



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Reducción de vibraciones en los taludes aplicando la técnica de onda elemental en una mina superficial del sur del Perú, 2024

Tesis presentada por:

Cano Guitton, Alejandro

ORCID: 0009-0007-0248-2575

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0002-4761-8911

Arequipa – Perú

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Mayo del 2026

Dictamen: 013653-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 013653, presentado por:

2015204131 - CANO GUITTON ALEJANDRO

Titulado:

**REDUCCIÓN DE VIBRACIONES EN LOS TALUDES APLICANDO LA TÉCNICA DE ONDA
ELEMENTAL EN UNA MINA SUPERFICIAL DEL SUR DEL PERÚ, 2024**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



Reducción de vibraciones en los taludes aplicando la técnica de onda elemental en una mina superficial del sur del Perú, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

idoc.pub

Fuente de Internet

1%

2

www.codeauni.com

Fuente de Internet

1%

3

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1%

4

repositorio.unap.edu.pe

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

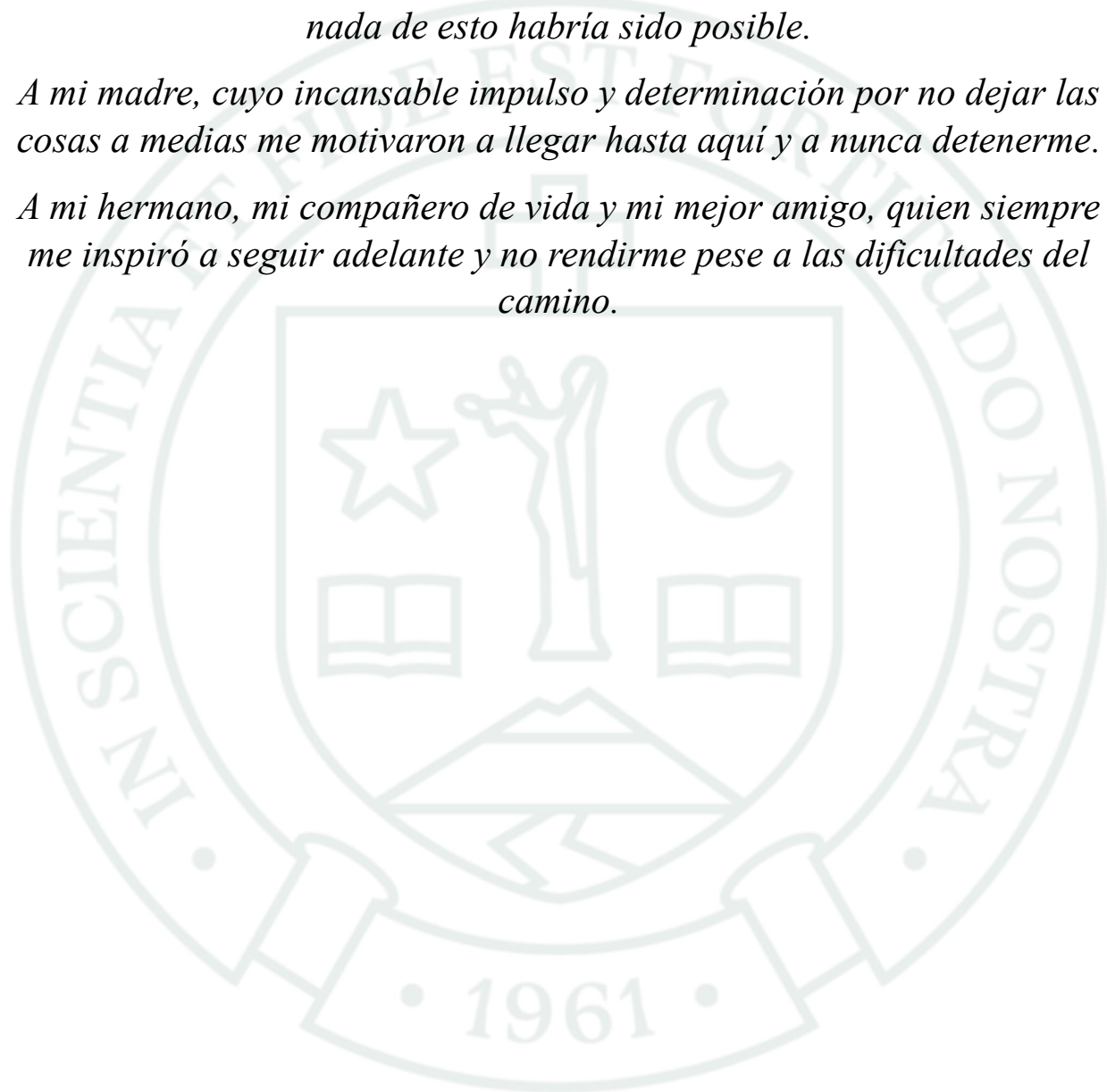
Apagado

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre, quien fue mi primer y más importante mentor. Me acompañó en cada etapa personal y profesional, y cuánto quisiera que pudiera estar presente en este momento. Sin su esfuerzo y sacrificio, nada de esto habría sido posible.

A mi madre, cuyo incansable impulso y determinación por no dejar las cosas a medias me motivaron a llegar hasta aquí y a nunca detenerme.

A mi hermano, mi compañero de vida y mi mejor amigo, quien siempre me inspiró a seguir adelante y no rendirme pese a las dificultades del camino.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Católica de Santa María, mi casa de estudios, por haberme brindado la formación académica y profesional que me permitió crecer y llegar a esta etapa.

A mi familia por su apoyo incondicional durante todo este camino, y a los amigos que hice en la universidad, quienes siguen siendo parte importante de mi vida en esta nueva etapa profesional.



EPÍGRAFE

“El futuro pertenece a quienes creen en la belleza de sus sueños”



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo reducir las vibraciones en los taludes mediante la aplicación de la técnica de onda elemental en la Fase 02 Norte de una mina superficial del sur del Perú. El problema de estudio surge porque, durante el proceso de perforación y voladura, se generan vibraciones elevadas en una zona con alta incidencia de fallas geológicas, situación que puede comprometer la estabilidad de los taludes, generar alertas geotécnicas e incrementar el riesgo de caída de rocas. En ese contexto, se planteó como hipótesis que la aplicación de la técnica de onda elemental permitiría disminuir las vibraciones inducidas por la voladura y mejorar las condiciones de seguridad y control geotécnico de la operación.

La investigación se desarrolló con un enfoque aplicado y un análisis comparativo antes y después de la implementación de la técnica. Para ello, se emplearon registros de vibraciones obtenidos mediante sismógrafo y geófono triaxial, considerando como indicadores principales la velocidad pico partícula (PPV) y la frecuencia en los ejes transversal, vertical y longitudinal. Como línea base, se analizaron nueve voladuras ejecutadas entre julio y diciembre de 2024 en la Fase 02 Norte, cuyos resultados mostraron valores de PPV suma entre 100.5 y 327.2 mm/s, evidenciando un escenario de vibraciones elevadas. Posteriormente, se desarrolló la técnica de onda elemental a partir de la detonación aislada de un taladro al inicio de la secuencia, la identificación y recorte de la señal sísmica mediante el software Blastware 10, y la simulación de distintos tiempos de retardo entre taladros para determinar la combinación más favorable en términos de menor vibración y mayor frecuencia.

Los resultados del modelamiento permitieron identificar que los tiempos de 19, 20 y 21 ms presentaban condiciones adecuadas de desempeño, seleccionándose finalmente 19 ms como el tiempo óptimo entre taladros para las voladuras de la Fase 02 Norte. Con la aplicación de este

criterio en el diseño de secuencias posteriores, se evaluaron doce voladuras entre enero y junio de 2025, obteniéndose valores de PPV suma entre 29.4 y 79.5 mm/s. Comparativamente, el promedio de PPV suma se redujo de 173.2 mm/s en la línea base a 60.86 mm/s luego de la implementación, lo que equivale a una disminución aproximada de 64.9 %, superando ampliamente la reducción esperada del 10 %.

Se concluye que la técnica de onda elemental constituye una alternativa eficaz para optimizar los tiempos de retardo, incrementar la frecuencia de vibración y reducir significativamente el impacto de las voladuras sobre los taludes. En consecuencia, su aplicación contribuye a mejorar la estabilidad geotécnica, disminuir el potencial de daño en las paredes del tajo y fortalecer la seguridad operativa en minería superficial.

Palabras clave: Vibraciones, onda elemental, voladura.

ABSTRACT

The aim of this research was to reduce slope vibrations through the application of the elemental wave technique in Phase 02 North of a surface mine in southern Peru. The research problem arises because, during the drilling and blasting process, high vibration levels are generated in an area with a high incidence of geological faults, a situation that may compromise slope stability, trigger geotechnical alerts, and increase the risk of rockfalls. In this context, the hypothesis proposed was that the application of the elemental wave technique would make it possible to reduce blasting-induced vibrations and improve the safety and geotechnical control conditions of the operation.

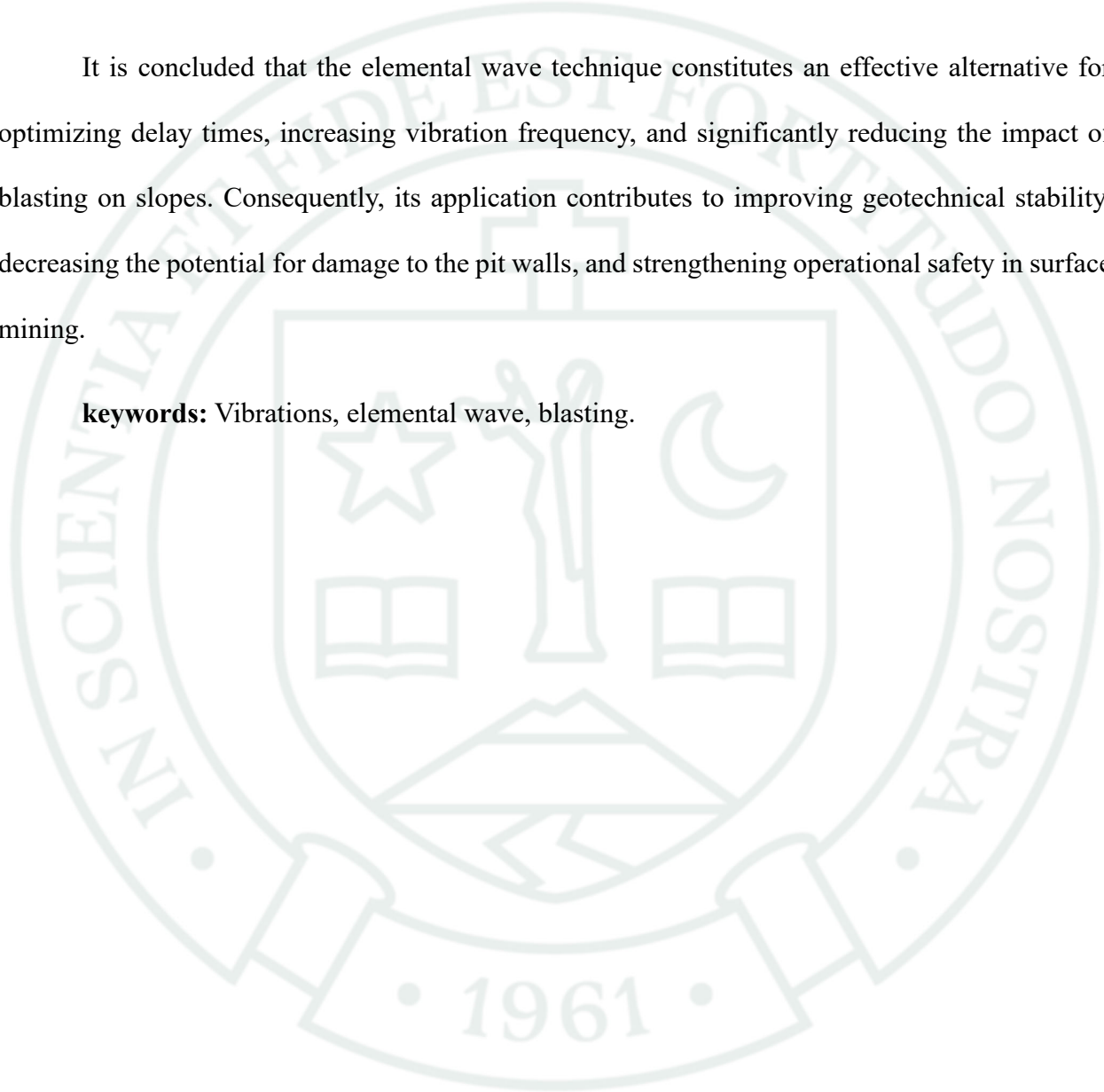
The research was conducted using an applied approach and a comparative analysis before and after the implementation of the technique. For this purpose, vibration records obtained through a seismograph and a triaxial geophone were used, considering peak particle velocity (PPV) and frequency in the transverse, vertical, and longitudinal axes as the main indicators. As a baseline, nine blasts carried out between July and December 2024 in Phase 02 North were analyzed, and the results showed PPV sum values ranging from 100.5 to 327.2 mm/s, evidencing a high-vibration scenario. Subsequently, the elemental wave technique was developed from the isolated detonation of a blast hole at the beginning of the sequence, the identification and truncation of the seismic signal using Blastware 10 software, and the simulation of different delay times between holes in order to determine the most favorable combination in terms of lower vibration and higher frequency.

The modeling results made it possible to identify that delay times of 19, 20, and 21 ms showed adequate performance conditions, with 19 ms ultimately being selected as the optimum inter-hole delay for the blasts in Phase 02 North. By applying this criterion in the design of

subsequent sequences, twelve blasts carried out between January and June 2025 were evaluated, yielding PPV sum values between 29.4 and 79.5 mm/s. Comparatively, the average PPV sum was reduced from 173.2 mm/s in the baseline to 60.86 mm/s after implementation, which is equivalent to an approximate 64.9% decrease, far exceeding the expected 10% reduction.

It is concluded that the elemental wave technique constitutes an effective alternative for optimizing delay times, increasing vibration frequency, and significantly reducing the impact of blasting on slopes. Consequently, its application contributes to improving geotechnical stability, decreasing the potential for damage to the pit walls, and strengthening operational safety in surface mining.

keywords: Vibrations, elemental wave, blasting.



ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	4
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Determinación del problema	5
1.2 Objetivo del proyecto	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Preguntas de investigación	6
1.3.1 Pregunta principal	6
1.3.2 Preguntas específicas.....	6
1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema.....	7
1.5 Palabra clave	7
1.6 Justificación e importancia.....	7
1.6.1 Justificación practica	7
1.6.2 Justificación social	8
CAPÍTULO II	9
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1 Estado del arte	10
2.1.1 Antecedentes de la investigación internacional.....	10
2.1.2 Antecedentes de la investigación internacional.....	11
2.2 Bases teóricas de la investigación	13
2.2.1 Vibraciones.....	13
2.2.2 Propiedades básicas de las ondas	15
2.2.3 Frecuencia de las vibraciones.....	16
2.2.4 Amplitud de la vibración.....	17
2.2.5 Duración de la Vibración.....	20

2.2.6	Longitud de onda de la vibración	22
2.2.7	Velocidad de propagación	24
2.2.8	Velocidad pico partícula	26
2.2.9	Comportamiento de la velocidad de partícula	27
2.2.10	Modelo general.....	27
2.2.11	Modelo Holmberg & Persson.....	27
2.2.12	Modelo Devin.....	28
2.2.13	Vibración	28
2.2.14	Secuencia de detonación	28
2.2.15	Vibración en los taludes	29
2.2.16	Carga operante.....	29
2.2.17	Onda elemental.....	29
2.2.18	Software Blastware	30
2.2.19	Análisis de vibraciones.....	30
2.3	Hipótesis.....	31
2.3.1	Hipótesis Específicas	32
2.3.2	Variable dependiente	32
2.3.3	Variable independiente	32
CAPÍTULO III		34
3	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	35
3.1	Alcances y limitaciones.....	35
3.2	Tipo y nivel de investigación	35
3.2.1	Tipo de investigación	35
3.2.2	Nivel de investigación.....	36
3.3	Población y muestra	37
3.3.1	Población.....	37
3.3.2	Muestra.....	37
3.4	Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	37
3.4.1	Procedimiento y técnica de recolección de datos.....	37
3.4.2	Técnicas de recolección de datos	38
3.4.3	Instrumentos de medición	38
3.4.4	Plan de análisis estadístico de los datos	39

3.5	Lugar de desarrollo de investigación.....	39
3.6	Ambiente que utilizar	40
3.6.1	Ubicación de la zona de estudio	42
3.7	Vibraciones en el proceso de voladura	43
3.8	Desarrollando la técnica de la onda elemental en la Fase 02 Norte	46
3.8.1	Identificación de la onda elemental.....	46
3.8.2	Uso del software Blastware 10 para recortar el registro de la onda elemental	51
3.8.3	Recorte de la onda elemental en el software Blastware 10	51
3.8.4	Simulación de onda elemental.....	53
3.8.5	Obtención del tiempo optimo entre taladros	56
3.9	Reducción de las vibraciones mediante la onda elemental	57
3.9.1	Gráficos de vibración y frecuencia para generación de tiempos de vibraciones.....	57
3.9.2	Uso de tiempos entre taladros seleccionados usando la técnica de onda elemental...61	
3.9.3	Resultados de medición de vibraciones en Fase 02 norte	62
3.9.4	Seguridad operativa y beneficio económico en minería por onda elemental.....	63
3.9.5	Estimación de los costos evitados por reducción de vibraciones	65
3.9.6	Comparativa de métodos de control de vibraciones en minas similares	66
CAPÍTULO IV		67
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
4.1	CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	33
Tabla 2 Valores de PPV y frecuencia registrados en la fase 02 Norte (julio - diciembre 2024)....	44
Tabla 3 Valores de PPV y frecuencia registrados en la fase 02 Norte (enero - junio 2025).....	62
Tabla 4 Estimación de los costos evitados por reducción de vibraciones	65
Tabla 5 Comparativa de métodos de control de vibraciones	66



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Presión y relajación asimétrica en un elemento de roca	15
Figura 2 Amplitudes de Onda	20
Figura 3 Registro completo de la onda de vibración.....	22
Figura 4 Valores de PPV por proyecto (julio - diciembre 2024).....	45
Figura 5 Posicionamiento de geófono.....	47
Figura 6 Posicionamiento de y colocación de sismógrafo	48
Figura 7 Sismógrafo señalizado y protegido para coma de onda elemental	49
Figura 8 Onda elemental	50
Figura 9 Onda elemental software Blastware 10	51
Figura 10 Herramienta truncate de Blastware 10.....	52
Figura 11 Herramienta signature hole análisis Blastware 10	53
Figura 12 Parámetros para simulación signature hole análisis Blastware 10	54
Figura 13 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias	55
Figura 14 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias	56
Figura 15 Onda elemental del proyecto F02N-3600-002.....	57
Figura 16 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001	58
Figura 17 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006.....	58
Figura 18 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3600-002.....	59
Figura 19 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001	60
Figura 20 Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006.....	61
Figura 21 Colocación de sismógrafo para segunda toma de vibraciones	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1 Onda Elemental F02N-3435-003.....	74
Anexos 2 Onda elemental F02N-3570-006	80
Anexos 3 Onda elemental F02N-3600-008	82
Anexos 4 Ficha técnica monitor de vibraciones Micromate.....	84
Anexos 5 Estándar monitoreo de vibraciones en campo cercano	87



INTRODUCCIÓN

En la minería superficial, las operaciones de perforación y voladura constituyen una etapa fundamental dentro del proceso productivo, debido a que permiten fragmentar el macizo rocoso para facilitar las actividades posteriores de carguío, acarreo, chancado o disposición del material. Sin embargo, junto con los beneficios operativos de la voladura, también se generan efectos secundarios que deben ser controlados técnicamente, entre ellos las vibraciones inducidas en el terreno. Estas vibraciones, cuando alcanzan niveles elevados, pueden afectar la estabilidad de los taludes, incrementar el potencial de daño en las paredes del tajo y generar condiciones de riesgo para la seguridad operacional.

En el caso de las minas superficiales ubicadas en zonas con presencia de fallas geológicas, discontinuidades estructurales y taludes expuestos, el control de vibraciones adquiere especial importancia. La propagación de ondas sísmicas generadas por las voladuras puede producir efectos desfavorables sobre el macizo rocoso, principalmente cuando se presentan altos valores de velocidad pico partícula y frecuencias bajas. Esta situación puede favorecer la apertura de discontinuidades, el debilitamiento progresivo de las paredes del tajo y el incremento del riesgo de caída de rocas. Por ello, resulta necesario aplicar técnicas que permitan optimizar el diseño de las voladuras y reducir el impacto vibratorio sobre los taludes.

La presente investigación se desarrolla en la Fase 02 Norte de una mina superficial del sur del Perú, donde se identificó la necesidad de reducir los niveles de vibración generados durante las voladuras. Para ello, se propone la aplicación de la técnica de onda elemental, también conocida como onda semilla, la cual permite analizar la respuesta vibratoria producida por la detonación aislada de un taladro. A partir de esta señal, es posible simular distintos tiempos de retardo entre

taladros y seleccionar aquellos que generen menores valores de velocidad pico partícula y mayores frecuencias, condiciones favorables para disminuir el potencial de daño sobre los taludes.

El estudio tiene como objetivo principal reducir las vibraciones en los taludes mediante la aplicación de la técnica de onda elemental en una mina superficial del sur del Perú. Para alcanzar este propósito, se determinaron inicialmente las vibraciones generadas en el proceso de voladura, se desarrolló la técnica de onda elemental en la Fase 02 Norte y, finalmente, se evaluó la reducción obtenida mediante un análisis comparativo antes y después de su aplicación. La investigación es de tipo aplicada, con enfoque experimental y nivel explicativo, ya que busca resolver un problema técnico real de la operación minera y evaluar el efecto de una variable independiente, representada por la técnica de onda elemental, sobre una variable dependiente, correspondiente a las vibraciones en los taludes.

La metodología empleada se basó en la recopilación de registros de vibraciones mediante sismógrafo digital y geófono triaxial, considerando como indicadores principales la velocidad pico partícula y la frecuencia en los ejes transversal, vertical y longitudinal. Como línea base, se analizaron nueve voladuras ejecutadas entre julio y diciembre de 2024, cuyos valores de PPV suma estuvieron comprendidos entre 100.5 mm/s y 327.2 mm/s. Posteriormente, se capturó la onda elemental mediante la detonación aislada de un taladro, se procesó la señal en el software Blastware 10 y se realizaron simulaciones para identificar los tiempos óptimos de retardo entre taladros.

A partir del análisis realizado, se determinó que los tiempos de 19, 20 y 21 ms presentaban condiciones favorables de baja vibración y alta frecuencia, seleccionándose finalmente el tiempo de 19 ms como el más adecuado para las voladuras posteriores de la Fase 02 Norte. Luego de aplicar este tiempo en el diseño de las secuencias de voladura, se evaluaron doce voladuras

ejecutadas entre enero y junio de 2025, obteniéndose valores de PPV suma entre 29.4 mm/s y 79.5 mm/s. Comparativamente, el promedio de PPV suma disminuyó de 173.2 mm/s a 60.86 mm/s, lo que representa una reducción aproximada de 64.86 %.

En ese sentido, la investigación demuestra que la técnica de onda elemental constituye una alternativa eficaz para optimizar los tiempos de retardo, reducir las vibraciones inducidas por voladura y mejorar el control geotécnico de los taludes. Asimismo, su aplicación contribuye a fortalecer la seguridad operacional, disminuir el riesgo de daño en las paredes del tajo y proporcionar una herramienta técnica útil para operaciones de minería superficial que requieran controlar el impacto vibratorio de sus voladuras.



CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

Dentro del proceso productivo de la minería a tajo abierto, la fase de perforación y voladura emerge como un componente vital y de suma importancia. Esta etapa es esencial, ya que reduce el tamaño de la roca a dimensiones óptimas para su transporte hacia la chancadora o los botaderos. Sin embargo, resulta inevitable que se generen vibraciones durante este proceso.

En el caso particular de esta mina, caracterizada por una alta incidencia de fallas geológicas, se han establecido límites de vibraciones según las zonas y litologías. Dado que la mina realiza voladuras diariamente y la incidencia de fallas geológicas es alta, la necesidad de reducir las vibraciones se ha vuelto imperativa para preservar la estabilidad de los taludes.

Ante este escenario, se plantea como solución la implementación de la técnica onda elemental en la etapa inicial del proceso de voladura. Este enfoque tiene como objetivo disminuir las vibraciones a niveles mínimos requeridos por la mina. Todo ello se busca lograr sin comprometer la estabilidad de los taludes, manteniendo inalterada la fragmentación de la roca.

Para lo que debemos capturar la onda elemental, simular la velocidad pico partícula (VPP), frecuencias y analizar los tiempos de retardo entre taladros.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Reducir las vibraciones en los taludes aplicando la técnica onda elemental en una mina superficial del sur del Perú, 2024.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las vibraciones en el proceso de voladura en la mina superficial del sur del Perú.
- Desarrollar la técnica de la onda elemental en las voladuras de fase 02 Norte.
- Determinar la reducción de las vibraciones mediante la técnica de la onda elemental en la fase 2 norte.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿Es posible reducir las Vibraciones en los Taludes aplicando la Técnica de onda elemental en una Mina Superficial del Sur del Perú, 2024?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cómo se determina las vibraciones en el proceso de voladura en la mina superficial del sur del Perú?
- ¿Es posible aplicar la técnica de la onda elemental en las voladuras de la Fase 2 norte?

- ¿En qué porcentaje se reducirá las vibraciones con la técnica de la onda elemental en la fase 2 norte?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a “Optimización de procesos mineros”, porque amplía el conocimiento ya existente sobre la técnica de onda elemental para la reducción de la vibración en taludes por la voladura reafirmando la utilidad de esta.

1.5 Palabra clave

- Vibraciones
- Onda elemental
- Voladura
- Taludes

1.6 Justificación e importancia

Mediante la presente investigación se amplía el conocimiento ya existente sobre la técnica de onda elemental para la reducción de la vibración en taludes por la voladura, reafirmando la utilidad de esta.

1.6.1 Justificación práctica

Esta investigación se justifica en la práctica porque permite atenuar o resolver el problema del daño recibido en los taludes por parte de la voladura reduciendo las vibraciones de esta, con la

técnica de onda elemental. Dando como resultado una mejor estabilidad, evitar alertas geotécnicas y posibles caídas de rocas en los taludes.

1.6.2 Justificación social

Se justifica socialmente porque permite reducir el riesgo de caída de rocas de los taludes y el deslizamiento de estos, a razón de recibir menos daños por efectos de la voladura, y esto a su vez genera mayor estabilidad en los taludes, y por consecuencia genera áreas seguras de trabajo para los colaboradores y minimiza el riesgo en las zonas aledañas.





CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 *Antecedentes de la investigación internacional*

En el estudio titulado: “Advanced Techniques for High Vibration Reduction” J. M. Blomberg (2018), se estudio el uso de técnicas avanzadas basadas en el concepto de ondas elementales y también detonadores electrónicos, utilizados para la significativa reducción de las vibraciones inducidas por la voladura.

En el estudio titulado “Seed Wave Modeling to Natural Caves Protection in Mining Operations – Carajás”, Lopes et al. (2023) determinaron que, mediante el modelamiento con la técnica seed wave, fue posible reducir significativamente el PPV en las zonas de cuidado, diseñando voladuras con secuencias y tiempos óptimos.

En el artículo titulado “Experimental Study on Vibration Reduction Technology of Hole-by-Hole Presplitting Blasting”, los autores Jun M., et al. (2021), obtienen que optimizando los parámetros de voladura de pre-corte y encontrando el coeficiente de desacople de carga utilizando detonadores electrónicos para este, es posible reducir la carga operante, reduciendo así la vibración hacia el talud.

En el artículo titulado “Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability” Los autores X.Z. Shi & SH.R Chen (2011), determinan las características de propagación de las vibraciones inducidas por las voladuras basadas en el monitoreo de campo en este sitio después de que se fijen los parámetros geométricos de la voladura, para reducir el daño al talud final de la mina haciendo control en carga de taladros de tiempo de retardo.

En la tesis titulada “Estudio de vibraciones inducidas por voladura en minería Spence”, los autores cubillos y vallejos (2018) evalúan la condición de la mina Spence identificando las zonas de daño y generando una nueva metodología de diseño en control de daño por vibraciones utilizando un modelo de daño de PPV, logrando así una propuesta de diseño de voladura que permitiría obtener una reducción del 35% de los deslizamientos a escala del talud.

2.1.2 Antecedentes de la investigación internacional

En el artículo titulado “Estudio de onda elemental para la optimización de tiempos de retardo y generación de frecuencias de menor daño a las paredes del talud por voladura – U.M Las Bambas Apurímac” Jorge P. (2022), toman la onda elemental en las zonas fase 3 y 4 para replantear los tiempos de retardo electrónicos, donde concluyeron en 23, 24 y 25 ms para la zona de Fase 3 y tiempos de 19 y 20 ms para la zona de Fase 4, con los cuales en la práctica se logró reducir las vibraciones en las paredes del talud.

En la tesis titulada “Reducción del daño generado por voladura a taludes finales por medio de técnicas de precorte para yacimiento tipo pórfido de gran escala superficial”, los autores Pacco y Apaza (2019) consideran realizar el diseño del precorte en una mina de tajo abierto considerando aspectos técnicos como geología, geotécnica, planeamiento operación y seguridad para lograr estabilidad de taludes y factores de seguridad aceptables. Se planteo técnicas de precorte de acuerdo con el tipo de roca. Obteniendo al término de la investigación reducir el daño generado por la voladura en los taludes utilizando técnicas de precorte con una carga desacoplada.

