

Juan Acosta Galiano, Elmo Quiroz Espinoza, Oscar Pereyra Ramirez y Arlen Ventura Leon

<sup>1</sup> Goldfields, Calle Santa Veronica 136 – Urb. Santa Emma, Lima, Perú ([Juan.Acosta@goldfields.com](mailto:Juan.Acosta@goldfields.com))

<sup>2</sup> Goldfields, Jirón Chabuca Granda 159 dpto. 402 Urb. San Carlos, Cajamarca, Perú ([Elmo.Quiroz@goldfields.com](mailto:Elmo.Quiroz@goldfields.com))

<sup>3</sup> Orica, Calle Chiclayo 188 Dpto 101, Lima, Perú ([Oscar.Pereyra@orica.com](mailto:Oscar.Pereyra@orica.com))

<sup>4</sup> Orica, Jirón Arias 352, Cajamarca, Perú ([Arlen.Ventura@orica.com](mailto:Arlen.Ventura@orica.com))

## RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes en los resultados de voladura son la generación de vibraciones las cuales, de no ser controladas, pueden tener impactos negativos en la estabilidad de taludes generando condiciones inseguras para los trabajos y procesos que se llevan a cabo. Además, en el contexto peruano en donde la gran mayoría de las operaciones mineras colindan con comunidades, el control de vibraciones es muy importante para reducir al máximo la percepción de la voladura por los pobladores y de esa forma mantener la relación con estos.

En la actualidad existen muchos controles para mitigar o direccionar las vibraciones generadas por la voladura, sin afectar los resultados de fragmentación, siendo uno de ellos los tiempos de retardo entre taladros.

Con el control de la precisión de la secuencia de detonación de las cargas explosivas y la flexibilidad para la selección de secuencias de detonación, se han identificado una gran variedad de beneficios enfocados en la fragmentación, lo cual mejora la eficiencia de la actividad minera, así como también en la ingeniería que puede ser usada para el control de las vibraciones, sin modificar los parámetros de carguío de la malla.

El presente trabajo fue desarrollado de acuerdo al cumplimiento de estrictas normas internacionales (Norma DIN) y a la reducción de la percepción de las vibraciones hacia las comunidades aledañas en Cerro Corona (Gold Fields la Cima S.A.).

Este estudio se basa en el análisis de onda elemental para determinar los tiempos de retardo que reduzcan al máximo el PPV en las comunidades (campo lejano). Inicia con la toma de datos con equipos de medición de vibraciones (sismógrafo Instancel Plus) con lo cual obtenemos el registro de un taladro de producción; el

que será analizado para determinar una relación de PPV versus tiempo de retardo.

Con los retardos obtenidos del análisis de onda elemental, se programan los siguientes disparos y se toman los registros de vibraciones en la zona donde se quiere medir los niveles de PPV. Los proyectos de voladura que servirán para hacer el comparativo y determinar la efectividad de esta metodología, serán los proyectos de producción cargados con mezcla explosiva gasificada; tomando como referencia los disparos desde 2018 en adelante.

Adicionalmente se podría usar esta información en conjunto con el modelo de vibración en campo lejano (modelo Devine) para predecir el resultado de vibraciones mediante una estimación estadística (Monte Carlo). De esta forma adelantarse a los resultados y poder tomar otros controles que reduzcan los resultados de vibraciones.

## 1. Introducción

Las vibraciones producto de voladuras, pueden inducir un daño significativo al macizo rocoso a grandes distancias a través de la alteración de estructuras principales, como también a instalaciones, estructuras y edificaciones.

Estas vibraciones pueden afectar a estructuras o fallas, cuyas orientaciones respecto a la geometría de un talud se presentan como desfavorables causando desplazamientos de grandes volúmenes de roca.

Es por ello que es necesario tomar diversos controles para que se las voladuras generen la menor cantidad de vibraciones posible.

