

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Parámetros de la voladura, que influyen en la sismisidad inducida,  
en la Unidad Minera San Vicente.**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

**Bach. Frank Raul VARGAS DELGADO**

**Asesor:**

**Ing. Toribio GARCIA CONTRERAS**

**Cerro de Pasco – Perú – 2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Parámetros de la voladura, que influyen en la sismisidad inducida,  
en la Unidad Minera San Vicente.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Mg. Edwin Elías SANCHEZ ESPINOZA**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Silvestre Fabián BENAVIDES CHAGUA**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Raúl FERNANDEZ MALLQUI**  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**Facultad de Ingeniería de Minas**  
**Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N°051-JUIFIM-2024**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Presentado por:

**Bachiller:** VARGAS DELGADO, Frank Raul

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería de Minas**

Tipo de trabajo:

**Tesis**

**PARAMETROS DE LA VOLADURA, QUE INFLUYEN EN LA SISMISIDAD  
INDUCIDA, EN LA UNIDAD MINERA SAN VICENTE.**

**Asesor:**

Ing. Toribio, GARCIA CONTRERAS

Índice de Similitud: 10%

Calificativo

**APROBADO**

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 08 de febrero 2024



Firmado digitalmente por AGUIRRE  
ADAUTO Agustín Arturo FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 08.02.2024 15:26:42 -05:00

**Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO**  
JEFE DE LA UNIDAD DE INVESTIGACION DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS

C.c.  
Archivo

## **DEDICATORIA**

Primeramente, dar las gracias a Dios, a mis padres y a mis hermanas quienes siempre han estado presentes en cada momento de mi vida, en cada caída, en cada tropiezo y gracias a ellos estoy llegando a cumplir una meta más propuesta, que con el apoyo de ellos los motivos de salir adelante crecen y más aún ver a mi familia orgullosa de mí. Segundo agradecer a mis docentes universitarios que me ayudaron a forjar conocimientos durante mi vida universitaria en la cual llevo empleándolo en mi vida minera con todos mis hermanos mineros que muy aparte de la producción es velar por la integridad y seguridad.

## **AGRADECIMIENTO**

En primera instancia, quiero dar gracias a Dios, por encaminarme por el camino bueno, brindándonos esfuerzo, inteligencia y sabiduría para llevar a buen término una etapa más de nuestra vida.

Agradecer a mis padres por apoyarme incondicionalmente me enseñaron a nunca rendirme para lograr mis metas.

Quiero rendir mis agradecimientos a los docentes de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por su experiencia académica y en especial a los que asesoraron esta tesis que con observaciones contribuyeron determinadamente a este trabajo.

Con especial afecto deseo agradecer a mi asesor por su tiempo y paciencia

## RESUMEN

Considerando que el proceso de voladura en la compañía de minas San Ignacio de Morococha (SIMSA) existe la ocurrencia de microsismos, se deberá tener en cuenta las siguientes acciones a fin de reducir su peligrosidad:

- La generación de microsismos tiene también relación con el proceso de voladura, la cantidad de microsismos aumenta en horario de disparo.
- Se determinó (prueba especial con taladro semilla en mineral) que, en la voladura de producción, el tiempo de retardo ( $\Delta T$ ) que reduce en mayor medida la vibración es 50 ms
- Las voladuras deberán espaciarse (entre ellas), con la finalidad de evitar superposiciones de la alteración sísmica, que podría acarrear el aumento de la magnitud de los microsismos pos-voladura.
- Se presenta la configuración de Voladura de Destress Blasting, ante la posibilidad de implementar esta técnica para la excavación de la rampa cuando atraviese terrenos propicios para generar SI
- El estudio de riesgo sísmico indica que el sismo esperado podrá tener magnitud mayor a 2.6 Mw, en vista de esto, las acciones que se recomiendan están dirigidas a reducir la cantidad y magnitud de la actividad sísmica.
- La relación Mw vs distancia al hastial define la categoría del macizo rocoso en ambiente sísmico y definirá el tipo de sostenimiento
- Se recomienda realizar el control estadístico de Mw vs distancia el hastial.

**Palabras clave:** Parámetros de la voladura, sismisidad inducida,

## ABSTRACT

Considering that the blasting process at the San Ignacio de Morococha mining company (SIMSA) is prone to microseisms, the following actions should be taken into account in order to reduce their danger:

- The generation of microseisms is also related to the blasting process, the number of microseisms increases during blasting hours.
- It was determined (special test with seed drill in mineral) that, in production blasting, the delay time ( $\Delta T$ ) that most reduces vibration is 50 ms.
- Blasting should be spaced (between them), in order to avoid superpositions of seismic alteration, which could lead to an increase in the magnitude of post-blasting microseisms. □ The Destress Blasting configuration is presented, given the possibility of implementing this technique for the excavation of the ramp when it crosses terrains suitable for generating SI
- The seismic risk study indicates that the expected earthquake may have a magnitude greater than 2.6 Mw, in view of this, the recommended actions are aimed at reducing the amount and magnitude of seismic activity.
- The Mw vs distance to the gable relationship defines the category of the rock mass in a seismic environment and will define the type of support
- It is recommended to perform the statistical control of Mw vs distance to the gable.

**Keywords:** Blasting parameters, induced seismicity,

## INTRODUCCIÓN

Las operaciones mineras San Vicente pertenecientes a la compañía de minas San Ignacio de Morococha (SIMSA) es una operación minera subterránea que en la actualidad está a 1017 metros de profundidad, y se prevé que en el futuro alcance los 1200 metros. Como consecuencia de la actividad minera, se está produciendo el fenómeno de “Sismicidad Inducida”. Este fenómeno se presenta en macizo rocoso de buena calidad, asociado a excavaciones mineras profundas, a la redistribución de esfuerzos en excavaciones, fallas, contactos litológicos, etc.

Al desarrollar la investigación encontramos justificaciones de orden teórico, práctico, económico.

El tipo de investigación es el aplicado “se caracteriza por su interés en la aplicación, utilización y consecuencias prácticas de los conocimientos. La investigación aplicada busca el conocer para hacer, para actuar, para construir, para modificar”. (SUPO, CAVERO, 2014)

La población estará constituida por todas las labores de la unidad minera, que se encuentran operando en la actualidad.

El Destress Blasting, es una técnica de Pre-Acondicionamiento (PA) que consiste en ubicar cargas explosivas totalmente confinadas que son detonadas simultáneamente con la voladura del frente de avance de túneles, la finalidad es crear fracturas (en el material a volar) para modificar las propiedades tensionales del macizo rocoso, a fin de reducir las cargas debido a esfuerzos en el frente de las excavaciones.

El estudio de riesgo sísmico indica que el sismo esperado podrá tener magnitud mayor a 2.6 Mw, en vista de esto, las acciones que se recomiendan están dirigidas a reducir la cantidad y magnitud de la actividad sísmica.



## ÍNDICE

|                   |  |
|-------------------|--|
| DEDICATORIA       |  |
| AGRADECIMIENTO    |  |
| RESUMEN           |  |
| ABSTRACT          |  |
| INTRODUCCIÓN      |  |
| ÍNDICE            |  |
| ÍNDICE DE FIGURAS |  |
| ÍNDICE DE TABLAS  |  |

### CAPITULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACION

|        |  |   |
|--------|--|---|
| 1.1.   | Planteamiento del problema.....        | 1 |
| 1.2.   | Delimitación de la investigación.....  | 2 |
| 1.2.1. | Delimitación espacial.....             | 2 |
| 1.2.2. | delimitación temporal.....             | 2 |
| 1.3.   | Formulación del problema.....          | 2 |
| 1.3.1. | Problema General.....                  | 2 |
| 1.3.2. | Problema Específicos.....              | 2 |
| 1.4.   | Formulación de Objetivos.....          | 3 |
| 1.4.1. | Objetivo General.....                  | 3 |
| 1.4.2. | Objetivos Específicos.....             | 3 |
| 1.5.   | Justificación de la investigación..... | 3 |
| 1.6.   | Limitaciones de la investigación.....  | 4 |

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.1.   | Antecedentes de estudio .....                    | 5  |
| 2.2.   | Bases teóricas científicas .....                 | 9  |
| 2.2.1. | Sismicidad inducida .....                        | 9  |
| 2.2.2. | Sistema de monitoreo .....                       | 9  |
| 2.2.3. | Vibraciones .....                                | 9  |
| 2.2.4. | Ondas sísmicas .....                             | 10 |
| 2.2.5. | Parámetros de vibración .....                    | 11 |
| 2.3.   | Definición de términos conceptuales .....        | 11 |
| 2.3.1. | Ondas sísmicas generadas por voladuras .....     | 12 |
| 2.3.2. | Parámetros que influyen en las vibraciones ..... | 16 |
| 2.3.3. | Fenómeno de estallido de roca .....              | 17 |
| 2.3.4. | Hipótesis General .....                          | 19 |
| 2.3.5. | Hipótesis específicas .....                      | 19 |
| 2.4.   | Enfoque filosófico - epistémico .....            | 19 |

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.1.   | Tipo de investigación .....                           | 22 |
| 3.2.   | Nivel de investigación .....                          | 22 |
| 3.3.   | Característica de la investigación .....              | 22 |
| 3.4.   | Métodos de investigación .....                        | 22 |
| 3.5.   | Diseño de investigación .....                         | 23 |
| 3.6.   | Procedimiento del muestreo .....                      | 23 |
| 3.6.1. | Población .....                                       | 23 |
| 3.6.2. | Muestra .....   | 23 |
| 3.7.   | Técnicas e instrumentos de recolección de datos ..... | 23 |
| 3.7.1. | Técnicas .....  | 24 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.7.2. | Instrumentos.....                                  | 24 |
| 3.8.   | Técnicas de procesamiento y análisis de datos..... | 24 |
| 3.9.   | Orientación ética .....                            | 24 |

## **CAPITULO IV**

### **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1.   | Presentación, análisis e interpretación de resultados. Ubicación..... | 25 |
| 4.1.1. | Accesibilidad.....  | 26 |
| 4.1.2. | Voladura en tajeos.....   | 26 |
| 4.1.3. | Voladura de avance, Túnel y Rampa .....                               | 29 |
| 4.1.4. | Modelo de vibración en Campo Lejano .....                             | 33 |
| 4.1.5. | Modelo de vibración en el Campo Cercano. ....                         | 34 |
| 4.1.6. | Prueba especial para DB .....   | 44 |
| 4.1.7. | Ley de atenuación en el campo lejano.....                             | 47 |
| 4.1.8. | Ley de atenuación para Campo Cercano.....                             | 47 |
| 4.2.   | Discusión de resultados .....   | 72 |

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Movimiento de las ondas y sus parámetros .....                | 11 |
| Figura 2 Ondas internas y superficiales .....                          | 13 |
| Figura 3 Onda secundaria o transversal “S” .....                       | 14 |
| Figura 4 Onda superficiales o LOVE “L” .....                           | 15 |
| Figura 5 Ondas superficiales o WAVE “W” .....                          | 16 |
| Figura 6 Casos de estallidos de rocas .....                            | 17 |
| Figura 7 Ubicación geográfica.....                                     | 26 |
| Figura 8 Malla de producción típica .....                              | 28 |
| Figura 9 Malla de Nominal (del proveedor) para Rampa 4.5 x 4.3 .....   | 30 |
| Figura 10 Malla efectiva para Rampa 4.0 x 4.0 (de SIMSA).....          | 32 |
| Figura 11 Modelo de vibración campo cercano (H&P) .....                | 35 |
| Figura 12 Ubicación del monitoreo (tajo), primer disparo .....         | 36 |
| Figura 13 Ubicación del monitoreo (tajo), séptimo disparo.....         | 36 |
| Figura 14 Ubicación del monitoreo (tajo), octavo disparo.....          | 37 |
| Figura 15 Ley de atenuación (voladura en tajos) .....                  | 37 |
| Figura 16 Ubicación de los sismógrafos (túnel), 3er, 4to disparo ..... | 38 |
| Figura 17 Ubicación de los sismógrafos (túnel), 6to, 9no disparo ..... | 39 |
| Figura 18 Ley de atenuación en la Rampa (Campo Lejano) .....           | 39 |
| Figura 19 Registro de monitoreo, Tajo 8640 Corredor 1 Sur.....         | 40 |
| Figura 20 Registro de monitoreo, Tajo 8660, acceso 8620 NW) .....      | 41 |
| Figura 21 Registro de monitoreo, rampa RP – 8600 .....                 | 42 |
| Figura 22 Registro de monitoreo, crucero CX 8586 .....                 | 43 |
| Figura 23 Configuración de taladros para la prueba.....                | 45 |
| Figura 24 Ubicación de la prueba (3 taladros).....                     | 46 |
| Figura 25 Ley de atenuación, Campo Lejano (ecuación de Devine) .....   | 47 |
| Figura 26 Bulbos de iso velocidades emulnor 1000 1 1/8 .....           | 48 |
| Figura 27 Bulbos de iso velocidades emulnor 500 1 1/4 .....            | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 Bulbos de iso velocidades anfo.....                                      | 50 |
| Figura 29 Distribución de carga (diseño D1 – 1) .....                              | 55 |
| Figura 30 DB para rampa 4 x 4, con 4 taladros de distress.....                     | 56 |
| Figura 31 Abaco de Barton para estimar VP .....                                    | 59 |
| Figura 32 Ubicación de la prueba .....   | 62 |
| Figura 33 Arreglo del taladro (prueba un 1 taladro).....                           | 63 |
| Figura 34 Aproximaciones empíricas del nivel de daño (CB) por voladura.....        | 64 |
| Figura 35 Funciones del sostenimiento: reforzamiento, retención y contención ..... | 69 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Operacionalización de variables e indicadores.....  | 21 |
| Tabla 2 Accesibilidad .....   | 26 |
| Tabla 3 Distribución de carga Tj 8640 ventana 2 sur .....   | 28 |
| Tabla 4 Parámetros de la voladura Tj 8640 ventana 2 sur .....                                     | 29 |
| Tabla 5 Distribución de carga explosiva, sección 5 m x 4.5 m.....                                 | 31 |
| Tabla 6 Carga nominal de taladros (SIMSA), rampa 8600 .....                                       | 33 |
| Tabla 7 Datos de campo depurados (tajos).....   | 35 |
| Tabla 8 Datos de campo rampa .....  | 38 |
| Tabla 9 Carga de los taladros (3 taladros) .....  | 45 |
| Tabla 10 Adquisición de datos de vibraciones (datos depurados).....                               | 46 |
| Tabla 11 Diseño D1, carga de los taladros de DB.....  | 51 |
| Tabla 12 Diseño D2, carga de los taladros de DB.....  | 52 |
| Tabla 13 Diseño D3, carga de los taladros de DB.....  | 53 |
| Tabla 14 Datos tabulados de valores Geomecánicas representativos .....                            | 57 |
| Tabla 15 Resultados de las pruebas de resistencia a compresión Uniaxial.....                      | 57 |
| Tabla 16 Parámetros Geomecánicos .....  | 58 |
| Tabla 17 Resumen de velocidades críticas obtenidas .....  | 61 |
| Tabla 18 Distribución de carga (voladura de 1 taladro) .....                                      | 62 |
| Tabla 19 Categorías del macizo rocoso en ambiente sísmico.....                                    | 68 |
| Tabla 20 Capacidad de absorción de energía del sostenimiento dinámico .....                       | 69 |
| Tabla 21 Energía dinamina con ML 2 y 1 a distancias e 2.5, 5 y 10 m .....                         | 70 |
| Tabla 22 Capacidad de absorción de energía del sostenimiento dinámico .....                       | 71 |
| Tabla 23 Factores de seguridad del sostenimiento para 2 ML, a distancias de 10, 5 y<br>2.5m ..... | 72 |

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACION**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

Las operaciones mineras San Vicente pertenecientes a la compañía de minas San Ignacio de Morococha (SIMSA) es una operación minera subterránea que en la actualidad está a 1017 metros de profundidad, y se prevé que en el futuro alcance los 1200 metros. Como consecuencia de la actividad minera, se está produciendo el fenómeno de “Sismicidad Inducida”. Este fenómeno se presenta en macizo rocoso de buena calidad, asociado a excavaciones mineras profundas, a la redistribución de esfuerzos en excavaciones, fallas, contactos litológicos, etc.

Para evaluar dicho fenómeno, la mina cuenta con un sistema de vigilancia sísmica (con la empresa ESG) la cual reporta mensualmente un informe con el análisis de la data sísmica.

La información indica que se viene registrando eventos micro sísmicos cuyas magnitudes varían entre: - 0.2 Mw y 2.6 Mw, se prevé que, de continuar la actual tendencia, el sismo esperado podría tener una magnitud sísmica mayor a 2.6 Mw, que sería muy perjudicial si se produce cerca/en los hastiales de excavaciones transitadas.

NOTA: Mw = Magnitud Momento

A fin de reducir la SI (sismicidad inducida), realizaremos la presente investigación, sobre los parámetros de la voladura que pueden controlarse o modificarse, a fin de reducir la cantidad y magnitud de estos eventos.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **1.2.1. Delimitación espacial**

Se optó por elaborar este trabajo académico en las instalaciones de la unidad minera San Vicente la que se ubica en el departamento de Junín y en la jurisdicción provincial de Chanchamayo, y específicamente en la localidad Vitoc.

### **1.2.2. delimitación temporal**

Se estima que el periodo de duración de esta elaboración abarcara cerca de un semestre durante el año 2021 de julio a diciembre.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema General**

¿Qué parámetros de la voladura, influirán en la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente?

### **1.3.2. Problema Específicos**

- a. ¿El monitoreo de las vibraciones generadas por la voladura contribuirá a reducir la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente?
- b. ¿Al aplicar la técnica de Destress Blasting en las voladuras, ayudara a reducir las propiedades tensionales del macizo rocoso, en la Unidad Minera San Vicente?
- c. ¿Qué tiempo de retardo podemos seleccionar, para reducir las interferencias destructivas de la vibración generado por la voladura, en la Unidad Minera San Vicente?



## **1.4. Formulación de Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar los parámetros de la voladura, que influyen en la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- a. Conocer si el monitoreo de las vibraciones generadas por la voladura contribuye a reducir la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente
- b. Determinar si la técnica de Destress Blasting en las voladuras, ayuda a reducir las propiedades tensionales del macizo rocoso, en la Unidad Minera San Vicente
- c. Determinar qué tiempo de retardo podemos seleccionar, para reducir las interferencias destructivas de la vibración generado por la voladura, en la Unidad Minera San Vicente

## **1.5. Justificación de la investigación**

Al desarrollar la investigación encontramos justificaciones de orden teórico, práctico, económico.

### **Justificación teórica:**

Su realización justifica porque es una oportunidad de poder aplicar muchas teorías sobre voladura y sismicidad en minería; a la vez los datos, la información que se obtienen en esta investigación pueden ser usados en otras investigaciones u otras aplicaciones.

### **Justificación práctica:**

Desde el punto de vista práctico nuestra investigación planteara como algunos parámetros de voladura susceptibles a modificarse se pueden controlar, para reducir la sismicidad inducida, así como también bajar la tensión del macizo rocoso, dentro de estos tenemos el tiempo de retardo, el espaciamiento entre

taladros, aplicación de voladura confinada (Destress Blasting), controlar el factor de potencia, revisar el burden y espaciamiento etc.

**Justificación económica:**

Si se logra controlar la sismicidad inducida por la voladura, es factible que se pueda reducir el costo que significa una voladura, lo cual favorecerá a la empresa.

**1.6. Limitaciones de la investigación**

La realización de la investigación no se encontró contratiempos ni limitaciones, llevándose con toda normalidad el estudio.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

Como producto de una revisión de la literatura especializada en este tema encontramos los siguientes trabajos que lo anteceden:

##### **Primer antecedente:**

La tesis “ANALISIS DE LA SISMICIDAD INDUCIDA EN LA UNIDAD MINERA EL PORVENIR - CERRO DE PASCO 2006 - 2008” presentado por (ZUÑIGA, 2017), su objetivo fue, conocer las zonas inestables de explotación, determinadas mediante el monitoreo micro sísmico.

Como conclusiones plantea:

- Se logro una planificación adecuada teniendo en cuenta la red de monitoreo sísmico.
- El control de los movimientos sísmicos se llevó a cabo mediante 6 geófonos y teniendo una certeza de 97 %
- Los datos sísmicos se realizaron mediante bloques, teniendo bloque zona sur 1402 eventos, bloque zona norte 754 eventos.
- Se logro determinar el valor de “b”, en la zona norte la sismicidad es más intensa que la zona sur.

- En cuanto a los eventos sísmicos vemos que en el bloque sur el 35 % son por compresión, extensión debido a la explotación y el 64 % debido al corte por activación de fallas, y en la zona norte el 66 % por explotación y 32 % por activación de fallas.
- La zona sur presenta rocas de bajo almacenamiento de energía y se producen sismos de magnitudes pequeñas, en la zona norte hay poca actividad sísmica y liberación de energía mayor, con rocas competentes donde los esfuerzos se acumulan, generando sismos de magnitud alta.

**Segundo antecedente:**

En la tesis titulado “ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE VIBRACIONES PARA SELECCIÓN OPTIMA DE EXPLOSIVO Y CARGA MÁXIMA PARA REDUCIR LOS COSTOS POR VOLADURA EN LA RP PATRICK V ZONA VALERIA V NV 2220 – MARSA 2018”, presentado por (TICLIA, 2019), tiene como objetivo, escoger un tipo de explosivo, reducir costos mediante un modelo de vibraciones y aplicarlo en la mina Marza.

Como conclusiones propone:

- Aplicando modelos como la ley de atenuación, campo lejano, y la velocidad pico de partícula (VPP) se determinó 20% de acciones correctivas
- El explosivo emulsor 1000 causa mayor sobre rotura y daño a la roca; así de 0 a 0.65 m. causa intenso fracturamiento, de 0 a 1.5 m crea nuevas fracturas; el explosivo Exsablock Life causa menor daño, tenemos que de 0 a 0.35 m intenso fracturamiento de 0.35 a 0.95 m crea nuevas fracturas
- Mediante el control de los disparos se redujo la sobre excavación de Los costos de voladura se redujeron a 103.1 \$/disparo, usando el explosivo Exsa Block Life para los taladros del perímetro, corona y hastiales.

**Tercer antecedente:**

La tesis “Análisis del monitoreo microsísmico y su influencia en el comportamiento del macizo rocoso en la Unidad Minera Americana Alpayana S.

A. – 2021” presentado por (ZANABRIA, 2021), su objetivo fue el de evaluar la influencia del monitoreo microsísmico en la masa rocosa de la mina Alpayana.

Como conclusión tenemos:

- Se logro implementar un sistema de control de los eventos micro sísmicos y poder detectar las zonas inestables. Pudiendo determinar datos como cuando, donde ocurrió, que intensidad tuvo.
- Se estableció el grado de stress de la roca teniendo sismicidad no critica de -2 a 0.5 Mw y de mayores de 0.5 a 2 Mw sismicidad críticas, y como conclusión final se determina que los estallidos de roca se producen por la liberación de energía

**Cuarto antecedente:**

La tesis “MONITOREO DE VIBRACIONES, ONDAS ACÚSTICAS Y DETERMINACIÓN DE LA ONDA DE SOPLO POR EFECTO DE VOLADURA, EN EL TÚNEL DE ADUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA. DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO” de (ORTIZ, 2016), tiene como objetivo ver el comportamiento de PPV, frecuencia, presión sonora al realizar la voladura: mediante el control de las vibraciones.

Como conclusión se tiene:

El monitoreo del campo lejano de las vibraciones de la voladura se realiza desde los 45 m hasta 3500 m. estableciéndose 47 puntos de control, como resultado se obtuvo la PPV está en 3.5 a 4.0 mm/s, la frecuencia es de 1 a 100 Hz y no se denota daño al macizo rocoso.

La vibración de la roca en el campo cercano se midió entre 45 a 150 m. registrándose 18 eventos sísmicos; la PPV es de 18 a 50 mm/s. la frecuencia es de 40 a 200 Hz y un tipo de roca elasto-plastica no muestran deformaciones ni rotura.

En cuanto a presión sonora se ve que no hay daño auditivo en el túnel, cuando uno se halla a más de 1300 m.

**Quinto antecedente:**

La tesis “SISMICIDAD EN MINERÍA: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN DE CONTROLES - CASO MINA YAULIYACU” de. (CALLUPE, 2016) el objetivo fue: al contar con datos de ocurrencia de microsismos producidos por la voladura se propuso analizar, controlar estos eventos con el software Hyperion.

Como conclusión se muestra:

- En cuanto a la ocurrencia de eventos sísmicos se tuvo 4007 en las dos unidades Casapálca y Yauliyacu, entre los niveles 200 y 3900, de magnitud -1 a +2.0 Mw. Con una tendencia decreciente.
- Los niveles de mayor ocurrencia fueron en mina Yauliyacu fue el nivel 1900, en mina Casapalca fue en el nivel 2300, la hora de ocurrencia se da a la hora del disparo entre 5.30 a.m. y 5.30 p.m.
- En cuanto a las zonas sísmicas en mes de agosto se tiene dos zonas, uno cerca al tajo 230 y 693, nivel 1200 y 1400; la otra zona cerca al tajo 684 niveles 1500 y 1700, en setiembre se tiene cerca al tajeo 681, en los niveles 600 y 800; también se tiene en el mes de octubre cerca a los tajos 655 y 670, de igual manera en el mes de noviembre.

**Sexto antecedente:**

La tesis “APLICACIÓN DE UN MODELO DE VIBRACIONES PARA EL CONTROL DE VOLADURAS EN TAJO SAN GERARDO MINA ATACUCHA” de (MUCHO, 2016), el objetivo de la tesis es de poder controlar la voladura del tajo Gerardo aplicando modelo matemático sobre vibraciones.

Dentro de sus conclusiones se tiene:

- Se logro establecer las vibraciones máximas de la voladura en base a PPV, a la distancia y la carga operante.
- El valor del PPV tienen como resultado  $k : 122.7$  y  $b : 1.63$ , con este modelo podemos predecir la distancia (D), carga (Q), PPV; conociendo dos de ellas.

- Decimos que toda voladura realizada en el tajo no genera vibraciones mayores al límite establecido para casas de tierra de adobe y tierras que es de (5.3 mm/s)

## **2.2. Bases teóricas científicas**

### **2.2.1. Sismicidad inducida**

Terminó hace referencia Generalmente en operaciones mineras a las respuestas que presenta el macizo rocoso a las actividades que se realizan en él. Se trata de una situación que puede poner en riesgo la integridad de los trabajadores además de la infraestructura operativa y con ello interferir en la producción de las operaciones mineras. si bien es cierto este tipo de problemas puede intensificarse conforme las actividades dentro de la mina progresen sobre todo a niveles de profundidad mayores. (ZANABRIA, 2021)

### **2.2.2. Sistema de monitoreo**

Procedimientos generalmente consisten en una configuración de sensores de aplicación sismográfica con acelerómetros y geófonos, además de un sistema que procese y suministre los datos. La finalidad de este procedimiento a nivel micro sísmico es establecer tres parámetros que se pueden identificar recurrentemente en las operaciones mineras. Estos son: cuándo, dónde y cuán grande ocurrió el evento sísmico. Estos eventos micro sísmicos sean la causa de explosiones violentas por parte del cuerpo de rocas dentro de la mina coma en términos operativos se le conoce como estallido de roca, entre sus consecuencias se pueden señalar incidentes y accidentes de labores, daño al equipamiento y pérdida de producción. (ZANABRIA, 2021)

### **2.2.3. Vibraciones**

Este fenómeno fundamentalmente se trata de energía transmitida cuya consecuencia es un movimiento de ondas propagado por cualquier medio que encuentre.

Términos prácticos podemos señalar que los explosivos que contiene un taladro pueden generar inmediatamente una temperatura alta que puede alcanzar los 3500 °K y una presión de 150,000 atm. Cuál se puede producir una cantidad considerable de material gaseoso. cuando esta energía se aplica inmediatamente en estas condiciones de temperatura y presión Directamente en la pared del orificio se produce los impactos o golpes bruscos y directos, con lo cual el resultado es la deformación tangencial y axial de cada punto del bloque a partir del cual se proyectará en distintas orientaciones coma con lo cual se provocará que el bloque se rompa en dichas fracturas. (ZANABRIA, 2021)

#### **2.2.4. Ondas sísmicas**

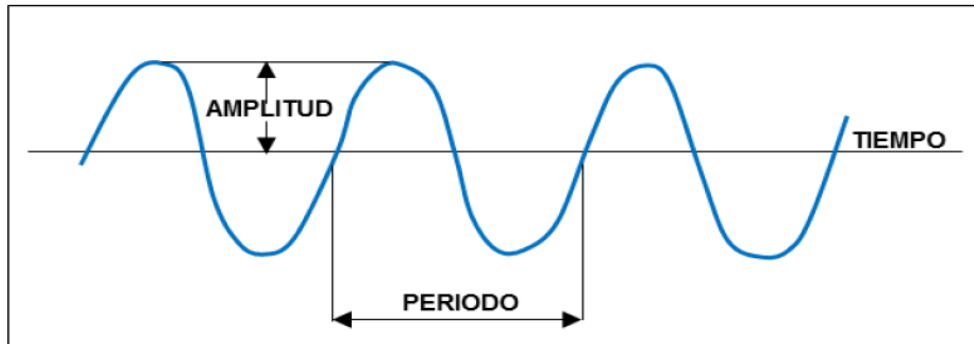
Este tipo de fenómeno se produce cuando una onda se propaga utilizando como medio el terreno o la superficie terrestre. Esto quiere decir que la energía utiliza la tierra para su transmisión, como ocurre con otras formas de transmisión energética que pueden ser la energía luminosa o sonora. el fenómeno natural más conocido que propaga ondas sísmicas es el terremoto. (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

#### **Parámetros de las ondas**

Fundamentalmente los movimientos de onda pueden ser descritos definiendo sus propiedades los cuales tienen la denominación de parámetros de onda. Estos parámetros son los que se encargan de cuantificar y medir las magnitudes que presentan los movimientos de las ondas o sus vibraciones. (BARBOSA, VALLEJO, 2019)



**Figura 1** *Movimiento de las ondas y sus parámetros*



### 2.2.5. Parámetros de vibración

Específicamente, el fenómeno de las vibraciones presenta unos parámetros orientados a la descripción del carácter de los movimientos del terreno, Los que vienen hacer frecuencia, aceleración, velocidad y desplazamiento (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

### 2.3. Definición de términos conceptuales

**Desplazamiento:** “se entiende por este parámetro a la distancia que puede recurrir una porción del terreno con referencia al lugar en el que se encontraba inicialmente. Generalmente la distancia de desplazamiento es medida en una dimensión de milímetros. (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

**Velocidad:** se entiende por este parámetro cuán rápidamente las partículas al desplazarse dejan en lugar que inicialmente ocupaban. En términos técnicos la medida de este parámetro debe comenzar en cero hasta alcanzar un nivel máximo volver al cero inicial. La dimensión de este parámetro está establecida milímetros por cada segundo. (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

**Aceleración:** en el caso de este parámetro se trata del nivel en el cual se produce un cambio en su velocidad. en términos técnicos la fuerza que ejerce una partícula al vibrar tiene que presentar una proporcionalidad en relación a la aceleración que presenta la misma partida. este parámetro cuantificable mediante fracciones de “g”. (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

**Frecuencia:** este parámetro se referencia a la cantidad de oscilaciones o vibraciones que se puede presentar durante el periodo de tiempo que abarca un segundo. La manera de cuantificar este parámetro es por medio de las unidades denominadas Hertz (Hz)". (BARBOSA, VALLEJO, 2019)

### **2.3.1. Ondas sísmicas generadas por voladuras**

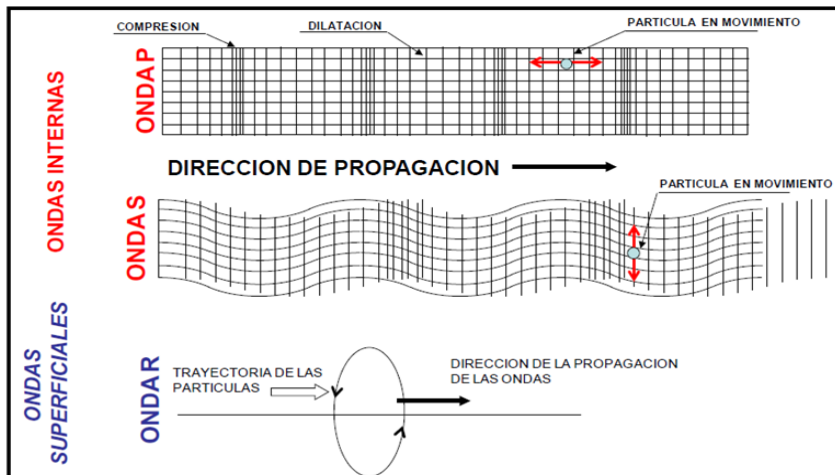
La energía que liberan las voladuras se manifiesta en forma de vibraciones que usan el cuerpo de rocas para abrirse paso en forma de onda sísmica. La parte frontal de esta onda describe un desplazamiento en forma de radio a partir del punto focal donde la carga fue detonada.

