOS DE CARGUÍO BUFFER - FLEXIGEL				
PARAMETROS DE MALLA Y CARGUÍO	DISEÑO BASE	CASO 1	CASO 2	CASO 3
BURDEN (m)	3.8	3.8	3.8	3.8
ESPACIAMIENTO (m)	4.0	4.0	4.0	4.0
DENSIDAD ROCA (g/cm3)	2.6	2.6	2.6	2.6
LONGITUD DE TALADRO (m)	16.0	16.0	16.0	16.0
AIR DECK (m)	7.5	5.3	4.1	2.4
TONELAJE (t)	632	632	632	632
DIAMETRO (pulg)	9 7/8	9 7/8	9 7/8	9 7/8
EXPLOSIVO	HA64 (Advrg)	FLEXIGEL 100	FLEXIGEL 90	FLEXIGEL 80
DENSIDAD EXPLOSIVO (g/cm3)	1.28	1.00	0.90	0.80
LONGITUD DE CARGA (m)	4.0	6.2	7.4	9.1
DCL (kg/m)	63.3	49.4	44.5	39.6
CARGA /TALADRO (kg/tal)	253	307	329	360
LONGITUD DE TACO (m)	4.5	4.5	4.5	4.5
FP (kg/t)	0.40	0.48	0.52	0.57
ENERGIA EFECTIVA (MJ /kg)	2.65	2.19	2.03	1.87
FACTOR DE ENERGÍA MJ/t	1.06	1.06	1.06	1.06

Nota: El análisis se realizó manteniendo el mismo factor de energía por tonelada (1.06 Mj/ton) para todos los casos.

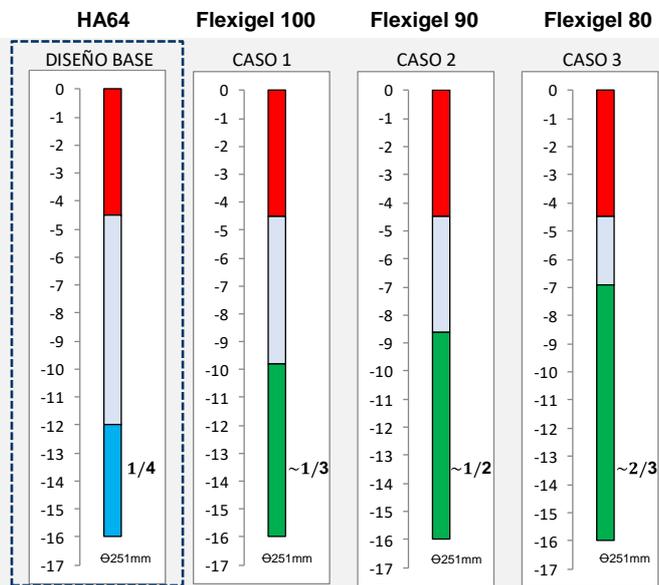
2.2.2. Energía disponible (Mj/kg)

Visto desde otra perspectiva, al requerir mantener los mismos niveles energéticos (factor de energía) para asegurar los resultados de fragmentación. Flexigel™ al tener menor energía efectiva y menor densidad, permite lograr mayores longitudes de carga y una mejor distribución de la energía disponible a lo largo de la columna como se observa en la Figura 3. Pasando de una altura de influencia del explosivo en relación con la altura total del taladro de sólo 1/4 (diseño base), a casi 2/3 (caso 3), logrando mucho mayor influencia hacia la

parte superior del banco y zona del taco, donde por lo general surgen los problemas con la fragmentación.

Figura3.

Incremento longitud de carga (m) por reducir la densidad, manteniendo el mismo factor de energía (Mj/ton).



Fuente: propia.

3. Análisis experimental comparativo

3.1. Pruebas de voladura para la obtención de Modelos de Vibraciones

En la industria de los explosivos, es ampliamente conocida la aplicación de voladuras especiales que permitan generar modelos de vibraciones, ya sea a campo cercano o lejano dependiendo del tipo y campo de aplicación que se desarrolle.

Estas pruebas especiales permiten la asociación al 100% de cada peak de vibraciones proveniente de cada taladro disparado en forma efectiva. Al ser pruebas acotadas permiten asegurar un control riguroso de la perforación y la calidad en el carguío de explosivo. Así mismo, mediante el uso de iniciación electrónica se puede asociar con precisión cada peak a cada carga en la secuencia de iniciación diseñada, usando tiempos de retardo lo suficientemente largos y sin dispersión.

De esta manera hoy en día esta metodología permite garantizar una buena calidad en la recopilación de la información y por tanto obtener modelos lo suficientemente representativos del comportamiento vibracional de los sectores en estudio. La Figura 5, muestra el arreglo de la voladura especial desarrollada para recopilar información de vibraciones para el caso Flexigel™.

3.2. Diseño prueba de vibraciones para evaluar performance de explosivo de baja energía.

Se ha diseñado una voladura especial para medir vibraciones en campo cercano, utilizando la metodología de Holmberg & Pearson. La prueba incluirá la comparación de los modelos de vibraciones generados para dos tipos de productos explosivos. Por un lado, uno estándar como es el caso del HA 64 (1.24 g/cc) y el otro de baja energía como es el Flexigel™ 90 (0.9 g/cc), ambos perforados y cargados bajo las mismas condiciones de macizo rocoso. Ver Figura 5.

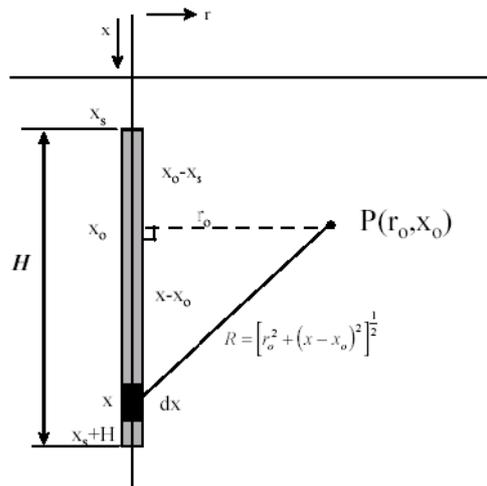
A partir de un análisis comparativo de los resultados de cada modelo, se podrá estimar el grado de atenuación de daño por vibraciones generados por voladuras disparadas con cada tipo.