De acuerdo a lo mencionado por Lopez J. (2017) el nivel de vibraciones puede verse afectado por diversos factores, los cuales pueden ser:

- Geología local y características de la roca: dependiendo del tipo de roca, estructuras, fallas, tipo de suelo, etc. las vibraciones y las frecuencias alcanzan ciertos niveles de atenuación.
- Peso de la carga operante: Es la carga que es iniciada en un solo instante.
- Distancia al punto de la voladura.
- Consumo específico del explosivo: La cantidad de explosivo que se usa por m<sup>3</sup> de material volado.
- Tipo de explosivo: explosivos que generan mayor presión de taladro tienden a generar mayores niveles de vibración.
- Tiempos de retardo: El tiempo de retardo usado entre taladros y cómo interactúan las ondas generadas por la detonación.
- Variables geométricas de la voladura: los parámetros del diseño de la voladura como diámetro del taladro, burden, espaciamiento, altura de banco, etc.

En Goldfields Cerro Corona se han aplicado controles para el control de muchas de estas variables (uso de detonadores electrónicos para controlar la carga operante, control de la cantidad de taladros detonados por disparo y dirección del tren de ondas).

En esta ocasión el control se basa en los tiempos de retardo entre taladros y fila para reducir los niveles de vibración en las comunidades. De esta forma tratar de reducir la percepción de las vibraciones generadas por las voladuras.

## 2. Percepción de comunidades

Dentro del área de influencia de la mina, tenemos 2 comunidades importantes por su cercanía a la operación de extracción minera. Estas comunidades son Hualgayoc y Pílancones, las cuales se encuentran a 1500 m y 700 m de la operación, respectivamente.



Figura 1. Distancia a las comunidades.

La relación con estos centros poblados es muy buena; sin embargo, las vibraciones por la voladura son perceptibles en ambos lugares. Esto ha conllevado a que en varias ocasiones se presenten quejas o reclamos por la sensación de vibración producto de las voladuras.

En ese sentido, se han generado diversas iniciativas que contribuyan a minimizar el impacto de la percepción de los disparos hacia las comunidades.

Uno de los proyectos que ha ayudado a minimizar considerablemente las vibraciones han sido los estudios de onda elemental.

## 3. Onda Elemental (O.E.)

El estudio de onda elemental se basa en el registro de vibración que genera un solo taladro al detonar su carga explosiva para; posteriormente, generar simulaciones de vibraciones según parámetros de cantidad de taladros y tiempos de retardo entre taladros y entre filas.

Esta onda recoge la información del macizo rocoso, dado que la forma, amplitud y duración de esta onda son resultado de las características del macizo rocoso.

Con esta información se generan las simulaciones para relacionar PPV y tiempos de retardo para la zona analizada. Este análisis por contener información de las características del macizo roco, los resultados deben ser usado en la zona o litología analizada. No puede ser usada para otras zonas con diferentes características geológicas.

Por otra parte, para entender cómo funciona el tiempo de retardo calculado por el análisis de onda elemental, es necesario saber que las ondas pueden interactuar entre ellas de forma constructiva y destructiva.

En la siguiente imagen de la figura 2, se aprecia como las ondas interactúan entre ellas de manera constructiva; es decir, se integran para formar una resultante de mayor amplitud, lo cual se refleja en mayor PPV. Esto se da porque se usan tiempos de retardo cortos (en este caso 3ms) lo que favorece la interacción descrita.

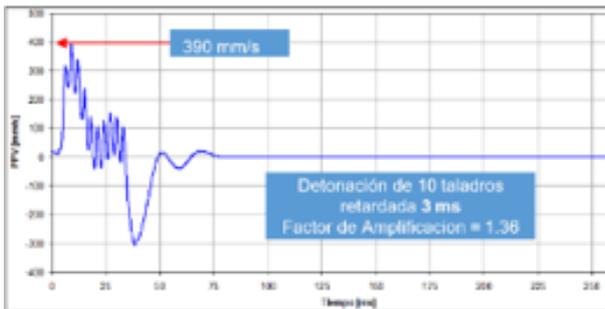


Figura 2. Comportamiento de ondas constructivas.

Por el contrario, las ondas destructivas resultan en la interacción nula de sus amplitudes para generar menor PPV.

En la siguiente imagen se observa como las ondas generadas por 10 taladros tienen un tiempo de retardo de 25ms; con lo cual, se logra que las ondas no se sumen para incrementar el PPV.