Por sus características pueden establecerse dos grupos bien diferenciados. Por un lado, las ondas que presentan un impacto interno y por otro las ondas de impacto superficial.

Las ondas de tipo interno presentan entre sus características más importantes un desempeño de tipo longitudinal o también conocido como primario "P". Así mismo también es común identificar un desempeño transversal o secundario "s". Por el lado de las ondas de impacto superficial existen las más recurrentes que se denominan Ondas Love y Ondas Rayleigh.

En seguida s III se proporciona una descripción resumida de cada tipo de onda que se puede ser generada como efecto de las voladuras. (Instituto Geologico y Minero de España, 1987)

**Figura 2 Ondas internas y superficiales**



- **Ondas Primarias o Longitudinales “P”**

Este tipo de ondas comúnmente denominadas P presentan un desempeño longitudinal o por compresión lo que significa que el terreno se comprime y dilata alternativamente siguiendo la orientación que describe la onda al propagarse. En general la velocidad a la que se mueve este tipo de onda alcanza una magnitud de 1.73 la de las ondas denominadas S. Además, el material por el cual se pueden propagar es indistinto y sean medio sólidos o líquidos. En los medios líquidos una velocidad normal para esta onda es de 1450 metros por segundo y en medios sólidos tipo material granítico o puede alcanzar los 5000 metros por segundo. (Instituto Geológico y Minero de España, 1987)

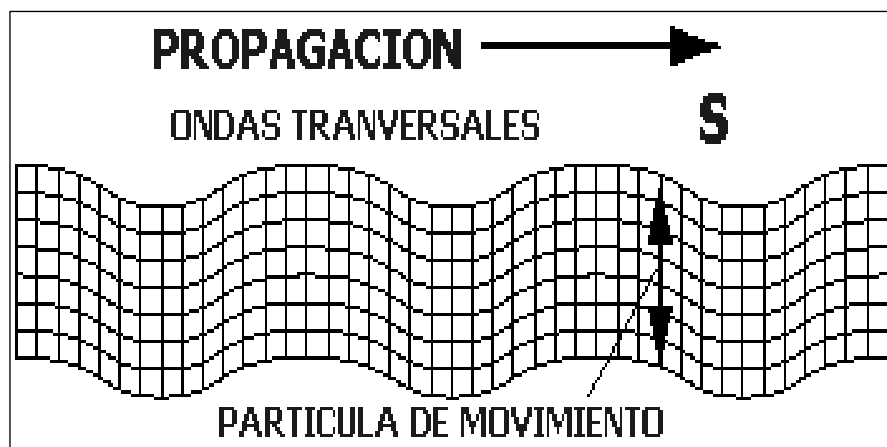
- **Ondas Secundarias y Transversales “S”**

Este tipo de ondas comúnmente denominadas S presentan una acción secundaria que describe desplazamientos transversales que se orientan siguiendo la propagación. En cuanto a las velocidades que puede alcanzar, éstas son considerablemente menores a las que puede alcanzar las ondas primarias. Entre sus principales características se encuentran la generación de oscilaciones cuando se producen los movimientos sísmicos, las que son la causa del mayor daño de estos fenómenos, el único medio de propagación

que tienen este tipo de ondas son los cuerpos sólidos. Por otra parte, las velocidades que pueden alcanzar su propagación en medios como características homogéneas o isotrópicas está condicionado por el módulo de corte  $\mu$  y de las densidades  $\rho$  de los materiales presentes. (Instituto Geológico y Minero de España, 1987)

**Figura 3** Onda secundaria o transversal "S"

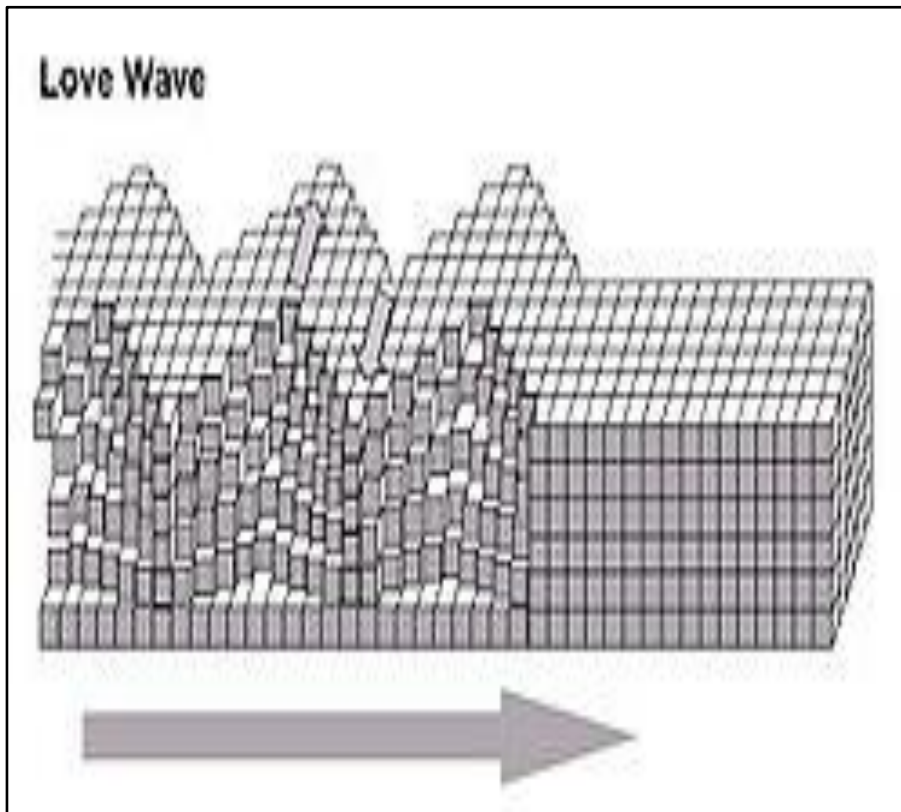
$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$



- **Ondas Superficiales**

Las ondas de tipo Love se caracterizan por presentar una actividad a nivel superficial que provoca movimientos horizontales de corte en las superficies donde actúa. Este fenómeno recibe su nombre de A.E.H. Love quien partiendo de sus investigaciones en el campo de las matemáticas logró introducir su propio modelo de ondas superficiales en el año 1911. en cuanto a las velocidades que este tipo de ondas pueden alcanzar se ha registrado que presentan hasta un 90% de la velocidad alcanzada por una onda S lo cual las coloca por encima de las Rayleigh. (Instituto Geológico y Minero de España, 1987)

**Figura 4** Onda superficiales o LOVE “L”

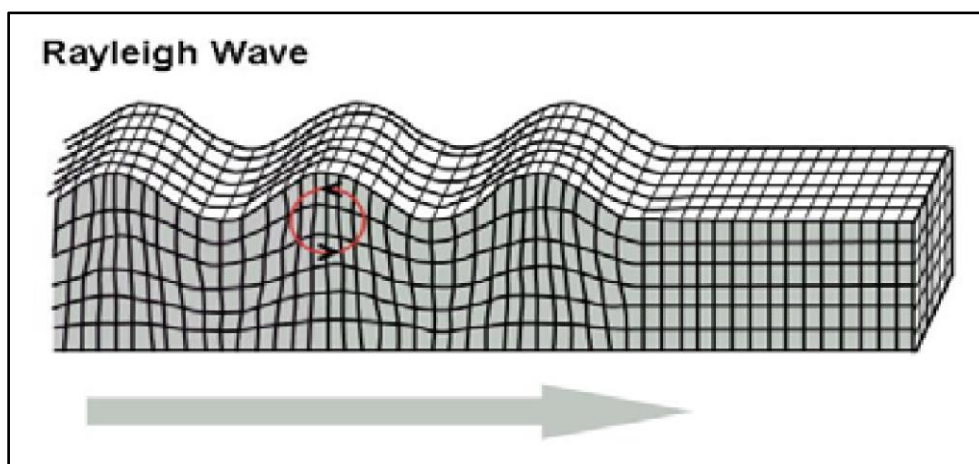


### **Ondas de Tipo Rayleigh**

Este tipo de ondas que también reciben el nombre de ground roll, se caracterizan por que en su actividad a nivel superficial provocan movimientos tipo elíptico con perfil retrógrado hacia el suelo. En este caso quien pudo establecer este tipo de ondas fue Lord Rayleigh John William Strutt, hacia el año 1885.

En cuanto a su velocidad estas presentan menores resultados que las ondas de cuerpo alcanzando un 70% de las velocidades de las ondas S. (Instituto Geológico y Minero de España, 1987)

**Figura 5 Ondas superficiales o WAVE "W"**



### **2.3.2. Parámetros que influyen en las vibraciones**

#### **Geología Local y Características de las Rocas:**

Es de gran importancia conocer este parámetro dado que la vibración es distinta, por ejemplo, en macizos rocosos homogéneos la propagación es uniforme en todas las direcciones y en estructuras geológicas complejas la propagación de ondas puede variar con la dirección y presentar diferentes tipos de atenuación y leyes de propagación. (LOPEZ JIMENO, 1987)

#### **Cantidad de Explosivo:**

“Factor de gran envergadura, dado que es directamente proporcional a la generación de vibraciones y fragmentación del macizo rocoso, a mayor carga explosiva, mayor magnitud de vibraciones y mayor riesgo de inestabilidad” (LOPEZ JIMENO, 1987)

#### **Distancia al Punto de Voladura:**

“Es parámetro dependerá del objetivo trazado y el factor a cumplir, ya que existe una relación directa entre la vibración y la distancia; por lo general conforme la distancia aumenta la intensidad de las vibraciones disminuye con respecto al punto de disparo” (LOPEZ JIMENO, 1987)

### 2.3.3. Fenómeno de estallido de roca

Un estallido de roca se define como un gran daño a una excavación que ocurre de manera violenta y repentina el cual está asociado a eventos sísmicos inducidos por la minería el cual puede provocar un violento abultamiento (bulking) (Figura 4 (a)) del contorno o eyección de roca desde el contorno de una excavación (Figura 4 (b)) (Kaiser y Cai, 2013). Con la definición explicada anteriormente se pretende distinguir este fenómeno del fenómeno de spalling el cual es la eyección de pequeñas partículas de roca de la capa más superficial del contorno de una excavación que a menudo se presentan como consecuencia de las altas tensiones presentes en el macizo rocoso y como fenómeno previo a un posible estallido de roca (CALLUPE, 2016).

**Figura 6** Casos de estallidos de rocas



#### **Explosión deformación**

Una explosión-deformación o strainburst es una súbita y violenta falla de la roca cerca del borde de la excavación, con focos sísmico y daño localizado. Esta podría o no causar eyección de material y la mayoría son causados debido a tensiones inducidas por la minería, es decir, el estallido es causado por cambios en el régimen de tensiones y/o al sistema de rigidez de la mina debido al avance del túnel. El daño causado puede estar relacionado a la energía almacenada cerca de la excavación o afectada por energía asociada a un

evento sísmico. Si el daño es solo causado por la energía almacenada, el estallido se auto inicia y esta causa eventos sísmicos. En cambio, hay otros estallidos en los que la acción es gatillada y magnificada por un evento sísmico. (TICLIA, 2019)

### **Explosión-deformación auto iniciado**

Estallido de roca causado por un debilitamiento gradual del macizo rocoso tal que las tensiones locales después de un tiempo exceden la resistencia del macizo rocoso. En este caso, el daño es solo relacionado a la energía almacenada en el volumen de roca en proceso de falla y de la energía liberada en el contorno del macizo rocoso. La energía irradiada o la intensidad del evento sísmico asociado (movimiento sísmico debido al estallido de roca) están relacionadas a la intensidad de la explosión-deformación. (TICLIA, 2019)

- **Explosión-deformación inducido por la minería**

Estallidos de roca causados por sobrecargas tiempo-dependientes, desplazamientos minero-inducidas o deformaciones que cambian los esfuerzos locales en el borde de la excavación de manera tal que las tensiones (temporalmente) alcanzan la resistencia del macizo rocoso. La energía liberada o intensidad del evento sísmico es otra vez relacionada a la intensidad del strainburst. (TICLIA, 2019)

- **Explosión-deformación gatillado sísmicamente**

En este caso las condiciones locales de tensión alcanzan y exceden el estado de equilibrio límite debido al evento sísmico para macizos bajo un régimen compresional alto debido a altas tensiones in situ y/o energía almacenada en la roca, lo que conlleva a la falla de la roca. El daño dependerá del nivel de tensión, de las características del macizo rocoso y la rigidez local de la mina.



En otras palabras, el daño causado por un strainburst gatillado sísmicamente es causado por un súbito y violento abultamiento de la roca (bulking) en gran parte altamente tensionada y fracturada debido a sobrecargas estáticas. (TICLIA, 2019)

#### **2.3.4. Hipótesis General**

Los parámetros de la voladura, que influyen en la sismicidad inducida, son, el tiempo de retardo, la técnica de la voladura confinada, el factor de potencia, la velocidad pico de partícula, el sostenimiento dinámico, el burden, el espaciamiento, la mallade perforación, explosivo a usar en los cuales deben controlarse permanentemente, la Unidad Minera San Vicente

#### **2.3.5. Hipótesis específicas**

- a. Al monitorear constantemente las vibraciones que se generan por la voladura se estará contribuyendo a reducir la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente.
- b. La aplicación de la técnica del Destress Blasting en las voladuras, ayudara a reducir las propiedades tensionales del macizo rocoso, en la Unidad Minera San Vicente.
- c. El tiempo de retardo que podemos seleccionar, para reducir las interferencias destructivas de la vibración generado por la voladura es la de 50 ms, en la Unidad Minera San Vicente.

#### **Identificación de variables**

Tiempo de retardo, la técnica de la voladura confinada, el factor de potencia, la velocidad pico de partícula, el sostenimiento dinámico, el burden, el espaciamiento, la mallade perforación, explosivo a usar

#### **2.4. Enfoque filosófico - epistémico**

Al desarrollar la presente investigación podemos acercarnos a la ciencia desde varias perspectivas. Es posible que nuestra meta sea resolver el

problema sobre minería Parámetros de la voladura, que influyen en la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente.

Los resultados obtenidos de esta problemática nos podrán parecer distintos si realizamos su aplicación en otras circunstancias o desde otras especialidades. Este aspecto demuestra que nuestra actitud científica puede ser enfocada desde una perspectiva distinta desde la cual inicialmente la planteamos

**Tabla 1** Operacionalización de variables e indicadores

| <b>OPERACIONALIZACION DE VARIABLES E INDICADORES</b>   |   |  |   |  |
|--|---|--|---|--|
| <b>VARIABLE</b>  | <b>DEFINICION CONCEPTUAL</b>  | <b>DEFINICION OPERACIONAL</b>  | <b>DIMENCION</b>  | <b>INDICADORES</b>   |
| <p><b>Variables para la hipótesis general</b></p> <p><b>Variable independiente</b><br/>                     tiempo de retardo, la técnica de la voladura confinada, el factor de potencia, la velocidad pico de partícula, el sostenimiento dinámico, el burden, el espaciamiento, la malla de perforación, explosivo a usar</p> <p><b>Variable dependiente</b><br/>                     sismicidad inducida<br/>                     Para la hipótesis específica a<br/>                     Variable independiente<br/>                     monitorear constantemente las vibraciones<br/>                     Variable dependiente<br/>                     sismicidad inducida<br/>                     Para la hipótesis específica b<br/>                     Variable independiente<br/>                     técnica del Destress Blasting<br/>                     Variable dependiente<br/>                     sismicidad inducida<br/>                     Para la hipótesis específica c<br/>                     Variable independiente<br/>                     tiempo de retardo<br/>                     Variable dependiente<br/>                     sismicidad inducida</p> | <p>Sismicidad inducida<br/>                     La sismicidad inducida es una respuesta del macizo rocoso a la minería aplicada, que genera un peligro para los trabajadores, además de poder generar interferencias en el proceso productivo minero. Este problema se ha intensificado con la progresión de la actividad minera a profundidades cada vez mayores. (ZANABRIA, 2021)</p> | <p>En la investigación vamos a determinar los parámetros de la voladura, que influirán en la sismicidad inducida, en la Unidad Minera San Vicente.</p> | <p>-Diagnóstico de la voladura<br/>                     -voladura confinada<br/>                     -Tiempo de retardo<br/>                     -monitoreo de vibraciones<br/>                     -Sostenimiento dinámico</p> | <p>-Malla de perforación<br/>                     -distribución de la carga<br/>                     -campo lejano<br/>                     -campo cercano<br/>                     -prueba de voladura confinada<br/>                     -Distribución de carga<br/>                     -Retardo de 50 ms.<br/>                     -pernos, cable bolt, malla electrosoldada</p> |

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es el aplicado “se caracteriza por su interés en la aplicación, utilización y consecuencias prácticas de los conocimientos. La investigación aplicada busca el conocer para hacer, para actuar, para construir, para modificar”. (SUPO, CAVERO, 2014)

#### **3.2. Nivel de investigación**

El nivel de investigación es descriptivo, apoyado en: “tales estudios se muestran, narran, reseñan o identifican hechos, situaciones, rasgos, características de un objeto de estudio, o se diseñan productos, modelos, prototipos, guías, etcétera, pero no se dan explicaciones o razones de las situaciones, los hechos, los fenómenos, etcétera”. (BERNAL, 2010)

#### **3.3. Característica de la investigación**

La característica es Procedimental ya sigue un proceso determinado, comenzando con una idea principal, luego siguiendo la premisa y finalmente logrando el objetivo final.

#### **3.4. Métodos de investigación**

El método a emplear es el método científico, y el uso de los métodos específicos inductivo-deductivo, analítico; como nos dice: “Este método de

inferencia se basa en la lógica y estudia hechos particulares, aunque es deductivo en un sentido (parte de lo general a lo particular) e inductivo en sentido contrario (va de lo particular a lo general)". (TAMAYO Y TAMAYO, 2003)

### **3.5. Diseño de investigación**

El diseño es el no experimental, transeccionales descriptivos como dice:

Los diseños transeccionales descriptivos tienen como objetivo indagar la incidencia de las modalidades o niveles de una o más variables en una población. El procedimiento consiste en ubicar en una o diversas variables a un grupo de personas u otros seres vivos, objetos, situaciones, contextos, fenómenos, comunidades, etc., y proporcionar su descripción. Son, por tanto, estudios puramente descriptivos y cuando establecen hipótesis, éstas son también descriptivas (de pronóstico de una cifra o valores). (HERNANDEZ, FERNANDES, BAPTISTA, 2014)

### **3.6. Procedimiento del muestreo**

#### **3.6.1. Población**

La población estará constituida por todas las labores de la unidad minera, que se encuentran operando en la actualidad, fundamentado por: " la población de una investigación está compuesta por todos los elementos personas, objetos, organismos, historias clínicas, etc que participan del fenómeno que fue definido y delimitado en el análisis del problema de investigación". (Badajoz, 2020)

#### **3.6.2. Muestra**

La muestra comprende los siguientes tajos, tajeo 8640, 8660, túnel 8650, rampa 8600, crucero 8586.

### **3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas e instrumentos que se empleó en nuestra investigación fueron.

### **3.7.1. Técnicas**

En nuestra investigación hemos hecho uso de técnicas como: la observación directa, recopilación de documentos y pruebas de campo; para obtener el diagnóstico de la voladura, para el monitoreo de las vibraciones, para la prueba de voladura confinada, recojo de datos sobre la geomecánica de las labores de estudio.

### **3.7.2. Instrumentos**

Como instrumentos se utilizó las guías de observación, fichas de registro; así se tiene las tablas de evaluación geomecánica, fichas de datos de campo de monitoreo, tablas de tiempos de retardo, registro de monitoreo, fotografías.

## **3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Contando con toda la información se procedió a ordenar y analizar los datos obtenidos usando herramientas como Excel, equipos de cómputo, equipos sismógrafos, para poder ver si estos parámetros de voladura que influyen en vibraciones de la sismicidad inducida se pueden controlar o no, obteniendo los resultados de la investigación.

## **3.9. Orientación ética**

En toda la investigación realizada se ha tratado de realizar con toda la objetividad posible, veracidad, honestidad, respetando los intereses de las personas, de la empresa y demás instituciones.

## **CAPITULO IV**

### **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados. Ubicación**

La Compañía Minera San Ignacio de Morococha S.A.A, Unidad San Vicente: - se halla ubicado en:

“Distrito de Vitoc,

Provincia de Chanchamayo:

Departamento de Junín

Región Andrés Avelino Cáceres.

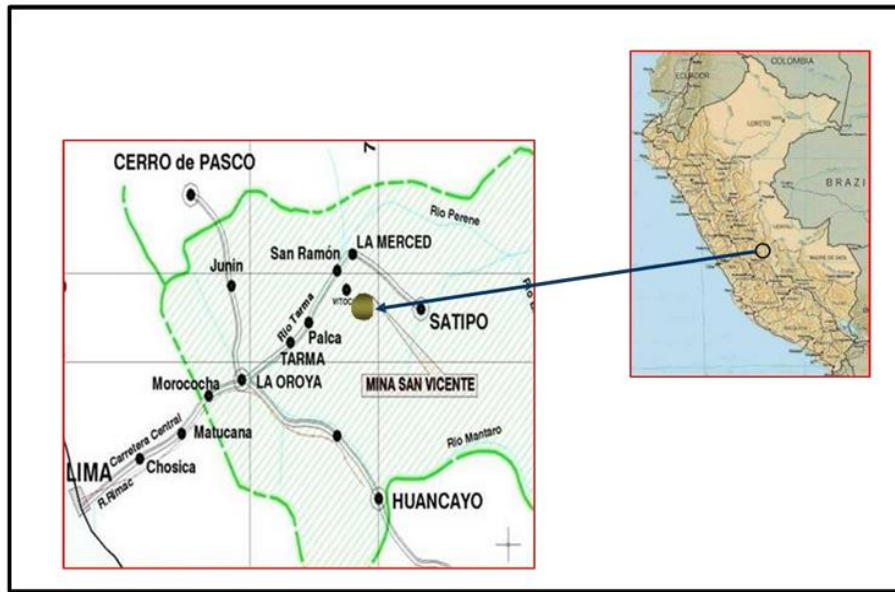
A una altitud de 1400 a 2000 m.s.n.m.

Sus coordenadas geográficas son:

11°13'45'' Latitud Sur

75° 23' 00'' Longitud Oeste” (VILLAVERDE, LARA, 2020)

**Figura 7 Ubicación geográfica**



#### 4.1.1. Accesibilidad

El acceso es desde Lima a través de la Carretera Central de penetración Lima – La Oroya - Tarma -San Ramón, en el kilómetro 293 (antes de San Ramón) se sigue un desvío hacia el sur. (VILLAVERDE, LARA, 2020)

**Tabla 2 Accesibilidad**

|                                | TIPO DE VÍA | DISTANCIA |
|--------------------------------|-------------|-----------|
| <b>LIMA – LA OROYA</b>         | ASFALTADO   | 188 Km.   |
| <b>LA OROYA- SAN RAMON</b>     | ASFALTADO   | 105 Km.   |
| <b>SAN RAMON – SAN VICENTE</b> | AFIRMADO    | 17 Km.    |
| <b>TOTAL</b>                   |             | 310 Km.   |

#### Diagnóstico de la voladura de rocas

La empresa minera realiza los diseños de voladura de producción en forma directa, mientras que los de avance horizontal son confeccionados por SIMSA y por empresas especializadas.

#### 4.1.2. Voladura en tajeos

Se observo los siguientes aspectos

- Malla “Efectiva”. El esquema de voladura es realizado por SIMSA, la malla típica se muestra en la Figura 8



- Carga total 48.01 Kg, las cargas operantes varían entre: CO = (2 - 4.06 Kg), el burden B = 0.80 m y el espaciamiento E = 1.0 m, Factor de Potencia: FP = 0.93 Kg/m<sup>3</sup> (0.31 Kg/ton).
- El factor de potencia debe ser revisado (al parecer es alto).
- Definir el FP a partir del índice de volabilidad por tipo de roca (ejemplo. con el modelo del índice de volabilidad de Lilly), que considera las características geomecánicas de macizo rocoso, y las propiedades del explosivo.
- Se debe reducir la carga operante para minimizar la vibración, la voladura debería considerar la detonación de “solamente” un taladro por período de retardo (esto se conseguirá empleando detonadores Duales).
- Revisar la carga lineal, la que muestra la tabla 2, indica cartuchos de. = 1 1/8 sin atacar (0.71 Kg/m). La carga lineal de SIMSA sería 0.89 Kg/m (equivalente a usar cartuchos de. = 1 1/4”).
- Tener en cuenta que el B y E, es función de la carga lineal (con explosivos encartuchados y del taladro con explosivos a granel).
- Se requiere tener un modelo de cálculo de voladura (ej. el modelo de Holmberg).
- Recalcular B y E considerando la Carga Lineal efectiva.
- Emplear un tiempo de retardo que produzca la interferencia destructiva de la vibración.
- Detonar solamente un taladro por período de retardo (muy importante)
- Emplear detonadores duales (50 ms / 500 ms)

Figura 8 Malla de producción típica

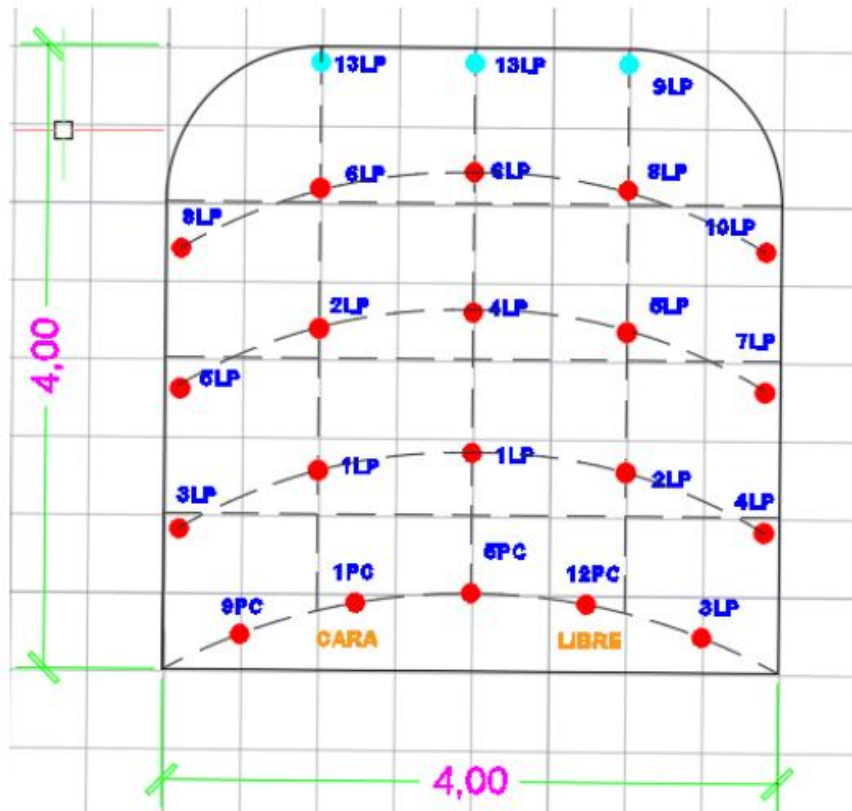


Tabla 3 Distribución de carga Tj 8640 ventana 2 sur

| DISTRIBUCION DE CARGA |                          |                |                        |                        |              |              |                             |                     |                         |                       |                        |
|-----------------------|--------------------------|----------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Nº DE FANEL           | TIEMPO DE RETARDO O (ms) | Nº DE TALADROS | EMULNOR 3000 1 1/8X16" | EMULNOR 1000 1 1/8X16" | FAMECORT E20 | TOTAL (Kg)   | CARGA OPERANTE (Kg/retardo) | CARGA LINEAL (Kg/m) | LONGITUD DE TALADRO (m) | LONGITUD DE CARGA (m) | LONGITUD SIN CARGA (m) |
| 1 PC                  | 25                       | 1              | 8                      | 0                      | 0            | 2.32         | 2.32                        | 0.75                | 3.60                    | 3.10                  | 0.50                   |
| 5 PC                  | 125                      | 1              | 8                      | 0                      | 0            | 2.32         | 2.32                        | 0.75                | 3.60                    | 3.10                  | 0.50                   |
| 9 PC                  | 225                      | 1              | 8                      | 0                      | 0            | 2.32         | 2.32                        | 0.75                | 3.60                    | 3.10                  | 0.50                   |
| 12 PC                 | 350                      | 1              | 8                      | 0                      | 0            | 2.32         | 2.32                        | 0.75                | 3.60                    | 3.10                  | 0.50                   |
| 1 LP                  | 500                      | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 2 LP                  | 1000                     | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 3 LP                  | 1500                     | 2              | 15                     | 0                      | 0            | 4.35         | 4.06                        | 0.70                | 3.60                    | 3.10                  | 0.50                   |
| 4 LP                  | 2000                     | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 5 LP                  | 2500                     | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 6 LP                  | 3000                     | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 7 LP                  | 3500                     | 1              | 7                      | 0                      | 0            | 2.03         | 2.03                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 8 LP                  | 4000                     | 2              | 14                     | 0                      | 0            | 4.06         | 4.06                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 9 LP                  | 4500                     | 1              | 1                      | 6                      | 0            | 1.99         | 1.99                        | 0.83                | 3.60                    | 2.40                  | 1.20                   |
| 10 LP                 | 5000                     | 1              | 7                      | 0                      | 0            | 2.03         | 2.03                        | 0.75                | 3.60                    | 2.70                  | 0.90                   |
| 13 LP                 | 6800                     | 2              | 2                      | 12                     | 0            | 3.98         | 3.98                        | 0.83                | 3.60                    | 2.40                  | 1.20                   |
| <b>TOTAL</b>          |                          | <b>23</b>      | <b>148</b>             | <b>18</b>              | <b>0</b>     | <b>48.01</b> |                             |                     |                         |                       |                        |

**Tabla 4** Parámetros de la voladura Tj 8640 ventana 2 sur

| PARAMETROS DE VOLADURA |                   |          |
|------------------------|-------------------|----------|
| Profundidad promedio   | m                 | 3.60     |
| Taco Promedio          | m                 | 0.80     |
| Burden                 | m                 | 0.80     |
| Espaciamiento          | m                 | 1.00     |
| Ø de la carga          | mm                | Acoplado |
| Tipo de roca           | Tipo              | Mineral  |
| Densidad de roca       | Tn/m <sup>3</sup> | 3.00     |
| Factor de Potencia     | Kg/Tn             | 0.31     |

#### 4.1.3. Voladura de avance, Túnel y Rampa

Existen dos mallas de voladura que son:

Malla de voladura “Nominal”, que ha sido diseñado por el Proveedor.