3.2.1. Modelo de campo cercano - Holmberg & Pearson

La Ecuación 1, muestra el modelo de vibraciones desarrollado por Holmberg & Pearson (H&P) en 1979.

Figura4.

Figura explicativa modelo Holmberg y Persson (1979).



Fuente: Manual de vibraciones Blastechology, 2006.

$$PPV = K * \left(\frac{\gamma}{r_0}\right)^\alpha \left[\varphi + \arctan\left(\frac{r_0 * \tan \varphi - H}{r_0}\right)\right]^\alpha$$

$$PPV = K * [H\&P]^\alpha \quad \text{Ecuación (1)}$$

La ecuación de H&P indica que el factor que tiene el mayor impacto en la vibración y en el daño, no tiene que ver específicamente con peso de la carga por retardo como es evidente en la ecuación de Devine, sino que más bien por la carga lineal, que está controlada por una combinación del diámetro del taladro y densidad de carga (kg/m).

Esta relación muestra que la Velocidad de Partícula Peak (PPV), en un punto del espacio, está dada por la ubicación de este punto respecto de la carga, el tipo de explosivo y la geometría del taladro definida por la concentración de carga lineal "γ" (Kg/m), y más

importante, por las características de atenuación de cada macizo rocoso en particular (constantes K y α). (McKenzie, 2006).

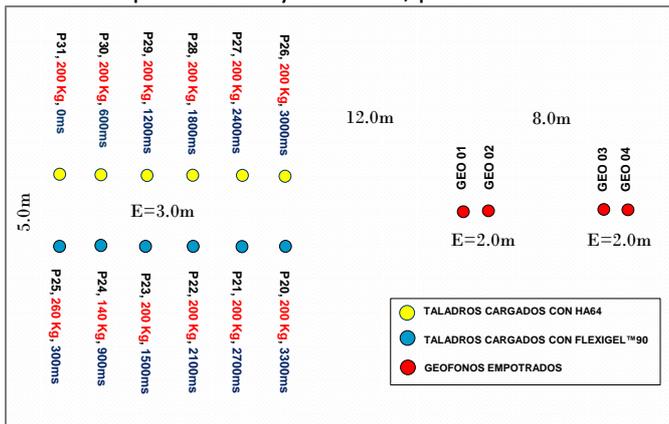
El parámetro α en la ecuación corresponde al coeficiente de atenuación controlado por la roca. Sin embargo, el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo. (McKenzie, 2006). Es decir, para verificar algún efecto de atenuación entre un explosivo y otro, se deberá identificar un cambio sustancial principalmente en el parámetro K.

3.2.2. Diseño de perforación y voladura

Se diseñó la prueba de vibraciones en terreno, para medir y comparar los niveles de vibraciones generados por dos filas de taladros equidistantes, disparados uno de ellos con HA 64 y el otro con Flexigel™ 90, y además monitoreados por 4 geófonos triaxiales empotrados. Ver Figuras 5 y 6.

Figura5.

Diseño de perforación y voladura, prueba vibraciones.



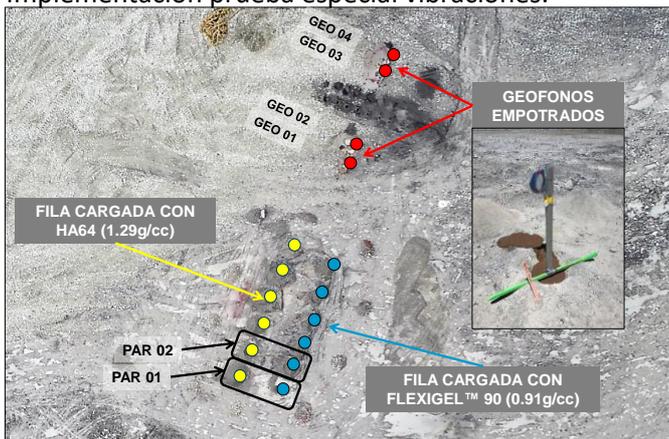
Nota: La prueba fue perforada dentro de un mismo tipo de macizo.

3.2.3. Implementación de prueba de vibraciones

Para el caso del primer par de taladros, se compararon factores de energía equivalente (MJ/t), para el segundo par se comparó longitudes de carga equivalente (m) y para el resto de los pares de taladros se comparó factor de carga equivalente (kg/t).

Figura6.

Implementación prueba especial vibraciones.



Nota: Todos los taladros se perforaron a 16m de longitud. (H=15m).

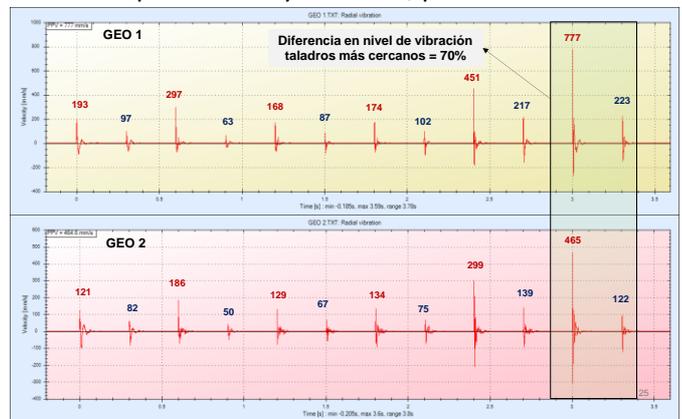
3.3. Registro de vibraciones obtenidos

La Figura 7 muestra los registros de vibraciones capturados post voladura a partir de los geófonos más cercanos 1 y 2. Se observan todos los eventos, lo cual valida la detonación de cada uno de los taladros.