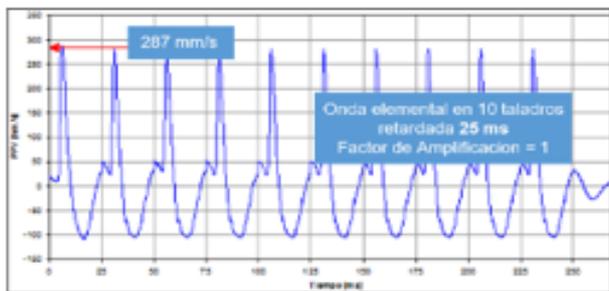


Figura 3. Comportamiento de ondas destructivas.

El objetivo del estudio de onda elemental es que la interacción de los taladros genere el menor PPV similar a lo mostrado en la figura 3, considerando las características del macizo rocoso.

Un punto importante de este estudio es que la onda elemental debe capturarse en el punto de interés (taludes, fallas, estructuras, etc) y se debe ser realizada con el diseño de carga que se aplica regularmente en los taladros de producción (la mayor carga).

La importancia de capturar ondas elementales son las siguientes:

- Al tener el registro de vibraciones de una onda elemental, se puede realizar simulaciones para encontrar una relación entre tiempos de retardo, PPV y frecuencia. Con esta relación podremos elegir los retardos que se adecuen a los resultados que queramos obtener de la voladura (Reducción de PPV, mejor frecuencia, mejor fragmentación).

- Estos tiempos de retardo serán usados posteriormente en los siguientes diseños de secuencia de detonación de la zona donde se realizó el estudio. Con ellos poder dar mayor confiabilidad al logro de los resultados que queremos obtener.

### 3.2. Metodología

El análisis de onda elemental se basa en la captura de la vibración de un taladro aislado, con la toma del registro en el punto donde se requiere cautelar la vibración.

Generalmente, se captura cuando se tiene la iniciación de una malla de producción; de esta malla, se escoge un taladro (Generalmente ubicado en uno de los extremos de la malla para no afectar la fragmentación) el cual será el aportante de la onda elemental.

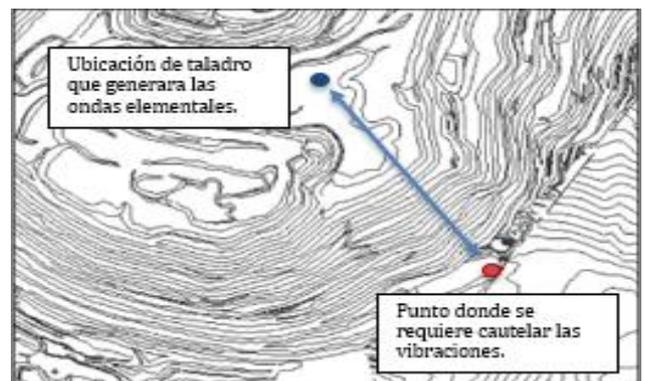


Figura 4. Metodología de registro de onda elemental.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de la ubicación del taladro de donde se generará la onda elemental (zona donde se realizarán los disparos) y la zona donde se quiere cautelar las vibraciones el cual puede ser un talud, estructura, zona urbana, etc (ubicación del sísmógrafo para la captura de la onda elemental).

El resultado es un registro de vibración en donde se puede apreciar la o las ondas elementales y el registro de la voladura de producción completa (Figura 5).

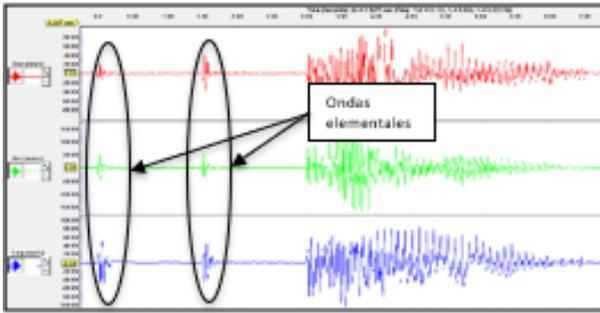


Figura 5. Registros de vibración.

En el ejemplo de la Figura 5, se observan el registro de 2 ondas elementales y un registro de voladura, es decir que se aislaron 2 taladros para obtener 2 registros de onda elemental.