Malla de voladura “Efectiva”, diseñada por SIMSA

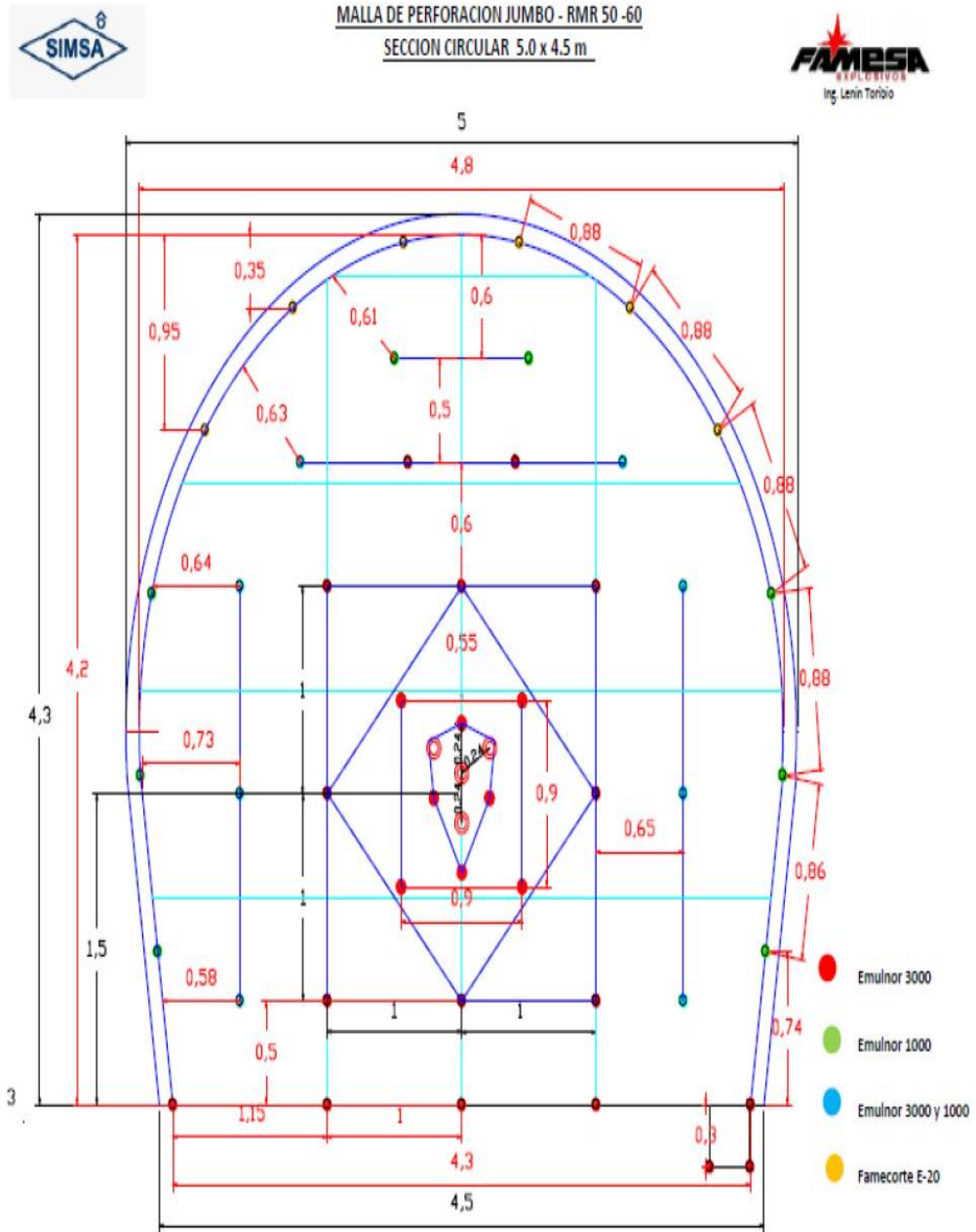
##### Esquema voladura “Nominal” (del proveedor)

Analizando la malla de voladura Nominal (teórica) que se muestra en la Figura 9 para rampa 4.5 x 4.3 m, se tienen los siguientes comentarios:

- Se emplean 47 taladros cargados. = 45 mm y 04 vacíos de. = 100 mm
- La malla no define la distribución de carga como: longitud sin carga  $L_s$  (m), la longitud cargada  $L_c$  (m), y la carga Lineal  $I$  (Kg/m)
- Considerar la posibilidad de emplear Emulnor 3000 solo en el arranque y posiblemente, en algunas ayudas) para el carguío de los taladros interiores se empleará Emulnor 1000.
- La malla debe definir la secuencia de detonación.
- Se desconoce el rendimiento real de la voladura con esta malla, ¿cuál es su eficiencia efectiva en avance?
- Se requiere la estadística mensual de avance para verificar el rendimiento de la voladura
- Modificar el arranque a fin de que produzca mayor avance por disparo.

- Ante la posibilidad de reducir el diámetro de perforación, previamente será aconsejable definir la carga lineal.

**Figura 9** Malla de Nominal (del proveedor) para Rampa 4.5 x 4.3



**Tabla 5 Distribución de carga explosiva, sección 5 m x 4.5 m**

| DISTRIBUCION DE CARGA EXPLOSIVA - SECCION 5.0m x 4.5m |                |              |              |                |              |            |                                  |              |              |                |              |            |                             |
|---|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------|--------------|------------|-----------------------------|
| RESUMEN   | N° de Taladros | 14 PIES      |              |                |              | TOTAL (Kg) | Max. Carga operante (kg/retardo) | 12 PIES      |              |                |              | TOTAL (Kg) | Carga operante (kg/retardo) |
|   |                | Emulnor 3000 | Emulnor 1000 | Famecorte E-20 |              |            |                                  | Emulnor 3000 | Emulnor 1000 | Famecorte E-20 |              |            |                             |
|   |                | 1 1/8x16"    | 1 1/8x16"    | 20             |              |            |                                  | 1 1/8x16"    | 1 1/8x16"    | 20             |              |            |                             |
| Cargado   | Und.           | Und.         | Pza.         |                |              | Und.       | Und.                             | Pza.         |              |                |              |            |                             |
| Taladros Rimados                                      | 4              |              |              |                |              |            |                                  |              |              |                |              |            |                             |
| Arranque  | 4              | 11           |              |                | 12.8         | 3.2        | 10                               |              |              |                | 11.6         | 2.9        |                             |
| 1ra Ayuda   | 4              | 10           |              |                | 11.6         | 5.8        | 9                                |              |              |                | 10.5         | 5.2        |                             |
| 2da Ayuda   | 4              | 9            |              |                | 10.5         | 5.2        | 8                                |              |              |                | 9.3          | 4.7        |                             |
| 3ra Ayuda   | 4              | 9            |              |                | 10.5         | 5.2        | 8                                |              |              |                | 9.3          | 4.7        |                             |
| Cuadrador corona central                              | 2              | 9            |              |                | 5.2          | 5.2        | 8                                |              |              |                | 4.7          | 4.7        |                             |
| Cuadrador corona extremos                             | 2              | 4            | 5            |                | 5.2          | 5.2        | 3                                | 5            |              |                | 4.6          | 4.6        |                             |
| Cuadrador hastiales                                   | 6              | 4            | 5            |                | 15.5         | 7.7        | 3                                | 5            |              |                | 13.8         | 6.9        |                             |
| Ayuda Corona  | 2              |              | 8            |                | 4.5          | 4.5        |                                  | 7            |              |                | 4.0          | 4.0        |                             |
| hastiales   | 6              |              | 8            |                | 13.6         | 6.8        |                                  | 7            |              |                | 11.9         | 6.0        |                             |
| Corona  | 6              |              | 1            | 6.0            | 6.7          | 6.7        |                                  | 1            | 5.0          |                | 5.9          | 5.9        |                             |
| Arrastre (Piso)                                       | 5              | 9            |              |                | 13.1         | 13.1       | 8                                |              |              |                | 11.6         | 11.6       |                             |
| Cuneta  | 2              | 7            |              |                | 4.1          | 4.1        | 6                                |              |              |                | 3.5          | 3.5        |                             |
| <b>TOTAL</b>  | <b>47</b>      | <b>243</b>   | <b>100</b>   | <b>36</b>      | <b>113.3</b> |            | <b>214</b>                       | <b>92</b>    | <b>30</b>    |                | <b>100.6</b> |            |                             |

| DATOS TECNICOS              |         |         |          | CONSUMO        |         |         |      | RESULTADOS                |         |         |       |
|-----------------------------|---------|---------|----------|----------------|---------|---------|------|---------------------------|---------|---------|-------|
|                             | 14 pies | 12 pies | Und.     |                | 14 pies | 12 pies | Und. |                           | 14 pies | 12 pies | Und.  |
| LONGITUD DE BARRA           | 4.2     | 3.6     | m        | CARMEX         | 2       | 2       | Und. | EFICIENCIA DE AVANCE      | 3.3     | 3.0     | m     |
| DENSIDAD DE ROCA            | 2.7     |         | tn/m3    | FANEL          | 47      | 47      | Und. | LONGITUD PROMEDIO DE TACO | 0.54    | 0.30    | m     |
| SECCIÓN DE LABOR (A x H)    | 5.0     | 4.3     | m        | EMULNOR 1000   | 100.00  | 92.00   | Kg   | EXPLOSIVO POR DISPARO     | 113.28  | 100.59  | Kg.   |
| N° TALADROS CARGADOS        | 47      | 47      | Taladros | EMULNOR 3000   | 243.00  | 214.00  | Kg   | VOLUMEN ROTO              | 60.72   | 55.20   | m3    |
| N° TALADROS DE ALIVIO       | 4       |         | Taladros | FAMECORTE E-20 | 36.00   | 30.00   | m    | TONELAJE ROTO             | 163.94  | 149.04  | t     |
| DIAMETRO DEL TALADRO        | 45      |         | mm       | CD 3P          | 30      | 30      | m    | FACTOR DE CARGA           | 1.87    | 1.82    | Kg/m3 |
| LONGITUD PROMEDIO X TALADRO | 3.84    | 3.30    | m        | TACO INERTE    | 38      | 38      | Und. | FACTOR DE POTENCIA        | 0.69    | 0.67    | Kg/t  |
| AREA DE LABOR CIRCULAR      | 18.40   |         | m2       |                |         |         |      | FACTOR DE AVANCE          | 34.33   | 33.53   | Kg/m  |

La malla es inadecuada porque no indica “claramente” la carga lineal, así como la distribución de carga.

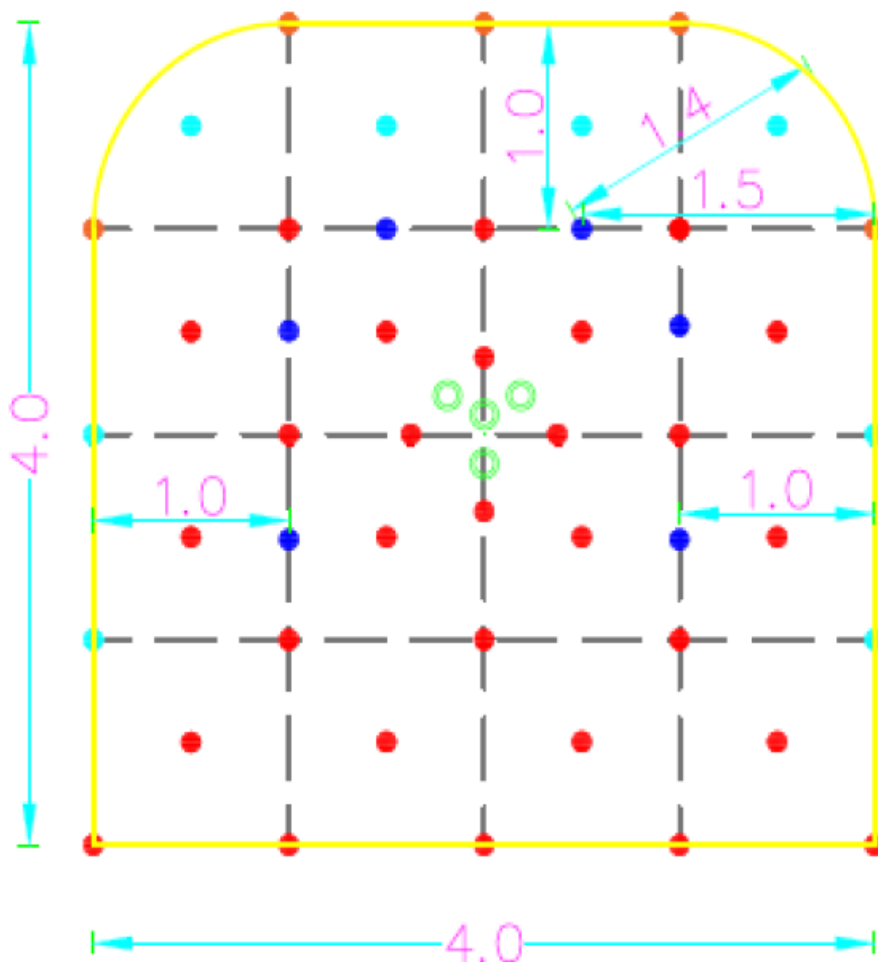
### Esquema voladura “Efectiva” (de SIMSA)

Analizando la malla de voladura “Efectiva” de SIMSA para rampa 4.5 m x 4.3 m, se tienen los siguientes comentarios:

- se emplean 47 taladros cargados. = 45 mm y 04 vacíos de. = 100 mm
- Los talados son detonados con Emulnor 3000, (la malla difiere con los que indica la malla Nominal del proveedor).
- Como los cartuchos son atacados parcialmente, la carga lineal es 0.90 Kg/m, equivalente a emplear cartuchos de 1 ¼ “de diámetro (verificar la carga lineal).
- Después de la voladura, quedan tacos de hasta 0.6 m (83% de avance).
- Modificar el arranque para obtener mayor avance en disparo (se deberá obtener, al menos 95% de avance).

- Considerar la posibilidad de emplear Emulnor 3000 solo en el arranque y posiblemente en algunas ayudas) para el carguío de los demás taladros interiores se empleará Emulnor 1000.
- Los taladros perimetrales de corona son detonados con Emulnor 1000 y Famecorte (voladura de recorte), no se observa sobre excavación.
- Estandarizar el uso de tacos de arcilla.

**Figura 10** Malla efectiva para Rampa 4.0 x 4.0 (de SIMSA)



|                                |
|--------------------------------|
| Taladros cargados Emulnor 3000 |
| Taladros cargados Emulnor 1000 |
| Taladros cargados Famecort E20 |
| Taladros Destress Blasting     |

- La malla no indica la secuencia de salida como: talados por período de retardo, tiempo de retardos
- Los taladros en azul son los de Destress Blasting (caso de implementarse este tipo de voladura)

**Tabla 6** Carga nominal de taladros (SIMSA), rampa 8600

| DISTRIBUCION DE CARGA |                        |                |                        |                        |              |               |                             |                     |                         |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Nº DE FANEL           | TIEMPO DE RETARDO (ms) | Nº DE TALADROS | EMULNOR 3000 1 1/8X16" | EMULNOR 1000 1 1/8X16" | FAMECORT E20 | TOTAL (Kg)    | CARGA OPERANTE (Kg/retardo) | CARGA LINEAL (Kg/m) | LONGITUD DE TALADRO (m) | LONGITUD DE CARGA (m) | LONGITUD SIN CARGA (m) |
| 1 PC                  | 25                     | 1              | 11                     | 0                      | 0            | 3.19          | 3.19                        | 0.85                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 5 PC                  | 125                    | 1              | 11                     | 0                      | 0            | 3.19          | 3.19                        | 0.85                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 6 PC                  | 150                    | 1              | 11                     | 0                      | 0            | 3.19          | 3.19                        | 0.85                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 12 PC                 | 350                    | 1              | 11                     | 0                      | 0            | 3.19          | 3.19                        | 0.85                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 1 LP                  | 500                    | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 2 LP                  | 1000                   | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 3 LP                  | 1500                   | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 4 LP                  | 2000                   | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 5 LP                  | 2500                   | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 6 LP                  | 3000                   | 2              | 18                     | 0                      | 0            | 5.22          | 5.22                        | 0.69                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 7 LP                  | 3500                   | 2              | 20                     | 0                      | 0            | 5.80          | 5.80                        | 0.77                | 3.96                    | 3.76                  | 0.20                   |
| 8 LP                  | 4000                   | 2              | 18                     | 0                      | 0            | 5.22          | 5.22                        | 0.73                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 9 LP                  | 4500                   | 2              | 18                     | 0                      | 0            | 5.22          | 5.22                        | 0.73                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 10 LP                 | 5000                   | 2              | 16                     | 0                      | 0            | 4.64          | 4.64                        | 0.65                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 11 LP                 | 5600                   | 2              | 16                     | 0                      | 0            | 4.64          | 4.64                        | 0.65                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 12 LP                 | 6200                   | 2              | 16                     | 0                      | 0            | 4.64          | 4.64                        | 0.65                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 13 LP                 | 6800                   | 4              | 32                     | 0                      | 0            | 9.28          | 9.28                        | 0.65                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| 14 LP                 | 7400                   | 1              | 8                      | 0                      | 0            | 2.32          | 2.32                        | 0.73                | 3.96                    | 3.16                  | 0.80                   |
| 15 LP                 | 8000                   | 5              | 0                      | 5                      | 25           | 6.04          | 6.04                        | 0.44                | 3.96                    | 2.76                  | 1.20                   |
| 16 LP                 | 8600                   | 5              | 45                     | 0                      | 0            | 13.05         | 13.05                       | 0.73                | 3.96                    | 3.56                  | 0.40                   |
| <b>TOTAL</b>          |                        | <b>43</b>      | <b>351</b>             | <b>5</b>               | <b>25</b>    | <b>107.83</b> |                             |                     |                         |                       |                        |

### Monitoreos de las vibraciones

Se realizó la adquisición de datos de vibraciones empleando sismógrafos con geófonos triaxiales, midiéndose la velocidad de vibración en los Campos Lejano y Cercano, con los datos obtenidos, se elaboró las Leyes de Atenuación de la Vibración para los campos mencionados.

#### 4.1.4. Modelo de vibración en Campo Lejano

El Campo Lejano se inicia, a partir de una distancia (perpendicular al taladro) de 5 veces la longitud de la carga en el taladro y se extiende indefinidamente.

Para modelar el comportamiento de la vibración en este campo, se podrá emplear la ecuación de Hendron, o la de Devine. En este estudio se eligió la ecuación de Devine, que relaciona la Velocidad Máxima de Vibración de Partícula PPV (mm/s) con la distancia escalada (distancia/raíz cuadrada de la carga), la ecuación E.1 es la fórmula de Devine.

Ecuación E1:

$$PPV = K_l * \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^\beta$$

Donde:

PPV = Velocidad Pico de la partícula (mm/s)

D= Distancia de la voladura al punto de registro (m)

W = Peso de la carga explosiva (Kg)

$K_l, \beta$  = son constantes a determinar mediante el análisis de regresión

#### 4.1.5. Modelo de vibración en el Campo Cercano.

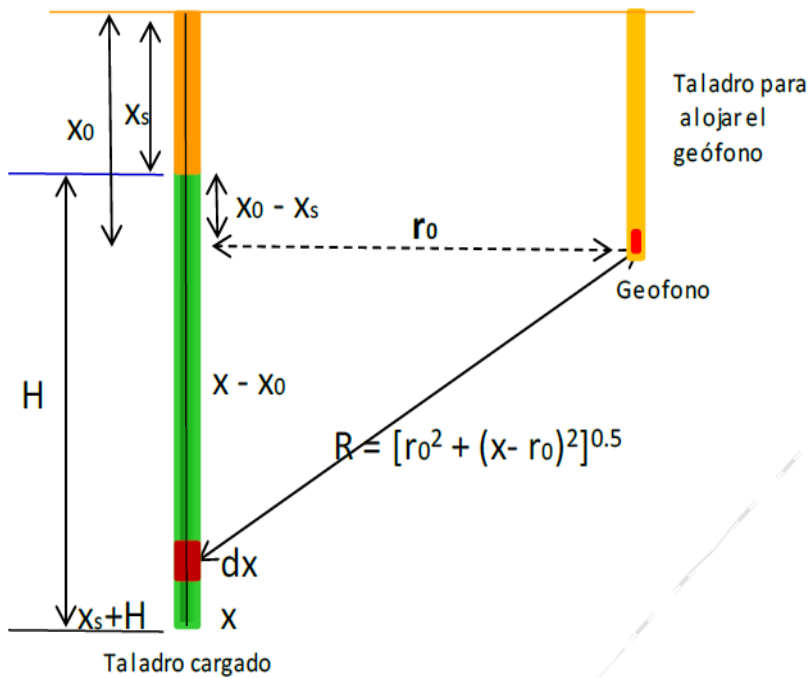
El Campo Cercano se inicia desde el taladro hasta 5 veces la longitud (perpendicular) de la carga alargada en él. En esta región, la vibración está afectada por las características geométricas de la carga alargada, para describirla se emplea el modelo de vibración de Holmberg y Persson que se muestra en la ecuación E. 2.

Ecuación E.2:

$$PPV = K \left( \frac{l}{r_0} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H+x_s-x_0}{r_0} \right) + \arctan \left( \frac{x_0-x_s}{r_0} \right) \right]^\alpha$$



**Figura 11** Modelo de vibración campo cercano (H&P)



Donde:

PPV = Velocidad Máxima de Vibración de Partícula (mm/s)

$I$  = Concentración lineal de carga (kg/m)

$r_0, x_0$  = Distancias del taladro al geófono (m)

$H$  = Longitud de la carga en el taladro (m)

$X_s$  = Longitud sin carga en el taladro (m)

Las constantes  $K$  y  $\alpha$  serán determinadas mediante el análisis de regresión

**Tabla 7** Datos de campo depurados (tajos)

| DATOS DE CAMPO .                   |            | ECUACION  | RAIZ CUADRADA | 1/2   |                 |         |       |       |          |            |            |             |          |                                  |
|------------------------------------|------------|-----------|---------------|-------|-----------------|---------|-------|-------|----------|------------|------------|-------------|----------|----------------------------------|
| <b>TAJO - BREASTING/DESQUINCHE</b> |            |           |               |       |                 |         |       |       |          |            |            |             |          |                                  |
|                                    | Fecha      | N° Prueba | Profund. m    | Lugar |                 | Sismog. | D m   | W Kg  | Tiempo s | VERT. mm/s | LONG. mm/s | TRANS. mm/s | PPV mm/s | $\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)$ |
| 4                                  | 5/12/2021  | 1         | 1057          | Tajo  | TJ - 8640 Corr. | G3-VD   | 26.56 | 3.40  |          | 1.49       | 2.38       | 1.46        | 2.38     | 14.41                            |
| 5                                  | 10/12/2021 | 7         |               | Desq. | Desq.-8600      | G2-VD   | 47.37 | 1.73  |          | 1.06       | 1          | 1.255       | 1.255    | 36.02                            |
| 6                                  |            |           |               |       |                 | G3-VD   | 48.8  | 1.73  |          | 2.43       | 1.08       | 1.15        | 2.43     | 37.08                            |
| 8                                  | 11/12/2021 | 8         | 1057          | Tajo  | TJ - 8640 Vent. | G3 - CD | 13.07 | 2.175 |          | 27.53      | 10.93      | 11.99       | 27.53    | 8.86                             |

Figura 12 Ubicación del monitoreo (tajo), primer disparo

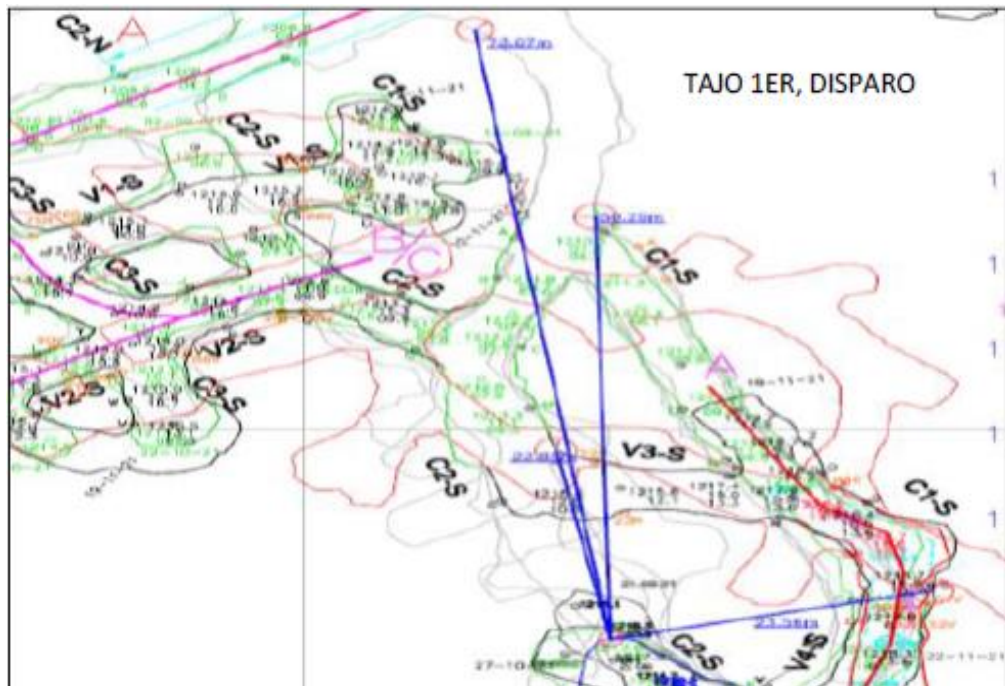
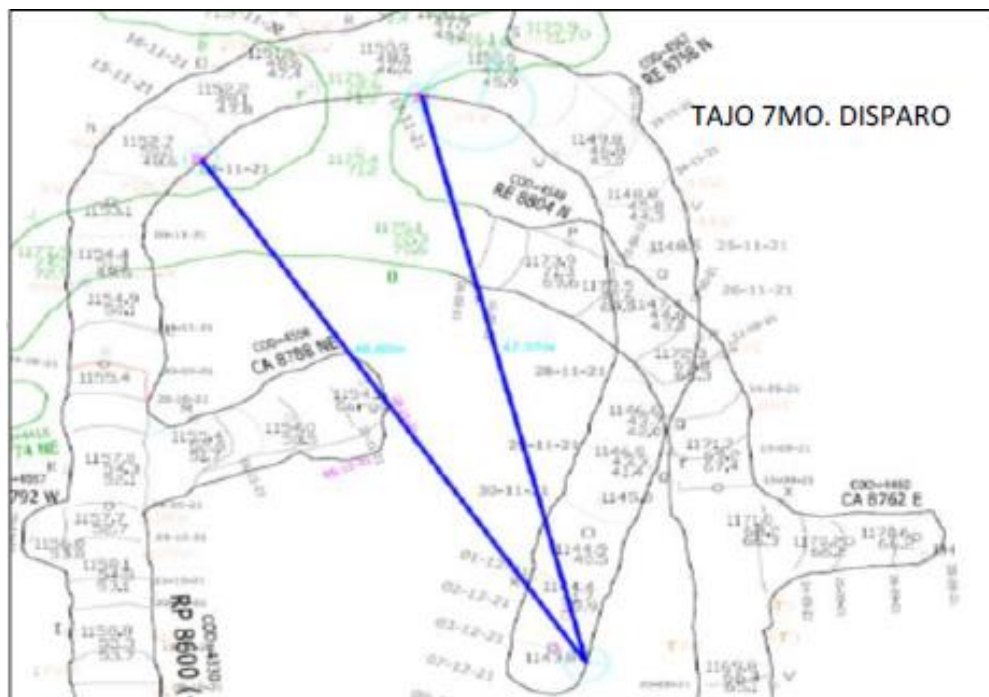
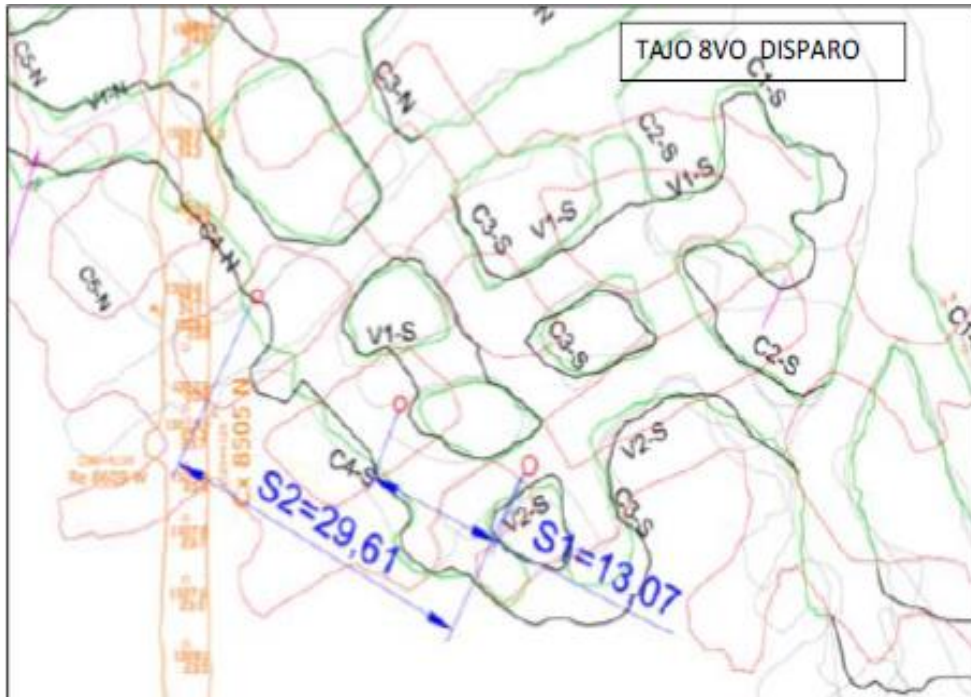