Se observa que, para cada par de taladros comparados, los peak de vibraciones correspondientes a los disparados con Flexigel™ son menores. Con una diferencia de hasta 70% menor para el caso de los taladros más cercanos a los geófonos.

Figura7.

Diseño de perforación y voladura, prueba vibraciones.



Nota: Los peaks con etiqueta de color azul corresponden a los taladros cargados con Flexigel™90.

3.3.1. Diferencia de niveles de vibraciones (mm/s)

La Tabla 2 muestra el detalle del carguío de los taladros de prueba, así como la diferencia en los niveles de vibraciones obtenidos para cada par de taladros comparados, uno de ellos cargados con HA64 y el otro con Flexigel™. La diferencia en niveles de vibraciones evidenciados para cada caso es sustancial, alcanzando reducciones promedio de 51%, 75% y 46% para los taladros cargados con Flexigel™, respecto a los taladros cargados con HA. Este ejercicio valida el potencial de atenuación de daño de los explosivos de menor energía en términos de reducir los niveles de vibraciones generados durante la voladura.

Tabla2.

Comparación niveles de vibraciones HA64 vs Flexigel™ 90.

	TIPO DE EXPLOSIVO	Carga (kg)	TIME (ms)	ID	DIFERENCIA NIVELES DE VIBRACIONES				
					GEO 1	GEO 2	GEO 3	GEO 4	PROMEDIO
PAR 1	HA 64	200	0	P31					
	FLEX90	260	300	P25	-51%	-46%	-54%	-52%	-51%
PAR 2	HA 64	200	600	P30					
	FLEX90	140	900	P24	-79%	-77%	-72%	-71%	-75%
PAR 3	HA 64	200	1200	P29					
	FLEX90	200	1500	P23	-50%	-43%	-37%	-30%	
PAR 4	HA 64	200	1800	P28					
	FLEX90	200	2100	P22	-32%	-21%	-33%	-28%	-46%
PAR 5	HA 64	200	2400	P27					
	FLEX90	200	2700	P21	-53%	-48%	-52%	-47%	
PAR 6	HA 64	200	3000	P26					
	FLEX90	200	3300	P20	-71%	-70%	-60%	-60%	

Nota: Se dispararon en forma intercalada un taladro cargado con HA64 y luego uno cargado con Flexigel™ con retardos de 300ms.

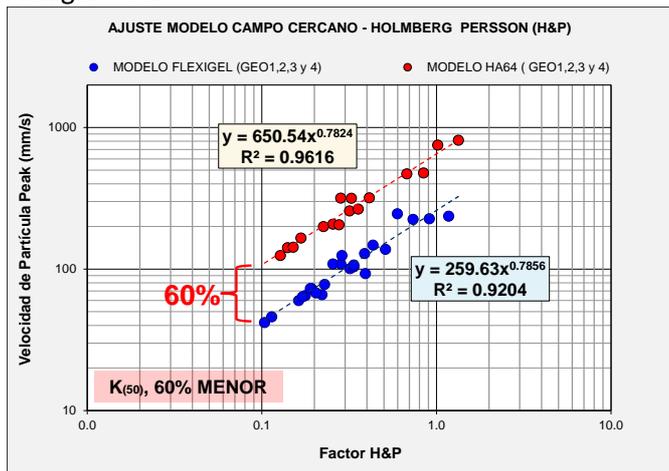
3.3. Modelos de vibraciones obtenidos

Con la información recopilada en la prueba, del mismo modo se pudieron generar dos modelos de vibraciones para cada caso evaluado. Tanto para la fila cargada con explosivo estándar HA64 (Ecuación 2), así como la fila cargada con explosivo de menor energía Flexigel™ 90 (Ecuación 3). La Figura 8 muestra los resultados obtenidos donde se observa similitudes y diferencias al comparar uno y otro modelo ajustado.

$$PPV_{HA64} = 651 * [H\&P]^{0.782} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$PPV_{Flexigel90} = 260 * [H\&P]^{0.786} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Figura8. Comparación de modelos de vibraciones HA64 vs Flexigel™ 90.



Fuente: propia.

Respecto al parámetro α controlado 100% por características de la roca, no se aprecia mayor diferencia, obteniendo valores de 0.782 y 0.786 para el caso del modelo HA64 y el modelo Flexigel™ 90 respectivamente, lo cual valida que el tipo de macizo rocoso como medio de transmisión de las vibraciones fue el mismo para ambos casos.

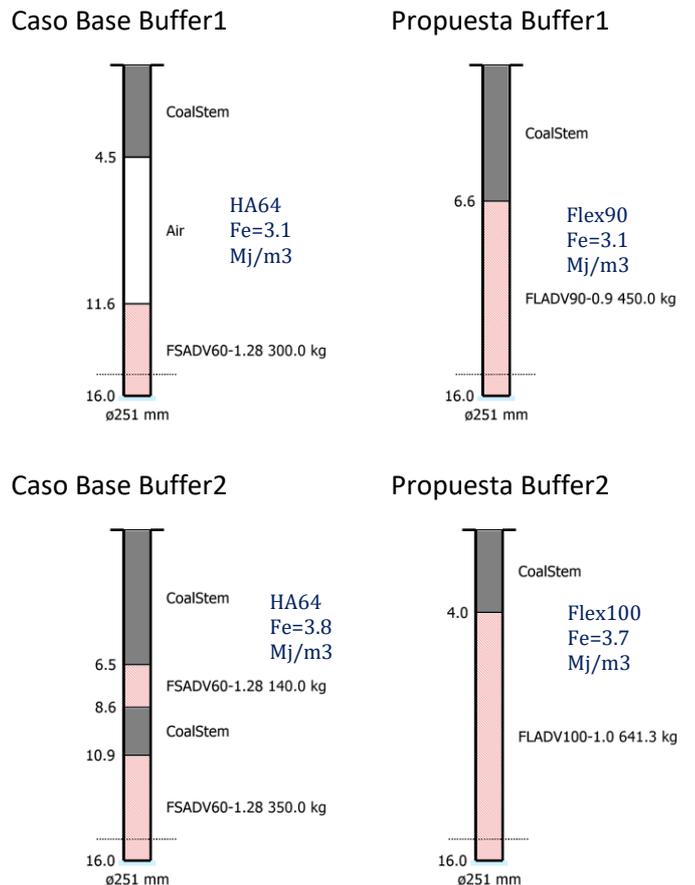
No obstante, respecto al valor de K, controlado por el explosivo y la eficiencia con la cual es capaz de inducir esfuerzo a la roca circundante. Si se observa una diferencia significativa, con valores de 651 y 260 para el caso del modelo HA64 y el modelo Flexigel™ 90 respectivamente. A partir de estos resultados se puede estimar un efecto de atenuación de vibraciones de 60% para el caso del explosivo de menor energía, validando de manera experimental su aplicabilidad y beneficios para su uso en el diseño de voladuras para el control de daño a taludes por vibraciones.