Para la simulación, es necesario separar las ondas elementales. Esto puede realizarse con un software de edición de vibraciones (Blastware, Cycad, etc).

El registro separado de la onda elemental es cargado a un software de simulación de variables junto con la cantidad en filas y taladros por fila.

El resultado es una matriz de datos en donde tenemos relacionados los tiempos de retardo entre taladros, tiempos de retardo entre filas y PPV (Ilustración 1).

Dependiendo cuales son los parámetros que requerimos para nuestra operación analizaremos 2 o 3 variables a la vez. Para el caso de este estudio, analizaremos la relación entre PPV y retardos; para lo cual, colocaremos en un gráfico de 2 dimensiones el nivel de PPV resultante y los retardos (Figura 6).



Figura 6. Gráfico de relación de PPV vs Retardo.

La selección del retardo dependerá de las condiciones del macizo rocoso y del tipo de material que se tenga. Es recomendable tener 2 o 3 tiempos de retardo como alternativa en caso de que se quiera maximizar el cuidado por vibraciones o si se requiere tener un cuidado medio sin afectar la fragmentación. Debemos tener en cuenta que este análisis es para maximizar la

reducción de vibraciones y no para mejorar la fragmentación, por lo que es necesario tener en cuenta este punto a la hora de definir que queremos obtener como resultado de la voladura.

#### 4. Aplicación en Cerro Corona

Al tener Cerro Corona dos comunidades cercanas, Hualgayoc y Pilancones, es necesario tener un control estricto en vibraciones; es por ello que, todos los registros son controlados en base a normas internacionales de control de vibraciones.

Actualmente existen diferentes estándares o normas que ayudan a establecer límites de vibración para el cuidado de estructuras o edificaciones, en este caso se toma como referencia, la normal internación alemana DIN 4150 la cual es la más rigurosa usada en minería.

Esta norma indica que las vibraciones en estructuras delicadas no deben superar los 3 mm/s, como se muestra en las siguientes figuras.

Tipo de edificación	Frecuencia		
	<10Hz	10-50Hz	50-100Hz
Estructuras delicadas, muy sensibles	3	3-8	8-10
Viviendas edificios	5	5-15	15-20
Comercial e industrial	20	20-40	40-50

Figura 7. Norma DIN 4150

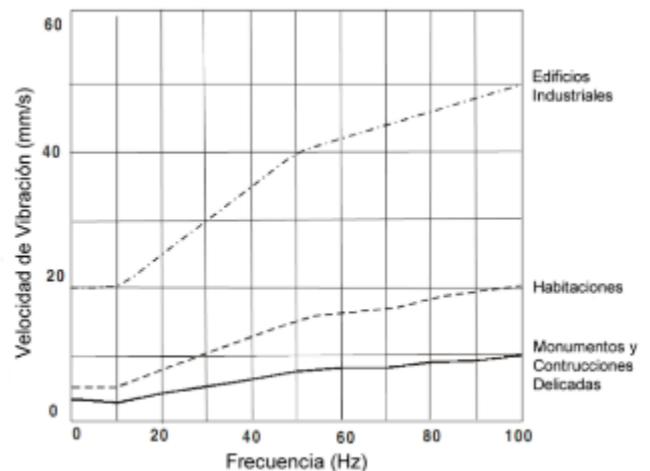


Figura 8. Normal DIN 4150

Teniendo en cuenta lo mencionado, todos los disparos son diseñados para evitar superar los 3 mm/s. Adicionalmente, con el estudio que es objetivo este documento, se pretende reducir al máximo las vibraciones para reducir la percepción de las voladuras en las comunidades.

En el siguiente grafico se observan los registros de vibraciones del último año, los cuales se encuentran por debajo de lo establecido en la norma DIN.

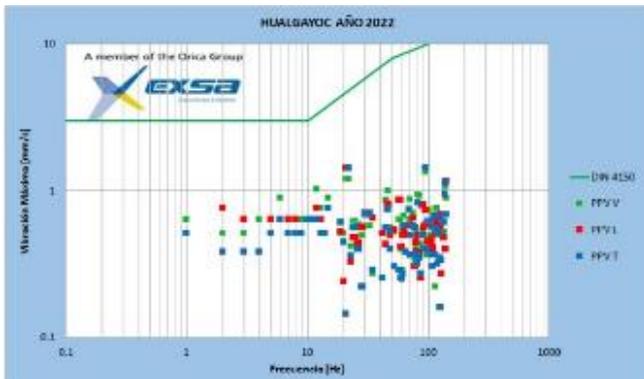


Figura 9. Registros de vibraciones de Hualgayoc 2022.