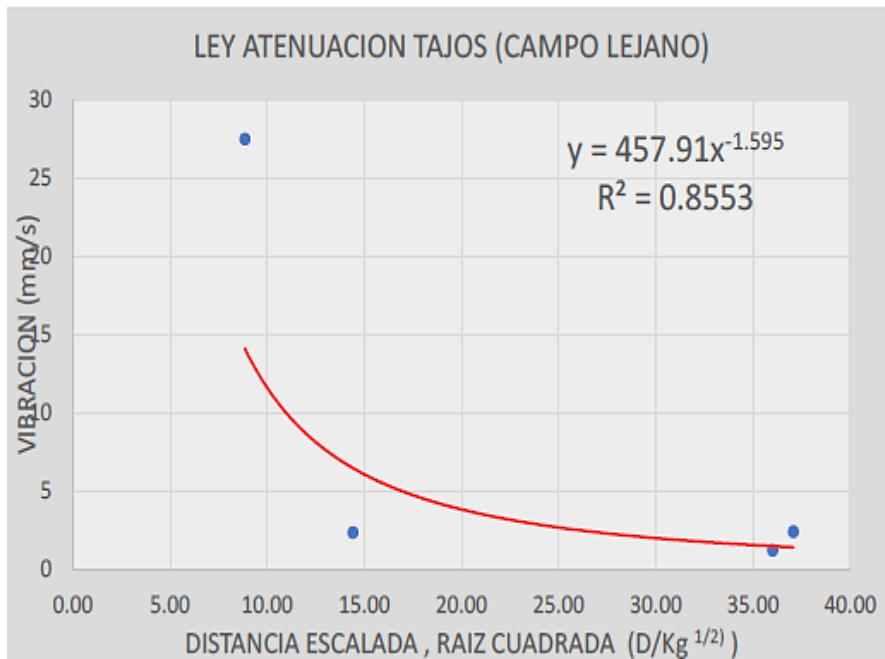
Figura 13 Ubicación del monitoreo (tajo), séptimo disparo



**Figura 14** Ubicación del monitoreo (tajo), octavo disparo



**Figura 15** Ley de atenuación (voladura en tajos)



Los valores de K y beta son:

$$K = 457.91$$

$$\text{beta} = -1.595$$

$$r^2 = 0.85$$

entonces, la ecuación (campo lejano en tajos) es:

Ecuación 3

$$PPV = 457.91 * \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.595}$$

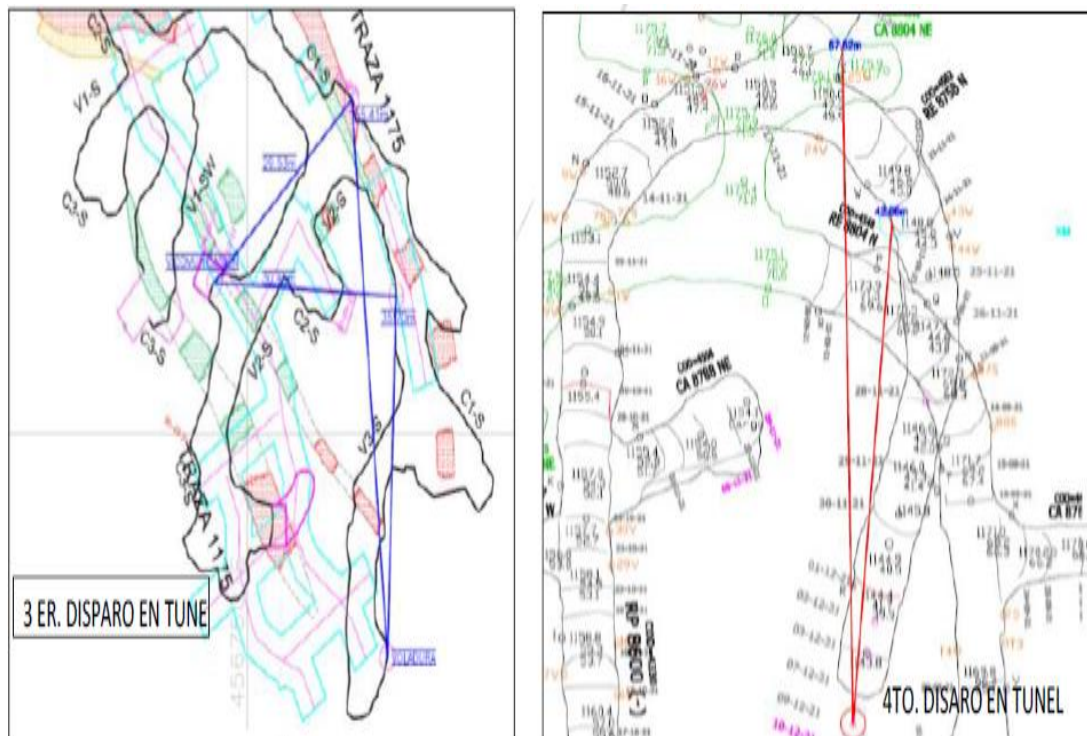
**Monitoreo de vibraciones en la rampa**

Determinación de la Ley de atenuación (Campo Lejano)

**Tabla 8** Datos de campo rampa

| DATOS DE CAMPO. |            |           |            |       |              |         |         |       |          |            |            |             | ECUACION: RAIZ CUADRADA 1/2 |                                    |
|-----------------|------------|-----------|------------|-------|--------------|---------|---------|-------|----------|------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------------------|
| RAMPA/TUNEL     |            |           |            |       |              |         |         |       |          |            |            |             |                             |                                    |
|                 | Fecha      | N° Prueba | Profund. m | Lugar |              | Sismog. | D m     | W Kg  | Tiempo s | VERT. mm/s | LONG. mm/s | TRANS. mm/s | PPV mm/s                    | $\left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)$ |
| 1               | 7/12/2021  | 3         | 1082       | Túnel | Túnel-8650   | G2 - VD | 35.7    | 3.19  |          | 2.31       | 2.16       | 2.69        | 2.69                        | 19.99                              |
| 2               |            |           |            |       | Vent. 3      | G3 - CD | 55.41   | 3.19  |          | 3.13       | 1.64       | 1.37        | 3.13                        | 31.02                              |
| 3               | 8/12/2021  | 4         |            | Rampa | RP - 8600    | G2 - VD | 42.96   | 3.19  |          | 2.85       | 0.97       | 0.63        | 2.85                        | 24.05                              |
| 4               |            |           |            |       |              | G3 - VD | 57.52   | 3.19  |          | 1.14       | 0.72       | 1.03        | 1.14                        | 32.21                              |
| 5               | 9/12/2021  | 6         | 1082       | Túnel | Túnel - 8650 | G3 - VD | 63.8    | 2.61  |          | 1.65       | 1.24       | 1.96        | 1.96                        | 39.49                              |
| 6               | 12/12/2021 | 9         | 1082       | Túnel | CX 8586      | G2 - VD | 34.99   | 2.61  |          | 12.22      | 4.42       | 5.06        | 12.22                       | 21.66                              |
| 7               |            |           |            |       |              |         | G3 - VD | 47.73 | 2.61     |            | 4.98       | 2.48        | 2.22                        | 4.98                               |

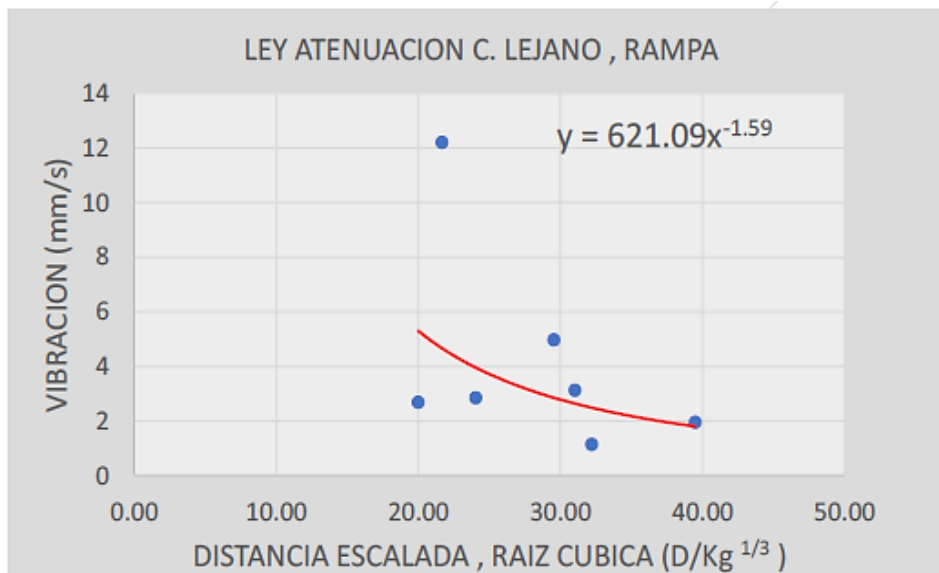
**Figura 16** Ubicación de los sismógrafos (túnel), 3er, 4to disparo



**Figura 17** Ubicación de los sismógrafos (túnel), 6to, 9no disparo



**Figura 18** Ley de atenuación en la Rampa (Campo Lejano)



Los valores de K y beta son:

$$K = 621.09$$

$$\text{Beta} = -1.59$$

Entonces, la ecuación (campo lejano en túneles) es:

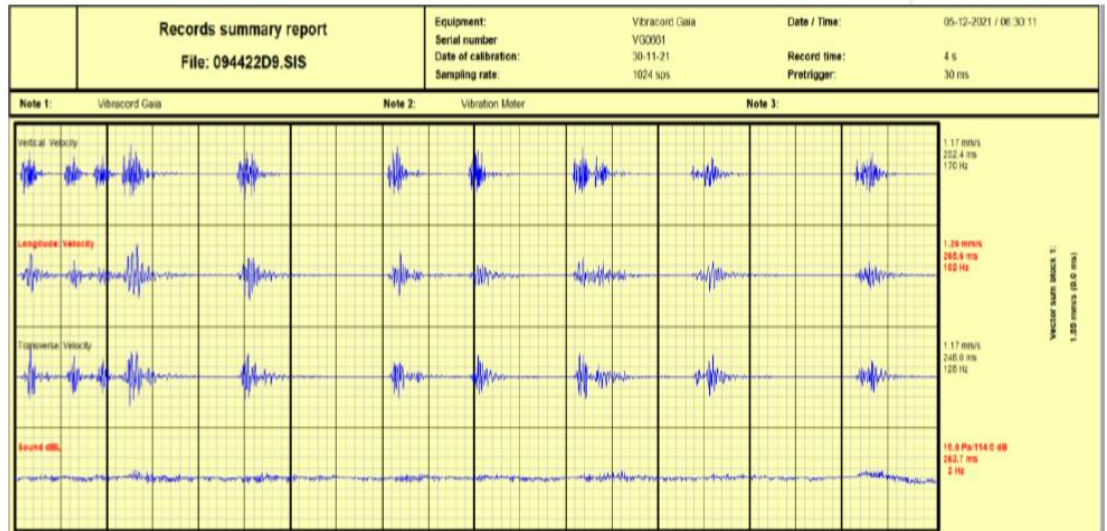
Ecuación 4:

$$PPV = 621.09 * \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.59}$$

## Registro de monitoreo

Figura 19 Registro de monitoreo, Tajo 8640 Corredor 1 Sur

### REGISTRO VOLADURAS (S2) FECHA: 05-12-2021 HORA: 6:30 AM



### REGISTRO VOLADURAS (S3) FECHA: 05-12-2021 HORA: 6:30 AM

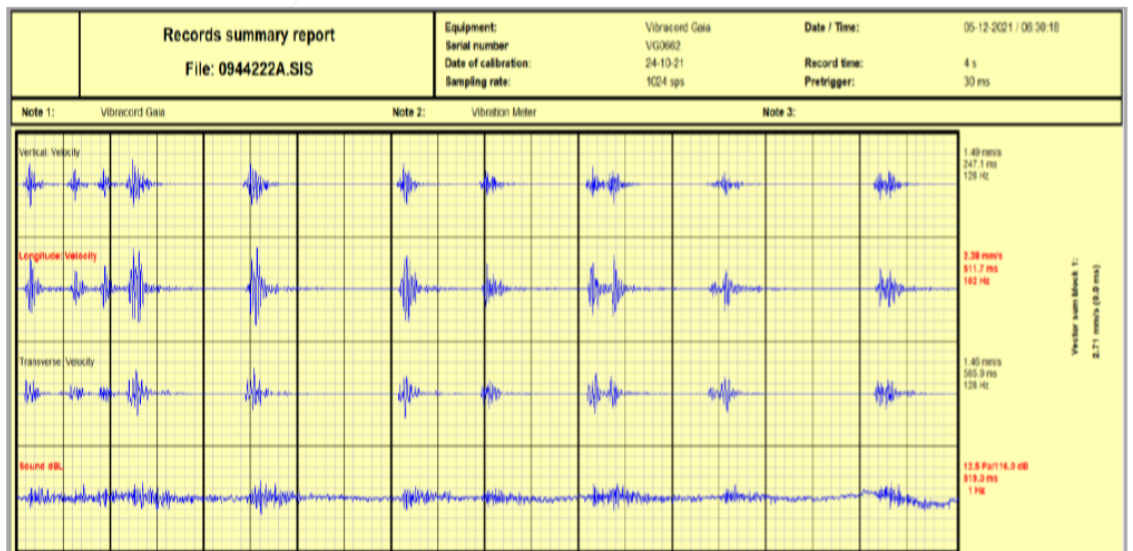
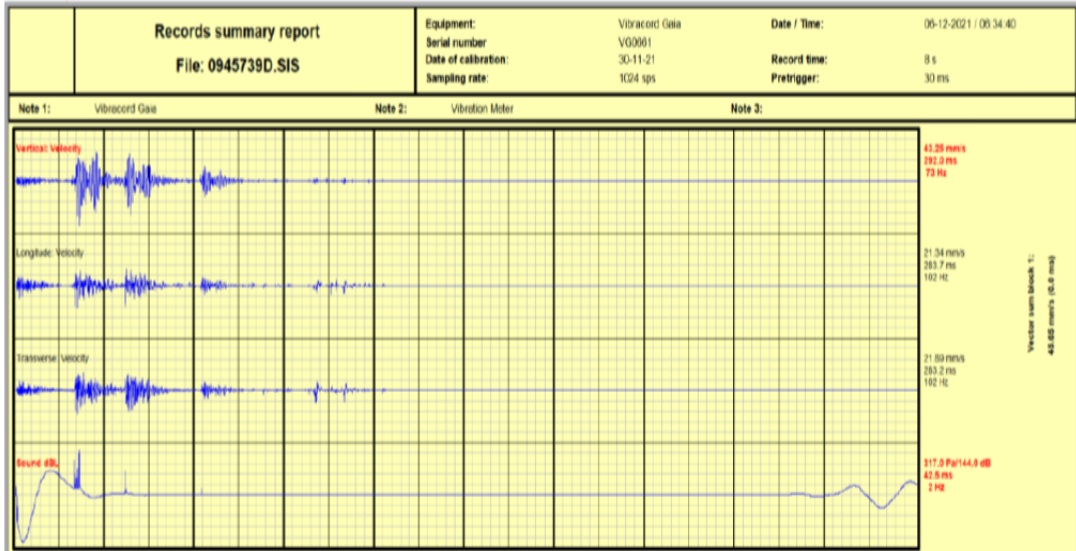


Figura 20 Registro de monitoreo, Tajo 8660, acceso 8620 NW)

**REGISTRO VOLADURAS (S2)** FECHA: 06-12-2021 HORA: 6:30 AM



**REGISTRO VOLADURAS (S3)** FECHA: 06-12-2021 HORA: 6:30 AM

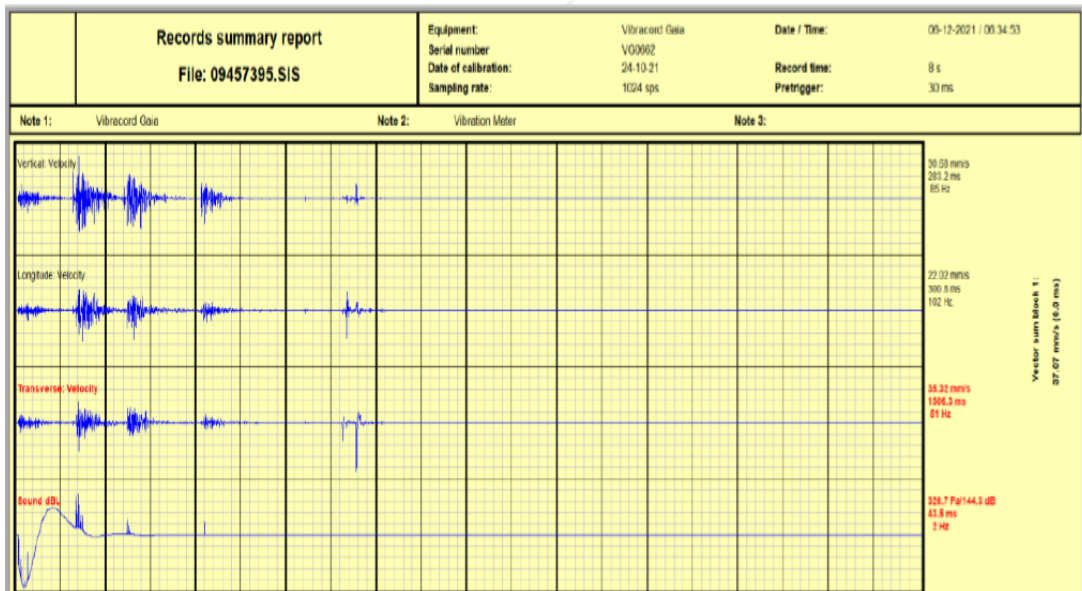


Figura 21 Registro de monitoreo, rampa RP – 8600

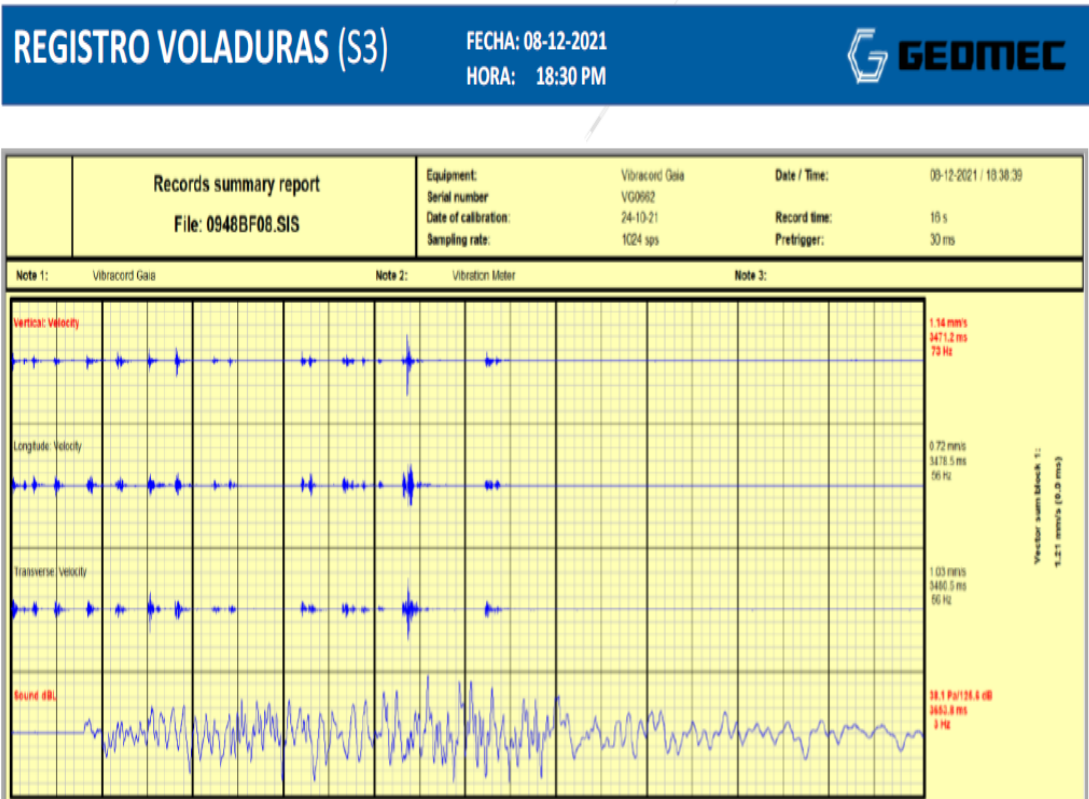
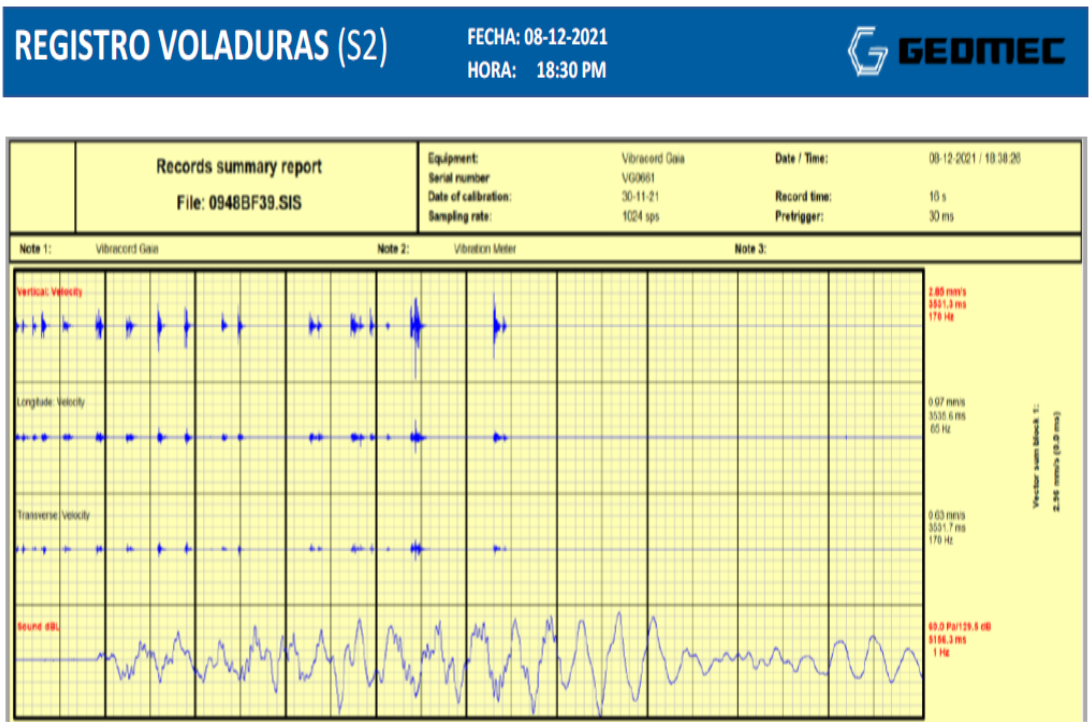
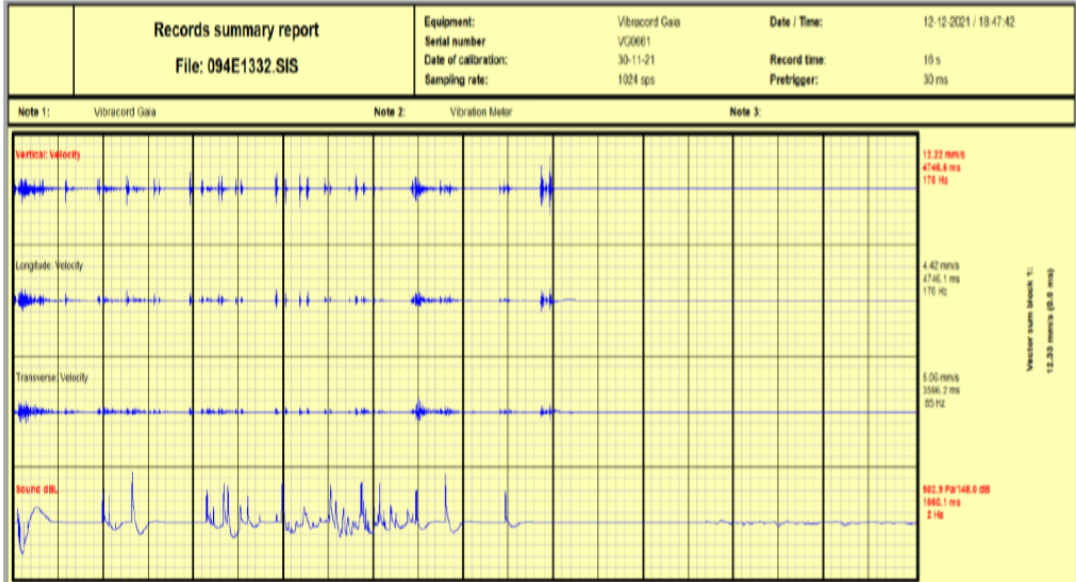


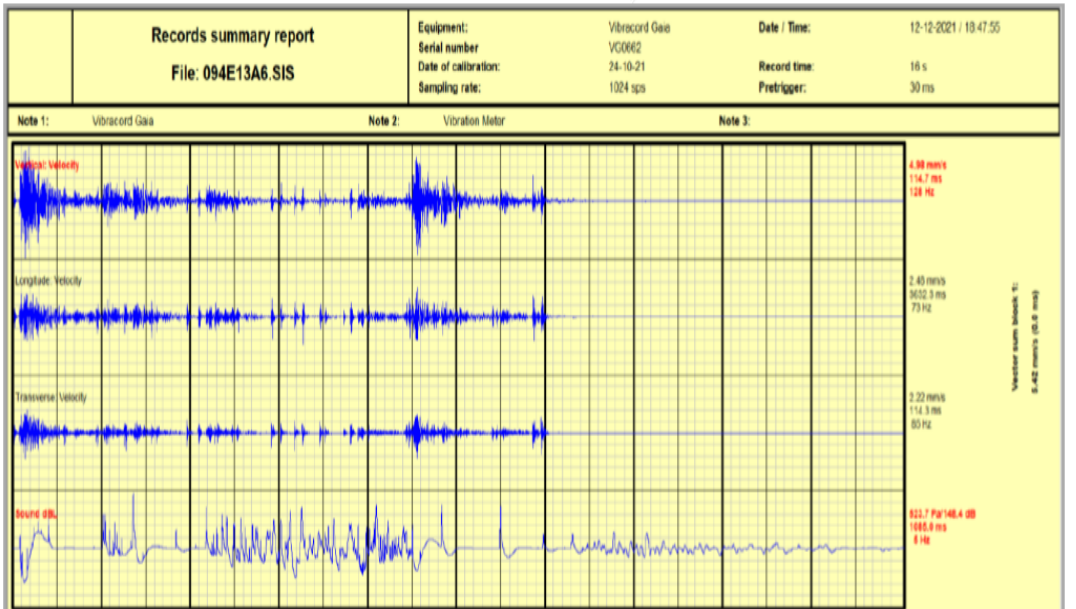


Figura 22 Registro de monitoreo, cruceo CX 8586

**REGISTRO VOLADURAS (S2)** FECHA: 12-12-2021 HORA: 18:30 PM 



**REGISTRO VOLADURAS (S3)** 



**Destress Blasting (DB) en ambiente propenso a Sismicidad Inducida (SI)**

El Destress Blasting, es una técnica de Pre-Acondicionamiento (PA) que consiste en ubicar cargas explosivas totalmente confinadas que son detonadas simultáneamente con la voladura del frente de avance de túneles, la finalidad es

crear fracturas (en el material a volar) para modificar las propiedades tensionales del macizo rocoso, a fin de reducir las cargas debido a esfuerzos en el frente de las excavaciones.

La detonación de un taladro produce, alrededor de él, una zona de roca intensamente triturada que se extiende hasta cuatro veces su diámetro, más allá de este límite, las fracturas se propagarán hasta aproximadamente 50 veces el diámetro de perforación (obviamente estas dimensiones varían de acuerdo al estado tensional del macizo rocoso de lugar), la zona fracturada por la detonación producirá la relajación de esfuerzos en el macizo remanente.

En el año 2021, se registró en la mina un evento micro sísmico de magnitud 2.6 Mw, alertando que se estaría produciendo un aumento del peligro sísmico, acrecentando el potencial de daños durante la excavación de túneles.

Debido a este aumento del número y magnitud de los microsismos, se podría implementar la técnica de **Destress Blasting (DB)**, que se aplicaría como una medida de mitigación de los riesgos que conlleva la excavación de túneles en terrenos donde se presenta el fenómeno de SI para aumentar la seguridad del personal durante la excavación del túnel.

#### **4.1.6. Prueba especial para DB**

Para definir los parámetros preliminares/conceptuales de la voladura de DB, se detonaron y monitorearon simultáneamente tres taladros confinados (sin cara libre) ubicados en el piso del tajo 8660, acceso 8602 NW, a fin de determinar la ley de atenuación de la velocidad de vibración (en roca) en condiciones de total confinamiento.

Para la adquisición de datos, se emplearon tres sismógrafos convenientemente ubicados tal como se muestra en el croquis de la Figura 22.