4. Modelamiento de vibraciones con software especializado

Una vez halladas las constantes de comportamiento vibracional (K y α) para ambos productos explosivos (HA64 y Flexigel™ 90) y ajustados los modelos de vibraciones para ambos casos, se procedió a simular propuestas de diseño alternativas con el software de modelamiento avanzado BDA (Blast Design Assistant) incluyendo el uso de explosivo de menor energía Flexigel™ en el diseño de las filas buffer.

Para el análisis se cuidó de mantener similares valores energéticos a los alcanzados con HA64 en el diseño estándar (caso base). Es decir, se utilizó un factor de energía (Mj/t) equivalente pero esta vez usando Flexigel™. Del mismo modo no se realizaron cambios respecto a geometrías de malla y diámetros de perforación. Se simularon tres escenarios, el primero corresponde al caso base con las dos filas buffer cargadas con HA64, el segundo escenario con la Buffer1 cargada con Flexigel™90 y la Buffer2 con HA64 y el tercero con ambas filas buffer cargadas con Flexigel™, la Buffer1 con Flexigel™90 (densidad 0.9 g/cc) y la Buffer2 con Flexigel™100 (densidad 1.0 g/cc). Ver Figura 9.

Figura9. Escenarios analizados, caso base versus propuesta para Buffer1 y Buffer2, impacto de daño a taludes.



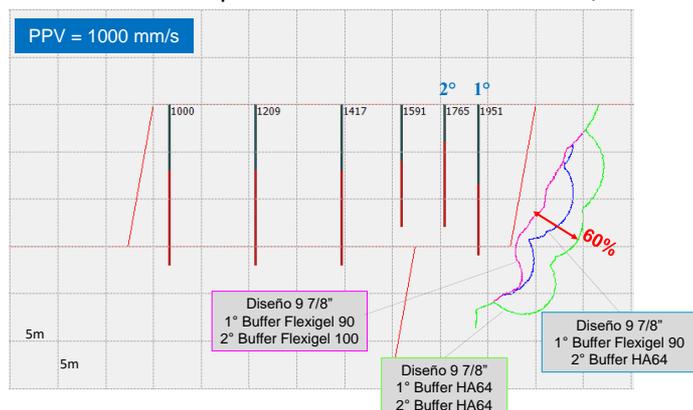
Nota: Análisis para banco de 15m, Buffer1 y Buffer2. Para el caso de la Buffer2, se elimina el deck intermedio y se trabaja a taco de 4m, con un SD (Scaled Depth of Burial) de 1.05.

El análisis entregó que pese a utilizar el mismo factor de energía (Mj/t) el alcance de daño por vibraciones (representado por un PPVc de 1000mm/s) fue menor para los escenarios 2 y 3 cargados con Flexigel™90.

La Figura 10 muestra la comparación de los halos de vibraciones obtenidos bajo los tres escenarios de carguío simulados en el software. El primero por cargar las dos filas buffer con HA64 representado por la línea verde. El segundo, por cargar la Buffer1 con Flexigel™90 y la Buffer2 con HA64 (línea azul) con una reducción de impacto hacia la pared alrededor del 30% y finalmente el tercer escenario por cargar las dos filas buffer con Flexigel™ (línea magenta) con una reducción en el nivel de daño de hasta 60%.

Figura10.

Análisis de daño BDA, HA64 vs Flexigel™, Analizado con una velocidad de partícula crítica PPVc=1000mm/s.



Nota: Análisis para banco de 15m, uso de doble buffer en diámetro 251mm, tamaño de grilla 5x5m

En las Figuras 9 y 10 de igual modo se puede observar una mejora sustancial en la distribución de carga a lo largo de la longitud del taladro, lo cual también se traduce en una mejora en la distribución de la energía disponible para fragmentar la roca o generar daño.

Para el caso de la Buffer1 se pasa de ocupar poco más de un cuarto (4.4m) de la longitud total de 16m a más de la mitad (8.2m) con el uso de Flexigel™ con una densidad de 0.9 g/cc. Esta relación se puede mejorar aún más usando densidades de Flexigel™ menores como 0.6 g/cc por ejemplo, manteniendo también buenos niveles energéticos, los cuáles pueden ser ajustados en función del tamaño de la malla y del diámetro de perforación según sea requerido. Ver Figura 11.

Para el caso de la segunda buffer, el diseño original incluye un deck intermedio, justamente con la finalidad

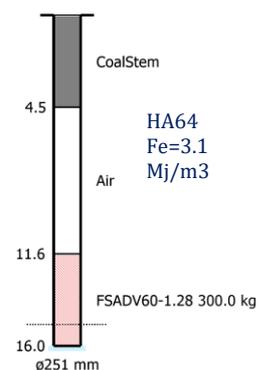
de ganar mayor influencia energética hacia la parte superior del banco y evitar problemas con la fragmentación en este sector. Sin embargo, también requiere de accesorios de voladura adicionales y el uso de doble iniciación, además de gastar mayor esfuerzo y tiempo durante la implementación del diseño en campo.