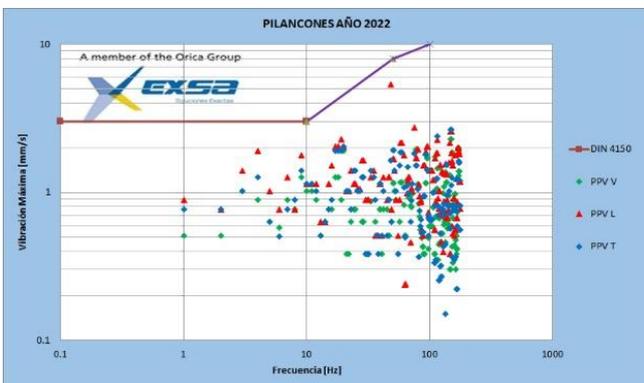


Figura 10. Registros de vibraciones de Pílancones 2022.

Las mediciones de vibraciones son registradas con equipos Instantel Minimate Plus en diversos puntos de la mina.



Figura 11. Equipo de medición de vibraciones – Minimate Plus.

Estos equipos son ubicados en zonas estratégicas con donde se requiere el cuidado de vibraciones.

Los software utilizados para el análisis de la data recopilada son:

- Blastware: Requerido para gestionar la descarga de registro de vibraciones.
- Cycad: Será necesario para separar las ondas de vibración de la voladura y aislar las ondas elementales.
- Scilab: Software que será usado para la simulación de los datos el cual generará la relación de PPV, frecuencia y tiempos de retardo.

Lo importante en la etapa de registro es identificar las zonas en donde se quiere cautelar las vibraciones. Para el caso de Cerro Corona, en coordinación con geotecnia, se identifican las fallas más importantes y las comunidades más cercanas. En el siguiente grafico se puede apreciar el tajo con los puntos a cautelar considerando los factores mencionados anteriormente.

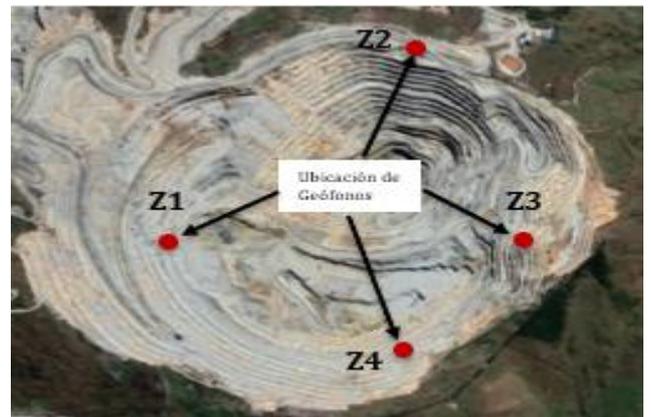


Figura 12. Ubicación de geófonos para ondas elementales.

Considerando los puntos que se muestran en la figura 12, se puede abarcar las fallas más importantes del tajo y la dirección hacia donde se encuentran las poblaciones de Hualgayoc y Pílancones; por lo tanto, los geófonos son instalados alrededor de esos puntos.

Debido a los constantes cambios del tajo, por la actividad extractiva, los registros de onda elemental son tomados cada cierto tiempo. Este tiempo dependerá de diferentes factores:

- El avance de los bancos: máximo el tiempo de retardo calculado no será usado más de 3 bancos de profundización en relación al nivel donde se inició el taladro para el registro de la onda elemental. Si se sigue profundizando, se deberá hacer otro registro y análisis.
- Cambios geológicos: si hay un cambio en las características geológicas del macizo rocoso, se deberá hacer un nuevo análisis de onda elemental.

- Presencia de Fallas: Si geotecnia determina que existe un fallamiento importante, se realiza el análisis en la ubicación de la falla.

Los taladros que aportan la onda sísmica proceden de proyectos de voladura cercanos a la zona donde se instalará el geófono.