En la implementación de esta técnica de pre-acondicionamiento se tendrán en cuenta las siguientes premisas:

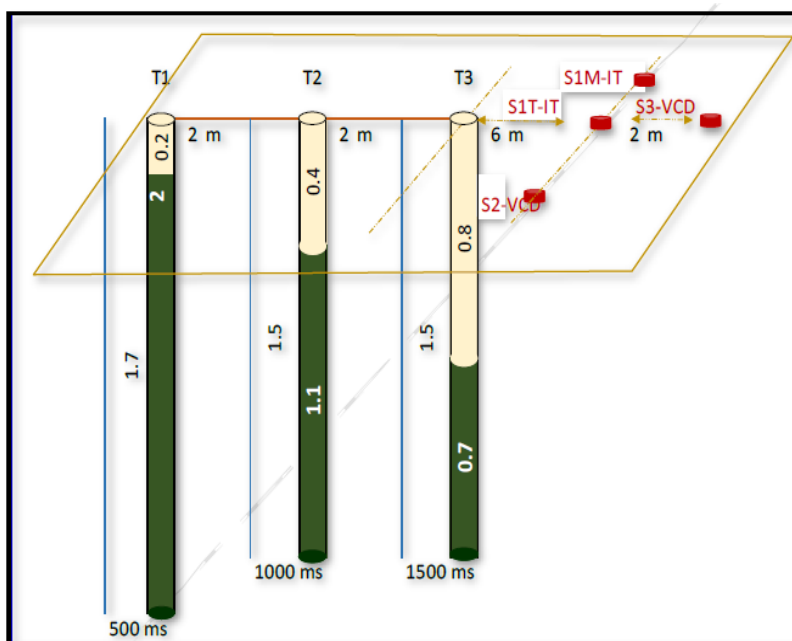
**Determinación de la ley de atenuación para el Campo Cercano:**

Definido con la ecuación E.2, de Holmberg y Persson (H&P)

**Criterio de rotura:** El espesor de la zona a fracturar alrededor del taladro de DB, tendrá por límite el que resulte de considerar la mínima “velocidad crítica de vibración” definida con el criterio sueco de rotura ( $V_{Crit. sueca}$ ).

**Criterio de diseño:** La zona fracturada por los taladros de pre acondicionamiento, no debería superar el perímetro del túnel.

**Figura 23** Configuración de taladros para la prueba



La figura muestra el arreglo para la detonación y monitoreo de los tres taladros de prueba, a fin de determinar la ley de atenuación H&P para condiciones totalmente confinadas.

**Tabla 9** Carga de los taladros (3 taladros)

| DISTRIBUCION DE CARGA |                        |            |                   |                   |             |                             |                   |             |               |                   |
|-----------------------|------------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------|-----------------------------|-------------------|-------------|---------------|-------------------|
| Nº DE FANEL           | TIEMPO DE RETARDO (ms) | Nº DE TAL. | EM 3000 1 1/8X16" | EM 1000 1 1/8X16" | TOTAL Kg    | CARGA OPERANTE (Kg/retardo) | CARGA LINEAL Kg/m | LONG. TAL m | LONG. CARGA m | LONG. SIN CARGA m |
| T1                    | 500 ms                 | 1          | 4                 |                   | 1.16        | 1.16                        | 0.77              | 1.70        | 1.50          | 0.20              |
| T2                    | 1000 ms                | 1          | 3                 |                   | 0.87        | 0.87                        | 0.79              | 1.50        | 1.10          | 0.40              |
| T3                    | 1500 ms                | 1          | 2                 |                   | 0.58        | 0.58                        | 0.83              | 1.50        | 0.70          | 0.80              |
| <b>TOTAL</b>          |                        | <b>3</b>   | <b>9</b>          |                   | <b>2.61</b> |                             | <b>0.80</b>       |             |               |                   |

**Tabla 10** Adquisición de datos de vibraciones (datos depurados)

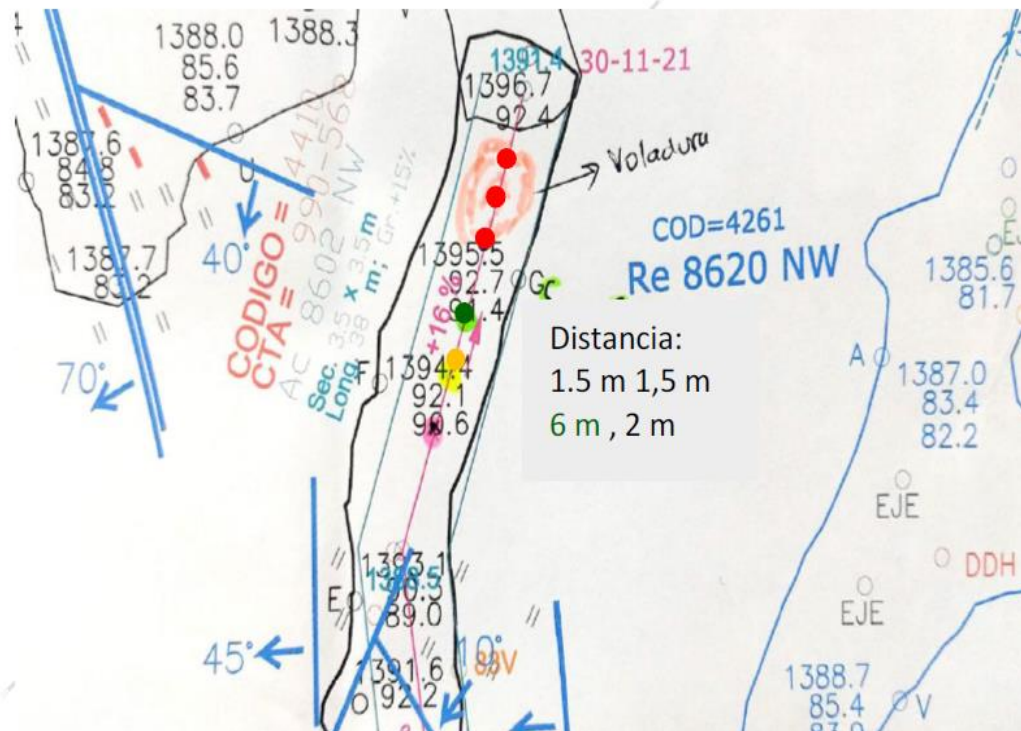
| DATOS DE CAMPO, TRES TALADROS |           |        |         |            |                   |             |          |     |              | ECUACION: RAIZ CUADRADA 1/2 |            |            |                            |                        |
|-------------------------------|-----------|--------|---------|------------|-------------------|-------------|----------|-----|--------------|-----------------------------|------------|------------|----------------------------|------------------------|
| VALIDOS                       | FECHA     | TALAD. | SISMOG. | CARGA Kg/m | CARGA LINEAL Kg/m | Long. carga | CARGA Kg | D m | $\Delta T$ s | TRAN mm/s                   | VERT. mm/s | LONG. mm/s | PPV <sub>Medida</sub> mm/s | DE m/Kg <sup>1/2</sup> |
| 3                             | 6/12/2021 | T1     | S2-VCD  | 1.16       | 0.77              | 1.50        | 1.74     | 9   | 0.584        | 21.89                       | 43.24      | 21.34      | 43.24                      | 6.82                   |
| 4                             |           |        | S3-VCD  | 1.16       | 0.77              | 1.50        | 1.74     | 11  | 0.602        | 21.08                       | 30.68      | 22.02      | 30.68                      | 8.34                   |
| 5                             |           | T2     | S1M-IT  | 0.87       | 0.79              | 1.10        | 0.96     | 7.5 | 0.965        |                             | 39.36      |            | 39.36                      | 7.67                   |
| 7                             |           |        | S2-VCD  | 0.87       | 0.79              | 1.10        | 0.96     | 7.5 | 1.032        | 20.1                        | 32.26      | 20.99      | 32.26                      | 7.67                   |
| 8                             |           |        | S3-VCD  | 0.87       | 0.79              | 1.10        | 0.96     | 9.5 | 1.112        | 10.74                       | 22.36      | 12.43      | 22.36                      | 9.71                   |
| 10                            |           | T3     | S1T-IT  | 0.58       | 0.83              | 0.70        | 0.41     | 6   | 1.6          | 5.71                        | 19.85      | 8.76       | 19.85                      | 9.42                   |
| 12                            |           |        | S3-VCD  | 0.58       | 0.83              | 0.70        | 0.41     | 8   | 1.694        | 1.68                        | 18.26      | 8.8        | 18.26                      | 12.56                  |

Se ocultaron los valores anómalos (filas 1, 2, 6, 9, 11)

Fecha 12/12/2021, explosivo empleado Emulnor 3000 – 1 1/8" x 16"

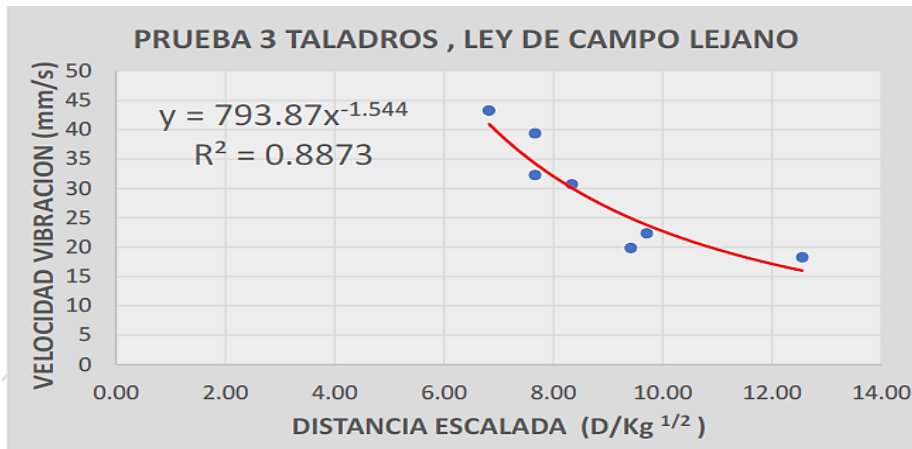
La voladura se realizó en mineral (piso del tajo 8660, acceso 8620 NW)

**Figura 24** Ubicación de la prueba (3 taladros)



#### 4.1.7. Ley de atenuación en el campo lejano

Figura 25 Ley de atenuación, Campo Lejano (ecuación de Devine)



Los valores K y beta, son:

$$K = 793.87$$

$$\text{Beta} = -1.544$$

$$r^2 = 0.88$$

La ecuación de Devine es:

Ecuación 5:

$$PPV = 793.87 * \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.544}$$

#### 4.1.8. Ley de atenuación para Campo Cercano

La ley de atenuación de H&P fue determinada a partir de la ecuación de Devine, los valores K y alfa son:

$$K = 793.87$$

$$\text{Alfa} = 0.772$$

$$r^2 = 0.88$$

Finalmente, la ecuación H&P queda:

Ecuación 6

$$PPV = 793.87 * \left[ \left( \frac{Y}{R_0} \right) * \left( \arctan \left( \frac{H+X_S-X_0}{R_0} \right) + \arctan \left( \frac{X_0-X_S}{R_0} \right) \right) \right]^{0.772}$$

## Bulbos de Iso velocidades

Acorde con lo establecido en el Ítem 4.4.1 (criterio de rotura y de diseño) y con la ecuación E. 6 de H&P se confeccionó el bulbo de iso-velocidades (Figura 26), las zonas coloreadas tienen el siguiente significado:

El color granate delimita la zona de intensa rotura.

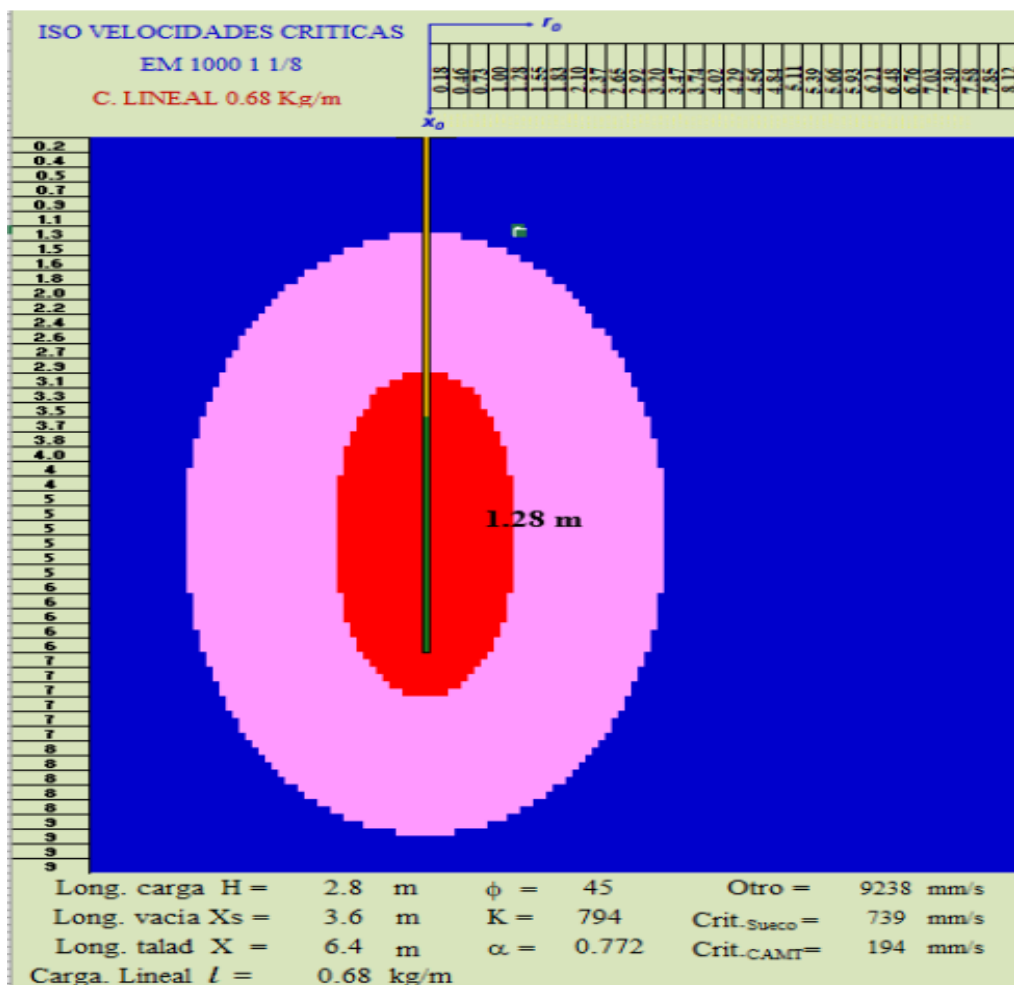
El rojo delimita la zona de rotura de la matriz rocosa y formación de nuevas fracturas (ver Ítem 4.6.2 ecuación E. 8)

V Critica. sueco = 739 mm/s

El color sepia indica solamente la propagación y apertura de las fracturas preexistente (ver Ítem 4.6.2, ecuación E. 10)

V. Critica. CANMET = 194 mm/s

**Figura 26** Bulbos de iso velocidades emulnor 1000 1 1/8



**Figura 27** *Bulbos de iso velocidades emulnor 500 1 1/4*

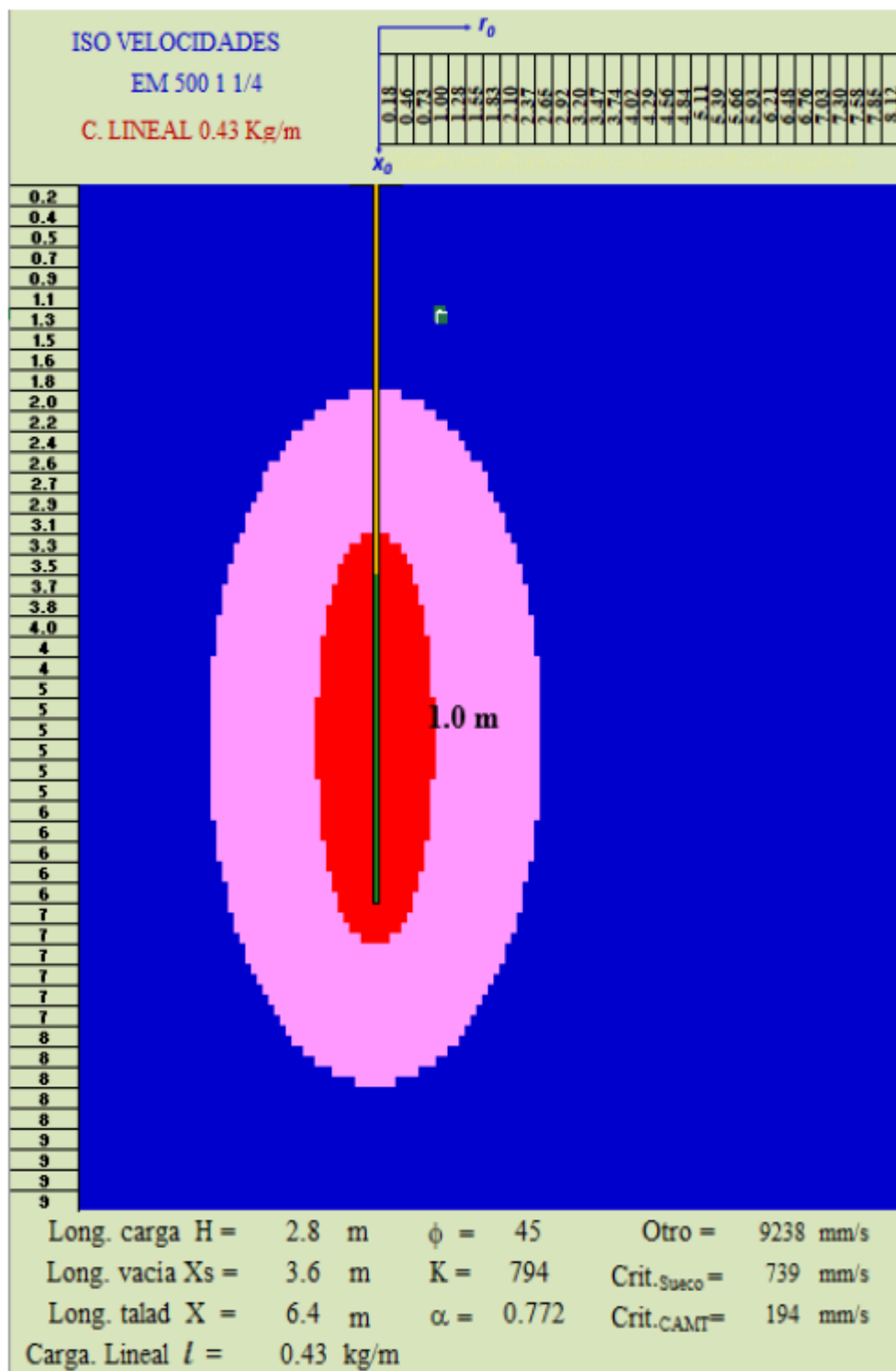
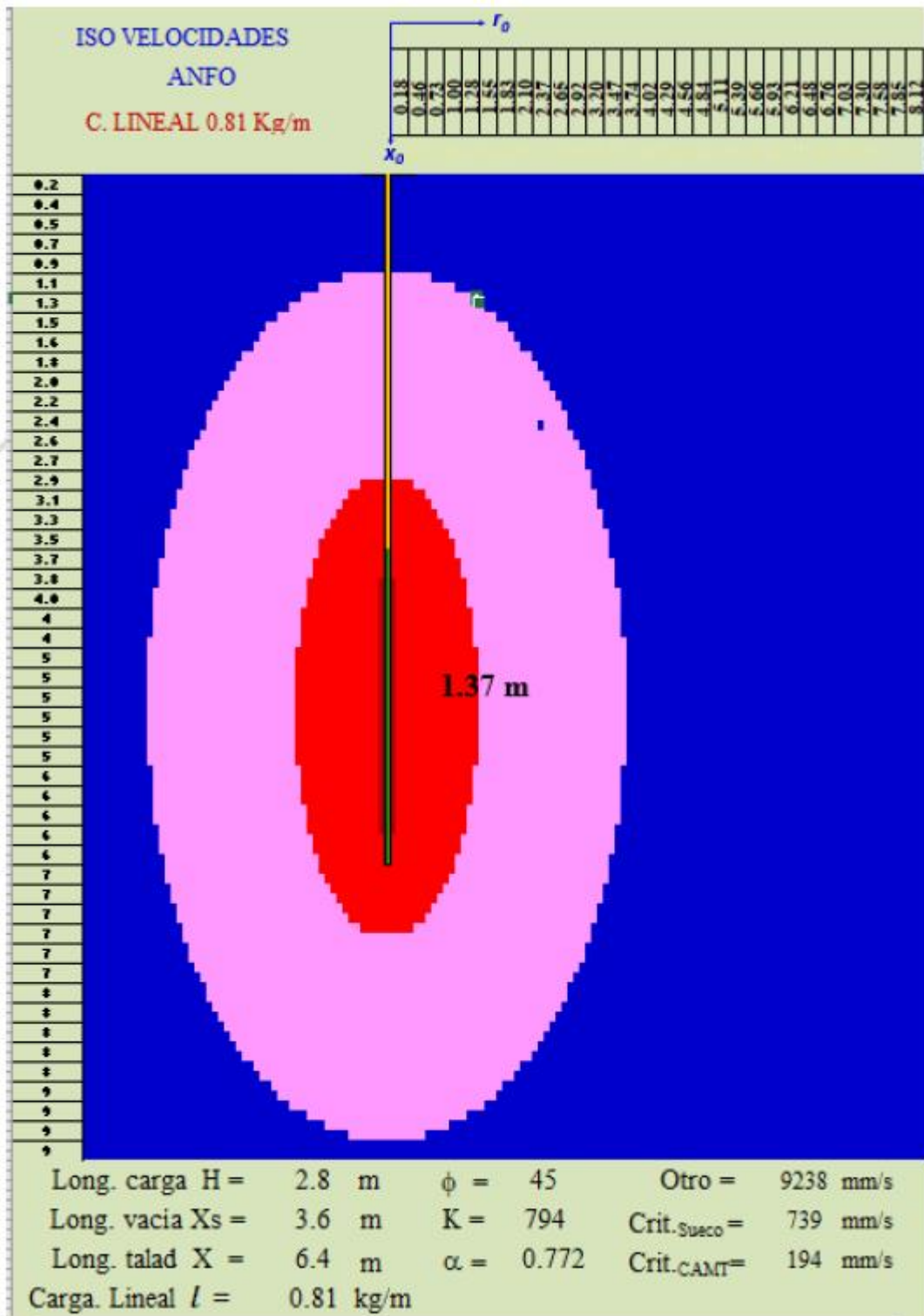


Figura 28 Bulbos de iso velocidades anfo





Hasta 1.28 m (ver Figura 26) empleando EM 1000 de 1" 1/8"

Hasta 1.00 m (ver Figura 27) empleando EM 500 de 1" 1/4"

Hasta 1.37 m (ver Figura 28) empleando ANFO

En la generación de los bulbos de iso velocidades, las cargas lineales se ajustaron acorde con la potencia relativa del explosivo empleado en la prueba de campo (detonación de 3 taladros).

- Los taladros de DB no deberán producir daños en el macizo remanente, su ubicación respecto al perímetro de la excavación será elegida con este criterio.
- La ubicación final de los taladros de DB, será definida con la malla de avance optimizada.
- La ecuación H&P (de campo cercano) también servirá para ubicar los taladros pre-perímetro de la voladura de rampa, para conseguir no dañar los hastiales

**Diseños preliminares de DB.**

Se presentan tres diseños de DB.

**Tabla 11** *Diseño D1, carga de los taladros de DB.*

| TALADROS DB . DISEÑO D1 (CON EM1000) |           |                        |             |            |           |      |           |       |        |         |      |
|--------------------------------------|-----------|------------------------|-------------|------------|-----------|------|-----------|-------|--------|---------|------|
| Diseño N°                            | Explosivo | f<br>Kg/m              | CART.<br>N° | N°<br>Tad. | PESO EXP. |      | PT<br>MPa | FP    |        | ZF<br>m |      |
|                                      |           |                        |             |            | Kg/tal.   | Kg   |           | Kg/m3 | Kg/ton |         |      |
| VOD 5800                             | D1 - 1    | EM1000 (1 1/8 " x 16") | 0.72        | 7          | 5         | 2.02 | 10.11     | 1849  | 0.16   | 0.06    | 1.28 |
|                                      | D1 - 2    | EM1000 (1 1/8 " x 16") | 0.72        | 7          | 6         | 2.02 | 12.14     | 1849  | 0.20   | 0.07    | 1.28 |
|                                      | D1 - 3    | EM1000 (1 1/8 " x 16") | 0.72        | 7          | 7         | 2.02 | 14.16     | 1849  | 0.23   | 0.08    | 1.28 |

VOD = Velocidad detonación exp.

f = Carga lineal,

PT = Presión del taladro,

Espesor zona fracturada = ZF

Sección Rampa (m2) =19.35

Volumen Destress (m3) =62

Longitud de la carga (m) =2.79

Peso Destress (ton) =167

Long. taladro (m)6.40

Taco de aire (m) =2.81

Taco inerte (m) =0.80

**Diseño: D1. Empleando EM 1000 de 1 1/8" x 16"**

Se carga con 7 cartuchos por taladro, la carga lineal 0.72 Kg/m. El factor de potencia (con 5 taladros en la malla) es: FP = 0.16 Kg/m<sup>3</sup> (0.06 Kg/ton).

Las mallas (preliminares) de voladura DB podrán ser con 5, 6 y 7 taladros

Si se elige este diseño, iniciar con la malla de 5 taladros, el número de taladros podrá variar de acuerdo a los resultados.

Los taladros ubicados entre 1.28 a 0.96 m del perímetro de la Rampa, 0.96 m si se considera a 80% de la velocidad crítica (criterio sueco de rotura).

**Tabla 12** Diseño D2, carga de los taladros de DB

| TALADROS DB . DISEÑO D2 (CON EM 500) |           |                        |             |            |           |      |           |                   |        |         |      |
|--------------------------------------|-----------|------------------------|-------------|------------|-----------|------|-----------|-------------------|--------|---------|------|
| Diseño N°                            | Explosivo | f<br>Kg/m              | CART.<br>N° | N°<br>Tad. | PESO EXP. |      | PT<br>MPa | FP                |        | ZF<br>m |      |
|                                      |           |                        |             |            | Kg/tal.   | Kg   |           | Kg/m <sup>3</sup> | Kg/ton |         |      |
| VOD 4400                             | D2 - 1    | EM 500 (1 1/4 " x 16") | 0.71        | 7          | 5         | 2.03 | 10.14     | 1025              | 0.16   | 0.06    | 1.00 |
|                                      | D2 - 2    | EM 500 (1 1/4 " x 16") | 0.71        | 7          | 6         | 2.03 | 12.16     | 1025              | 0.20   | 0.07    | 1.00 |
|                                      | D2 - 3    | EM 500 (1 1/4 " x 16") | 0.71        | 7          | 7         | 2.03 | 14.19     | 1025              | 0.23   | 0.08    | 1.00 |

VOD = Velocidad detonación exp.

f = Carga lineal,

PT = Presión del taladro,

Espesor zona fracturada = ZF

Sección Rampa (m<sup>2</sup>) =19.35

Volumen Destress (m<sup>3</sup>) =62

Longitud de la carga (m) =2.84

Peso Destress (ton) =167

Long. taladro (m) 6.40

Taco de aire (m) = 2.76

Taco inerte (m) = 0.80

**Diseño: D2. Empleando EM 500 de 1 1/8" x 16".**

Se carga con 7 cartuchos por taladro, la carga lineal 0.71 Kg/m. El factor de potencia (con 5 taladros en la malla) es: FP = 0.16 Kg/m<sup>3</sup> (0.07 Kg/ton).

Las mallas (preliminares) de voladura DB será con 5, 6 o con 7 taladros, ubicados entre 1.00 a 0.80 m del perímetro de la Rampa (0.80 m si se considera a 80% de la velocidad crítica (criterio sueco de rotura).

Si se opta por este diseño, será recomendable iniciar con la malla de 5 taladros, el número de taladros variar de acuerdo a los resultados.

**Tabla 13** Diseño D3, carga de los taladros de DB.

| TALADROS DB . DISEÑO D3 (CON ANFO) |           |           |             |            |           |      |           |                   |        |         |      |
|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|------|-----------|-------------------|--------|---------|------|
| Diseño N°                          | Explosivo | f<br>Kg/m | CART.<br>N° | N°<br>Tad. | PESO EXP. |      | PT<br>MPa | FP                |        | ZF<br>m |      |
|                                    |           |           |             |            | Kg/tal.   | Kg   |           | Kg/m <sup>3</sup> | Kg/ton |         |      |
| VOD 3400                           | D3-1      | ANFO      | 1.27        |            | 5         | 5.69 | 28.44     | 1017              | 0.53   | 0.20    | 1.37 |
|                                    | D3-2      | ANFO      | 1.27        |            | 6         | 5.69 | 34.12     | 1017              | 0.63   | 0.23    | 1.37 |
|                                    | D3-3      | ANFO      | 1.27        |            | 7         | 5.69 | 39.81     | 1017              | 0.74   | 0.27    | 1.37 |

VOD = Velocidad detonación exp.

f = Carga lineal,

PT = Presión del taladro,

Espesor zona fracturada = ZF

Sección Rampa (m<sup>2</sup>) = 19.35

Volumen Destress (m<sup>3</sup>) = 54

Longitud de la carga (m) = 2.79

Peso Destress (ton) = 146

Long. taladro (m) 6.40

Taco de aire (m) =2.81

Taco inerte (m) =0.80

### **Diseño: D3. Empleando ANFO**

Se carga con 5.69 Kg de ANFO por taladro, la carga lineal 1.27 Kg/m. El factor de potencia (con 5 taladros en la malla) es:  $FP = 0.33 \text{ Kg/m}^3$  (0.12 Kg/ton)

Las mallas (preliminares) de voladura DB será con 5, 6 o con 7 taladros, ubicados entre 1.37 a 1.0 m del perímetro de la Rampa (1.0 m si se considera a 80% de la velocidad crítica (criterio sueco de rotura).

Sera recomendable iniciar con la malla de DB con 5 taladros, el número de taladros podrá variar de acuerdo a los resultados.

En las simulaciones de diseño de DB y dependiendo de las condiciones del lugar, se podrá tener en cuenta la siguiente referencia histórica:

- Empleando ANFO, el Factor de Potencia, podrá variar entre 1.2 a 1.7 Kg/m<sup>3</sup>
- Con ANFO, la presión del taladro se mantendrá alrededor de 1000 MPa (al considerar otros explosivos tratar de mantener el FP y la presión del taladro cercano al valor de referencia).
- El diseño que más se ajusta a los valores referenciales es el D3 – 1, pero debido a la presencia de agua, no se podrá emplear ANFO
- Entonces, preliminarmente emplear el diseño D2 – 1 (taladros cargados con EM 500 1 ¼).