En la tesis titulada “Cuidado de infraestructuras en operaciones a tajo abierto modificando tiempos entre taladros y diseño de configuración de carga”, el autor José C. Tong (2020) evalúa el diseño, carga y secuencia de salida rediseñando la malla para este sector usando los modelos

Devine, Kuz Ram y la teoría de Cunningham para calcular los tiempos de secuencia para no dañar un tanque de combustible localizado a 250 metros, obteniendo al término de la investigación un diseño de voladura que no genere daño a la infraestructura, utilizando tiempos de 100 ms entre filas y 29 ms entre columnas.

En el estudio titulado “Reducción de vibraciones hacia comunidades mediante control de retardos”, los autores Acosta y Pereira (2022) en la minera Goldfields en el Cerro Corona tienen dos comunidades cercanas: Hualgayoc y Pílancones por lo que es necesario la reducción de las vibraciones percibidas debido a las quejas de estas comunidades. Mediante la toma de unas ondas elementales, se han diseñado secuencias con retardos eficientes para la reducción de vibraciones percibidas en las comunidades, logrando reducirse en un 27% sin afectar considerablemente la fragmentación.

En la tesis titulada “Aplicación de modelo predictivo de daño (CROSS HOLE) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud, Mina Constancia – 2019” (Gómez Tique, 2019), se aplica el método Cross Hole así como el análisis de onda elemental para poder predecir y controlar vibraciones generadas por las voladuras. A partir de la onda elemental se optimizaron los tiempos de retardo entre taladros, lo que permitió estimar con más precisión la VPP y reducir el impacto sobre la estabilidad de los taludes.

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Vibraciones

Las vibraciones pueden entenderse como movimientos oscilatorios o cíclicos que se propagan a través de un medio, generados por la sucesión alternada de fases de compresión y tensión. En el caso específico de las vibraciones ocasionadas por voladuras en macizos rocosos, estas se originan principalmente durante el proceso de detonación del explosivo.

De manera general, se considera que la mayor parte de la vibración se produce en el frente de detonación, es decir, en la zona donde el explosivo en estado sólido se transforma rápidamente en gases a altas presiones y temperaturas. En esta etapa inicial, conocida comúnmente como zona de plasma o zona de choque, la densidad de los gases generados aún puede ser similar a la densidad del explosivo sólido. Debido a la elevada liberación de energía en un intervalo muy corto de tiempo, esta zona tiene un papel fundamental en la fragmentación primaria del macizo rocoso y en la generación de ondas vibratorias que se transmiten a través de la roca.

Posteriormente, una vez que el frente de detonación ha avanzado, los gases producidos comienzan a expandirse hacia las zonas ubicadas detrás de dicho frente. Esta expansión genera la denominada energía de gas, la cual contribuye de manera significativa al desplazamiento, apertura de fracturas y movimiento de la roca fragmentada. Por lo tanto, las vibraciones inducidas por voladuras no solo dependen de la energía liberada durante la detonación inicial, sino también del comportamiento posterior de los gases y de la forma en que dicha energía interactúa con las características del macizo rocoso.

Consideremos un escenario básico correspondiente a un único pozo de voladura, cargado con una cantidad reducida de explosivo. Para efectos de análisis, cuando la longitud de la carga es

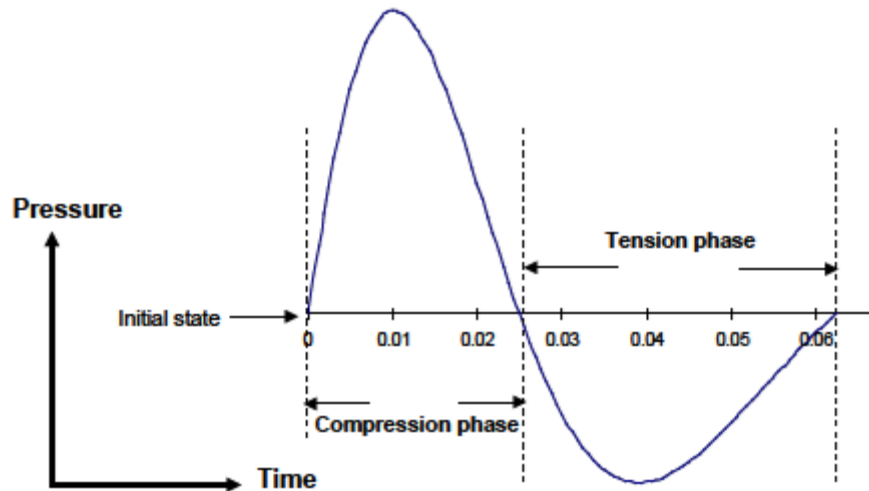
aproximadamente seis veces el diámetro del pozo, esta puede idealizarse como una carga de comportamiento casi esférico. Al producirse la detonación, la masa rocosa que rodea la carga es sometida de forma inmediata a un intenso esfuerzo de compresión, originando así la primera componente del ciclo vibratorio.

Luego de esta etapa inicial, la roca comienza una fase de expansión, como respuesta natural del material frente a la deformación sufrida y en un intento por recuperar su estado de equilibrio original. Esto ocurre debido a que los materiales, incluida la roca, presentan en cierta medida un comportamiento elástico semejante al de un resorte. Por ello, una vez que disminuye o desaparece la fuerza compresiva generada por la detonación, el macizo rocoso tiende a relajarse y retornar a su posición inicial.

Sin embargo, este retorno no se detiene exactamente en la posición original. Debido a la energía acumulada durante la compresión, la roca puede desplazarse más allá de su estado inicial, generando una fase de tensión dentro del ciclo de vibración. De esta manera, el fenómeno vibratorio se compone de una alternancia entre compresión y tensión, proceso que explica la propagación de las ondas generadas por la voladura a través del macizo rocoso.

Figura 1

Presión y relajación asimétrica en un elemento de roca



Nota. Relación de presión y relajación asimétrica en roca.

2.2.2 Propiedades básicas de las ondas

Las ondas vibratorias presentan una serie de propiedades fundamentales que permiten describir su comportamiento y la forma en que se propagan a través de un medio, como el macizo rocoso. Entre las principales características se encuentran la frecuencia, la amplitud, la duración, la longitud de onda y la velocidad de propagación.

La frecuencia corresponde al número de ciclos completos de compresión y tensión que se producen o transmiten en un segundo. Esta propiedad se expresa generalmente en hertzios y permite conocer la rapidez con la que oscila el medio durante el paso de la onda.

La amplitud representa el valor máximo del movimiento o esfuerzo generado por la vibración. En términos generales, se relaciona con el desplazamiento o movimiento de las partículas individuales del medio cuando estas son sometidas a esfuerzos dinámicos.

La duración se refiere al tiempo total durante el cual el medio permanece expuesto a la vibración. Este parámetro es importante, ya que una vibración de mayor duración puede incrementar el efecto acumulativo sobre las estructuras, el terreno o el macizo rocoso.

La longitud de onda es la distancia que recorre la onda durante un ciclo completo de compresión y tensión. Esta propiedad está directamente relacionada con la frecuencia y la velocidad de propagación de la onda.

Finalmente, la velocidad de propagación corresponde a la rapidez con la que la onda se desplaza a través del medio. Es importante señalar que esta velocidad no es igual a la velocidad de movimiento de las partículas individuales, ya que las partículas oscilan alrededor de una posición de equilibrio, mientras que la onda es la perturbación que se transmite a través del material.

2.2.3 Frecuencia de las vibraciones

La frecuencia de las vibraciones corresponde al número de veces por segundo que una onda completa un ciclo de compresión y tensión durante su propagación a través del medio. En otras palabras, permite describir cuántas oscilaciones se producen en un segundo y se expresa comúnmente en hertzios (Hz).

En el caso de las vibraciones generadas por voladuras, uno de los factores que más influye en la frecuencia es la dimensión de la carga explosiva. Por lo general, las columnas de carga de mayor tamaño tienden a generar vibraciones de menor frecuencia, debido a que liberan energía durante un intervalo relativamente más prolongado. No obstante, la frecuencia también depende de otros aspectos relevantes, como las propiedades mecánicas del macizo rocoso, los módulos elásticos de la roca y las características propias del explosivo, especialmente la velocidad de detonación y la forma en que se desarrolla la carga durante el proceso de explosión.

A partir del análisis de registros vibratorios, la frecuencia dominante suele determinarse como el inverso del tiempo requerido para completar un ciclo completo de la onda. Por ejemplo, si un ciclo tiene una duración de 0,05 segundos, la frecuencia correspondiente será de 20 Hz. Este tiempo necesario para completar un ciclo se conoce **como** período de la onda, generalmente representado por la letra T, y debe expresarse en segundos. De esta manera, la relación entre frecuencia y período puede expresarse como:

$$F = \frac{1}{T}$$

donde f representa la frecuencia y T el período de la onda.

Asimismo, es importante considerar que las ondas vibratorias reales no siempre presentan un comportamiento simple o perfectamente sinusoidal. En muchos casos, las señales registradas son complejas y están compuestas por varias componentes sinusoidales superpuestas, cada una con su propia frecuencia característica. Por esta razón, el análisis de frecuencia resulta fundamental para interpretar adecuadamente el comportamiento de las vibraciones inducidas por voladuras y su posible efecto sobre el macizo rocoso o las estructuras cercanas.

2.2.4 Amplitud de la vibración

La amplitud de la vibración representa una medida de la intensidad o “fuerza” con la que se manifiesta una onda vibratoria. Desde el punto de vista energético, la energía transportada por una onda de vibración es proporcional al cuadrado de su amplitud; es decir, a mayor amplitud, mayor será la energía asociada al movimiento vibratorio.

En el caso de una vibración continua y regular, donde cada ciclo de propagación mantiene una forma similar, basta con utilizar un único valor de amplitud para describir su magnitud. Este valor puede corresponder, por ejemplo, a la amplitud máxima registrada en una dirección

determinada. El signo de la amplitud, positivo o negativo, únicamente indica la dirección del movimiento de las partículas respecto a su posición de equilibrio.

Sin embargo, en la medición de vibraciones en macizos rocosos, generalmente no se diferencia entre amplitudes positivas y negativas. En la práctica, estos valores se expresan como magnitudes positivas o en valor absoluto, ya que lo más relevante es conocer la intensidad máxima del movimiento, independientemente de la dirección en que este se produzca.

Cuando la amplitud varía de un ciclo a otro dentro de una onda vibratoria más compleja, existen distintas formas de representarla. Entre las más utilizadas se encuentran:

- Amplitud peak o amplitud máxima.
- Amplitud promedio.
- Amplitud RMS, también conocida como media cuadrática.

La amplitud promedio y la amplitud RMS dependen del intervalo de tiempo seleccionado para realizar el cálculo. Por esta razón, los valores obtenidos pueden cambiar si se considera un período de análisis diferente. Por ejemplo, al evaluar un ciclo completo, el promedio de la amplitud puede resultar igual a cero debido a la compensación entre los valores positivos y negativos de la onda. En cambio, si se analiza un intervalo menor, el promedio y el valor RMS pueden variar. A diferencia de estos parámetros, la amplitud peak corresponde a un valor fijo, ya que representa el mayor nivel alcanzado por la vibración durante el registro. Este valor es especialmente importante, debido a que se asocia con el máximo esfuerzo dinámico al que puede estar sometido el terreno.

Las unidades utilizadas para expresar la amplitud dependen del tipo de sensor empleado para registrar el paso de la onda vibratoria. La propagación de una onda genera el movimiento real

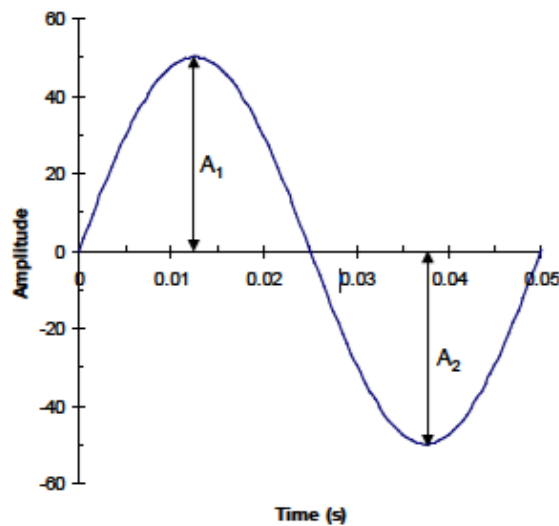
de las partículas del medio, por lo que es posible medir dicho fenómeno a través del desplazamiento, la velocidad o la aceleración de las partículas.

En términos teóricos, estas tres variables se encuentran relacionadas entre sí. Por lo tanto, si se conoce una de ellas, es posible estimar las otras mediante procedimientos matemáticos adecuados. No obstante, en la práctica, debido a que las frecuencias asociadas al movimiento pueden ser elevadas, incluso del orden de cientos de hertzios, se emplean instrumentos con sensibilidad y respuesta dinámica apropiada.

Los dispositivos más utilizados para este tipo de mediciones son los geófonos y los acelerómetros. Los geófonos permiten medir la vibración en términos de velocidad de partícula, la cual suele expresarse en milímetros por segundo (mm/s), o en pulgadas por segundo en algunos países.

Por su parte, los acelerómetros registran la aceleración del movimiento de las partículas. En estudios de vibraciones inducidas por voladuras, los geófonos son ampliamente utilizados debido a su costo relativamente bajo, facilidad de instalación y adecuada respuesta para el monitoreo de vibraciones en terreno.

Figura 2
Amplitudes de Onda



Nota. Es importante señalar que, en la medición de vibraciones en macizos rocosos, normalmente no se establece una diferencia entre las amplitudes positivas y negativas de la onda, representadas como A_1 y A_2 . Esto se debe a que el signo únicamente indica la dirección del movimiento de las partículas, mientras que el interés principal del análisis se centra en la magnitud de la vibración. Por ello, los valores registrados suelen reportarse como cantidades positivas, es decir, en términos de su valor absoluto.

2.2.5 Duración de la Vibración

La duración de la vibración corresponde al intervalo de tiempo durante el cual el terreno permanece en movimiento debido a la energía liberada por una voladura. Este parámetro depende principalmente de dos factores: la duración total de la voladura y la distancia existente entre el punto de monitoreo y el lugar donde se realiza la detonación.

Para obtener un registro confiable, es fundamental que el equipo de medición capture la totalidad de la onda vibratoria. Esto permite identificar correctamente el valor máximo de velocidad de partícula y, además, extraer la mayor cantidad de información posible del evento

registrado. Un registro adecuado debe incluir un tramo inicial sin vibraciones, correspondiente al estado de reposo del terreno antes de la llegada de la onda; luego, debe mostrar el desarrollo completo de la señal vibratoria y, finalmente, un intervalo posterior en el que el terreno retorna gradualmente a su condición inicial de quietud.

En una voladura de producción, la vibración total registrada no corresponde a una única onda simple, sino a la combinación de múltiples pulsos generados por la detonación de cada pozo. Estos pulsos individuales se superponen y forman una señal resultante en el punto de medición. La forma en que dichas ondas se combinan depende de la distancia, la dirección de propagación, las características del macizo rocoso y la secuencia de detonación utilizada. Por esta razón, dos registros obtenidos de una misma voladura pueden presentar formas de onda diferentes si se ubican en puntos de monitoreo distintos.