Para ello se escogerá el taladro más cercano al geófono y será detonado 2 segundos antes del inicio del proyecto de voladura.

La finalidad de la separación en tiempo es que la lectura pueda salir limpia sin que las ondas de los taladros de producción puedan combinarse con la del registro de onda elemental (Figura 4).

#### 4.1. Registros en Cerro Corona

Los análisis de onda elemental se han venido realizando en Cerro corona desde el año 2019 de manera continua en la operación.

Los taladros que aportaran la onda sísmica para el análisis deben tener el mismo diseño de carga que un taladro de producción (diámetro de taladro, tipo de explosivo y altura de carga). Esto para simular la detonación de una malla de producción con la carga operante más alta que se puede iniciar en la zona de análisis.

A continuación, se tienen los diseños de carga de los taladros de producción considerados para los estudios de onda elemental según su dureza para mineral y desmonte.

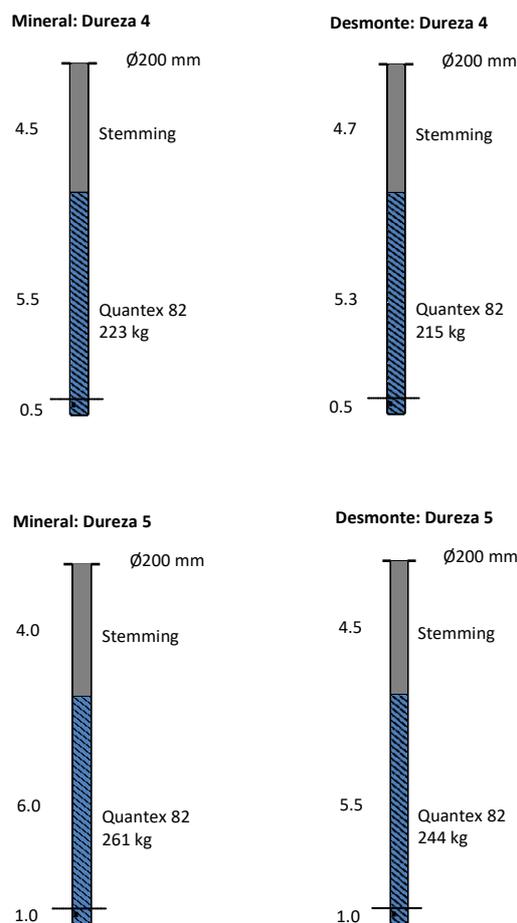
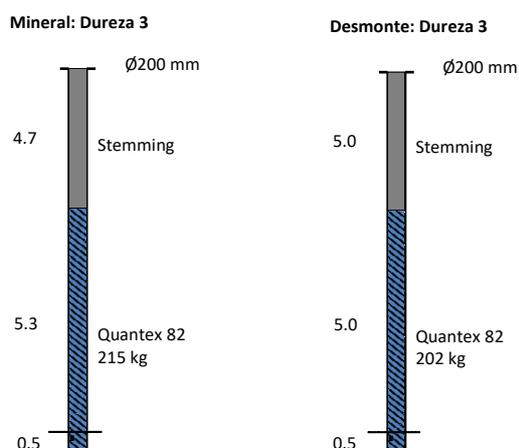


Figura 13. Diseños de Carga de producción.

#### 5. Análisis de Datos

Cada disparo cuenta con registros de vibraciones en las comunidades y en la cercanía de los proyectos de voladura. En muchos de los proyectos se han usado los retardos producto de las ondas elementales analizadas.

Desde el año 2019, que se iniciaron los análisis de onda elemental de acuerdo a la sectorización mostrada en la Figura 10. Algunos de los valores más representativos obtenidos son los que se muestran en la siguiente Tabla.

Zona	T.T.1	T.T.2	T.T.3	T.F.1	T.F.2
Z1	6	9	10	120	120
Z2	18	22	24	140	148
Z3	10	11	12	124	172
Z4	16	17	18	128	138

Tabla 1. Tiempos entre taladro y entre filas de O.E. (T.T.=Tiempo entre taladro; T.F.=Tiempo entre filas)

Con los tiempos calculados de a partir del análisis de onda elemental se monitorearon los disparos en los puntos de Pilancones y Hualgayoc. Los resultados se encuentran en la Tabla 2.