**Figura 29 Distribución de carga (diseño D1 – 1)**

| DISEÑO DI - I          |      | $l = 0.72 \text{ kg/m}$ |      | FP = 0.06 Kg/ton |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                  |      |       |                               |      |                             |         |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                   |      |       |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|-------------------------|------|------------------|------|------|------|------------------------|------|-------|------|------|------|------------------|------|-------|-------------------------------|------|-----------------------------|---------|------|------|------|------------------------|------|-------|------|------|------|-------------------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.11                   | 0.22 | 0.33                    | 0.43 | 0.54             | 0.65 | 0.76 | 0.87 | 0.98                   | 1.08 | 1.19  | 1.30 | 1.41 | 1.52 | 1.63             | 1.74 | 1.84  | 1.95                          | 2.06 | 2.17                        | 2.28    | 2.39 | 2.49 | 2.60 | 2.71                   | 2.82 | 2.93  | 3.04 | 3.15 | 3.25 | 3.36              | 3.47 | 3.58  | 3.69 | 3.80 | 3.91 | 4.01 | 4.12 | 4.23  | 4.34 | 4.45 | 4.56 | 4.66 | 4.77 | 4.88 | 4.99 | 5.10 | 5.21 | 5.32 | 5.42 | 5.53 | 5.64 | 5.75 | 5.86 | 5.97 | 6.07 | 6.18 | 6.29 | 6.40 |
| Long. tal. de avance = |      |                         |      |                  |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                  |      |       | Long. tal. Destressing = 3.20 |      |                             |         |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                   |      |       |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Taco aire = 2.81       |      |                         |      |                  |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                  |      |       | Ti = 0.80                     |      | L. carga destressing = 2.79 |         |      |      |      |                        |      |       |      |      |      |                   |      |       |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Detonador              |      | Periodo corto           |      | FONDO            |      | 1    |      | EM 500 (1 1/8 " x 16") |      | 0.295 |      | Kg   |      | Diámetro taladro |      | 0.045 |                               | m    |                             | COLUMNA |      | 6    |      | EM1000 (1 1/8 " x 16") |      | 1.728 |      | Kg   |      | Diámetro de carga |      | 0.029 |      | m    |      | 7    |      | 2.023 |      | Kg   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

La distribución de carga del diseño D1 – 1, considera: Longitud del taladro= 6.4 m (perforación para avance 3.2 m +, perforación para destressing 3,2 m), longitud cargada del taladro de destressing 2.79 m y taco inerte de 0.8 m (0.5 m tal. DB +0.3 m tal. Avance).

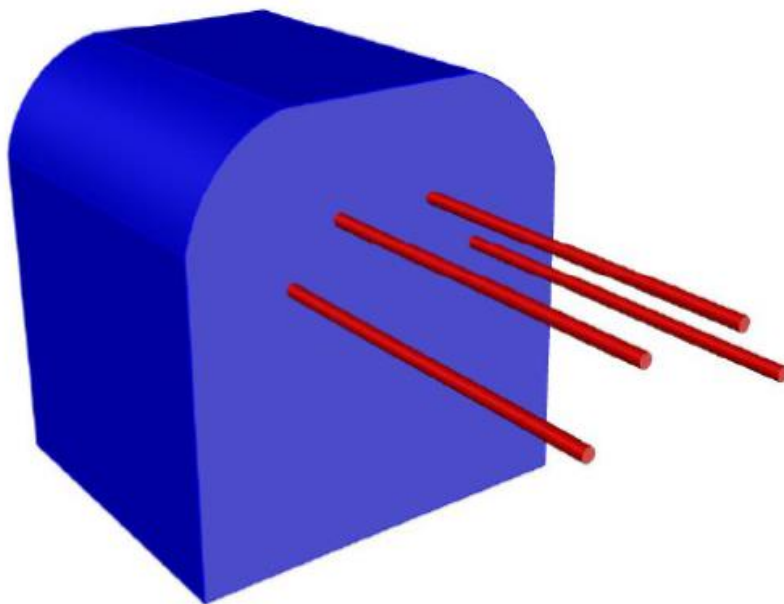
La carga lineal (preliminar) será = 0.72 Kg/m y el Factor de Potencia = 0.16 Kg/m<sup>3</sup> (0.06 Kg/ton). Estos valores serán ajustados durante las pruebas de implementación, la efectividad del DB será determinada (estadísticamente) si el peligro sísmico producto de la voladura de avance desciende. Por lo que será necesario medir este parámetro.

La distribución de carga es similar para los otros diseños.

- La Figura 9 del Ítem 4.2.2, se indica la ubicación de los taladros para DB en el frente de avance (Diseño N° 1).
- Antes de iniciar las pruebas para la implementación de la voladura de DB, es imprescindible optimizar la voladura en la Rampa, en lo posible el % de avance por disparo deberá ser mayor a 95%.
- Para lograr lo indicado líneas arriba, será también recomendable modificar el actual arranque de la malla de voladura.
- La malla de voladura de avance deberá ser rediseñada para que los taladros de DB queden convenientemente ubicados y evitar reperfilar en talados anteriores.

- Debido al aumento del peligro sísmico, se justificaría implementar la técnica de DB a fin de reducir la potencialidad de daños en la excavación de túneles.
- El diseño de DB mostrado es preliminar, su implementación requiere mediciones y la búsqueda (mediante pruebas) del explosivo y distribuciones de carga más conveniente.
- Seleccionar el explosivo y la carga lineal (la excesiva fractura miento en la zona de destressing, podría impedir la perforación de avance).
- La efectividad de los diseños de DB se verificará elaborando las gráficas Gu-tenberg-Richter para las voladuras de implementación DB.
- La atenuación de la SI ayudará a establecer el ciclo adecuado de excavación considerando el tiempo de espera y el de reingreso seguro a la labor.

**Figura 30** DB para rampa 4 x 4, con 4 taladros de destress



La figura muestra los taladros para DB, en rampa de 4 x 4 . la ubicación de ellos deberá ser definida considerando la malla optimizada para la rampa.

Se deberán diseñar voladuras de DS empleando 4, 5 ,6 y 7 taladros de destress, Según el diseño (conceptual) que se elija, es recomendable que los

taladros DB se ubiquen a las distancias indicadas en los bulbos de iso velocidades (o a un % de ellas).

### Geomecánica

La información geomecánica que se muestra en la tabla 13 corresponden a las labores donde se realizaron los monitoreos.

**Tabla 14** Datos tabulados de valores Geomecánicas representativos

| Nivel                      | Lugar                   | GSI | $\delta_{ci}$<br>MPa | RMR | Q   | Qc  | VP<br>Km/s | $\rho_i$<br>ton/m <sup>3</sup> | V <sub>Crit.sueca</sub><br>mm/s | V <sub>Crit.CANMET</sub><br>mm/s |
|----------------------------|-------------------------|-----|----------------------|-----|-----|-----|------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1200                       | TJ - 8640 Cor. 1 sur    | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 3                              | 752                             | 197                              |
| 1175                       | Prueba 3 td. - Roca     | 51  | 95                   | 56  | 3.8 | 3.6 | 4.1        | 2.7                            | 694                             | 182                              |
| 1175                       | Túnel-8650 Vent. 3      | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 2.7                            | 836                             | 219                              |
| 1125                       | RP - 8600               | 51  | 95                   | 56  | 3.8 | 3.6 | 4.1        | 2.7                            | 694                             | 182                              |
| 1150                       | TJ -8670 (Prueba 1 td.) | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 3                              | 752                             | 197                              |
| 1200                       | Túnel - 8650 Cor. 1 N   | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 2.7                            | 836                             | 219                              |
| 1125                       | Desq.-8600              | 51  | 95                   | 56  | 3.8 | 3.6 | 4.1        | 2.7                            | 694                             | 182                              |
| 1200                       | Tj - 8640 Vent. 2 S     | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 3                              | 752                             | 197                              |
| 1200                       | CX 8586                 | 51  | 95                   | 56  | 3.8 | 3.6 | 4.1        | 2.7                            | 694                             | 182                              |
| <b>PROMEDIO EN MINERAL</b> |                         | 53  | 120                  | 58  | 4.7 | 5.7 | 4.3        | 3                              | 752                             | 197                              |
| <b>PROMEDIO EN ROCA</b>    |                         | 52  | 103                  | 57  | 4.1 | 4.3 | 4.1        | 2.7                            | 741                             | 195                              |

**Tabla 15** Resultados de las pruebas de resistencia a compresión Uniaxial

| CÓDIGO DE MUESTRA | DIÁ.<br>"d"<br>(mm) | ALT.<br>"h"<br>(mm) | CARGA<br>(kN) | RESISTENCIA<br>A LA<br>COMPRESIÓN<br>UNIAXIAL -<br>UCS(d) (MPa) | TIPO DE<br>ROTURA | TIEMPO<br>(s) |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|-------------------|---------------|
| Rampa 8600        | 38.8                | 73.4                | 60.29         | 50.99   | II/Matriz         | 123.7         |
| Crucero CX 8586_A | 18.1                | 45.1                | 22.97         | 89.27   | IV/Mixta          | 114.9         |
| Crucero CX 8586_B | 18.1                | 38.6                | 17.34         | 67.39   | III/Matriz        | 86.7          |

Ensayos de laboratorio de muestras de roca, realizadas en Geomecánica Latina.

## Evaluación geomecánica de las áreas de monitoreo

Tabla 16 Parámetros Geomecánicos

| PARAMETROS GEOMECAICOS     |       |       |                                      |       |                                       |       |               |       |                             |       |                        |       |                  |       |                |       |
|----------------------------|-------|-------|--------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------|-------|-----------------------------|-------|------------------------|-------|------------------|-------|----------------|-------|
| LABOR                      | GSI   |       | RESIST. COMP. UNIAxIAL (Masa Rocosa) |       | RESIST. COMP. UNIAxIAL (Roca Intacta) |       | DENSIDAD ROCA |       | CONSTANTE ROCA INTACTA (mi) |       | MODULO Y. ROCA INTACTA |       | MODULO Y. MACIZO |       | RMR BIENIAWSKY |       |
|                            | RMR-5 | Prom. | MPa                                  | Prom. | MPa                                   | Prom. | Tn/m3         | Prom. | mi                          | Prom. | GPa                    | Prom. | MPa              | Prom. | RMR            | Prom. |
| Tajo 8640 Corredor 1 sur   | 57-49 | 53    | 9.0-4.5                              | 6.75  | 130-110                               | 120   | 3.3-3.3       | 3.30  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 8.856-5.038      | 6.947 | 62-54          | 58    |
| Tajo 8660 AC 8602NW        | 55-47 | 51    | 6.1-3.1                              | 4.60  | 100-90                                | 95    | 2.8-2.8       | 2.80  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 7.891-4.424      | 6.156 | 60-52          | 56    |
| Tajo 8650 Ventana 3        | 57-49 | 53    | 9.0-4.5                              | 6.75  | 130-110                               | 120   | 3.3-3.3       | 3.30  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 8.856-5.038      | 6.947 | 62-54          | 58    |
| Rampa 8600                 | 55-47 | 51    | 6.1-3.1                              | 4.60  | 100-90                                | 95    | 2.8-2.8       | 2.80  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 7.891-4.424      | 6.156 | 60-52          | 56    |
| Tajo 8670                  | 57-49 | 53    | 9.0-4.5                              | 6.75  | 130-110                               | 120   | 3.3-3.3       | 3.30  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 8.856-5.038      | 6.947 | 62-54          | 58    |
| Tajo 8650 Corredor 1 Norte | 57-49 | 53    | 9.0-4.5                              | 6.75  | 130-110                               | 120   | 3.3-3.3       | 3.30  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 8.856-5.038      | 6.947 | 62-54          | 58    |
| Rampa 8600                 | 55-47 | 51    | 6.1-3.1                              | 4.60  | 100-90                                | 95    | 2.8-2.8       | 2.80  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 7.891-4.424      | 6.156 | 60-52          | 56    |
| Tajo 8640 Ventana 2 Sur    | 57-49 | 53    | 9.0-4.5                              | 6.75  | 130-110                               | 120   | 3.3-3.3       | 3.30  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 8.856-5.038      | 6.947 | 62-54          | 58    |
| CX 8586                    | 55-47 | 51    | 6.1-3.1                              | 4.6   | 100-90                                | 95    | 2.8-2.8       | 2.80  | 16-16                       | 16    | 29-27                  | 28    | 7.891-4.424      | 6.156 | 60-52          | 56    |

### Medición de la velocidad de la onda P

Se presentan tres métodos de fácil implementación que hemos empleado en la etapa de campo para medir la velocidad de la onda P con el equipo de medición de vibraciones.

#### Método 1:

Se empleó un sismógrafo Instantel Mini Mate Plus, configurado con dos geófonos que estuvieron separados una distancia de 50 m (los geófonos y la voladura estarán en línea recta) se midió el tiempo de llegada de la onda P a los respectivos geófonos, conociendo el tiempo de llegada y la distancia, se determina VP. Como el cable de extensión tenía enchufes para alargar el espaciamiento entre los geófonos, se produjo corto circuito por ingreso de agua, invalidando la medición. Salvo este inconveniente, es un método muy confiable para estimar VP).

#### Método 2:

Se empleó un sismógrafo configurado con un micrófono y geófono, que se ubicaron juntos (la distancia de los captadore a la voladura es conocida).

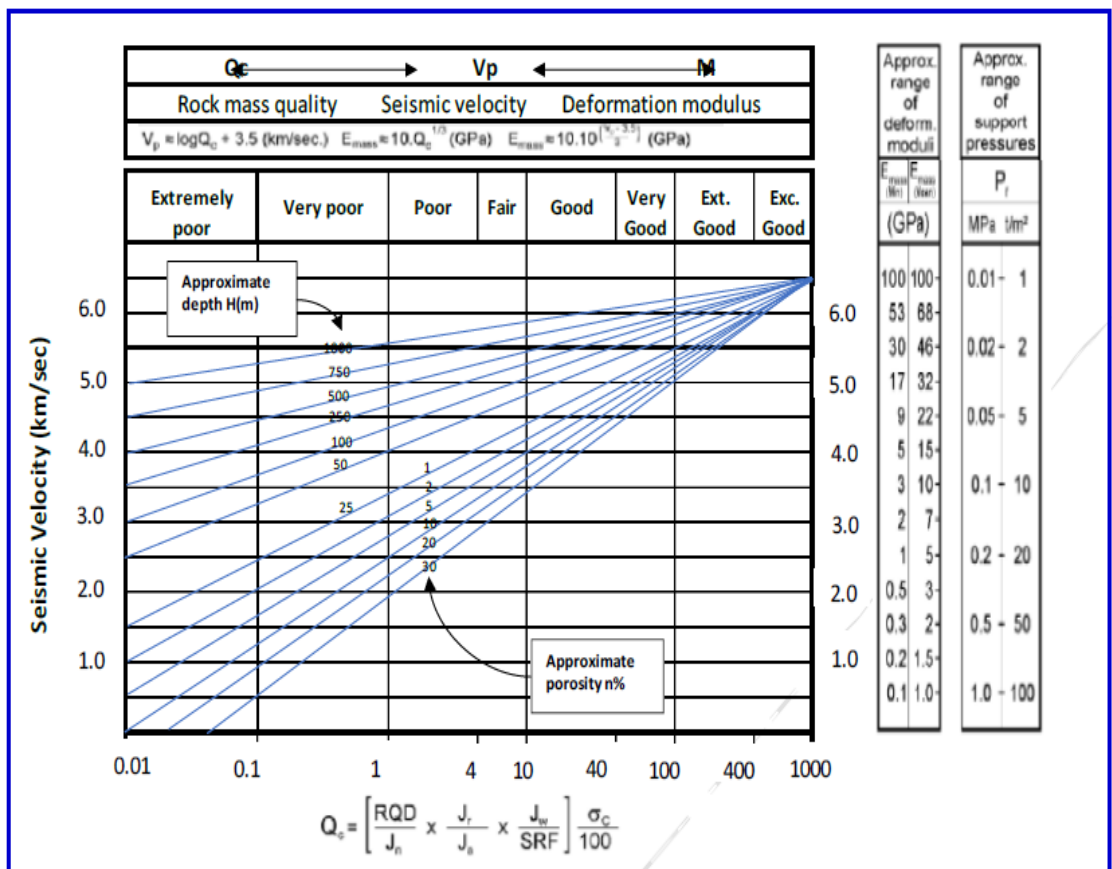


Se registró el tiempo de llegada de la onda sónica y la onda P, con estos datos se estimó la VP, este método se empleó en la voladura especial de detonación con un taladro). El valor hallado experimentalmente para VP es VP = 4811 m/s.

**Método 3:**

Empleando el Abaco de Barton para estimar VP en función de la profundidad, se adjunta el Abaco respectivo.

**Figura 31** Abaco de Barton para estimar VP



**Velocidad crítica de vibración**

Es la mínima velocidad de vibración de partícula que produce la rotura de la roca por tracción dinámica y/o la apertura y propagación de las fracturas preexistentes. Existen dos criterios de rotura que son: El criterio sueco de rotura y el de rotura del CANMET (o de extensión de fracturas).

### **Criterio de sueco de rotura o rotura por tracción dinámica**

Es la mínima velocidad de vibración que producirá la rotura de la matriz rocosa y/o la generación de nuevas fracturas (Calder y Larocque 1976) , su expresión es:

Formula 7:

$$V_{Crit.sueca} = 0.08 \frac{\sigma_c}{VP * \rho_r} * 10^6$$

Reemplazando valores en la ecuación E.9 con los valores: Densidad de la roca:  $\rho_r = 2.7 \text{ Ton/m}^3$ , resistencia a compresión uniaxial roca:  $\sigma_c = 120 \text{ MPa}$ , velocidad  $VP = 4900 \text{ m/s}$ .

**Ecuación 8:**

$$V_{C.Sueco} = 0.08 * \frac{120}{4811 * 2.7} * 10^6 = 739 \text{ mm/s}$$

La velocidad crítica para la rotura de la matriz rocosa es:

**Velocidad Critica sueco = 739 mm/s**

**Donde:**

c. = Resistencia compresión simple de la roca (MPa)

VP = Velocidad de la onda P (m/s)

$\rho_r$  = Densidad de la roca (kg/m<sup>3</sup>)

VC. SUECO: velocidad crítica de vibración según el criterio sueco de rotura (mm/s)

VC. CANMET: Velocidad crítica de vibración, criterio de extensión de fractura (mm/s)

### **Criterio de rotura del CANMET**

El criterio del CANMET (Canadá Center for Mineral and Energy Technology) también llamado criterio de extensión de fracturas es la mínima velocidad de vibración que produce solo la apertura de las fracturas preexistentes (Calder y Larocque 1976), su expresión es:

### ECUACION 9:

$$V_{C. CANMET} = 0.021 \frac{\sigma_C}{V_P * \rho_r} * 10^6$$

Reemplazando valores en la ecuación E.10 se tiene:

### Ecuación 10

$$V_{C.CANMET} = 0.021 \frac{120}{4811 * 2.7} = 194 \text{ mm/s}$$

La velocidad crítica para que se produzca solamente la propagación y apertura de las fracturas preexistentes es:

### Velocidad Critica CANMET =194 mm/s

La velocidad crítica de vibración de partícula es dato de ingreso para evaluar los daños en las rocas encajonantes (espesor de la zona fracturada por voladura en los hastiales de las excavaciones), así como para elaborar los bulbos de iso-velocidades (ver la Figura 26).

**Tabla 17** Resumen de velocidades criticas obtenidas

| Criterio        | Expresión   | mm/s | Comentario                             |
|-----------------|---|------|--|
| Sueco de rotura | $V_{Sueca} = 0.08 * \left( \frac{120}{4811 * 2.7} \right) * 10^6$   | 739  | Rotura matriz rocosa, nuevas fracturas |
| Rotura (CANMET) | $V_{CANMET} = 0.021 * \left( \frac{120}{4811 * 2.7} \right) * 10^6$ | 194  | Apertura fracturas pre existentes      |

### Selección del tiempo de retardo

El tiempo de retardo  $\Delta T$  a seleccionar deberá producir la interferencia destructiva de la vibración de voladura, a fin de reducirla.

Para obtener información que permita definir el  $\Delta T$  empleando detonadores pirotécnicos en la voladura, se realizó una prueba (evento: 8 /12/2021, 12:33:01) de voladura que consistió en la detonación y monitoreo de un taladro cuya distribución de carga se muestra en la tabla 17.

**Tabla 18 Distribución de carga (voladura de 1 taladro)**

| DISTRIBUCION DE CARGA |                          |                |                        |            |                             |                     |                         |                       |                        |
|-----------------------|--------------------------|----------------|------------------------|------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Nº DE FANEL           | TIEMPO DE RETARDO O (ms) | Nº DE TALADROS | EMULNOR 1000 1 1/8X16" | TOTAL (Kg) | CARGA OPERANTE (Kg/retardo) | CARGA LINEAL (Kg/m) | LONGITUD DE TALADRO (m) | LONGITUD DE CARGA (m) | LONGITUD SIN CARGA (m) |
| 10 PL                 | 5000                     | 1              | 4                      | 1.132      | 1.132                       | 1.132               | 2.00                    | 1.00                  | 1.00                   |

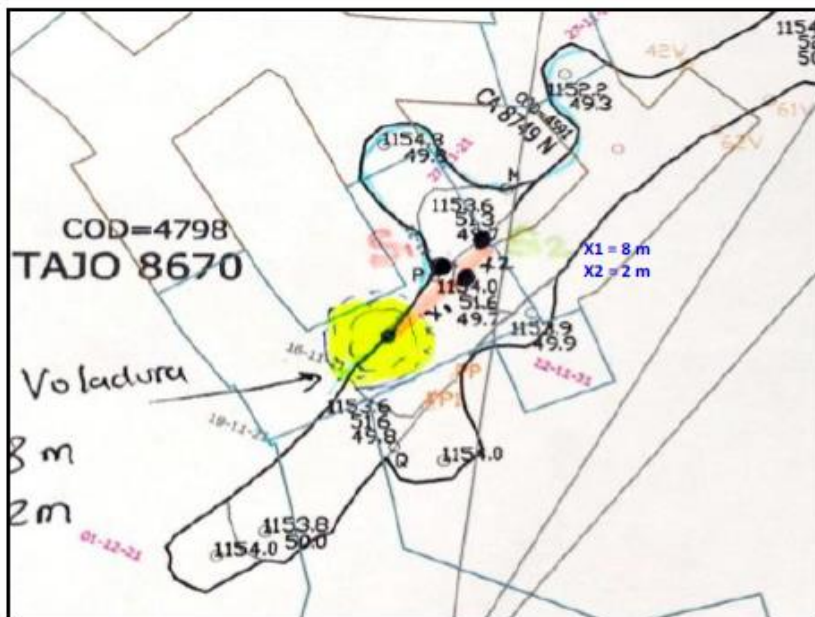
Se determinó que los tiempos de retardo, empleando detonadores pirotécnicos, más convenientes serían 25 ms y 50 ms. Por lo que se recomienda:

- Emplear el detonador Pirotécnico de 50 ms/ 500 ms.
- El tiempo de retardo deberá ser constante a través de toda la voladura.
- El detonador a seleccionar deberá tener mínima dispersión, por lo que se debe realizar pruebas de dispersión de los detonadores que se están empleando.
- Solamente se detonará un taladro por período de retardo.

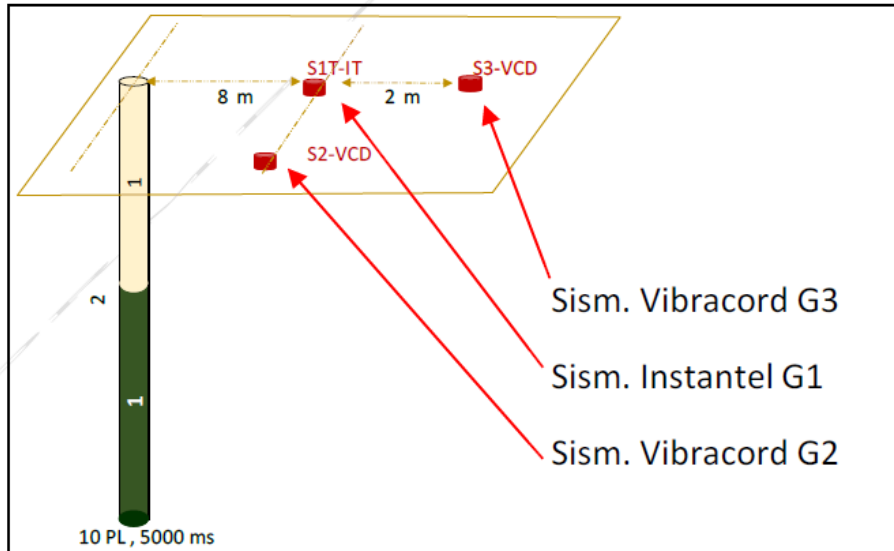
**Prueba de detonación de un taladro**

Esta prueba se realizó para seleccionar el tiempo de retardo que, en mayor medida, reduzca la vibración.

**Figura 32 Ubicación de la prueba**



**Figura 33** Arreglo del taladro (prueba un 1 taladro)



### **Efecto de voladura en la calidad “RMR” de masa rocosa**

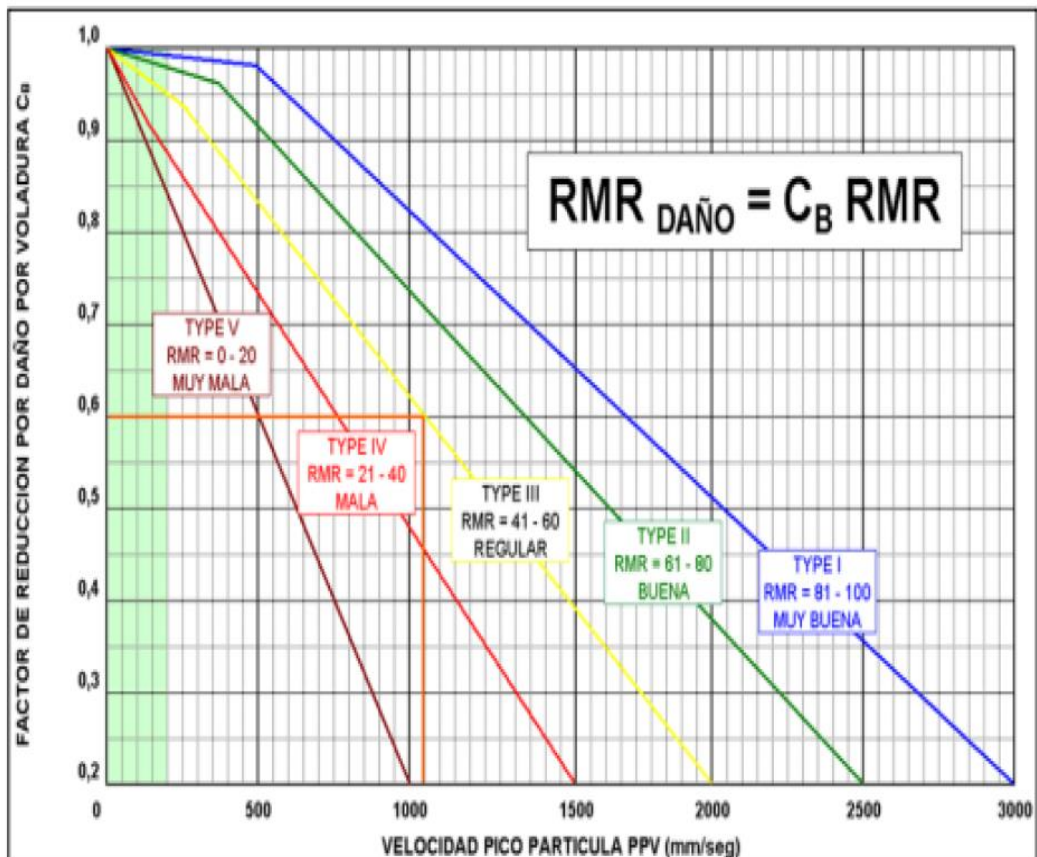
La voladura definida como el “proceso de rotura de rocas mediante el uso de energía explosiva”, genera daños en la masa rocosa con efectos muy negativos para la estabilidad. La no aplicación de técnicas de voladura controlada (recorte, taqueo eficiente, etc.), durante el proceso de voladura en las minas frecuentemente está asociado al desconocimiento de las propiedades Geomecánicas del macizo rocoso, estas malas prácticas de voladura genera niveles de daño considerables que influyen en el deterioro de las propiedades resistentes de la masa rocosa (cohesión, fricción, módulos elásticos) y consecuentemente procesos de inestabilización progresiva de las excavaciones e incremento de los costos de sostenimiento. Algunos daños inducidos a la masa rocosa durante el proceso de voladura son:

- Abertura de discontinuidades pre-existentes (disminución de la resistencia al esfuerzo de corte entre las paredes de las discontinuidades).
- Creación de grietas tensionales (incrementa el grado de fracturamiento).
- Reducción de los módulos elásticos (Módulos de Young y Poisson).
- Propagación de fracturas pre-existentes.

En términos generales representa una reducción significativa de las propiedades resistentes de la masa rocosa (módulos elásticos, cohesión y fricción) y consecuentemente

se degrada la calidad de la masa rocosa, por esta condición se sugiere no manejar los tiempos de autoaporte y colocar el sostenimiento conforme avanza el minado. El sostenimiento debe ser considerado como parte del ciclo de minado en todas las excavaciones. Para ajustar el valor del RMR (después del proceso de voladura), es necesario el uso de aproximaciones empíricas que permitan valorar cuantitativamente el nivel de daño. En la figura 9-1, se muestran las curvas de aproximaciones empíricas que ayudan a predecir la valoración RMR después de realizada la voladura. Estas curvas aproximadas para evaluar la reducción de la calidad geomecánica "RMR" de la masa rocosa permiten estimar el nivel de daño (CB) en función a la velocidad pico de partícula del explosivo empleado para romper la roca cuya valoración RMR inicial será disminuido por el nivel de daño (CB).

**Figura 34** Aproximaciones empíricas del nivel de daño (CB) por voladura



Para determinar “Abertura máxima y el Tiempo de auto-soporte” de las excavaciones en la unidad minera San Vicente es necesario realizar ajustes a la calidad de masa rocosa usando las aproximaciones empíricas mostradas en la figura 9-1, que permitan determinar el factor de ajuste por daño de voladura (CB), con este factor finalmente se debe obtener el “RMR ajustado” (RMR ajustado = CB\*RMR antes de voladura) para cuyo valor se debe estimar la “Abertura máxima y el Tiempo de Autosoporte”. Esta práctica debe ser realizada operacionalmente por personal encargado del sostenimiento para finalmente establecer “Aberturas máximas y el Tiempo de Autosoporte” para el RMR ajustado.