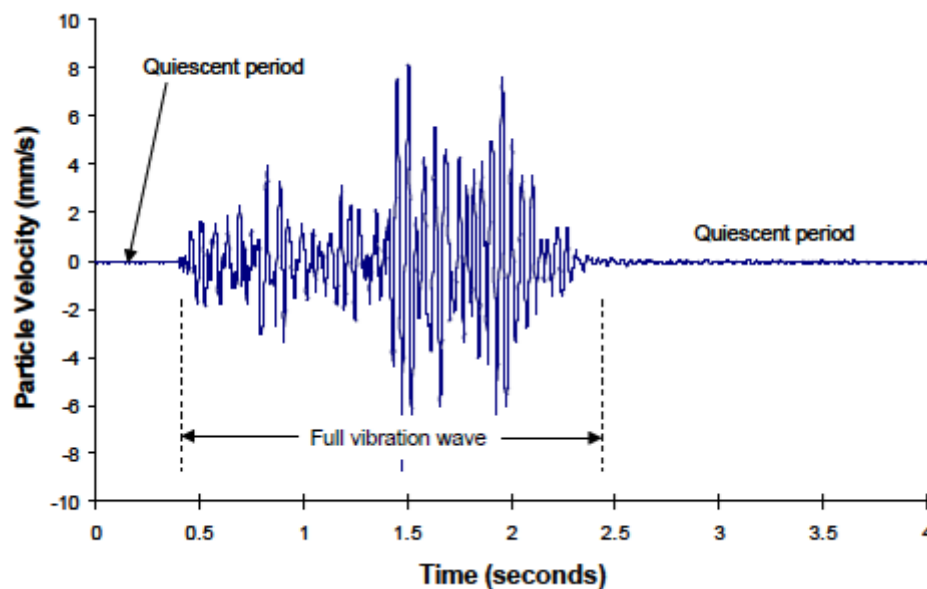
Por lo general, la duración de la vibración es ligeramente mayor que la duración propia de la voladura, entendida esta última como el tiempo transcurrido entre la detonación del primer y del último pozo. Esta diferencia se debe al tiempo que requieren las ondas para propagarse desde el último pozo detonado hasta el punto de medición. En condiciones habituales, la duración de la señal vibratoria puede exceder la duración de la voladura en aproximadamente 200 a 300 milisegundos.

Asimismo, a medida que aumenta la distancia de propagación, la duración de la vibración también tiende a incrementarse. Esto ocurre porque, en trayectos más largos, las ondas directas se combinan con ondas reflejadas y refractadas dentro del macizo rocoso. Además, comienzan a distinguirse con mayor claridad las ondas de superficie y las ondas de corte, las cuales se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Como resultado, el registro vibratorio se prolonga en el tiempo.

Por ejemplo, a distancias cercanas a 500 metros, la onda de vibración registrada puede durar entre 500 y 1000 milisegundos más que la duración de la voladura. Este comportamiento evidencia la importancia de considerar tanto la geometría de la voladura como las condiciones geológicas del terreno al momento de analizar la duración y el alcance de las vibraciones inducidas.

Figura 3

Registro completo de la onda de vibración



Nota. Partícula de vibración vs tiempo (Segundos)

2.2.6 Longitud de onda de la vibración

La longitud de onda de una vibración corresponde a la distancia que recorre una onda durante un ciclo completo de compresión y tensión, es decir, durante un período completo de la onda. Este parámetro es relevante en el análisis de vibraciones inducidas por voladuras, ya que permite comprender cómo se propaga la energía a través del macizo rocoso y cuál podría ser su efecto sobre las estructuras geológicas presentes.

La longitud de onda, representada comúnmente por la letra griega λ , puede calcularse para una onda de frecuencia única, también denominada onda armónica simple, mediante la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{V_p}{f}$$

Donde λ es la longitud de onda, V_p corresponde a la velocidad de propagación de la onda P y f representa la frecuencia de la vibración.

En el contexto de las voladuras realizadas en Chile, es común el uso de pozos largos, los cuales tienden a generar vibraciones de baja frecuencia. Como consecuencia, se producen longitudes de onda relativamente grandes, especialmente en macizos rocosos constituidos por materiales como pórfidos y andesitas. Por ejemplo, si una onda P se propaga a una velocidad de 3000 m/s y presenta una frecuencia de 30 Hz, la longitud de onda resultante será aproximadamente de 100 metros. Además, si la frecuencia disminuye, la longitud de onda aumenta.

Este aspecto adquiere importancia al analizar la interacción entre las ondas vibratorias y las estructuras presentes en la roca. Por ejemplo, si una estructura geológica, como una cuña de aproximadamente 100 metros de longitud, es sometida a una onda de vibración con una frecuencia de 30 Hz, es posible que diferentes sectores de dicha estructura experimenten movimientos en direcciones opuestas. Mientras una parte puede desplazarse verticalmente hacia arriba, otra puede hacerlo hacia abajo. De igual manera, algunas zonas pueden encontrarse sometidas a esfuerzos de compresión, mientras que otras experimentan esfuerzos de tensión.

Por lo tanto, la relación entre la longitud de onda de la vibración y el tamaño de las estructuras del macizo rocoso resulta fundamental para evaluar el posible daño inducido por las

vibraciones. Cuando las dimensiones de una estructura son comparables con la longitud de onda, pueden generarse deformaciones diferenciales que incrementan la probabilidad de inestabilidad, apertura de discontinuidades o deterioro del macizo rocoso.

2.2.7 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación corresponde a la rapidez con la que una onda vibratoria se desplaza a través del macizo rocoso. Este parámetro permite conocer el tiempo que tarda la perturbación generada por una voladura en viajar desde el punto de emisión hasta un punto determinado de medición.

Una forma habitual de determinar esta velocidad consiste en instalar **dos geófonos** a diferentes distancias respecto de la voladura. Al registrar el instante de llegada de la señal vibratoria en cada sensor, es posible calcular la diferencia de tiempo de arribo entre ambos registros. Con esta información y conociendo la distancia que separa a los geófonos, se puede estimar la velocidad de propagación de la onda.

En minas a rajo abierto, la velocidad de propagación suele encontrarse alrededor de los 3000 m/s. Sin embargo, en rocas muy competentes o de alta dureza, especialmente en operaciones subterráneas, este valor puede alcanzar aproximadamente 5000 m/s. Para obtener resultados más precisos, la separación entre los geófonos debe ser suficiente, ya que distancias muy cortas pueden generar errores significativos en el cálculo.

Por ejemplo, si dos geófonos se encuentran separados solo 10 metros, la diferencia esperada en el tiempo de llegada de la onda puede ser de aproximadamente 3 milisegundos. En este caso, un error de medición de apenas 0,5 milisegundos representaría un error cercano al 17 %, lo que evidencia la importancia de utilizar distancias adecuadas entre sensores. En cambio, cuando la

separación es mayor, como por ejemplo 300 metros, y la diferencia de tiempo de llegada es de 80 milisegundos, la velocidad de propagación calculada corresponde a aproximadamente 3750 m/s.

La velocidad de propagación de la onda P, representada como V_p , puede calcularse mediante la expresión:

$$V_p = \frac{s}{t}$$

donde s corresponde a la distancia recorrida por la onda y t al tiempo que tarda en propagarse entre dos puntos.

Cuando una onda atraviesa distintos tipos de materiales, la velocidad promedio no depende únicamente de un valor individual, sino de la combinación de los tramos recorridos en cada medio. En estos casos, el cálculo considera la suma de las distancias atravesadas y el tiempo total de viaje de la onda. Por ello, la velocidad promedio estará influenciada por la proporción de recorrido que la onda realiza en cada tipo de material.

Un caso particular ocurre en macizos rocosos fracturados o con presencia de numerosas diaclasas. En condiciones normales, la velocidad de propagación no siempre se ve afectada de manera significativa por el fracturamiento, debido a que muchas grietas mantienen puntos de contacto entre los bloques de roca. Estos contactos permiten que las vibraciones se transmitan con una pérdida limitada de velocidad. Sin embargo, cuando las fracturas se encuentran abiertas y contienen aire, el comportamiento cambia considerablemente.

En una interfaz roca-aire, la transmisión de energía vibratoria se reduce de forma importante debido al contraste de impedancia acústica entre ambos medios. La impedancia acústica depende de la densidad del material y de la velocidad de propagación de la onda. Debido

a que el aire posee una impedancia muy inferior a la de la roca, una fractura abierta puede reflejar casi la totalidad de la energía incidente, permitiendo una transmisión muy baja a través de la discontinuidad.

Por esta razón, aunque el fracturamiento puede no modificar de manera importante la velocidad cuando existen contactos efectivos entre bloques, sí puede afectar fuertemente la amplitud de las ondas transmitidas. En mediciones sísmicas realizadas en rocas con planos de fractura, es común obtener velocidades aparentemente menores que las correspondientes a la roca intacta. No obstante, estas velocidades deben interpretarse como velocidades efectivas, ya que pueden estar asociadas a trayectorias refractadas, desviadas o curvadas por la presencia de discontinuidades. En consecuencia, estos valores pueden indicar un alto grado de fracturamiento, pero no necesariamente representan la velocidad real de propagación de la roca y no deberían emplearse directamente en cálculos posteriores sin un análisis adecuado.

2.2.8 *Velocidad pico partícula*

La velocidad pico de partícula es una medida fundamental utilizada para cuantificar las vibraciones generadas durante una voladura en la industria minera. Representa la máxima velocidad alcanzada por las partículas del terreno en respuesta a las ondas de presión generadas por la explosión. El PPV se mide en unidades de velocidad, como centímetros por segundo (cm/s) o milímetros por segundo (mm/s), y es un indicador importante para evaluar el impacto de las vibraciones en las estructuras y el entorno circundante. La precisión en la estimación del PPV es esencial para garantizar la seguridad de las personas y las infraestructuras cercanas a las operaciones mineras (Neil H., 2023).

2.2.9 Comportamiento de la velocidad de partícula

Varios son los modelos experimentales que representan la velocidad de partícula en función del explosivo detonado y la distancia a la que se registra dicha detonación, entre los más conocidos se encuentran el Modelo general (ecuación 1) y el de Regresión Múltiple (ecuación 2) (Scherpenisse C., et al., 2000)

2.2.10 Modelo general

$$PPV = K * D^{-a}$$

Donde:

- PPV: Velocidad de Partícula (mm/s) D = Distancia Escalar.
- K: Factor de Velocidad.
- a: Factor de Decaimiento.

2.2.11 Modelo Holmberg & Persson

Otros autores (ecuación 2), no consideran una simetría de carga particular y utilizan la siguiente expresión.

$$PPV = K * d - \beta * W * \alpha$$

En el área más cercana a las cargas explosivas (donde se produce el mayor fracturamiento), esta ecuación puede ser modificada para tomar en cuenta la longitud de una carga de forma cilíndrica (Scherpenisse C., et al., 2000).

2.2.12 Modelo Devin

El modelo de Devine (ecuación 3), es una ecuación empírica utilizada para predecir la velocidad pico de partícula (PPV) generada por explosiones en minería y construcción (Devine y Duvall, 1963).

$$PPV = K * \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-\alpha}$$

2.2.13 Vibración

Las vibraciones del suelo son oscilaciones o movimientos que ocurren en el terreno como resultado de una voladura. Durante una explosión, la liberación repentina de energía provoca una propagación de ondas de presión a través del suelo. Estas ondas se transmiten en forma de vibraciones y se desplazan desde el punto de detonación en todas las direcciones. Las vibraciones del suelo pueden afectar a las estructuras cercanas, como edificios, puentes y tuberías, así como a elementos sensibles en el entorno, como cuerpos de agua, suelos frágiles y hábitats naturales. La evaluación y el control de las vibraciones del suelo son cruciales para minimizar los impactos negativos y garantizar la integridad estructural y la seguridad de las operaciones mineras (Neil H., 2023).

2.2.14 Secuencia de detonación

La secuencia de detonación es el orden e intervalos de tiempo entre las detonaciones de los explosivos en los taladros de una voladura, que influyen directamente en la fragmentación del material y otros resultados operativos, como la disminución del tamaño de los fragmentos y la optimización en las operaciones secundarias." (Jacopo Seccatore et al, 2024).

2.2.15 Vibración en los taludes

La vibración en los taludes se refiere a las oscilaciones inducidas en la superficie y la estructura interna de un talud como resultado de la energía liberada durante la voladura. Estas pueden afectar la estabilidad del talud, potenciando el riesgo de deslizamientos, fracturas o colapsos. (Bhandari, S., & Verma, S; 2013).

2.2.16 Carga operante

La carga operante se refiere a la presión resultante ejercida sobre la roca circundante como consecuencia de la detonación de los explosivos y a la cantidad de explosivo en Kg que se detona por taladro en una ventana de tiempo de 8 ms y la secuencia de detonación que determina la cantidad de explosivo detonado en un instante (Hustrulid 1999).

2.2.17 Onda elemental

La onda elemental representa la primera fase de energía liberada inmediatamente después de la detonación del explosivo durante la voladura, es también llamada onda semilla. La onda se caracteriza por su alta amplitud y breve duración, constituyendo el impacto inicial y más potente sobre la roca circundante. Su acción desencadena la formación y propagación de fracturas, actuando como el motor inicial del proceso de fragmentación. A medida que la onda elemental se disipa, su energía se transforma en otras formas de onda de menor energía, como ondas de corte y ondas de presión secundarias, las cuales continúan el proceso de fragmentación y distribución de energía en el terreno. La comprensión y control preciso de la onda elemental son fundamentales para mitigar los impactos no deseados, como vibraciones del suelo y daños a estructuras circundantes, durante las operaciones de voladura (Gertsch, R. E., & Poole, R. D. 1983).

Las vibraciones en el campo cercano tienden a afectar las estructuras cercanas, en este caso los taludes, ya que los altos niveles de PPV y frecuencias bajas generan un mayor daño a las paredes de los taludes, por ello, mediante la técnica de onda elemental se busca la reducción de vibraciones y el aumento de la frecuencia.

En el campo lejano, cuando la frecuencia primaria de vibración de las ondas coincide con la frecuencia natural de las estructuras se produce un fenómeno llamado resonancia. Esta coincidencia amplifica las vibraciones, lo que aumenta el riesgo de las paredes de los taludes a sufrir daños. (Mattmet Lizares, 2017).

2.2.18 *Software Blastware*

Blastware es un software desarrollado por Instantel Inc. este permite configurar y controlar los sismógrafos de vibraciones de la serie Instantel. Además, incluye herramientas para el modelado y simulación de ondas de explosión, como el Signature Hole Analysis, que permite evaluar y predecir los efectos de las vibraciones generadas por voladuras (Blastware, 2015).

2.2.19 *Análisis de vibraciones*

Es el proceso de medir, modelar y evaluar las ondas sísmicas generadas durante la voladura, con el objetivo de minimizar daños al macizo rocoso y estructuras cercanas. Este análisis permite determinar la cantidad máxima de explosivo por retardo y seleccionar el tipo de explosivo adecuado para reducir el impacto de las vibraciones, mediante el monitoreo de vibraciones se pueden obtener datos como las velocidades pico de partícula en tres direcciones, que sirven para modelar, analizar y evaluar el daño potencial que una voladura puede producir (Zapata Porras, 2017).