Con la propuesta de Flexigel™100 para la Buffer2, se logra una sola columna homogénea distribuyendo la influencia de la carga en el taladro hasta 66% mejor y eliminando la necesidad del uso de deck intermedio para este caso. No obstante, aquí se debe señalar que todos los diseños deben ser analizados y ajustados considerando cuidadosamente los límites permisibles del macizo rocoso en términos de PPV crítico.

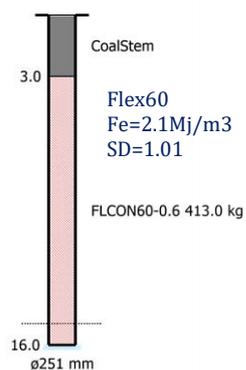
Figura11.

Mejora de la distribución energética en ±200% por usar Flexigel™60 con densidad 0.6g/cc.

Caso Base Buffer1



Propuesta Buffer1



Nota: Flexigel™ con densidades menores a 0.9 g/cc no son aptas en condiciones de agua.

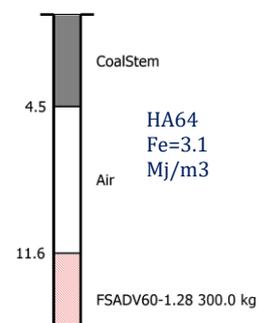
5. Prueba de vibraciones con explosivo de baja energía a escala de voladura de producción.

De igual manera se realizaron pruebas de vibraciones a escala de voladuras de producción, para incluir la componente secuencia de iniciación y tiempos de retardo en la evaluación de mitigación de daño a taludes, además del cambio de explosivo estándar por explosivo menos energético.

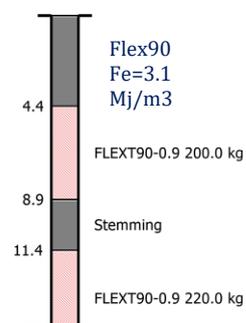
Figura12.

Propuesta de diseño Flexigel™90 en deck.

Caso Base Buffer1



Propuesta Buffer1

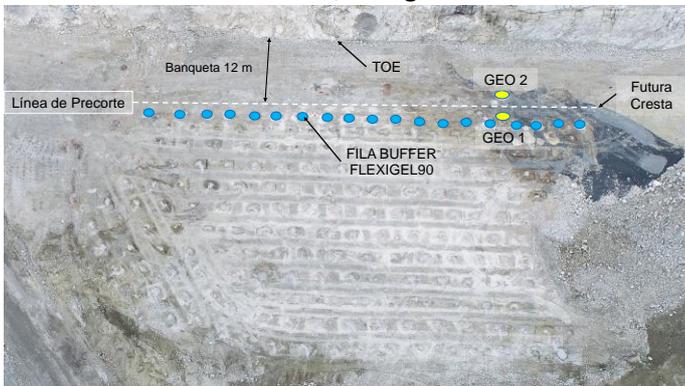


Genera

Nota: Se mantienen los mismos niveles energéticos para la Buffer1, sin embargo, con mucho mejor distribución a lo largo de la columna.

Las Figuras 12 y 13 muestran el diseño de una voladura de prueba donde se disparó la primera fila buffer con Flexigel™90 densidad de 0.9g/cc y uso de taco intermedio. Así mismo en este proyecto fue disparada una voladura de precorte en forma previa un día antes.

Figura13.
Prueba de filtro de Precorte, Flexigel™ en fila buffer.

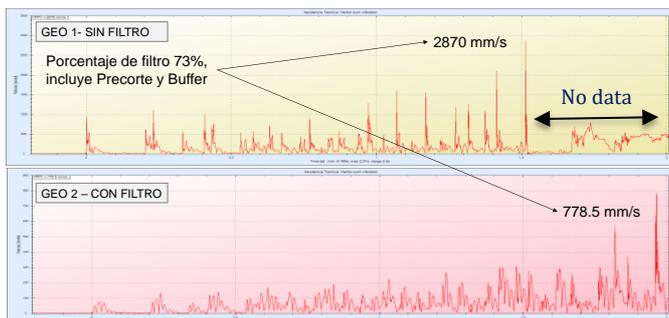


Nota: Para el carguío de la primera fila buffer se usó Flexigel™90 en remplazo del explosivo estándar HA64.

El objetivo de la prueba consistió en medir el efecto filtro del precorte para el caso de una voladura de cierre de banco, así mismo evaluar si se logra superar el PPV crítico del macizo rocoso en el sector de estudio correspondiente a 800 mm/s. para este efecto se instalaron dos geófonos empotrados de campo cercano ubicados antes (Geófono 1) y después (Geófono 2) de la fila de precorte previamente ejecutada. Figura 13.

El registro de vibraciones resultante, así como el modelo de vibraciones de campo cercano se muestran en las Figuras 14 y 15 respectivamente.

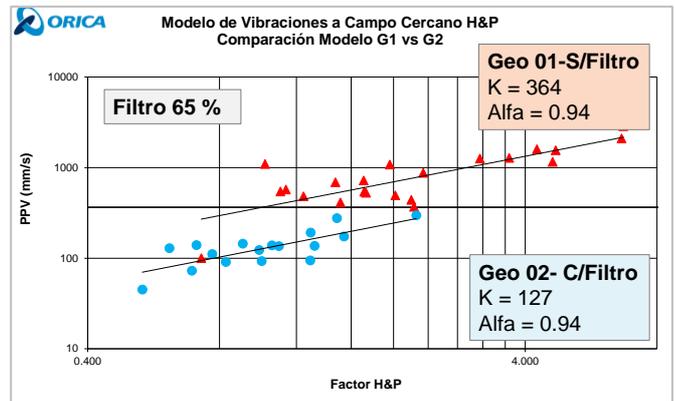
Figura14.
Comparación registros Geófonos 1 y 2, instalados antes y posterior a la fila de Precorte.



Nota: Se muestra el registro del tren de ondas de toda la voladura en el Geófono2 ubicado detrás del precorte. Para el caso del Geófono1 ubicado adelante, dentro de la malla. Se observa que consigue registrar hasta antes de ser dañado por la detonación de los taladros ubicados muy cercanos a este.