### **Sismicidad inducida**

El sistema de monitoreo sísmico de SIMSA, fue instalado (año 2019) por la empresa canadiense EGS Solutions, y está conformado con 6 geófonos monoaxiales y 6 triaxiales, grabadores digitales Paladín y el paquete de software Hyperion. la empresa EGS realiza un reporte mensual de la data sísmica.

El sistema de sensores abarca el área solida de los sectores Ayala inferior de la U.E.A. Palmapata.

En la base de datos con todos los eventos sísmicos desde el año 2019 a noviembre 2021, cada evento está registrado con su hipocentro, fecha, hora, magnitud y otros parámetros.

Actualmente, en SIMSA, la magnitud de los eventos sísmicos al parecer ha aumentado, llegando a registrarse hasta 2.6 Mw (25 de junio 2021), que estaría asociado a fallas geológicas (por su ubicación espacial).

En la data sísmica, la Magnitud Momento (Mw) es determinada en función del Momento Sísmico (Mo) con la siguiente expresión:

Ecuación 11

$$Mw = \left(\frac{2}{3}\right) * \log(M_0) - 6.01$$

Como la data solo presenta la Magnitud Local (sin proporcionar su respectivo algoritmo) convendría establecer la relación entre la Mw y ML.

### **Estimación del daño por estallido de roca**

El daño a una abertura minera ocurre cuando la onda de choque que resulta de un estallido de rocas es lo suficientemente fuerte como para quebrar la roca o hacer que sea expulsada del perímetro de la abertura.

En estudios de Voladura y Rockburst, la velocidad máxima de vibración de partícula ppv, y en menor medida el desplazamiento y la aceleración, son los criterios principales para evaluar los daños en los sistemas de soporte de estructuras subterráneas.

Para determinar la ppv que llega al hastial en estudio, Hedley presenta las ecuaciones E.12 (entre otras).

Ecuación 12

$$ppv = 4000 * \left( \frac{D}{10^{ML/3}} \right)^{-1.6}$$

Ecuación 13

$$\delta = 71 * \left( \frac{D}{10^{ML/3}} \right)^{-1.7}$$

Donde:

ppv = Velocidad máxima de vibración de partícula (mm/s)

$\delta$  = Desplazamiento máximo

D = Distancia desde el Hipocentro al hastial afectado (m)

ML = Magnitud Local

K, n y K, n = Constantes experimentales a determinar mediante el cálculo de regresión.

Hedley propone los valores K = 4000 y n = -1.6 para las condiciones de SI en minas canadienses profundas, por lo que la ecuación E.12 será:



### **Demanda de energía**

La carga dinámica de un estallido originado a cualquier distancia de una abertura puede ser determinada calculando la ppv registrada en ella (hastial afectado) con la ecuación E.12, conociendo este parámetro se podrá determinar, con la ecuación E.13 la energía dinámica aplicada a 1 m<sup>3</sup> de bloque de roca alrededor de la abertura.

Ecuación 14Escriba aquí la ecuación.:

$$F = \frac{1}{2} * \rho * ppv^2$$

Donde:

ppv = Máxima velocidad de vibración (m/s)

F = Fuerza dinámica (demanda de energía) en (KJ/m<sup>2</sup>).

$\rho$  = Densidad de la roca, masa por m<sup>3</sup> de Roca), (Kg/m<sup>3</sup>)

La demanda de energía en las paredes de las aberturas subterráneas del macizo rocoso en un ambiente sísmico, es definida cuantitativamente como: baja, mediana, alta, muy alta y extremadamente alta, las categorías mencionadas están relacionadas, entre otros parámetros, con la energía por metro cuadrado (Thompson y Villaescusa – Ground support terminology, pg. 553 – 580.

Las demandas cualitativas podrán ser luego contrastadas con el sistema de sostenimiento.

**Tabla 19** Categorías del macizo rocoso en ambiente sísmico

| Categoría del macizo rocoso en ambiente sísmico | Presión de reacción KPa | Superficie de desplazamiento mm | Energía KJ/m <sup>2</sup> |
|---|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Baja  | < 100                   | < 50                            | <b>&lt; 5</b>             |
| Mediana   | 100 - 150               | 50 - 100                        | <b>5 – 15</b>             |
| Alta  | 150 - 200               | 100 - 200                       | <b>15 – 25</b>            |
| Muy alta  | 200 - 400               | 200 - 300                       | <b>25 – 35</b>            |
| Extremadamente alta                             | > 400                   | > 300                           | <b>&gt; 35</b>            |

Con la información de la ubicación de los hipocentros de los microsismos y la posición topográfica de las paredes de la abertura (hastial afectado), se podrá determinar:

- La distancia Hipo central, entre el microsismo y el hastial en estudio (m)
- La demanda de energía en el hastial en estudio (KJ/m<sup>2</sup>)
- La categoría del macizo rocoso en el ambiente sísmico (del Cuadro 10.2)
- El tipo de sostenimiento requerido (estático y/o dinámico).

La empresa Regin Rock, indica en informe (20 setiembre 2021) que la distancia hipo central a las aberturas están concentradas en un rango de 0 a 150 metros de las labores.

Sera recomendable determinar la distancia del microsismo para una magnitud determinada al hastial en estudio. Este análisis ayudará a determinar el tipo de sostenimientos a aplicar.

### **Criterios del sostenimiento dinámico**

Para definir el sostenimiento dinámico, se requiere que este aporte suficiente capacidad de “Absorción de Energía” que le permita resistir las fuerzas dinámicas para contener cualquier daño.

**Tabla 20** Capacidad de absorción de energía del sostenimiento dinámico

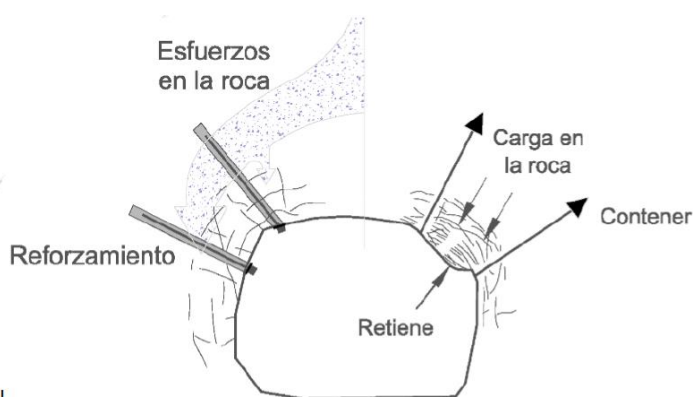
| Elemento de sostenimiento | Capacidad de carga KN | Desplazamiento mm | Resistencia de soporte KN/m <sup>2</sup> | Energía absorbida KJ/m <sup>2</sup> |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|--|-------------------------------------|
| Perno mecánico            | 120                   | 20                | 83                                       | 0.6                                 |
| Barra cementada           | 150                   | 25                | 104                                      | 1.3                                 |
| Cable bolt                | 230                   | 15                | 160                                      | 1.2                                 |
| Split set                 | 50                    | 100               | 35                                       | 3.5                                 |
| Swellex                   | 100                   | 50                | 70                                       | 3.5                                 |
| Malla electrosoldada      | 30                    | 200               | 20                                       | 2.1                                 |

### Evaluación del sostenimiento dinámico

El sostenimiento estándar de las labores subterráneas no puede contener las fuerzas dinámicas de un evento sísmico cercano., usualmente se considera algún tipo de sostenimiento flexible con la finalidad de tratar de contener el daño producido por el evento sísmico.

Siempre será posible determinar la capacidad del sostenimiento necesario tomando en cuenta los mayores eventos sísmicos esperados.

**Figura 35** Funciones del sostenimiento: reforzamiento, retención y contención



Para contrarrestar los tres procesos de fracturamiento, desplazamiento y expulsión de material, el sistema de sostenimiento debe realizar tres diferentes funciones.

1ro. Reforzar el macizo rocoso con la finalidad de prevenir la falla de la roca.

2do. Sostener la roca fallada. Cuando el refuerzo es ineficaz se producirá rotura de la roca y se tendrá que sostenerla, para controlar la cantidad de roca desplazada.

3ro. Retener la roca fallada, el sostenimiento deberá adsorber la energía del material que resulta violentamente expulsado.

Las primeras dos funciones, reforzamiento y contención, son conseguidos dentro del volumen del macizo rocoso (con pernos o cables), la tercera función es conseguida solo sobre la superficie del macizo rocoso, empleando malla o por una capa de shotcrete.

**Tabla 21** *Energía dinamina con ML 2 y 1 a distancias e 2.5, 5 y 10 m*

| Distancia<br>r<br>m | Magnitud<br>local<br>ML | ppv<br>mm/s | ppv<br>ms | Desplazamiento<br>mm | Energía<br>dinámica<br>KJ/m2 |
|---------------------|-------------------------|-------------|-----------|----------------------|------------------------------|
| 2.5                 | 2                       | 10765.21    | 10.77     | 203                  | 156.45                       |
| 5                   | 2                       | 3551.20     | 3.55      | 63                   | 17.02                        |
| 10                  | 2                       | 1171.46     | 1.17      | 19                   | 1.85                         |
| 2.5                 | 1                       | 3152.75     | 3.15      | 55                   | 13.42                        |
| 5                   | 1                       | 1040.02     | 1.04      | 17                   | 1.46                         |
| 10                  | 1                       | 343.08      | 0.34      | 5                    | 0.16                         |

De acuerdo al cuadro 10-3, se tiene: Un evento micro sísmico de magnitud 2 ML que se produzca en el hastial, el sostenimiento dinámico y/o estático será ineficaz, el macizo rocoso no podrá resistir a tan alta sollicitación de energía.

A 2.5 m del hastial la demanda de energía será 156 KJ/m2 y el macizo rocoso tampoco podrá resistir con este rango de energía.

A 5m del hastial la demanda se energía será 17 KJ/m2, el macizo rocoso podrá resistir con Concreto lanzado (16 KJ/m2) y pernos cementados.

A 10 metros del hastial, la demanda de energía será 1.85 KJ/m<sup>2</sup> y se podrá resistir con pernos cementados y malla electrosoldada (doble malla electrosoldada).

**Un evento micro sísmico de magnitud 1 ML** que se produzca a 2.5 m del hastial, la demanda de energía será 13 KJ/m<sup>2</sup>, el macizo rocoso podrá resistir con concreto lanzado (de alta resistencia) y pernos cementados.

A 5 m del hastial la demanda de energía será 1.46 KJ/m<sup>2</sup> y el macizo rocoso podrá resistir con pernos cementados y malla electrosoldada (doble malla)

A 10 metros del hastial, la demanda de energía será 0.16 KJ/m<sup>2</sup> y se requerirá pernos cementados y malla electrosoldada.

### **Capacidad de absorción de energía del sostenimiento dinámico**

Para definir este sostenimiento, se requiere que aporte suficiente capacidad de "Absorción de energía" que le permita resistir las fuerzas dinámicas para contener el daño. En la tabla 20 se muestra la capacidad de absorción de energía de algunos elementos de sostenimiento dinámicos.

**Tabla 22** *Capacidad de absorción de energía del sostenimiento dinámico*

| Elemento de sostenimiento | Capacidad de carga KN | Desplazamiento mm | Resistencia de soporte KN/m <sup>2</sup> | Energía absorbida KJ/m <sup>2</sup> |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|--|-------------------------------------|
| Perno mecánico            | 120                   | 20                | 83                                       | 0.6                                 |
| Barra cementada           | 150                   | 25                | 104                                      | 1.3                                 |
| Cable bolt                | 230                   | 15                | 160                                      | 1.2                                 |
| Split set                 | 50                    | 100               | 35                                       | 3.5                                 |
| Swellex                   | 100                   | 50                | 70                                       | 3.5                                 |
| Malla electrosoldada      | 30                    | 200               | 20                                       | 2.1                                 |

El factor de seguridad del sostenimiento dinámico, es la relación entre la energía disponible del sostenimiento y la energía liberada, este factor se deberá mantenerse en FS = 1.5.

Se evaluará la capacidad del actual sostenimiento que se viene aplicando en la mina.

$$FS = \frac{\text{Energía disponible (sostenimiento)}}{\text{Energía liberada (demanda)}}$$

**Tabla 23** Factores de seguridad del sostenimiento para 2 ML, a distancias de 10, 5 y 2.5m

Factores de seguridad con el sostenimiento en SIMSA, para magnitud 2 ML, evento carcano al hastial

| Distancia del evento a la labor | Magnitud local (ML) | Elementos de refuerzo y contención      | Elementos de retención     | C L de alta resistencia y cap. energética | Energía liberada por el evento | Capacidad energética del sost. | Factor de seguridad (FS) |
|---------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 10 m                            | 2                   | Swellex - 7 pies , espaciados 1 m x 1 m | Doble malla electrosoldada |   | 1.85                           | 5.5                            | 2.97                     |
| 5 m                             | 2                   | Swellex - 7 pies , espaciados 1 m x 1 m | Doble malla electrosoldada |   | 17                             | 5.5                            | 0.32                     |
| 2.5 m                           | 2                   | Swellex - 7 pies , espaciados 1 m x 1 m | Doble malla electrosoldada |   | 156                            | 5.5                            | 0.04                     |

- Verificar, estadísticamente, la magnitud y distancia de los eventos micro sísmicos respecto a la labor en estudio.
- Realizar simulaciones de la capacidad energética del sostenimiento para magnitudes menores 2 ML.
- Lo indicado en el Ítem anterior ayudará a definir tipo y características del sostenimiento requerido.

#### 4.2. Discusión de resultados

En la Compañía minera San Vicente debido a la explotación subterránea que se realiza cada vez con mayor profundidad, actualmente se está llegando a 1017 m de profundidad, vemos que se está produciendo cada vez el fenómeno de la sismicidad inducida. Para poder evitar y controlar este fenómeno, en la presente investigación se trató de analizar varios aspectos entre estos tenemos.

- Realizar el diagnóstico de la voladura en SIMSA
- Analizar las vibraciones producidas por la voladura

- Plantear un diseño técnico de la voladura confinada, Destress Blasting (DB)
- Seleccionar el tiempo de tiempo de retardo adecuado.

Al analizar cada uno de estos aspectos podemos comentar lo siguiente.

**El diagnóstico de la voladura** realizada en la mina, vemos que se realiza voladuras en tajeos y voladuras en frentes rampas, túneles.

En la voladura en tajeos se tiene como parámetros; profundidad promedio 3.60 m, taco promedio 0.80 m, burden 0.80 m, espaciamiento 1.0 m, tipo de roca mineral, densidad de roca 3.0 tn/m<sup>3</sup>, factor de potencia 0.31 kg/tn, también diremos que se realizaron varias observaciones sobre cómo se lleva a cabo este tipo de voladura.

En la voladura de avance (túnel, rampa) se emplean dos tipos de malla, malla nominal y malla efectiva, se tiene como parámetros para la malla nominal; profundidad promedio 3.84 m, y 3.30 m, eficiencia de avance 3.30 m, longitud promedio de taco 0.54 m, explosivos por disparo 113.28 kg, volumen roto 60.72 m<sup>3</sup>, tonelaje roto 163.94 tn, factor de potencia 0.69 kg/tn, factor de carga 1.87 kg/m<sup>3</sup>, también diremos que se realizaron varias observaciones al cómo se lleva a cabo este tipo de voladura.

### **Monitoreo de las vibraciones**

Con los sismógrafos de la empresa se midió la velocidad de vibración en campo lejano y cercano.

Monitoreo de vibraciones en tajeos, se midió la ley de atenuación en campo lejano, teniendo la siguiente relación:

$$PPV = 457.91 * \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.595}$$

Monitoreo de vibraciones en la rampa, se midió la ley de atenuación en campo lejano, teniendo la siguiente relación:

$$PPV = 621.09 * \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.59}$$

**Destress Blasting (DB) o voladura confinada**, voladura recomendado para aplicar en zonas donde se está produciendo el aumento del peligro sísmico; se detonaron y monitorearon simultáneamente tres taladros confinados (sin cara libre) ubicados en el piso del tajo 8660, acceso 8602 NW, a fin de determinar la ley de atenuación de la velocidad de vibración (en roca) en condiciones de total confinamiento, tanto en campo lejano como en campo cercano, con estos valores se confecciono el bulbo de iso-velocidades, las zonas coloreadas tienen el siguiente significado:

- El color granate delimita la zona de intensa rotura.
- El rojo delimita la zona de rotura de la matriz rocosa y formación de nuevas fracturas

El color sepia indica solamente la propagación y apertura de las fracturas preexistente

Se realizaron tres diseños preliminares de DB

empleando EM 1000 de 1 1/8" x 16, el espesor de zona fracturada es Hasta 1.28 m

empleando EM 500 de 1" 1/4", el espesor de zona fracturada es Hasta 1.00 m.

empleando ANFO, el espesor de zona fracturada es Hasta 1.37 m

**La medición de la velocidad de la onda P**, se realizó mediante tres métodos, mediante el segundo método se determinó la velocidad de onda P igual a 4811 m/s.

#### **Velocidad crítica de vibración**

Se determino mediante dos métodos el método sueco dio una velocidad crítica de 739 mm/seg, y con el método Canmet se obtuvo un valor de la velocidad crítica de 194 mm/seg.



### **Selección del tiempo de retardo**

Se realizó una prueba de voladura donde se determinó el tiempo de retardo más conveniente serían 25 ms y 50 ms, por lo que se recomienda emplear detonadores de 50 ms a 500 ms.

### **Efecto de la voladura en la calidad de la masa rocosa**

La voladura genera efectos negativos para la estabilidad de la roca, para superar estos efectos se debe aplicar técnicas de voladura controlada, y conocer las características geomecánicas de la roca.

Sino se controla estos efectos se va a generar deterioro de la masa rocosa, produciéndose inestabilidad de la excavación, elevación del costo de sostenimiento, debido a abertura de discontinuidades preexistentes, creación de grietas, reducción de módulos elásticos, etc. Esto exige que se debe colocar el sostenimiento conforme se avanza el minado.

## CONCLUSIONES

1. La generación de microsismos tiene también relación con el proceso de voladura, la cantidad de microsismos aumenta en horario de disparo. Se determinó (prueba especial con taladro semilla en mineral) que, en la voladura de producción, el tiempo de retardo (T) que reduce en mayor medida la vibración es 50 ms.
2. Las voladuras deberán espaciarse (entre ellas), con la finalidad de evitar superposiciones de la alteración sísmica, que podría acarrear el aumento de la magnitud de los microsismos pos-voladura.
3. Se presenta la configuración de Voladura de Destress Blasting, ante la posibilidad de implementar esta técnica para la excavación de la rampa cuando atraviese terrenos propicios para generar SI.
4. El estudio de riesgo sísmico indica que el sismo esperado podrá tener magnitud mayor a 2.6 Mw, en vista de esto, las acciones que se recomiendan están dirigidas a reducir la cantidad y magnitud de la actividad sísmica.
5. La relación Mw vs distancia al hastial define la categoría del macizo rocoso en ambiente sísmico y definirá el tipo de sostenimiento.

## RECOMENDACIONES

1. Definir el factor de potencia con algún modelo que tenga en cuenta las características geomecánicas del macizo rocoso y del explosivo (ej. Modelo de volabilidad de Lilly).
2. Detonar solamente un taladro por periodo de retardo, emplear detonadores pirotécnicos duales, El tiempo de retardo será 50 ms / 500 ms.
3. Revisar el Burden y Espaciamiento en función de la carga lineal efectiva. por lo que se recomienda verificar (estadísticamente) la carga lineal.
4. Revisar el % de avance mensual, si es bajo modificar la malla, en especial, el arranque para que produzca mayor avance.
5. Dentro del horario de disparo, espaciarlas las voladuras en las diversas labores, para evitar efectos de superposiciones de la alteración sísmica.
6. La implementación de Destress Blasting (DB) es un proceso iterativo que depende de las condiciones locales. Se deberá buscar el explosivo y el Factor de potencia adecuado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badajoz, M. (2020). *Tu tesis en cinco pasos*.
- BARBOSA, VALLEJO, J. (2019). *ANÁLISIS DE LA AFECTACIÓN POR VIBRACIONES DE LA CANTERA "LA ROCA" EN ZONAS CERCANAS A POBLACIONES*. [tesis de licenciamiento Universidad Católica de Colombia] repositorio institucional Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- BERNAL, C. (2010). *Metodología de la investigación* (Tercera edición ed.). (P. Educación, Ed.)
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS, Universidad Politécnica de Madrid.
- CALLUPE, P. (2016). *SISMICIDAD EN MINERÍA: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN DE CONTROLES - CASO MINA YAULIYACU*. [tesis de licenciamiento UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA] Repositorio institucional Universidad de Ingeniería.
- ENAEX. (s.f.). *Manual de tronadura ENAEX S.A.* ENAEX, Gerencia técnica.
- EXSA. (s.f.). *Manual practico de voladura, 4ta edición*. exsa.
- FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. (2018). Emulsiones/Hidrogel a granel no sensibilizado SAN-G APU.
- HERNANDEZ, FERNANDES, BAPTISTA, R. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta edición ed.). (M. e. S.A., Ed.)
- Instituto Geológico y Minero de España. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Geológico y Minero de España.
- LOPEZ JIMENO, C. (1987). *MANUAL DE PERFORACION Y VOLADURA*. (I. G. España, Ed.)
- MUCHO, E. (2016). *APLICACIÓN DE UN MODELO DE VIBRACIONES PARA EL CONTROL DE VOLADURAS EN TAJO SAN GERARDO MINA ATACUCHA*.

[tesis de licenciamento Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna]  
repositorio institucional U. N. Jorge Basadre Grohmann - Tacna.

ORTIZ, A. (2016). *MONITOREO DE VIBRACIONES, ONDAS ACÚSTICAS Y DETERMINACIÓN DE LA ONDA DE SOPLO POR EFECTO DE VOLADURA, EN EL TÚNEL DE ADUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA. DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO.* [tesis de licenciamento U. N: de San Agustín de Arequipa] repositorio institucional U. N. de San Agustín de Arequipa.

SUPO, CAVERO, F. (2014). *FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PROCEDIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN CIENCIAS SOCIALES.* (E. Universitario, Ed.)

TAMAYO Y TAMAYO, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (cuarta edición ed.). (L. N. Editores, Ed.)

TICLIA, L. (2019). *“ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE VIBRACIONES PARA SELECCIÓN OPTIMA DE EXPLOSIVO Y CARGA MÁXIMA PARA REDUCIR LOS COSTOS POR VOLADURA EN LA RP PATRICK V ZONA VALERIA V NV 2220 – MARSA 2018”.* [tesis de licenciamento Universidad Nacional de Trujillo] repositorio institucional Universidad nacional de Trujillo.

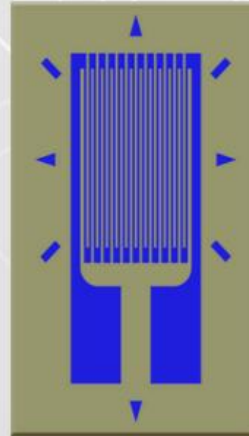
VILLAVERDE, LARA, E. (2020). *“OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA-CLASIFICACIÓN EN LA PLANTA CONCENTRADORA SAN VICENTE 2019”.* [tesis de licenciamento, Universidad Nacional del Centro del Perú] repositorio institucional Universidad Nacional del centro del Perú.

ZANABRIA, D. (2021). *Análisis del monitoreo microsísmico y su influencia en el comportamiento del macizo rocoso en la Unidad Minera Americana Alpayana S. A. - 2021.* [tesis de licenciamento Universidad Continental] repositorio institucional Universidad Continental.

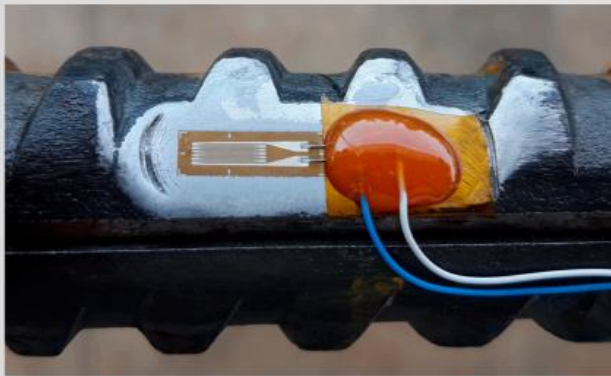
ZUÑIGA, H. (2017). *“ANALISIS DE LA SISMICIDAD INDUCIDA EN LA UNIDAD MINERA EL PORVENIR - CERRO DE PASCO 2006 - 2008”*. [tesis de licenciamiento Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

**ANEXO**

## INTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS



Este Perno es compatible con el sistema inalámbrico de Geosinergia, pudiendo integrarse al resto de la instrumentación disponible.



Pernos Helicoidales instrumentados, para identificar constantes

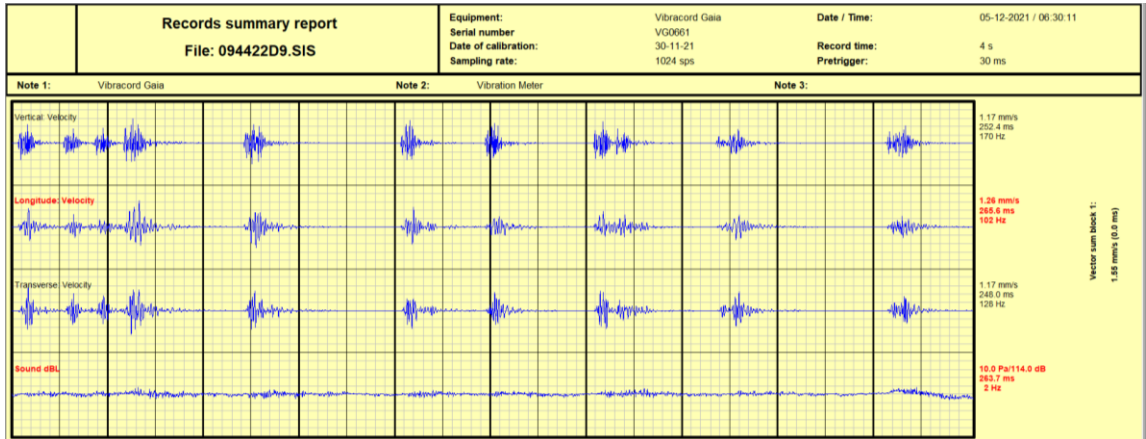


# REGISTRO DE MONITOREO

Tajo 8640 Corredor 1 Sur

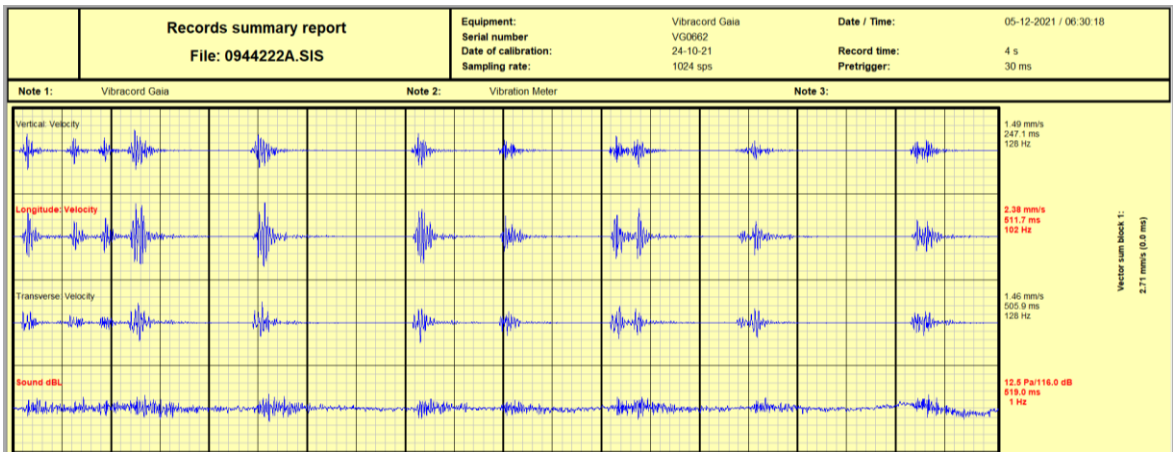
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 05-12-2021  
HORA: 6:30 AM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

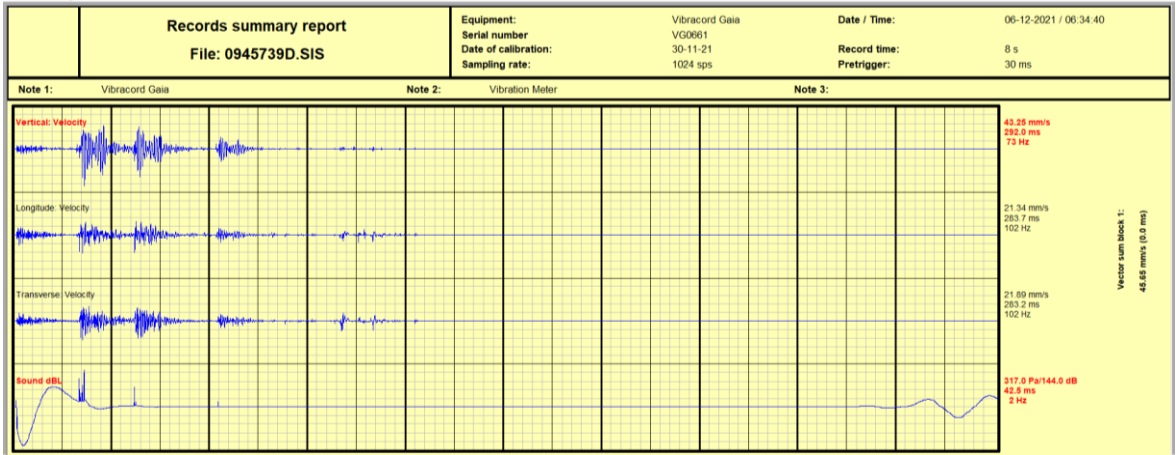
FECHA: 05-12-2021  
HORA: 6:30 AM



# Tajo 8660, acceso 8620 NW)

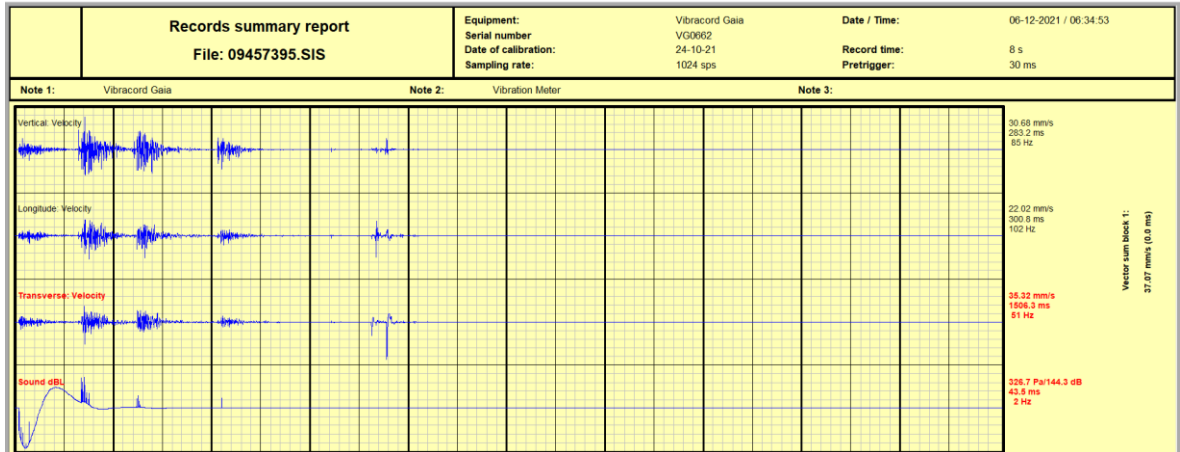
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 06-12-2021  
HORA: 6:30 AM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