Riesgo: El riesgo en minería se refiere a la posibilidad de que ocurran eventos no deseados que puedan tener consecuencias negativas para la seguridad, la salud, el medio ambiente o la operación de una mina (López, J. P; 2011).

Minería superficial: La minería superficial, se refiere a un método de extracción de minerales que se lleva a cabo en la superficie de la tierra. Este método implica el uso de maquinaria pesada, para remover el material sobrecubierto y exponer los depósitos minerales para su extracción (R. Carrasco, 2017).

Detonador electrónico: Un detonador electrónico es un dispositivo utilizado en voladuras controladas que permite la activación precisa y programada de los explosivos (A. Guzmán, 2018).

Técnica: La técnica se refiere al conjunto de métodos, procedimientos y herramientas empleadas de manera sistemática para lograr un objetivo específico en un área determinada de conocimiento o actividad práctica (Posner, M. I; 1979)

Taladro: se define como un agujero perforado en la roca utilizando herramientas especializadas, con el propósito de insertar explosivos para fragmentar la roca de manera controlada durante la voladura (R. Carrasco, 2017).

Talud: se refiere a una superficie inclinada o pendiente formada durante la extracción de material de una mina. Los taludes pueden ser naturales o artificiales y representan la inclinación de las paredes o laderas de una excavación minera (John A. Hudson, 2022).

2.3 Hipótesis

Aplicando la Técnica de onda elemental se reducen las Vibraciones en los Taludes de la fase 2 norte en una Mina Superficial del Sur del Perú, 2024.

2.3.1 Hipótesis Específicas

- Las vibraciones se determinan con el uso de los instrumentos de medición (sismógrafos y geófonos) durante la voladura.
- La técnica de la onda elemental se aplica en las voladuras de la fase 2 norte.
- Con la técnica de la onda elemental se reducirán las vibraciones en un 10%.

2.3.2 Variable dependiente

- La variable dependiente para considerar es: vibraciones en los taludes.

2.3.3 Variable independiente

- La variable independiente para esta investigación será la técnica de onda elemental en una voladura superficial.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variables independientes	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Técnica de onda elemental	La técnica de onda elemental se refiere a un taladro que sale aislado al inicio de la secuencia con la finalidad de tomar sus datos mediante el sismógrafo para su interpretación y mejorar los tiempos de la secuencia.	• Tiempos de retardo • Tipo de secuencia s • Malla de perforación • Amplitud máxima • Frecuencias Altas o bajas • Diseño de secuencia de disparo	• Milisegundos / ms • Forma geométrica • Burden y espaciamiento • Milímetros / mm • Hertz / Hz • Kilogramos, intervalo de tiempo (8ms)
Variables dependientes	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Vibraciones en los taludes	La vibración en los taludes se refiere a las oscilaciones inducidas en el macizo rocoso de un talud como resultado de la energía liberada durante la voladura. Estas pueden afectar la estabilidad del talud, potenciando el riesgo.	• Vibración durante la voladura	• mm/s

Nota: Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como base la reducción de vibraciones en taludes aplicando la técnica de onda elemental en minería superficial.



CAPÍTULO III

3 ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

La investigación se desarrollará a través de una empresa contratista minera-especialista en voladura. El alcance del estudio aplica a la zona de fase 2 norte del tajo en la mina del sur del Perú para la reducción de las vibraciones en los taludes.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que se orienta a resolver un problema concreto identificado dentro de una operación minera superficial: la generación de vibraciones elevadas en los taludes como consecuencia del proceso de voladura. A diferencia de una investigación puramente teórica, este estudio no se limita a ampliar el conocimiento sobre las vibraciones inducidas por voladura, sino que busca emplear dicho conocimiento para proponer, aplicar y evaluar una alternativa técnica que contribuya a mejorar las condiciones de estabilidad y seguridad en el tajo.

En ese sentido, la investigación utiliza conceptos propios de la ingeniería de minas, tales como velocidad pico de partícula, frecuencia de vibración, secuencia de detonación, tiempos de retardo y comportamiento de la onda elemental, con la finalidad de optimizar el diseño de las voladuras y reducir el impacto vibratorio sobre los taludes. Por ello, su carácter aplicado se evidencia en el uso de información real obtenida en campo, mediante registros de vibraciones generados durante las voladuras, así como en el procesamiento de dichos datos con herramientas especializadas como el software Blastware 10.

Asimismo, la investigación presenta un enfoque experimental, ya que se interviene sobre una variable independiente, representada por la aplicación de la técnica de onda elemental y la selección de tiempos óptimos de retardo entre taladros, para observar su efecto sobre una variable dependiente: las vibraciones generadas en los taludes. Esta relación se analiza mediante la comparación de los valores de velocidad pico de partícula y frecuencia antes y después de aplicar la técnica propuesta.

El componente experimental se manifiesta en el desarrollo de una metodología que incluye la identificación de la onda elemental mediante la detonación aislada de un taladro, el registro de la señal con equipos de monitoreo, el recorte y análisis de la onda en gabinete, y la simulación de diferentes tiempos de retardo. A partir de este procedimiento, se selecciona el tiempo de retardo más favorable para reducir los niveles de vibración y aumentar la frecuencia, condiciones que permiten disminuir el potencial daño sobre los taludes.

Por lo tanto, el tipo de investigación se considera aplicada y experimental, porque parte de una problemática real de la actividad minera, aplica una técnica específica para modificar las condiciones iniciales de la voladura y evalúa los resultados obtenidos mediante datos medibles y comparables. De esta manera, el estudio busca generar una solución técnica orientada al control de vibraciones, la mejora de la estabilidad geotécnica y el fortalecimiento de la seguridad operacional en minería superficial.

3.2.2 Nivel de investigación

La presente investigación corresponde al nivel explicativo, porque no se limita únicamente a describir las vibraciones generadas por las voladuras en la fase 02 Norte, sino que busca explicar el efecto que produce la aplicación de la técnica de onda elemental sobre la reducción de las

vibraciones en los taludes. En ese sentido, el estudio analiza la relación causal entre la variable independiente, técnica de onda elemental, y la variable dependiente, vibraciones en los taludes, medidas mediante la velocidad pico partícula (PPV) y la frecuencia registrada en los ejes transversal, vertical y longitudinal. Asimismo, este nivel permite comparar los registros obtenidos antes y después de la aplicación de la técnica, con la finalidad de verificar la hipótesis de investigación y determinar si la optimización de los tiempos de retardo contribuye significativamente a la disminución de las vibraciones en la zona de estudio

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Vibraciones producidas por las voladuras en la fase 02 norte en una mina al sur del Perú.

3.3.2 Muestra

Vibraciones producidas en diferentes niveles de la fase 02 norte.

3.4 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

El presente estudio empleará métodos de recolección y análisis de datos, esto en primer lugar será el método de la observación para la toma de datos iniciales en el desarrollo de la técnica de la onda elemental.

Posteriormente a esto se aplicará la simulación de la onda elemental para encontrar los tiempos óptimos entre taladros y reducir las vibraciones.

Finalmente se hará un análisis comparativo de las vibraciones antes y después del uso de la técnica de la onda elemental.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

La técnica para utilizar será la documental y los instrumentos serán:

- El registro de vibraciones: La técnica de la onda elemental consiste en (poner los 4 pasos) se realiza detonando un taladro aislado al inicio de la secuencia y tomando el resultado con un sismógrafo con el que se medirá la onda elemental, la intensidad de la velocidad pico partícula que se generan en los taludes. reportes post-voladuras.

3.4.3 Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición empleados en la presente investigación fueron el sismógrafo digital con geófono triaxial, el software Blastware 10 y la ficha de registro de monitoreo de voladuras. El sismógrafo digital con geófono triaxial constituyó el instrumento principal para medir las vibraciones generadas por las voladuras, permitiendo registrar la velocidad pico partícula (PPV) en los ejes transversal, vertical y longitudinal, así como la frecuencia correspondiente a cada eje y el vector suma, expresados en mm/s y Hz, respectivamente. Este equipo fue utilizado tanto en la medición de las voladuras de línea base como en la captura de la onda elemental mediante la detonación aislada de un taladro al inicio de la secuencia.

De igual modo, se utilizó el software Blastware 10 para descargar, visualizar, procesar y analizar los registros obtenidos por el sismógrafo. A través de este programa se identificó la onda elemental, se realizó el recorte del registro mediante la herramienta *truncate*, se generó el vector suma y se efectuó la simulación *Signature Hole Analysis*, lo que permitió evaluar distintos tiempos de retardo entre taladros y seleccionar el tiempo óptimo de disparo en función de menores valores de PPV y mayores frecuencias.

Finalmente, se empleó una ficha de registro de monitoreo de voladuras para sistematizar la información técnica de cada evento evaluado. En dicha ficha se consignaron datos como código del proyecto, fecha de voladura, litología, ubicación del punto de monitoreo, PPV suma, PPV por ejes, frecuencia por ejes, tiempos de retardo aplicados y observaciones de campo. Este instrumento permitió ordenar la base de datos y facilitó el análisis comparativo de las vibraciones antes y después de la aplicación de la técnica de onda.

3.4.4 Plan de análisis estadístico de los datos

- Se recopiló información de los registros del sismógrafo de las vibraciones de los taludes del segundo semestre del 2024.
- Análisis de la información recopilada para establecer el promedio vibraciones en el talud de la zona de estudio.
- Simulación de la secuencia de voladura para encontrar el menor tiempo de la velocidad pico partícula tiene su menor intensidad con el software Blastware 10.
- Se implementa los datos obtenidos de la simulación en las secuencias posteriores de las voladuras de la Fase 02 norte.
- Se desarrolla el análisis comparativo mediante la base de datos inicial y la del primer semestre del 2025 importando la base de datos al Microsoft Excel.

3.5 Lugar de desarrollo de investigación

La presente investigación se desarrolló en una operación minera superficial ubicada en el sur del Perú, dentro de una zona de explotación a tajo abierto donde se ejecutan actividades permanentes de perforación y voladura. El estudio se enfocó en un sector operativo identificado

como Fase 02 Norte, el cual presenta condiciones geotécnicas relevantes para el análisis de vibraciones debido a la presencia de estructuras geológicas, taludes expuestos y operaciones de voladura cercanas a zonas sensibles del tajo.

Debido a restricciones de autorización y confidencialidad de la información operativa, no se consigna el nombre específico de la unidad minera ni se incluyen coordenadas exactas del área de trabajo. No obstante, el ámbito de estudio corresponde a una mina superficial representativa del sur del Perú, cuyas características operacionales permiten evaluar el comportamiento de las vibraciones inducidas por voladura y su influencia sobre la estabilidad de los taludes.

El desarrollo de la investigación se sustentó en registros técnicos obtenidos durante las actividades de voladura ejecutadas en la zona de estudio, considerando mediciones de velocidad pico de partícula, frecuencia y comportamiento de la onda vibratoria. Estos datos permitieron establecer una línea base de vibraciones y, posteriormente, evaluar la aplicación de la técnica de onda elemental como alternativa para la optimización de los tiempos de retardo y la reducción del impacto vibratorio sobre los taludes.

La elección de esta zona responde a la necesidad de controlar los niveles de vibración generados por las voladuras, especialmente en sectores donde la estabilidad del macizo rocoso constituye un aspecto crítico para la seguridad operacional. En ese sentido, el lugar de desarrollo de la investigación resulta adecuado para analizar la relación entre el diseño de secuencias de detonación, la propagación de ondas vibratorias y la respuesta geotécnica del talud.

3.6 Ambiente que utilizar

El ambiente utilizado para el desarrollo de la investigación correspondió a un entorno minero superficial en operación, específicamente asociado a labores de perforación, carguío,

voladura y monitoreo de vibraciones en taludes. En este contexto, el trabajo se llevó a cabo bajo condiciones reales de campo, lo cual permitió obtener información representativa del comportamiento de las vibraciones generadas durante las voladuras de producción.

El ambiente de estudio estuvo conformado principalmente por el sector de voladura, los puntos de monitoreo instalados en zonas estratégicas del tajo y el área de análisis técnico donde se procesaron los registros obtenidos. Para la medición de las vibraciones se emplearon equipos especializados, como sismógrafos y geófonos triaxiales, los cuales permitieron registrar la velocidad pico de partícula en los ejes transversal, vertical y longitudinal, así como las frecuencias asociadas a cada evento de voladura.

Asimismo, se utilizó un ambiente de gabinete para el procesamiento e interpretación de la información registrada en campo. En esta etapa se empleó el software Blastware 10, mediante el cual se realizó la descarga de los registros, la identificación de la onda elemental, el recorte de la señal sísmica y la simulación de distintos tiempos de retardo entre taladros. Este procedimiento permitió evaluar alternativas de diseño orientadas a disminuir los niveles de vibración y mejorar el control sobre los taludes.

Por motivos de confidencialidad y debido a la falta de autorización para el uso específico de la zona minera, la descripción del ambiente se presenta de manera general, evitando la exposición de datos sensibles como nombres de proyectos, coordenadas exactas, planos internos o información operacional restringida. Sin embargo, la información utilizada conserva validez técnica, ya que se basa en registros reales de monitoreo de vibraciones obtenidos durante el proceso de voladura.

3.6.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se ubicó en una mina superficial del sur del Perú, dentro de un sector operativo de tajo abierto denominado para fines de la presente investigación como Fase 02 Norte. Esta área fue seleccionada debido a que en ella se registraron niveles significativos de vibración durante las voladuras, así como condiciones geológicas y geotécnicas que justifican la necesidad de implementar medidas de control orientadas a la protección de los taludes.

La ubicación exacta de la zona no se detalla en la investigación debido a restricciones de acceso, autorización y confidencialidad de la información proporcionada por la operación minera. Por esta razón, no se presentan coordenadas específicas, planos internos ni nombres propios de la unidad minera. En su lugar, se describe el área de manera referencial como una zona de explotación a tajo abierto situada en el sur del país, donde se desarrollan actividades de voladura controlada en bancos de producción.

Desde el punto de vista técnico, la zona de estudio presenta características adecuadas para el análisis de vibraciones, ya que se encuentra expuesta a la influencia directa de las ondas generadas por las voladuras. Además, la presencia de taludes cercanos al área de detonación permite evaluar el efecto de la velocidad pico de partícula y la frecuencia sobre la estabilidad del macizo rocoso.

En este sector se realizaron mediciones antes y después de la aplicación de la técnica de onda elemental, con el propósito de comparar los niveles de vibración registrados y determinar la efectividad de los tiempos de retardo seleccionados. De esta manera, la ubicación de la zona de estudio se considera técnicamente pertinente para cumplir con los objetivos de la investigación, sin comprometer información confidencial de la operación minera.

3.7 Vibraciones en el proceso de voladura

En la fase 02 Norte se registró las vibraciones de las voladuras de 9 proyectos durante el periodo de julio a diciembre de 2024, como se muestra en la tabla (1), donde se observan los valores obtenidos de PPV suma, PPV en los tres ejes y la frecuencia en los tres ejes.