En la Figura 15, se observa una gran diferencia en los niveles de vibraciones registrados en ambos geófonos hasta de un 73%. Para el caso del Geófono2 que representa la condición que experimenta el talud durante el evento de voladura, se observa que, a lo largo de todo el registro, ningún peak de vibraciones logra superar el PPVc de 800mm/s, lo cual implica que el macizo rocoso no sufrió un daño lo suficientemente considerable para comprometer su estabilidad.

Figura15.
Comparación modelos de vibraciones en Geófonos 1 y 2, instalados antes y posterior a la fila de Precorte.



Nota: Se usaron tiempos entre deck de 100ms, tiempos entre taladros en el rango de 30 a 50ms y tiempos entre filas de 200ms para el caso de las filas de control (Trim).

Del mismo modo en el análisis de los modelos de vibraciones de la Figura 15, se observa un efecto filtro del 65%. Es decir, el uso de precorte en conjunto con la aplicación de explosivo de menor energía en primera fila buffer, son capaces de mitigar los niveles de vibraciones en un porcentaje mayor al 60%, valor considerado muy bueno en este tipo de aplicaciones. De esta manera se logra no superar el límite máximo permisible de vibraciones que puede soportar el macizo rocoso, antes de infringirle daño durante la voladura. Cabe señalar que antecedentes de porcentaje de filtro medido en el mismo sector evaluado, con el uso del diseño estándar, datan de alrededor del 30% con un cumplimiento del ancho de banqueta menor al 80%.

Figura16.
Resultados de la pared, post minado y limpieza.



Nota: Precorte disparado con perforación inclinada y a doble banco.

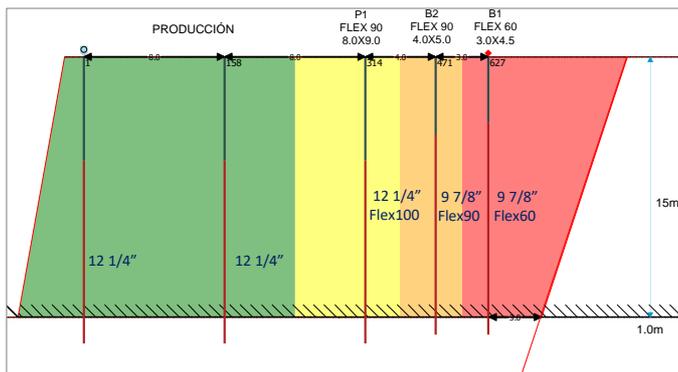
5. Diseños optimizados con explosivo de menor energía.

En esta sección se muestra el resultado de una voladura, aplicando diseño de control optimizado con explosivo de baja energía en diferentes densidades, Flexigel™ 60 (0.6 g/cc), Flexigel™ 90 (0.9 g/cc) y Flexigel™ 100 (1.0 g/cc) en taladros buffer y primera producción (zona de control). La Figura 18, muestra el diseño de perforación empleado. Las Figuras 19, 20 y 21 así mismo muestran los diseños de carga utilizados para el carguío de ambas filas buffer (B1 y B2) y la primera fila de producción (P1) respectivamente.

Para este efecto inicialmente se realizó el diseño y simulación de la voladura considerando los valores energéticos requeridos por la roca para asegurar una buena fragmentación (KPI P80>25mm) y excavabilidad de la pila, así como no superar los límites máximos permisibles en términos de niveles de vibraciones capaces de inducir daño (PPVc=877 mm/s).

Figura17.

Diseño de perforación, voladura de cierre con tres filas de control, dos buffer mas primera de producción.



Nota: Primera pasada de doble banco. Dos filas buffer perforadas en 251mm de diámetro y filas de producción en 311mm.

5.1. Configuración de carga voladura de control

Figura18.

Configuración de carga Buffer1.

Hole loading - Buffer 1
 Burden x spacing = 3.0 m x 4.5 m
 Powder factor = 1.79 kg/m³
 Energy factor = 2.22 MJ/m³
 Scaled depth of burial = 1.20 m/kg ^{1/3}



Figura19.

Configuración de carga Buffer2.

Hole loading - Buffer 2
 Burden x spacing = 4.0 m x 5.0 m
 Powder factor = 1.86 kg/m³
 Energy factor = 3.16 MJ/m³
 Scaled depth of burial = 1.19 m/kg ^{1/3}

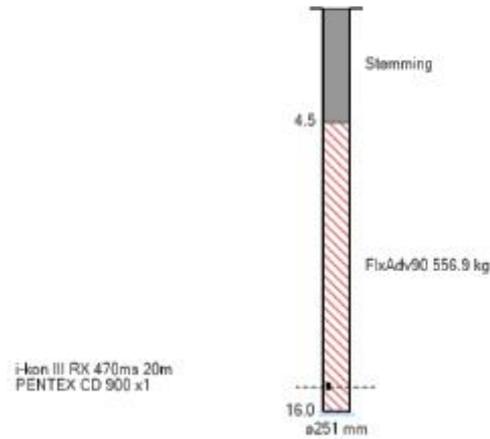
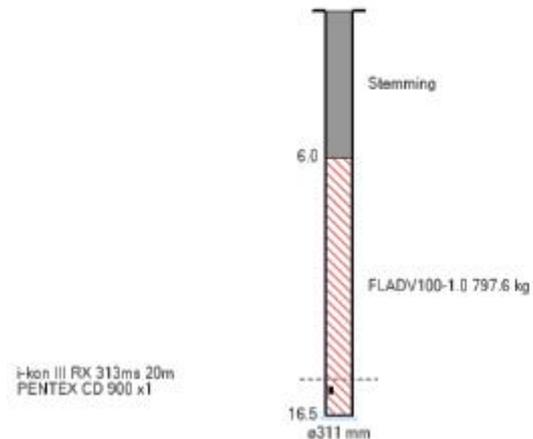


Figura20.

Configuración de carga Producción1.