Dureza	PPV Sin O.E.	PPV Con O.E.	Variación %
D3	1.186 mm/s	1.063 mm/s	- 10%
D4	1.129 mm/s	1.119 mm/s	- 3%
D5	1.058 mm/s	0.769 mm/s	- 27%

Tabla 2. Variación de Vibraciones en Pilancones

Dureza	PPV Sin O.E.	PPV Con O.E.	Variación %
D3	0.838 mm/s	0.724 mm/s	- 14%
D4	0.693 mm/s	0.665 mm/s	- 4%
D5	0.711 mm/s	0.546 mm/s	- 23%

Tabla 3. Variación de vibraciones en Hualgayoc

La reducción de vibraciones en general por el uso de tiempos de retardo con onda elemental ha reducido de 3 % a 27 %.

Cabe resaltar que los valores siempre se han mantenido dentro de los estándares de la norma DIN 4150 por lo que la reducción de vibraciones está enfocada en reducir la percepción de la voladura en las zonas de Pilancones y Hualgayoc.

### Análisis de Fragmentación

Generalmente los tiempos de retardo de onda elemental se han aplicado en disparos donde el material es considerado como desmonte, para no afectar la fragmentación de material; sin embargo, los resultados de fragmentación no se han visto muy afectados, como se muestra en la tabla 4.

Dureza	P80 Sin O.E.	P80 Con O.E.	% Variación
D3	154 mm	159 mm	3%
D4	170 mm	178 mm	5%
D5	171 mm	179 mm	5%

Tabla 4. Analisis de Fragmentación.

Como se observa la fragmentación no se ha visto afectada a lo largo del periodo de aplicación del control de tiempo por onda elemental, la variación ha sido entre 3% a 5% lo cual es muy bajo.

### 6. Conclusiones

El estudio de onda elemental ha demostrado ser efectivo en cuanto a la reducción de vibraciones (hasta 27%) sin afectar considerablemente los resultados de fragmentación (5%). Es por ello que se seguirá utilizando esta metodología para el control de vibraciones en los puntos críticos (Taludes y comunidades).

Con los controles que efectuamos, se ha logrado mantener por debajo del límite de 3mm/s establecidos en la norma DIN 4150. Evitando posibles daños en las estructuras de las comunidades y reclamos sociales.

Durante los constantes estudios de este análisis se ha encontrado que es necesario hacer las pruebas de manera regular para poder capturar las variaciones que tiene el macizo rocoso durante la profundización de las operaciones. De esta manera, los tiempos de retardo que se apliquen serán más efectivos en cuanto a la reducción de vibraciones.