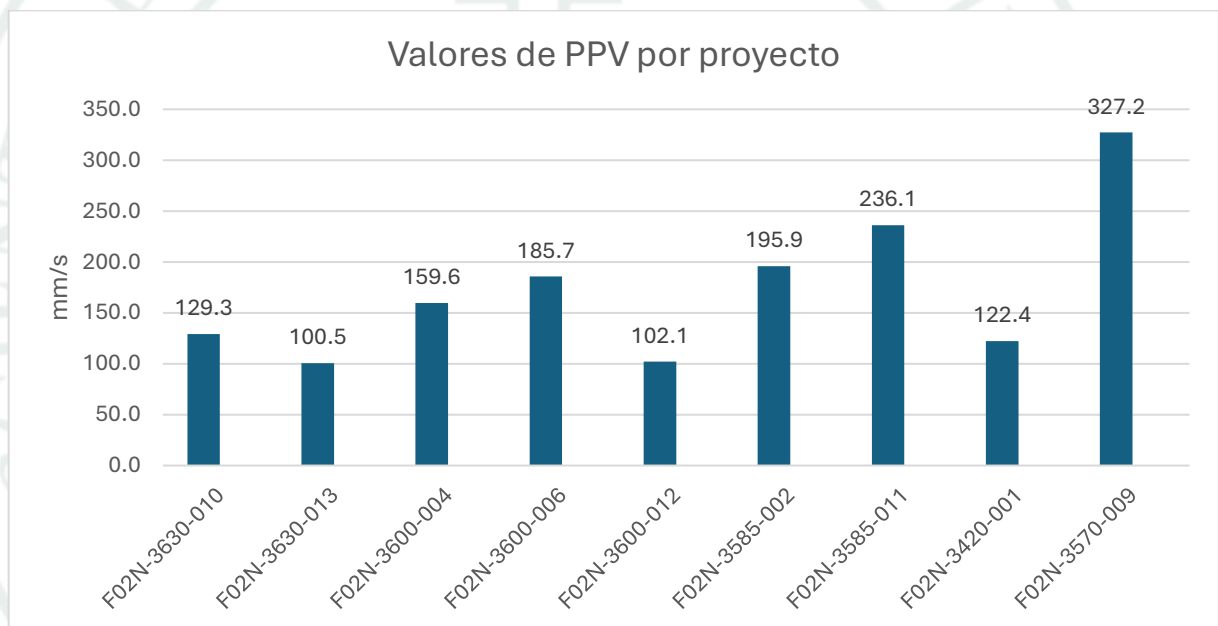
Tabla 2*Valores de PPV y frecuencia registrados en la fase 02 Norte (julio - diciembre 2024)*

Número de voladura	Proyecto	Fecha voladuras	Mes	Año	Litología	PPV Suma (mm/s)	PPV Transversal (mm/s)	Frec, transversal (Hz)	PPV Vertical (mm/s)	Frec, Vertical (Hz)	PPV Longitudinal (mm/s)	Frec, longitudinal (Hz)
1	F02N-3630-010	1/07/2024	Julio	2024	Ignimbrita	129.3	61.2	3.8	123.9	20.0	60.2	3.9
2	F02N-3630-013	2/08/2024	Agosto	2024	Ignimbrita	100.5	84.7	3.7	82.3	9.3	85.4	3.5
3	F02N-3600-004	12/09/2024	Setiembre	2024	Porfido temprano	159.6	41.8	3.6	154.0	7.1	100.0	3.6
4	F02N-3600-006	16/09/2024	Setiembre	2024	Porfido temprano	185.7	140.9	3.9	88.3	4.1	164.5	4.1
5	F02N-3600-012	2/10/2024	Octubre	2024	Porfido temprano	102.1	72.5	7.1	83.2	7.4	61.0	7.0
6	F02N-3585-002	10/10/2024	Octubre	2024	Porfido temprano	195.9	77.9	4.2	171.0	10.6	161.0	2.6
7	F02N-3585-011	29/11/2024	Noviembre	2024	Porfido temprano	236.1	214.7	25.5	167.5	25.5	185.5	5.6
8	F02N-3420-001	13/12/2024	Diciembre	2024	Porfido temprano	122.4	31.4	6.0	119.0	29.4	57.9	9.7
9	F02N-3570-009	16/12/2024	Diciembre	2024	Porfido tardío	327.2	211.9	2.9	237.8	2.9	186.8	2.9

Nota: Valores de PPV registrados en fase 02, julio diciembre 2024.

Como resultado de la recopilación de los datos, se obtuvieron valores de PPV Suma superiores a 100 mm/s, lo que indica la presencia de altas vibraciones en los registros de las voladuras realizadas en la Fase 02 Norte durante el periodo de julio a diciembre. Además, se observa que las vibraciones más altas se presentaron en el proyecto F02N-3570-009, cuya litología corresponde a un pórfido tardío, mientras que las vibraciones más bajas de la tabla (proyectos F02N-3630-010 y F02N-3660-013) se registraron en una litología de ignimbrita.

Figura 4
Valores de PPV por proyecto (julio - diciembre 2024)



Nota: Valores de PPV de julio a diciembre 2024.

En la **Figura 4** Valores de PPV por proyecto (julio - diciembre 2024) se aprecia la intensidad de vibraciones por proyecto en la Fase 02 Norte durante el periodo de julio a diciembre del 2024, donde la intensidad máxima está representada por el proyecto F02N-3570-009 y la intensidad mínima por el proyecto F02N-3630-013.

3.8 Desarrollando la técnica de la onda elemental en la Fase 02 Norte

En este punto se desarrolla la técnica de la onda elemental de la fase 02 norte donde el impacto de las voladuras en los taludes se encuentra determinado por los parámetros de diseño utilizados tanto en las voladuras de mallas de contorno como en las de producción. Por lo tanto, con el fin de reducir al máximo el efecto negativo generado por estas voladuras, se propone el desarrollo de la técnica de onda elemental con el objetivo de determinar los tiempos óptimos de retardo entre taladros y filas, así como aumentar la frecuencia.

3.8.1 Identificación de la onda elemental

Este es el primer paso para poder identificar y desarrollar la onda elemental se detono un taladro aislado antes que el resto del proyecto de voladura F02N-3600-002:

- Se coloca el sismógrafo a 50 metros del proyecto de voladura con la finalidad de captar la onda elemental.
- Se descarga los datos tomados del sismógrafo con el programa blastware 10 y se identifica la onda elemental en el registro de vibraciones como se muestra en la

Figura 8

Onda elemental.

Figura 5
Posicionamiento de geófono



Nota. Excavación para posicionamiento de geófono en macizo rocoso. A lado de la chuta (Rocas naranjas del lado izquierdo. Punto determinado por topografía a 50 metros del proyecto.

Figura 6

Posicionamiento de y colocación de sismógrafo



Nota. Posicionamiento de y colocación de sismógrafo y micrófono para recolección de onda elemental en voladura efectuada en fase 02 norte de unidad minera.

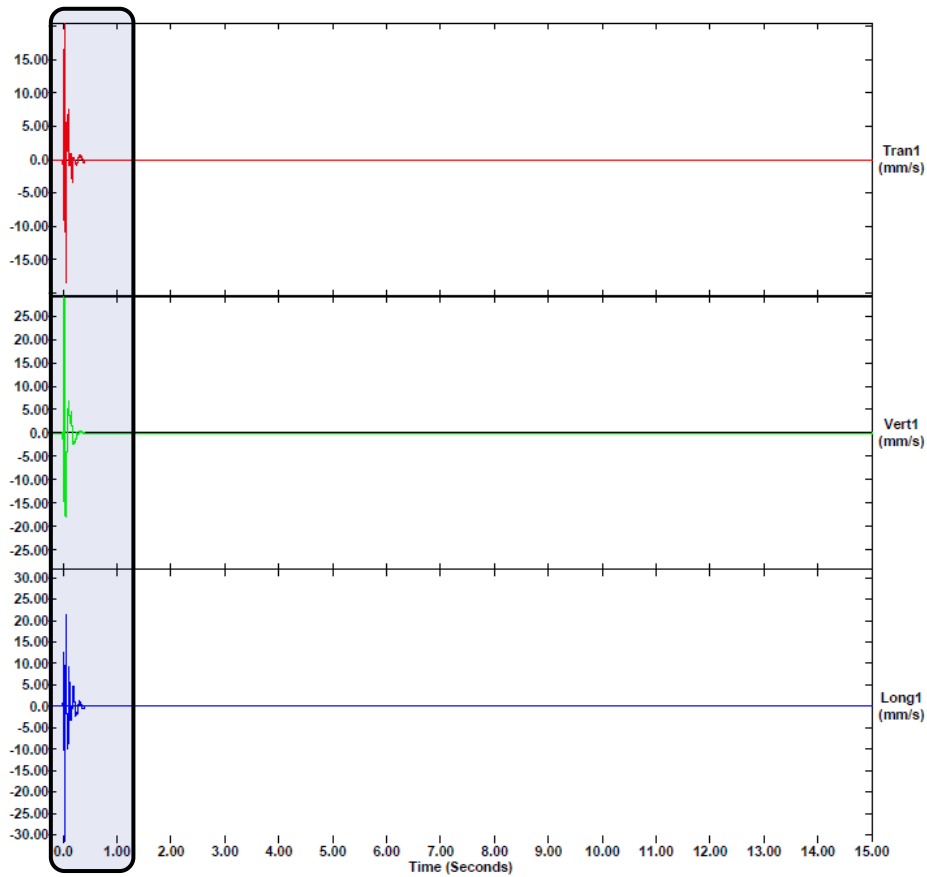
Figura 7

Sismógrafo señalado y protegido para coma de onda elemental



Nota. Señalización de acuerdo con norma para colocación de sismógrafo para obtención de datos de onda elemental.

Figura 8
Onda elemental



Nota: Grafica de la onda elemental

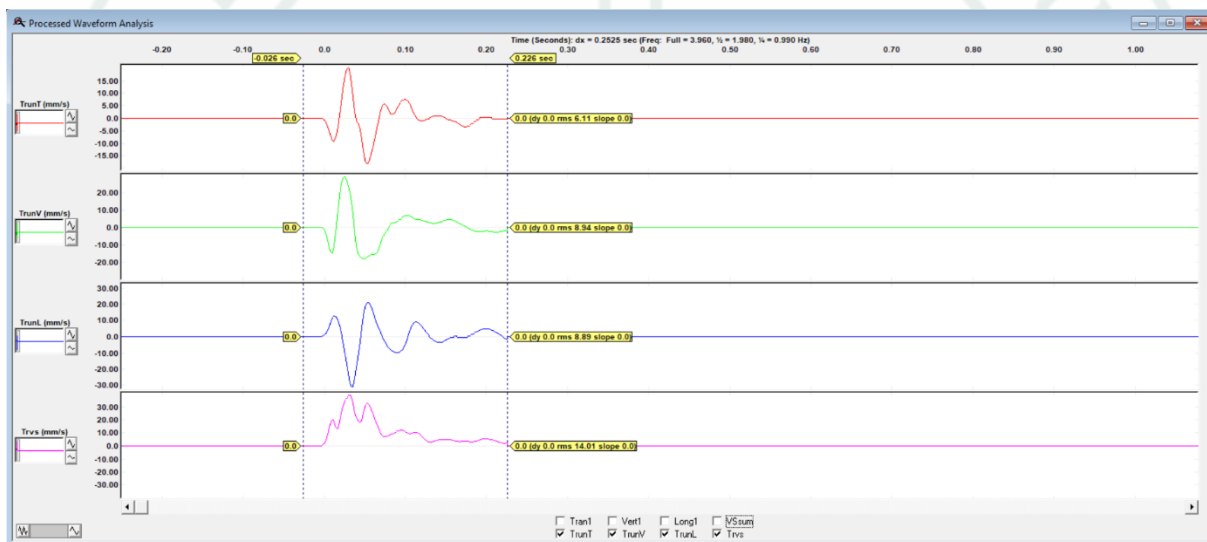
En el **Figura 8**

Onda elemental se muestra la identificación de la onda elemental sin las vibraciones del resto de la voladura, dado que este se detono 20 segundos después, donde el color azul representa la ppv en el eje longitudinal, el color verde representa la ppv en el eje vertical y el color rojo representa la ppv en el eje transversal. Claramente está representada en la parte izquierda del Gráfico 3 en tono gris el tramo de registro de la onda elemental entre el segundo -0.026 y finaliza en el segundo 0.226.

3.8.2 Uso del software Blastware 10 para recortar el registro de la onda elemental

Mediante el uso del software Blastware 10 se genera el Vector Suma para hacer el recorte de la onda elemental desde el inicio de la generación de la onda hasta su término a cero, como se aprecia en la figura 09. Al momento de hacer el corte de la onda elemental se aprecia la duración de esta entre el tiempo -0.026 ms y 0.226 ms, comenzando 20 segundos después el resto de la voladura.

Figura 9
Onda elemental software Blastware 10



Nota: Procesamiento y análisis de onda elemental con software Blastware 10

En la **Figura 9**

Onda elemental software Blastware 10 el color verde representa la PPV en el eje vertical y el color rojo representa la PPV en el eje transversal.

3.8.3 Recorte de la onda elemental en el software Blastware 10

En esta etapa se hace uso de la opción “Truncate” para cortar solo la onda elemental y eliminar el resto del registro de la voladura que no nos sirve para la simulación.

Figura 10
Herramienta truncate de Blastware 10



Nota: Opción de análisis truncate de Blastware 10

En el **Figura 10**

Herramienta truncate de Blastware 10 se muestra que después de usar la herramienta truncate se recorta solo la onda elemental y se elimina el resto del registro, hacemos este recorte solo de la onda elemental para realizar la simulación ya que el resto del registro no se necesita.

3.8.4 Simulación de onda elemental

Seguidamente para continuar con la simulación se va a la herramienta tools > Blast design simulations > signature hole análisis como se aprecia en la **Figura 11**

Herramienta signature hole análisis Blastware 10 .

Figura 11
Herramienta signature hole análisis Blastware 10



Nota: Opción de análisis signatura hole de Blastware 10.

Posteriormente en la ventana de signature hole analysis para efectos de la simulación se consideran 10 taladros por fila; se considera el tiempo entre taladros de 1 a 50 ms con un incremental de 1 como se muestra en la **Figura 11**

Herramienta signature hole análisis Blastware 10.

Para efectos de la simulación se coloca como filtro de frecuencias, mayores a 10 Hz y se direcciona la ruta donde se guarda el reporte.

Figura 12

Parámetros para simulación signature hole análisis Blastware 10

Signature Hole Analysis

Timeline Generation
(assumes a corner blast)

Number of Decks per Hole: 1
Inter-Deck Delay: Start 0 msec, End 0 msec, Increment 0 msec

Number of Holes Per Row: 10
Inter-Hole Delay: Start 1 msec, End 50 msec, Increment 1 msec

Number of Rows: 1
Inter-Row Delay: Start 100 msec, End 100 msec, Increment 1 msec

Sorting Options

	Operator	Value	Priority
PPV (mm/s)	Equal To	0	1
PVS (mm/s)	Equal To	0	3
Dominant FFT Frequency (Hz)	Equal To	1	2
Upper to Lower Frequency Ratio	Equal To	1	4

Frequency Ratio: Upper (Hz) 31 to 80, Lower (Hz) 1 to 30

☐ Apply Sort Options Clear All

☒ Apply Band Pass Filter From 10 Hz. To 315 Hz.