Hole loading - Producción A
 Burden x spacing = 8.0 m x 9.2 m
 Powder factor = 0.72 kg/m³
 Energy factor = 1.45 MJ/m³
 Scaled depth of burial = 1.22 m/kg ^{1/3}



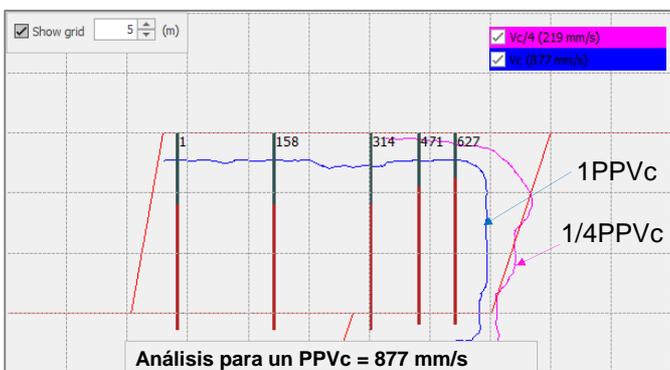
Nota: Primera producción también incluida en zona de control.

5.2. Modelamiento de daño por vibraciones, voladura de control optimizada.

El análisis de daño por vibraciones realizado en el software BDA, muestra que el diseño de control aplicado tanto en las filas buffer como la primera fila de producción, no genera impacto negativo hacia la pared ya que el halo de vibraciones correspondiente al PPVc del macizo rocoso en estudio (línea azul en la Figura21) no traspasa el perfil de diseño del talud. Inclusive si se desea emplear el criterio para roca intacta que considera como umbral de daño el uso de $\frac{1}{4}$ del PPVc (línea magenta en la Figura21) se observa que tampoco traspasa el límite de diseño del talud.

Por otro lado, se observa una excelente distribución energética del explosivo hacia la zona del taco, lo cual favorece los resultados de fragmentación en la parte superior del banco.

Figura21. Análisis de daño BDA, Flexigel™60, 90 y 100, Analizado con una velocidad de partícula crítica PPVc=877mm/s.

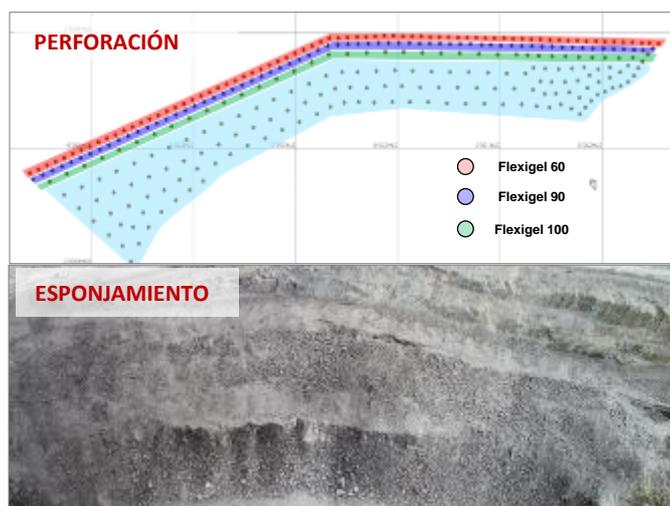


Nota: Análisis para banco de 15m, uso de doble buffer en diámetro 251mm y primera producción en diámetro 311mm.

5.3. Resultados post voladura y minado.

La Figura 22, muestra la malla de perforación real de la voladura de control optimizada antes y post voladura. Así como las condiciones de la pared post minado y limpieza.

Figura22. Resultados voladura con tres filas de control-Flexigel™

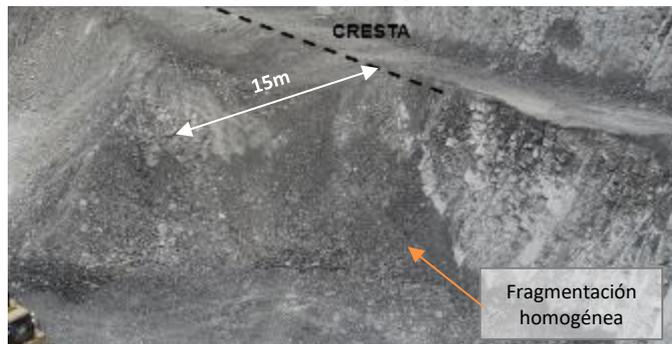


Nota: A lo largo de toda la malla se logra el cumplimiento del ancho de banqueta al 100%, así como una fragmentación homogénea.

5.2. Resultados fragmentación resultante en zona de control.

Respecto a los resultados de Fragmentación, se ha realizado un comparativo entre los valores de P80 de línea base (explosivo estándar HA64) versus los resultados obtenidos con el uso de explosivo de menor energía. Para el análisis comparativo se ha puesto foco sólo en la fragmentación resultante a partir de las tres filas de control, haciendo seguimiento específicamente en la zona de buffer (ancho de 15 m pegado al talud). Ver Figura 23.

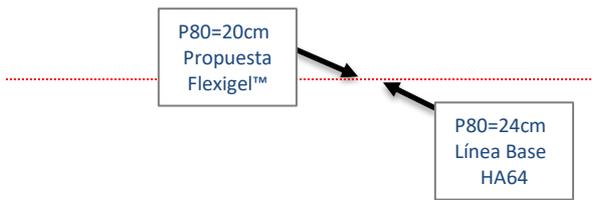
Figura23. Frente de minado en zona buffer – Voladura con tres filas de control cargado con Flexigel™



Nota: Los registros fotográficos para los análisis de fragmentación fueron tomados dentro de los 15m en la zona de influencia de las filas de control.

La Figura 24, muestra las curvas de distribución granulométrica resultante para ambos casos. Aquí se evidencia una reducción de hasta un 20% en términos de P80 para el caso de la curva medida en sectores con Flexigel™ respecto al caso base con HA64. Al observar las curvas se puede notar mayor impacto en la zona de gruesos de la curva, que por lo general se encuentra asociada a la zona del taco en la parte superior del banco, debido a que por lo general en estos sectores la influencia energética del explosivo es menor con el uso de explosivos estándar.