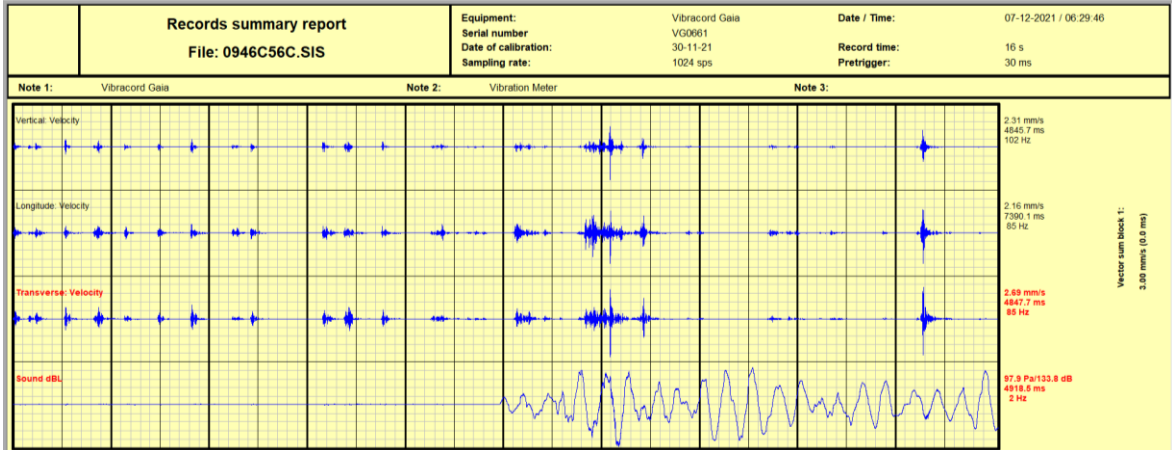
FECHA: 06-12-2021  
HORA: 6:30 AM



# Túnel -8650 Ventana 3

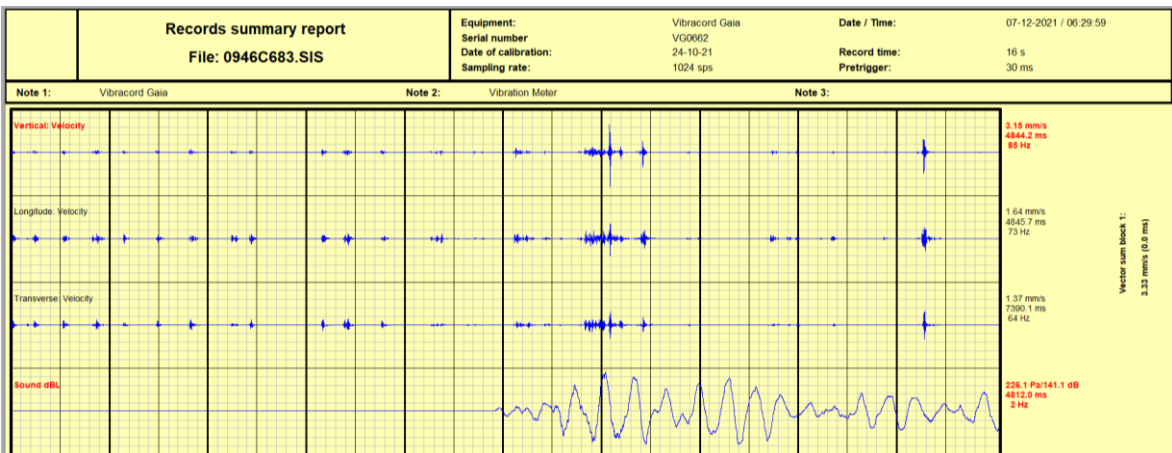
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 07-12-2021  
HORA: 6:30 AM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

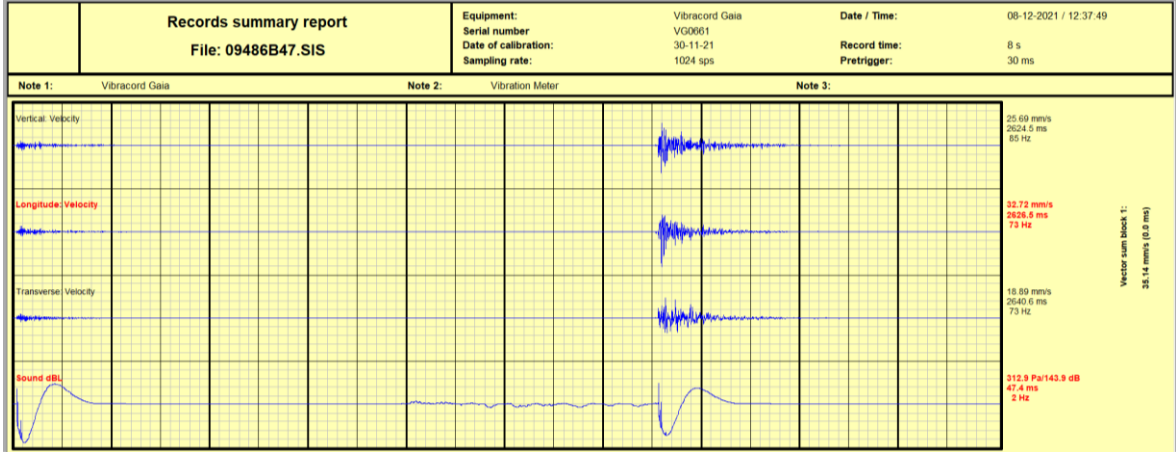
FECHA: 07-12-2021  
HORA: 6:30 AM



# TJ -8670 (Prueba 1 td.)

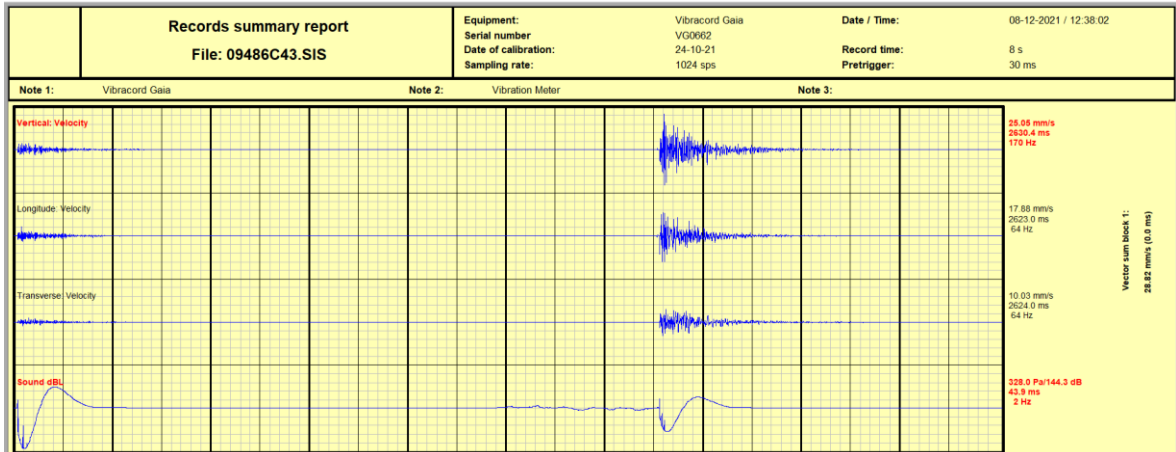
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 08-12-2021  
HORA: 12:30 PM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

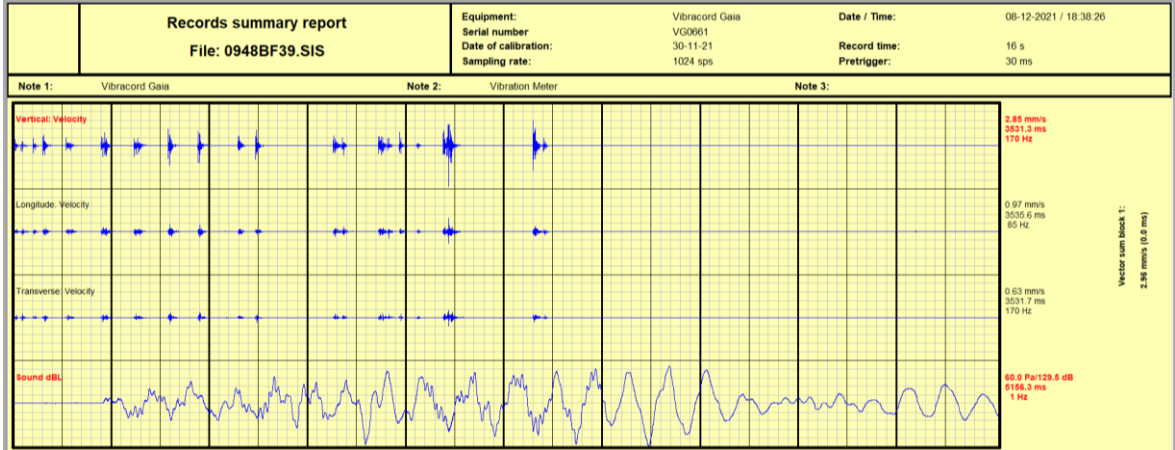
FECHA: 08-12-2021  
HORA: 12:30 PM



RP - 8600

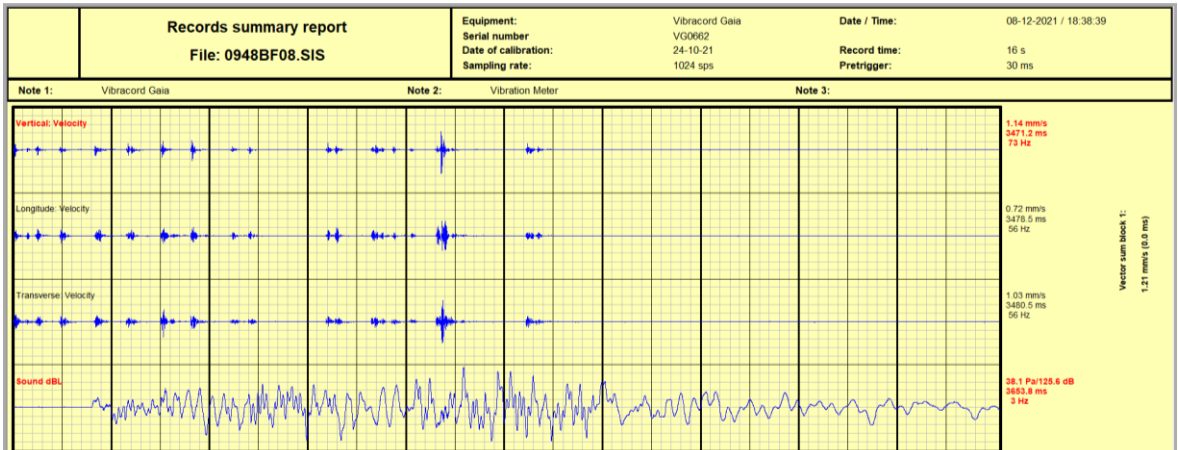
**REGISTRO VOLADURAS (S2)**

FECHA: 08-12-2021  
HORA: 18:30 PM



**REGISTRO VOLADURAS (S3)**

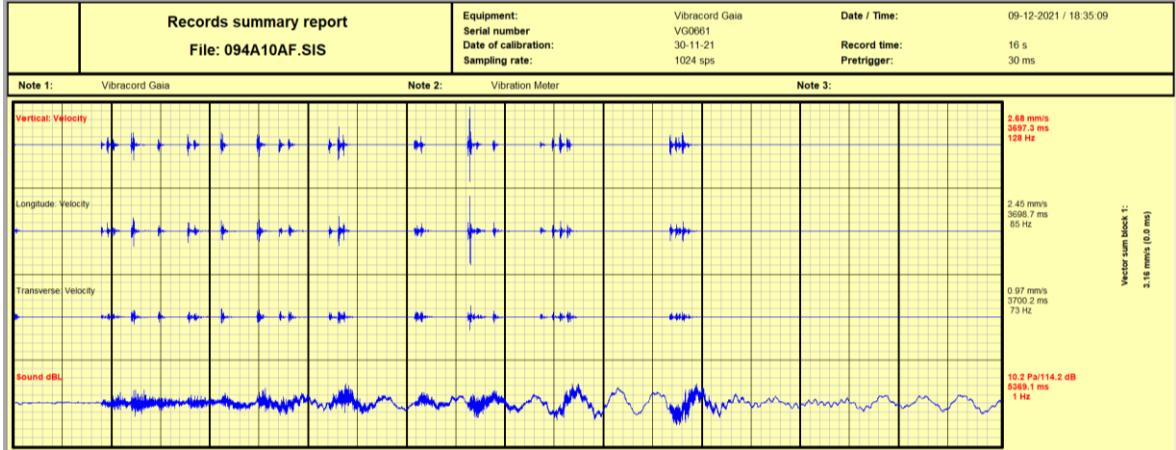
FECHA: 08-12-2021  
HORA: 18:30 PM



# Túnel - 8650 Cor. 1 N

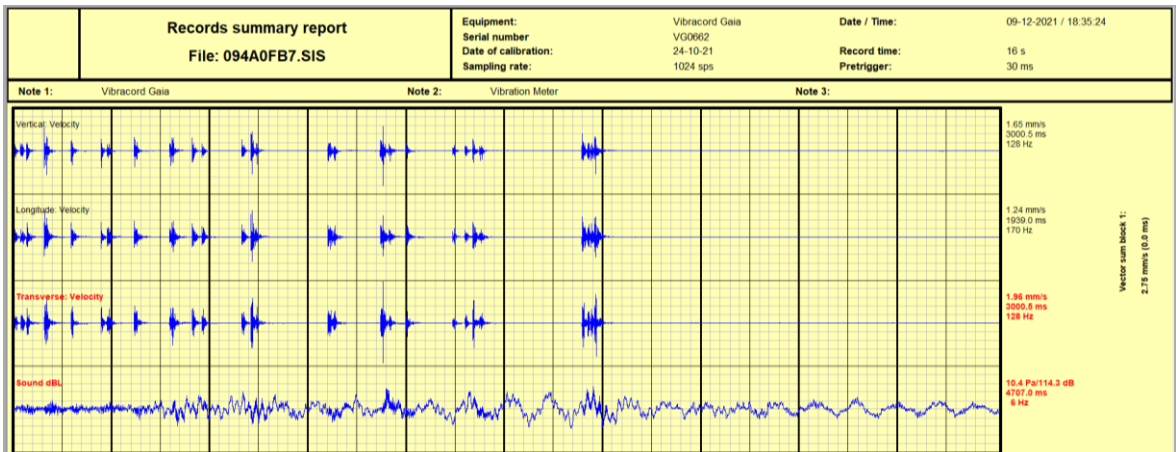
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 09-12-2021  
HORA: 18:30 PM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

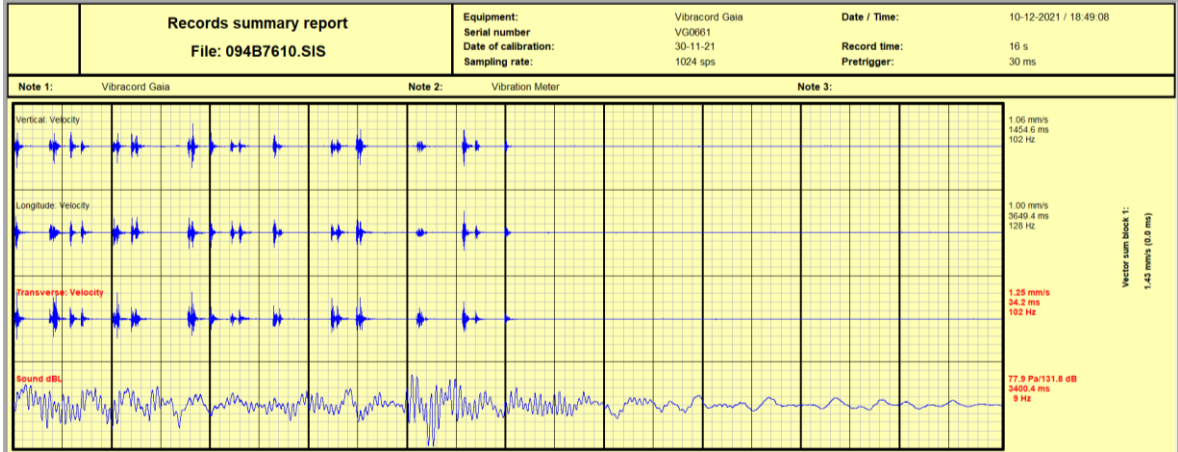
FECHA: 09-12-2021  
HORA: 18:30 PM



# Desquinche - 8600

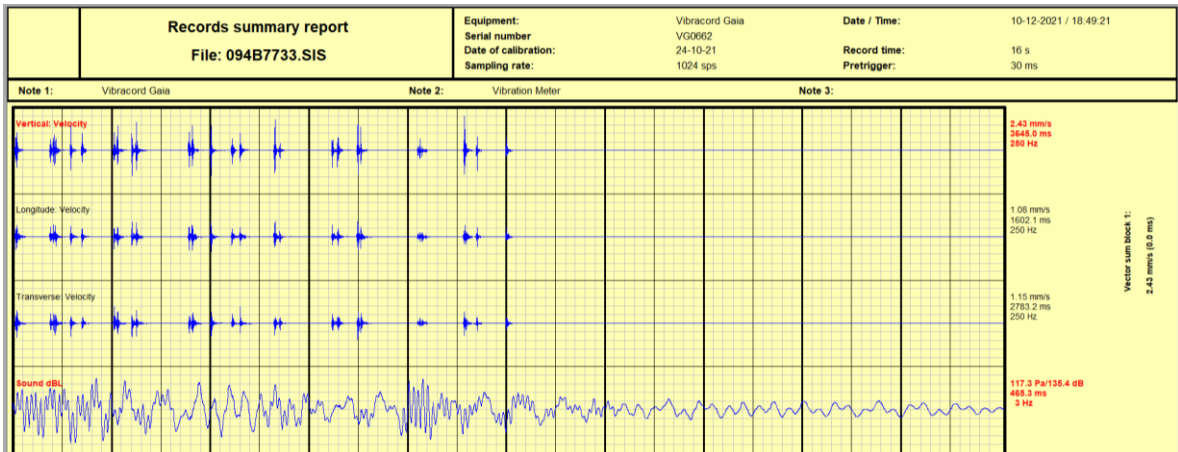
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 10-12-2021  
HORA: 18:30 PM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

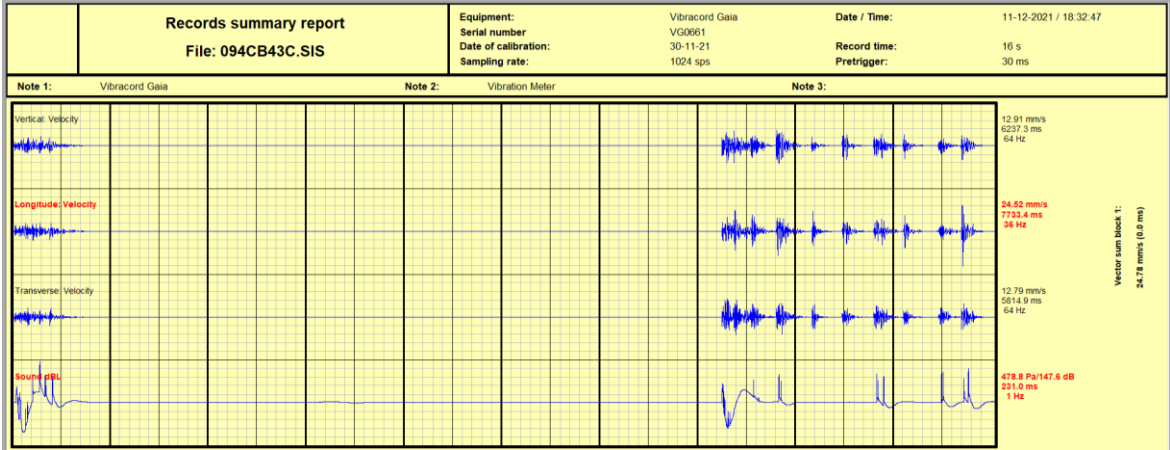
FECHA: 10-12-2021  
HORA: 18:30 PM



# TJ - 8640 Ventana 2 Sur

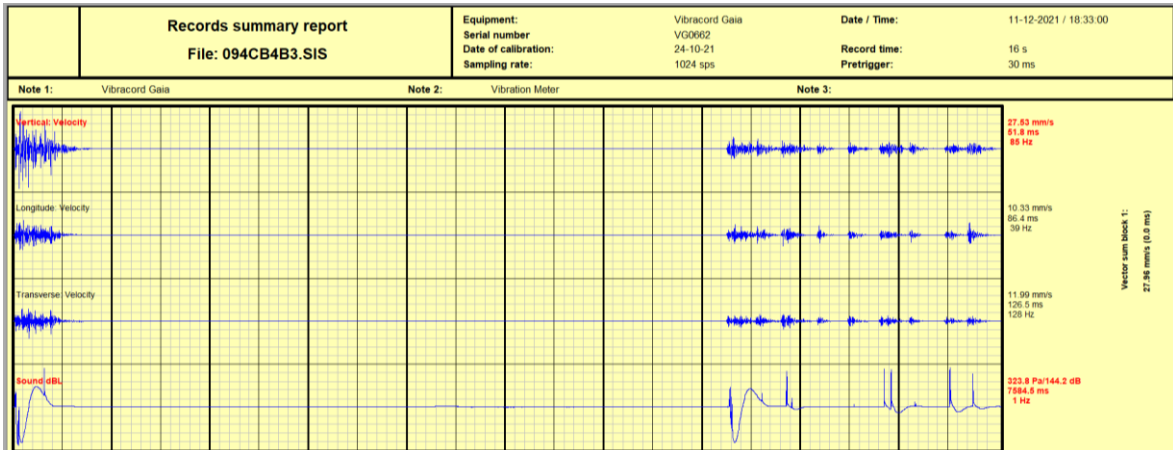
## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 11-12-2021  
HORA: 18:30 PM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)

FECHA: 11-12-2021  
HORA: 18:30 PM

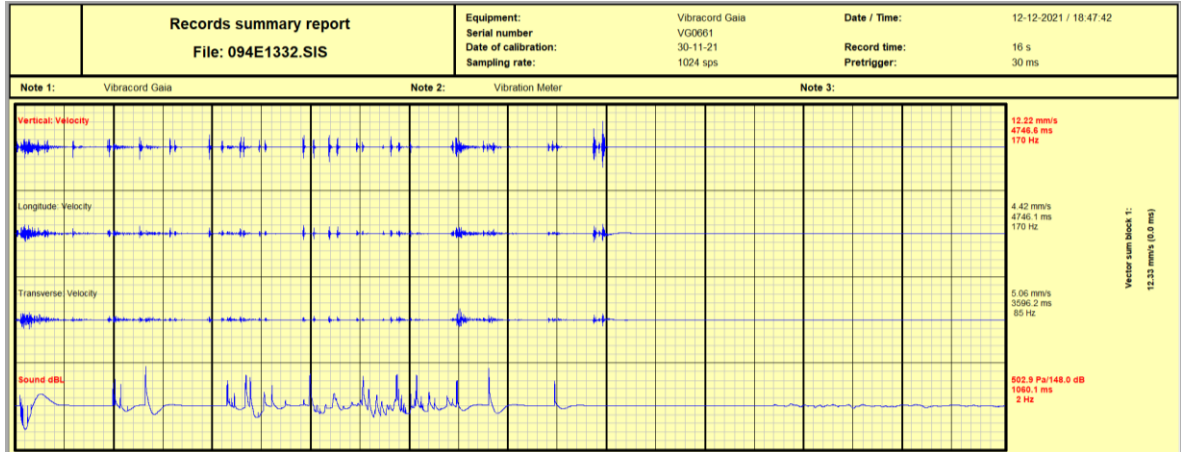




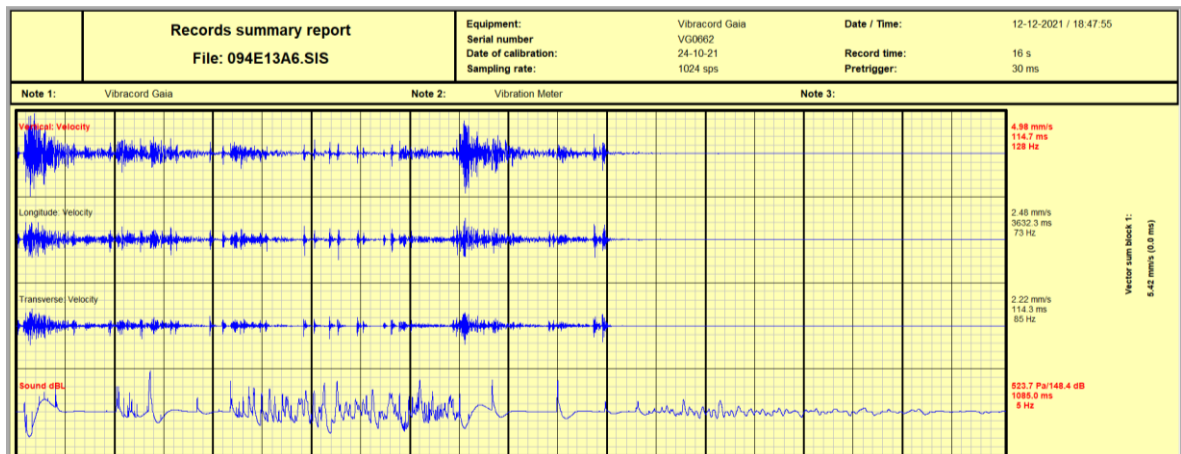
CX 8586

## REGISTRO VOLADURAS (S2)

FECHA: 12-12-2021  
HORA: 18:30 PM



## REGISTRO VOLADURAS (S3)



## REGISTRO FOTOGRÁFICO: VIBRACIONES, VOLADURA Y SISMICIDAD INDUCIDA POR VOLADURA

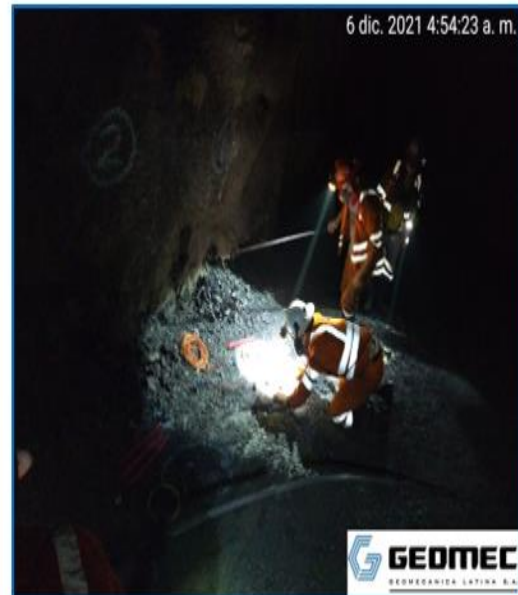


ENERO - 2022  
LIMA-PERÚ

## REGISTRO FOTOGRÁFICO:



**FOTO N° 1:** Instalación de equipos Sismógrafos (GEOMEC) para medición de vibraciones inducidas por voladura. Tajo 8640 Corredor 1 Sur frente Breasting.



**FOTO N° 2:** Carguío de taladros (RESEFER) para realizar "Prueba Especial en Roca" Destress Blasting. Tajo 8660 AC 8602 NW.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO:



**FOTO N° 3:** Carguío de taladros en frente completo por personal SIMSA para monitoreo de vibraciones inducidas por voladura. Tajo 8650 Ventana 3.



**FOTO N° 4:** Instalación de equipos Sismógrafos (GEOMEC) para medición de vibraciones inducidas por voladura. Rampa 8600 Frente completo.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO:



**FOTO N° 5:** Carguío de un taladro (SIMSA) para prueba especial en mineral y defenir "Tiempo de Retardo", Tajo 8670.



**FOTO N° 6:** Instalación de equipos Sismógrafos (GEOMECC) para medición de vibraciones inducidas por voladura, bajo supervisión del ING Rubén Maza. Tajo 8650 Corredor 1 Norte.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO:



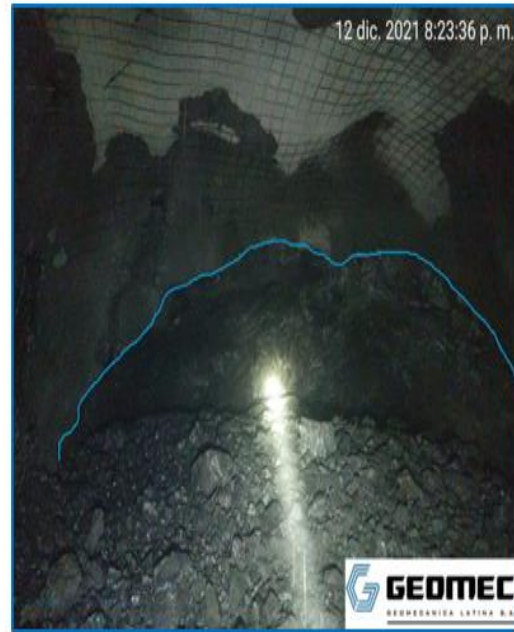
**FOTO N° 7:** Encendido de equipos Sismógrafos (GEOMECC) para medición de vibraciones inducidas por voladura. Rampa 8600 frente desquinche.



**FOTO N° 8:** Instalación de equipos Sismógrafos (GEOMECC) para medición de vibraciones inducidas por voladura. Tajo 8640 ventana 2 Sur frente breasting.



**FOTO N° 9:** Instalación de equipos Sismógrafos (GEO MEC) para medición de vibraciones inducidas por voladura. Cx 8586 frente completo.



**FOTO N° 10:** Verificación de voladura, se observa que no existe sobre excavación en corona y hastiales. Cx 8586 frente completo.