Project Directory: D:\Blastware 10\DESIGN

Process Display Table Exit

Nota: Opción de análisis simulación signature hole análisis Blastware 10.

En la **Figura 12**

Parámetros para simulación signature hole análisis Blastware 10 se puede apreciar los parámetros descritos líneas arriba utilizados para la simulación de la onda elemental.

El reporte se guarda en un archivo txt. Donde posteriormente se genera el reporte de tiempos versus vibración y frecuencias en los 3 canales (T, V, L), como se puede ver en la **Figura 13**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias

Figura 13
Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias

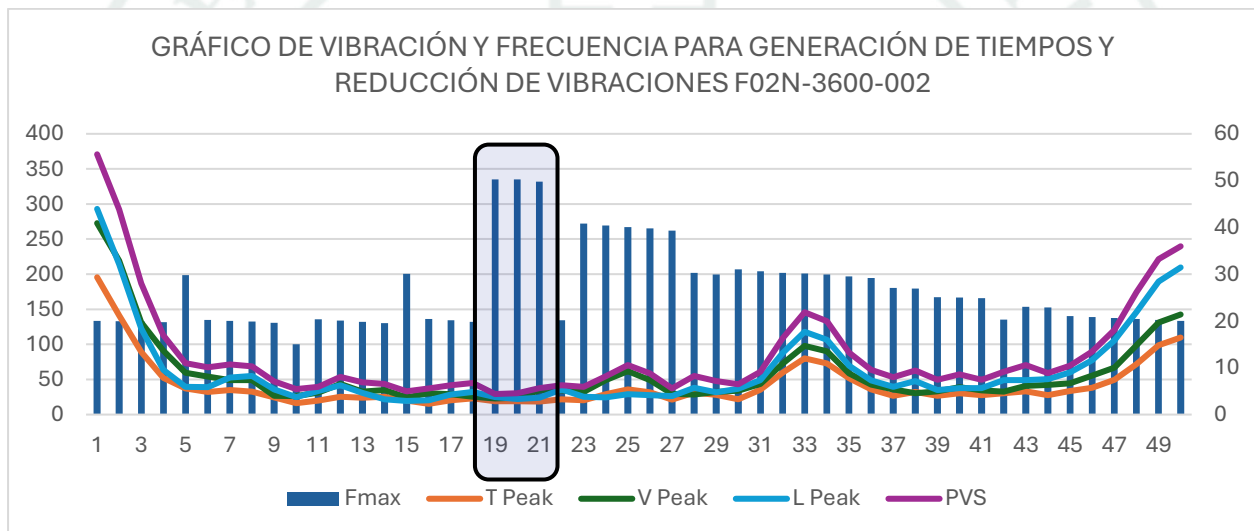
Signature Hole Analysis Table																
File																
Filename (Double Click to view)	Blast Timing			Peak Particle Velocity				PVS	Dominant FFT Frequency				Upper/Lower Frequency Ratio			
	Deck Delay (msec)	Hole Delay (msec)	Row Delay (msec)	Trans (mm/s)	Vert (mm/s)	Long (mm/s)	Peak (mm/s)	Peak Vector Sum	Trans (Hz)	Vert (Hz)	Long (Hz)	Peak (Hz)	Trans	Vert	Long	Peak
5D1H10R100.BWP	1	10	100	16.14	26.06	24.70	26.06	36.49	15.0	13.0	15.0	15.0	28.850	8.030	8.506	28.850
5D1H11R100.BWP	1	11	100	19.95	31.24	33.74	33.74	39.42	20.3	10.8	20.4	20.4	0.121	0.083	0.046	0.121
5D1H12R100.BWP	1	12	100	25.48	43.40	41.72	43.40	53.65	20.0	10.7	20.1	20.1	0.521	0.358	0.197	0.521
5D1H13R100.BWP	1	13	100	23.87	32.80	30.90	32.80	45.85	10.5	10.5	19.8	19.8	1.745	1.198	0.661	1.745
5D1H14R100.BWP	1	14	100	25.35	34.91	21.72	34.91	43.58	10.4	10.4	19.5	19.5	0.191	0.131	0.072	0.191
5D1H15R100.BWP	1	15	100	20.06	24.67	19.40	24.67	33.32	10.2	10.1	30.1	30.1	0.004	0.003	0.001	0.004
5D1H16R100.BWP	1	16	100	15.30	30.55	20.45	30.55	37.25	10.1	10.0	20.4	20.4	0.092	0.063	0.035	0.092
5D1H17R100.BWP	1	17	100	20.31	29.16	28.54	29.16	41.71	20.0	10.0	20.1	20.1	0.257	0.178	0.097	0.257
5D1H18R100.BWP	1	18	100	23.03	25.39	32.28	32.28	45.11	19.7	19.8	19.8	19.8	0.074	0.051	0.028	0.074
5D1H19R100.BWP	1	19	100	19.11	22.96	25.08	25.08	29.25	50.3	19.4	19.5	50.3	0.046	0.031	0.017	0.046
5D1H1R100.BWP	1	1	100	195.60	272.70	293.00	293.00	370.80	19.8	20.0	20.0	20.0	0.020	0.014	0.008	0.020
5D1H20R100.BWP	1	20	100	19.09	24.11	22.05	24.11	30.17	50.1	49.9	50.3	50.3	0.188	0.136	0.071	0.188
5D1H21R100.BWP	1	21	100	18.44	34.34	24.16	34.34	37.91	49.8	10.8	20.5	49.8	0.059	0.041	0.022	0.059
5D1H22R100.BWP	1	22	100	21.61	34.63	35.96	35.96	41.90	20.1	10.7	20.2	20.2	0.094	0.065	0.036	0.094
5D1H23R100.BWP	1	23	100	20.29	32.21	25.30	32.21	39.53	40.8	40.6	19.8	40.8	0.386	0.266	0.146	0.386
5D1H24R100.BWP	1	24	100	29.14	49.07	24.24	49.07	54.38	40.4	40.2	19.5	40.4	0.237	0.164	0.090	0.237
5D1H25R100.BWP	1	25	100	35.94	61.94	29.16	61.94	70.37	40.1	39.9	30.1	40.1	0.519	0.357	0.197	0.519
5D1H26R100.BWP	1	26	100	31.55	48.91	27.60	48.91	58.68	39.8	39.6	20.5	39.8	0.185	0.127	0.070	0.185
5D1H27R100.BWP	1	27	100	21.31	29.55	26.24	29.55	37.35	39.3	39.2	20.2	39.3	0.272	0.188	0.103	0.272
5D1H28R100.BWP	1	28	100	31.23	28.60	37.98	37.98	55.11	30.2	30.3	19.8	30.3	0.053	0.036	0.020	0.053
5D1H29R100.BWP	1	29	100	28.32	32.19	31.95	32.19	47.81	29.7	29.9	29.7	29.9	0.025	0.017	0.009	0.025
5D1H2R100.BWP	1	2	100	141.10	219.30	214.00	219.30	292.00	19.8	10.4	20.0	20.0	0.029	0.020	0.011	0.029
5D1H30R100.BWP	1	30	100	21.94	34.09	36.74	36.74	43.29	31.0	31.0	31.0	31.0	13.990	2.598	1.644	13.990
5D1H31R100.BWP	1	31	100	35.53	43.53	49.24	49.24	61.09	30.5	30.6	30.6	30.6	0.011	0.007	0.004	0.011
5D1H32R100.BWP	1	32	100	59.41	72.20	87.44	87.44	108.50	30.2	30.3	30.3	30.3	0.009	0.006	0.004	0.009

Nota: Reporte de análisis de tiempo vs vibración y frecuencias.

3.8.5 Obtención del tiempo óptimo entre taladros

Para obtener el tiempo Óptimo entre taladros graficamos la vibración y frecuencia para generación de tiempos óptimos y reducción de vibraciones, la gráfica obtenida considera un gráfico combinado donde las frecuencias se representan por barras como se representa en el gráfico 9.

Figura 14
Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias



En la **Figura 14**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias se muestra una tabla de triple entrada donde tenemos tiempos de detonación entre taladros (ms), vibración (mm/s) y Frecuencia (Hz); para los tiempos de 19, 20 y 21 ms encontramos un PPV bajo para los tres ejes de 19.11 a 34.4 ms así como una frecuencia alta de 49.75 y 50.25 Hz, lo que buscamos precisamente pues si bien se tiene vibraciones bajas desde los 6 ms la frecuencia es baja por lo que aun reduciendo la vibración con la frecuencia baja podríamos causar daños a estructuras lejanas a la voladura como los taludes.

3.9 Reducción de las vibraciones mediante la onda elemental

Este estudio de onda elemental tiene por finalidad encontrar los tiempos óptimos que podamos usar para mejorar el desempeño de las voladuras con la finalidad de reducir el posible daño que se pudiese ocasionar en los taludes de la Fase 02 Norte.

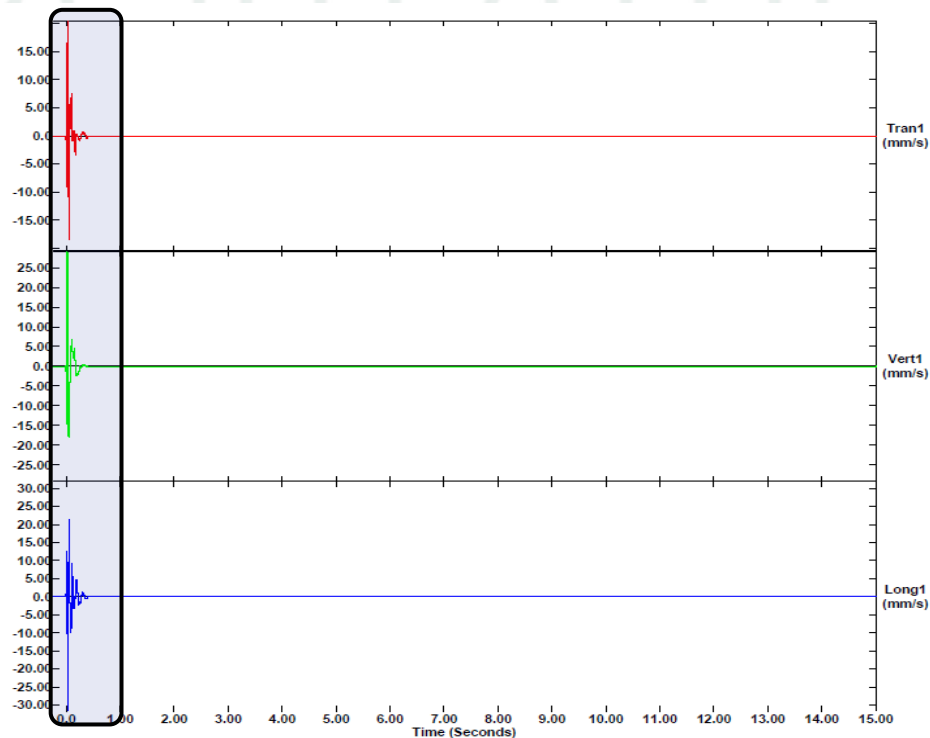
Para el propósito de nuestro estudio se consideró la realización de 3 ondas elementales correspondientes a los proyectos:

- F02N-3600-002
- F02N-3435-001
- F02N-3570-006

3.9.1 Gráficos de vibración y frecuencia para generación de tiempos de vibraciones

Figura 15

Onda elemental del proyecto F02N-3600-002



Nota: En el **Figura 15**

Onda elemental del proyecto F02N-3600-002 se puede apreciar la onda elemental correspondiente al proyecto F02N-3600-002 que salió antes del proyecto electrónico.

Figura 16

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001

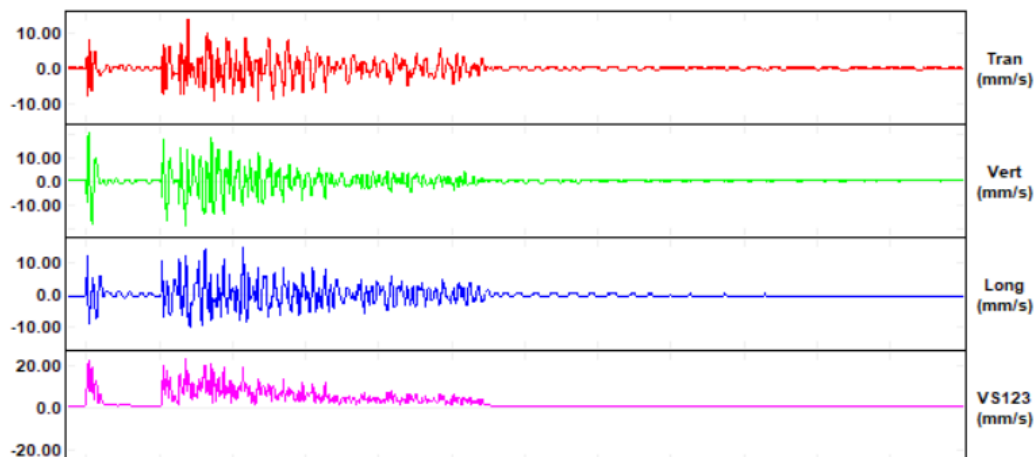


Nota: En la **Figura 16**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001 se puede apreciar la onda elemental correspondiente al proyecto F02N-3435-001 que salió antes del proyecto electrónico

Figura 17

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006

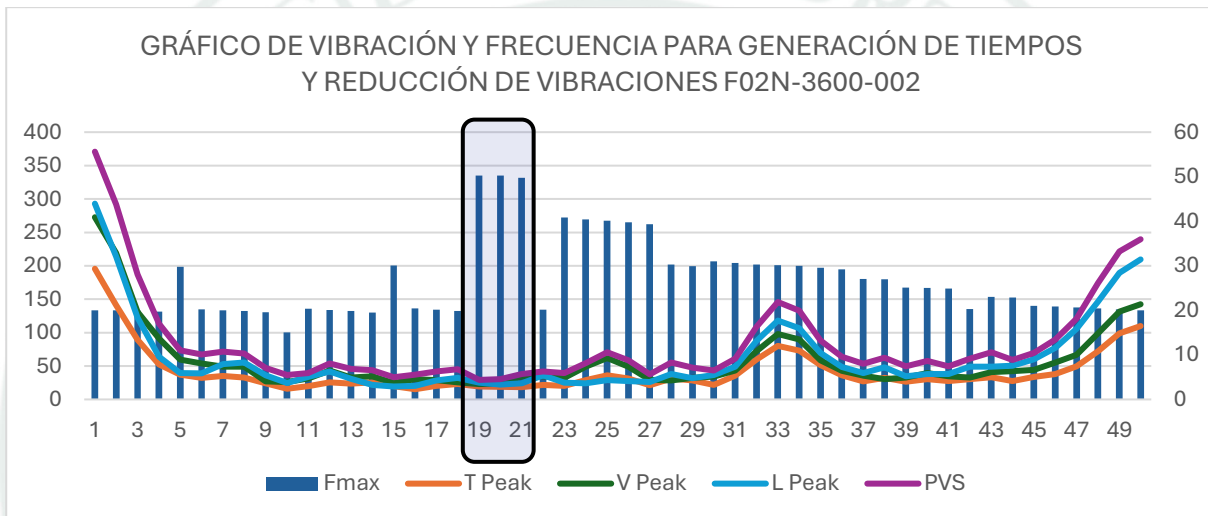


Nota: En la **Figura 17**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006 se puede apreciar la onda elemental correspondiente al proyecto F02N-3570-006 que salió 2000 ms antes del proyecto electrónico.