Figura24. Análisis granulométrico comparativo entre voladuras de control con Flexigel™ versus el diseño estándar HA64.



Nota: KPI de fragmentación en zonas buffer, P80 por debajo de los 25cm.

Flexigel™, pese a ser un explosivo menos energético (Mj/kg), es capaz de lograr buenos resultados también en términos de fragmentación, debido que se puede usar en densidades muy bajas (0.5-1.1 g/cc) se puede manejar longitudes de carga máximas, con flexibilidad de manejo de factores de carga (kg/t) de acuerdo con la necesidad.

6. Conclusiones

Mediante la implementación de pruebas de vibraciones de campo cercano, que incluye la instalación de geófonos empotrados y la perforación de mallas especiales para generar modelos de vibraciones, se ha desarrollado una metodología para poder entender el comportamiento vibracional atenuado de los explosivos de baja energía como es el caso de Flexigel™.

Para los sectores evaluados de roca competente (UCS de 110MPa) con moderado control estructural (<10 FF/m) y velocidad de onda P (Vp) alrededor de 3500 m/s. se pudo determinar un porcentaje de atenuación de 60% por cambiar la mezcla Heavy Anfo 64 (1.28 g/cc) reemplazándola por Flexigel™90 con una densidad de 0.9 g/cc.

Lo anterior se pudo evidenciar al comparar los modelos de vibraciones generados para cada tipo de explosivo, midiendo la diferencia entre los valores del parámetro K en el modelo de Holmberg & Pearson. Cabe señalar el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo.

Del mismo modo se realizó una prueba de vibraciones a escala de una voladura completa que incluyó taladros de buffer y producción, así como un precorte. Las limitaciones de este ejercicio tienen que ver con poder identificar claramente la correspondencia de los peaks de vibraciones generados por cada taladro, debido a los tiempos de retardo relativamente cortos en la secuencia y al riesgo de daño a los geófonos durante la voladura. Sin embargo, al medir el tren de ondas de la voladura completa se pudo determinar que en el

periodo de detonación no se llegó a superar la velocidad de partícula crítica PPVc del macizo correspondiente a 800 mm/s, lo que significa que no se le generó daño al talud.

El porcentaje estimado de atenuación para este caso fue mayor al 60%, sin embargo, se debe considerar que en este valor está incluido el efecto de filtro del precorte que junto con el uso de explosivo de menor energía en la fila buffer, son la mejor combinación para alcanzar mayores niveles de atenuación y reducción de daño.

Por otro lado, haciendo uso de herramientas de modelamiento avanzado de Orica como es software BDA, a partir de las constantes de atenuación (K y α) calculados en los modelos de vibraciones para cada tipo de explosivo, se pudo realizar análisis comparativo de daño mostrando la diferencia del impacto al talud para el caso del diseño estándar (con HA64) respecto a otras propuestas de diseño, incluyendo Flexigel en una o ambas filas buffer. Aquí también se pudo evidenciar un porcentaje de atenuación alrededor del 60%.

Finalmente, se pudo mostrar los resultados de voladuras donde se aplicaron diseños optimizados mediante el uso de Flexigel™ en diferentes densidades e implementadas tanto para el caso de las filas buffer como la primera fila de producción (filas de control trim).

En estas voladuras se observó muy buenos resultados de acuerdo con lo presupuestado, fueron evaluados principalmente el cumplimiento de ancho de banqueta efectivo según el diseño del talud, así como el impacto en los resultados de fragmentación en estas filas de control.

Los resultados entregaron por un lado el cumplimiento del 100% del ancho de banqueta, verificado topográficamente. Cabe señalar que para todos los casos con anterioridad se dispararon los correspondientes precortes, cuyo implementación fue crucial para haber alcanzado estos resultados.

En términos de fragmentación, se evidenció una mejora de hasta el 20% en el porcentaje pasante P80. Aquí se compararon los resultados obtenidos en la línea base (HA64) respecto a los obtenidos con Flexigel™. Se estima que el mayor aporte en esta mejora provenga de la parte superior del banco. Al lograr longitudes de carga mayores y mejor distribuidas con Flexigel™ se alcanza mayor influencia energética en la zona del taco que antes no había.

Agradecimientos

A todo el equipo técnico de Orica que colaboró con la búsqueda, recopilación y análisis de la información, así como monitoreo e instrumentación, para llevar a cabo las pruebas y demostraciones.

Referencias

- Cancec, A. 2016. Voladuras masivas cercanas a paredes en Chaquicocha. Perumin32.
- Chiappetta, F. 2016. Presplitting, Highwall Controls and Mass Blasting Techniques. BAI.
- Lozada, P. 2022. Voladuras para Wall Control, XVI Simposio Internacional de Perforación y Voladura de Rocas 2022.
- McKenzie, C. 2006. Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento. CINTEX.
- Orica MS, 2013. Blast Design Assistant Workshop. Technical Specialist, Orica Limited.

Autores:

Nombre: PEDRO LOZADA PAUCAR
Empresa: ORICA MINING SERVICES PERU SA
Cargo: LEAD TECHNICAL SERVICES
Teléfono: 973023463
Correo electrónico: pedro.lozada@orica.com

Reseña:

Ingeniero de Minas, egresado de la UNASAM, cursando MBA en CENTRUM, 15 años de experiencia en minería superficial de gran escala, incluyendo operaciones en Perú y Chile. Especialista en ingeniería de Perforación y Voladura, así como en Geotecnia aplicada a la voladura.

Nombre: JUAN MANUEL PRADO MONJE
Empresa: ORICA MINING SERVICES PERU SA
Cargo: MANAGER BLAST ENGINEERING
Teléfono: 949144816
Correo electrónico: juan.prado@orica.com

Reseña:

Ingeniero de Minas, egresado de la UNAS, EMBA de Universidad de los Andes – Bogotá, más de 21 años de experiencia, incluyendo operaciones de Peru, Chile, Colombia, Argentina, Venezuela, Panamá, Caribe, Suriname, etc.