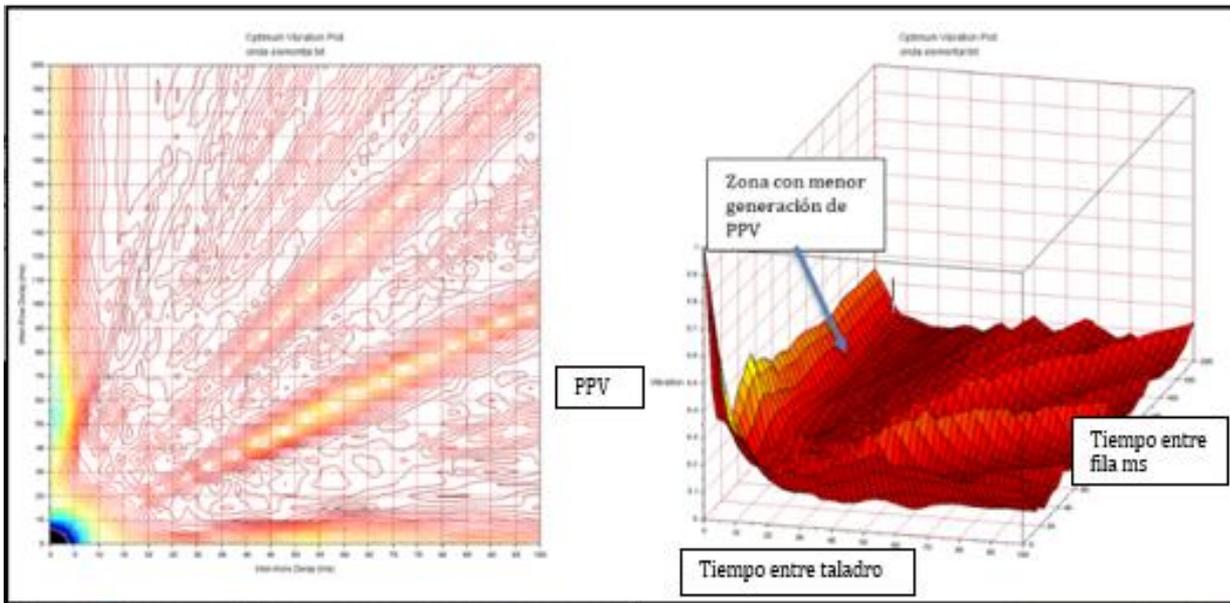
### Agradecimientos

Este trabajo fue elaborado gracias al esfuerzo de toda el área de perforación y voladura de Goldfields así como al equipo de EXSA/Orica del sitio quienes están constantemente enfocados en la mejora de los resultados en la fragmentación sin descuidar el cuidado de vibraciones.

### Referencias

- Lopez, Carlos., Lopez, Emilio., Garcia, Pilar. 2017. Manual de perforación y voladura de rocas. Nombre de la Revista, v. 01, p. 454-458.
- Bragada, Ignacio. 2003. Física General, v. 001, p. 95-106.
- Cloutier, Guy., Destremes, Francois., Yu, Francois., Tang, An. 2021. Quantitative ultrasound imaging of soft biological tissues: a primer for radiologists and medical physicists. v. 001, p. 006-007.

## Ilustraciones.



Ilustracion 1. Resultados de análisis de onda elemental.

Teléfono / Celular: 975475954

Dirección: Jirón Arias 352 – Cajabamba - Cajamarca.

#### Perfil profesional

Ingeniero de Minas con 14 años de experiencia en Minería Tajo Abierto, liderando cargos en Operaciones y Voladura.

Nombre del autor: Juan Acosta Galiano

Cargo: Supervisor Senior de Mina

Empresa: Gold Fields La Cima SA

Correo electrónico: [Juan.Acosta@goldfields.com](mailto:Juan.Acosta@goldfields.com)

Teléfono / Celular: 976935338 – 943771731

Dirección: Calle Santa Veronica 136 – Urb. Santa Emma – Lima

#### Perfil profesional

Experiencia de 7 años en minería a tajo abierto en las áreas de dispatch, operaciones y voladura.

Actualmente liderando la supervisión de Voladura en Goldfields.

Nombre del coautor: Elmo Quiroz Espinoza

Cargo: Supervisor de Perforación y Voladura

Empresa: Gold Fields La Cima SA

Correo electrónico: [Elmo.Quiroz@goldfields.com](mailto:Elmo.Quiroz@goldfields.com)

Teléfono / Celular: 945384050

Dirección: Jirón Chabuca Granda 159 dpto. 402 Urb. San Carlos - Cajamarca

#### Perfil profesional

Ingeniero de minas con mas de 10 años de experiencia en minería de gran envergadura, liderando proyectos de mejora en operaciones a tajo abierto y subterránea en Perú. Parte de equipo de Orica Perú, llevando propuestas que mejoran los procesos de voladura de sus clientes.

Nombre del coautor: Oscar Pereyra Ramirez

Cargo: Lead Technical Services

Empresa: Orica Mining Services

Correo electrónico: [Oscar.pereyra@orica.com](mailto:Oscar.pereyra@orica.com)

Teléfono / Celular: 993451931

Dirección: Calle Chiclayo 188 Dpto 101 - Lima

#### Perfil profesional

Ingeniero de minas con más de 10 años de experiencia en voladura en minas del Perú y Chile. Actualmente a cargo del área técnica con Orica en operaciones del norte del país

Nombre del coautor: Arlen Ventura Leon

Cargo: Blasting Engineer

Empresa: Orica Mining Services

Correo electrónico: [Arlen.Ventura@orica.com](mailto:Arlen.Ventura@orica.com)