Figura 18

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3600-002



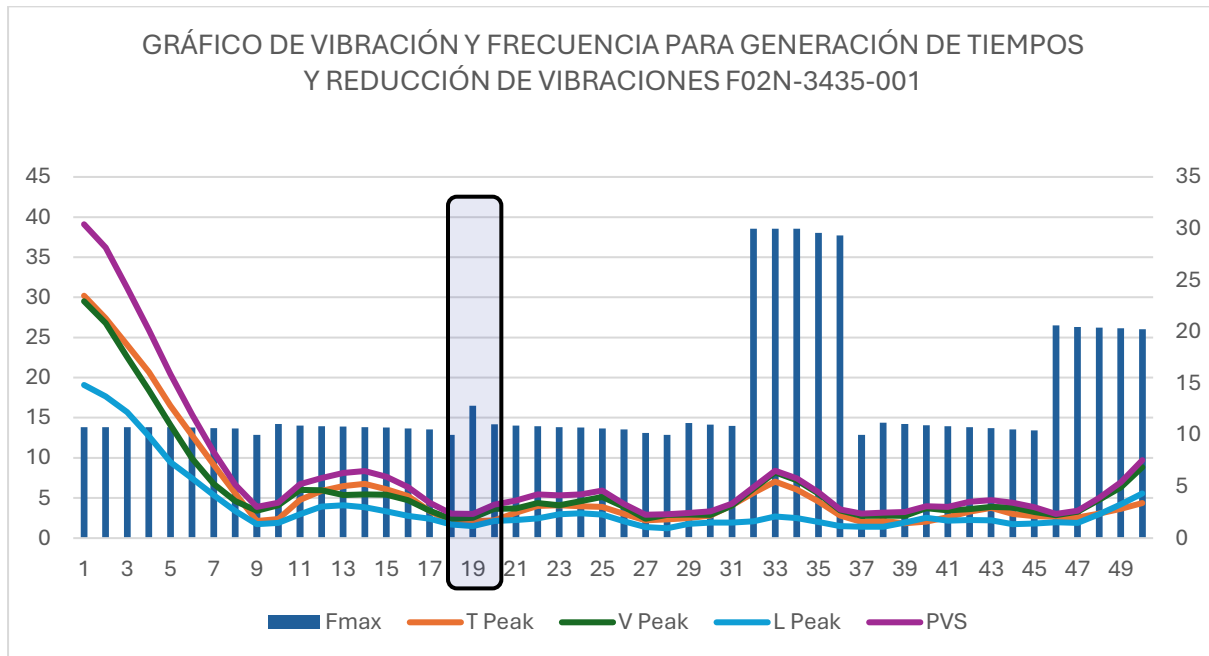
Nota: Tiempo vs vibración y frecuencias en F02N-3600-002

Como se muestra en la **Figura 18**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3600-002, correspondiente a la onda elemental simulada y analizada del proyecto F02N-3600-002, se presenta la tabla de triple entrada, a partir de la cual, tal como se mencionó en el punto 4.2.5 (Obtención del tiempo óptimo entre taladros), se seleccionan los tiempos de 19, 20 y 21 ms, considerando los valores de PPV y frecuencia requeridos para lograr la reducción de vibraciones.

Figura 19

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001

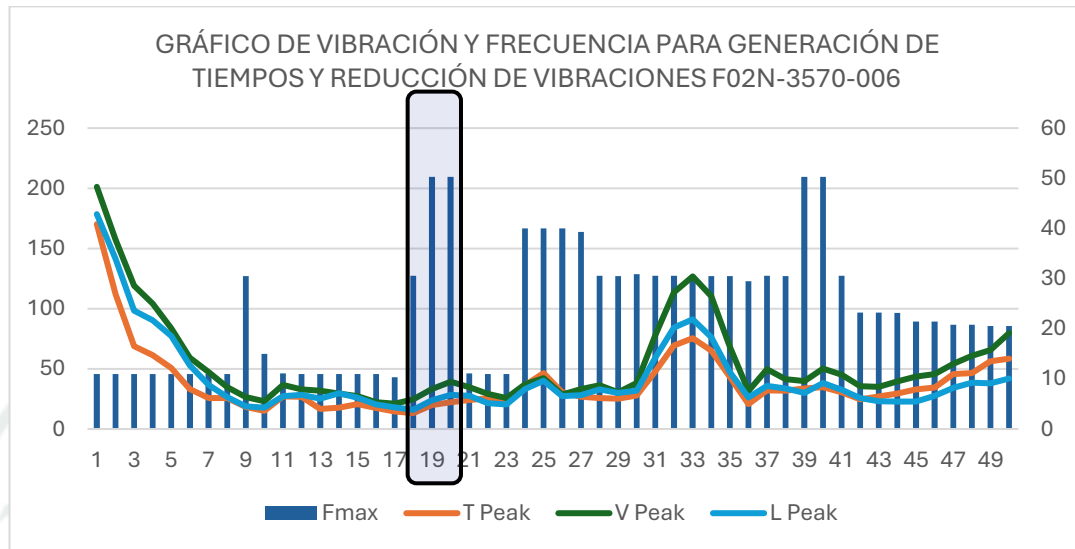


Nota: Como se puede observar en la **Figura 19**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3435-001 , correspondiente al proyecto F02N-3435-001, nuevamente se identifica el tiempo de 19 ms como aquel que presenta los valores de vibración y frecuencia requeridos para cumplir con el objetivo de reducción de vibraciones.

Figura 20

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006



Nota: Como se puede observar en la **Figura 20**

Reporte de tiempos vs vibración y frecuencias en F02N-3570-006, correspondiente al proyecto F02N-3570-006, nuevamente se identifica los tiempos de 19 y 20 ms como aquel que presenta los valores de vibración y frecuencia requeridos para cumplir con el objetivo de reducción de vibraciones.

3.9.2 Uso de tiempos entre taladros seleccionados usando la técnica de onda elemental

Como se puede apreciar en los gráficos presentados en el punto anterior, y luego de la simulación de vibraciones en cada uno de los casos analizados, se concluye que el tiempo óptimo entre taladros a utilizar en los proyectos de voladura de la Fase 2 Norte es de 19 ms, debido a que presenta un bajo valor de PPV y una alta frecuencia, condiciones favorables para la reducción de vibraciones en los taludes.

En consecuencia, a partir de este resultado, el área de Asistencia Técnica inicia el diseño de las secuencias de voladura considerando un tiempo de onda elemental de 19 ms como tiempo entre taladros



3.9.3 Resultados de medición de vibraciones en Fase 02 norte

Tabla 3

Valores de PPV y frecuencia registrados en la fase 02 Norte (enero - junio 2025)

Número de voladura	Proyecto	Fecha voladuras	Mes	Año	Litología	PPV Suma (mm/s)	PPV Transversal (mm/s)	Frec, transversal (Hz)	PPV Vertical (mm/s)	Frec, Vertical (Hz)	PPV Longitudinal (mm/s)	Frec, longitudinal (Hz)
1	F02N-3585-019	3/01/2025	Enero	2025	Granodiorita	54.1	18.6	8.6	53.9	11.0	40.2	13.3
2	F02N-3585-018	5/01/2025	Enero	2025	Granodiorita	71.3	42.7	3.4	62.1	3.2	52.0	3.1
3	F02N-3555-011	1/02/2025	Febrero	2025	Porfido temprano	72.2	21.4	6.8	72.0	7.6	29.5	6.2
4	F02N-3540-006	9/03/2025	Marzo	2025	Porfido temprano	79.5	48.5	22.4	67.9	8.1	48.7	22.5
5	F02N-3540-007	14/03/2025	Marzo	2025	Porfido temprano	44.3	42.1	5.7	36.4	6.7	46.9	4.3
6	F02N-3525-001	23/03/2025	Marzo	2025	Porfido temprano	38.8	19.5	11.2	32.5	9.2	25.5	6.2
7	F02N-3525-002	11/04/2025	Abril	2025	Porfido intermineral	78.4	24.3	15.3	38.9	3.8	74.8	15.3
8	F02N-3525-005	21/04/2025	Abril	2025	Porfido temprano	29.4	12.5	6.8	21.2	6.7	25.6	10.00
9	F02N-3510-001	17/05/2025	Mayo	2025	Porfido temprano	72.7	25.7	4.2	66.4	8.4	55.3	5.9
10	F02N-3510-004	26/05/2025	Mayo	2025	Porfido temprano	47.0	16.7	12.6	38.5	12.5	38.9	4.3
11	F02N-3510-003	16/06/2025	Junio	2025	Porfido temprano	71.3	24.3	6.3	55.2	6.2	45.5	3.4
12	F02N-3510-005	16/06/2025	Junio	2025	Porfido temprano	71.3	24.3	6.3	55.2	6.2	45.5	3.4

Nota. Valores registrados en los periodos de enero a julio del 2025.

Figura 21

Colocación de sismógrafo para segunda toma de vibraciones



Nota. Posicionamiento y colocación de sismógrafo para segunda toma de Vibraciones en fase 02 norte de unidad minera.

3.9.4 Seguridad operativa y beneficio económico en minería por onda elemental

La técnica de la onda elemental presenta un beneficio principalmente orientado a la seguridad operativa, debido a que las voladuras en minería superficial se ejecutan de manera continua y casi diaria, generando impactos consecutivos sobre los taludes. En ese sentido, la aplicación de esta técnica y la reducción de los valores de PPV mediante la optimización de los

tiempos utilizados en las secuencias de voladura permiten disminuir las vibraciones sin generar un impacto significativo en la fragmentación del material.

Asimismo, la reducción de vibraciones no solo contribuye a minimizar el daño acumulativo en los taludes, sino también el impacto sobre estructuras e instalaciones cercanas a la operación minera. A diferencia de otros métodos de control de vibraciones, como el precorte, cuya aplicación generalmente se limita a taludes finales debido al incremento de los costos de perforación, la técnica de la onda elemental puede ser aplicada de manera continua durante la operación.

De igual manera, otros métodos como la utilización de decks permiten reducir la carga explosiva por retardo y atenuar las vibraciones; sin embargo, pueden generar variaciones en la fragmentación del material y afectar la eficiencia de los procesos de carguío y acarreo.

Desde el punto de vista económico, la técnica de la onda elemental representa una alternativa eficiente debido a que su aplicación requiere principalmente el uso de un sismógrafo para el monitoreo de vibraciones, el análisis de la onda elemental en gabinete y la optimización de los tiempos de iniciación entre filas y taladros, sin necesidad de realizar modificaciones significativas en el diseño de perforación o incrementar considerablemente los costos operativos. Por ello, esta técnica permite mantener un adecuado equilibrio entre seguridad, estabilidad geotécnica, productividad y control de costos en operaciones mineras superficiales.

3.9.5 Estimación de los costos evitados por reducción de vibraciones

Tabla 4

Estimación de los costos evitados por reducción de vibraciones

Evento operativo asociado	Base de estimación	Costo referencial por evento	Sustento / criterio
Parada operativa por alerta geotécnica menor	1 a 2 horas de restricción parcial de frente/equipos	US\$ 3,000 – 10,000 / S/ 10,290 – 34,300	Se considera downtime parcial de equipos y pérdida de continuidad operativa. Referencias externas reportan costos relevantes por hora de equipo detenido.
Parada operativa por alerta geotécnica moderada	2 a 4 horas de restricción de acceso, inspección y reprogramación	US\$ 10,000 – 40,000 / S/ 34,300 – 137,200	Incluye detención parcial del frente, inspección geotécnica, espera operativa y reordenamiento de actividades.
Limpieza de material desprendido por caída de rocas	Equipo auxiliar + operador + supervisión + pérdida de tiempo operativo	US\$ 1,500 – 8,000 / S/ 5,145 – 27,440	Estimación conservadora para limpieza menor/localizada. La literatura considera la limpieza como costo asociado a fallas de taludes.
Rehabilitación de banco o berma afectada	Reperfilado, limpieza, acondicionamiento y control de acceso	US\$ 5,000 – 25,000 / S/ 17,150 – 85,750	Aplica cuando el daño requiere intervención operativa y no solo limpieza simple.
Sostenimiento o control adicional de talud por daño inducido	Medidas correctivas, monitoreo adicional, saneo, barreras/mallas u otra intervención	US\$ 15,000 – 100,000+ / S/ 51,450 – 343,000+	Rango amplio porque depende del método de sostenimiento; se recomienda usarlo como costo potencial, no como costo fijo.
Evaluación geotécnica adicional	Inspección, instrumentación, monitoreo, análisis y liberación del área	US\$ 1,000 – 5,000 / S/ 3,430 – 17,150	Costo asociado a horas profesionales, monitoreo y validación de condiciones seguras.

Pérdida de eficiencia operativa	Demoras en carguío, acarreo, perforación o voladura por restricciones	Variable	Puede estimarse por horas de equipos/frentes afectados. Se recomienda calcularlo con datos internos de la unidad minera.
---------------------------------	---	----------	--

Nota. Cuadro de estimaciones de costos evitados por la reducción de vibraciones e impacto positivo en la eficiencia de las operaciones.

3.9.6 Comparativa de métodos de control de vibraciones en minas similares

Tabla 5

Comparativa de métodos de control de vibraciones

Método de control de vibraciones	Aplicación	Resultado reportado	Ventajas	Limitaciones
Reducción de carga por retardo	Minas superficiales	Disminución moderada de PPV	Fácil aplicación	Puede afectar la fragmentación
Precorte	Control y protección de taludes	Reducción del daño en taludes y mejor estabilidad geotécnica	Genera superficies más estables y controladas	Incrementa costos y tiempos de perforación
Decking	Taludes sensibles	Atenuación parcial de vibraciones	Reduce la energía transmitida al macizo rocoso	Diseño y carguío más complejos
Técnica de onda elemental	Fase 2 Norte	Reducción de 64.86% del PPV	Alta eficiencia en el control vibracional y estabilidad de taludes	Requiere análisis previo de ondas y tiempos óptimos

Nota. Comparativa de los resultados obtenidos con la técnica de onda elemental frente a otros métodos de control de vibraciones utilizados en otras minas de similares características



CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Se logró reducir las vibraciones mediante la comparación de los valores registrados en el último semestre del año 2024 con los obtenidos en el año 2025. Luego de la toma y análisis de la onda elemental, se determinó un tiempo óptimo de 19 ms, el cual presentaba una baja vibración (PPV) y una alta frecuencia. Este tiempo fue utilizado en la elaboración de las secuencias de voladura de manera regular, lográndose una reducción en los valores de PPV registrados, concluyendo así la disminución de las vibraciones en los taludes.
- Se determinaron las vibraciones mediante la medición de las mismas antes y después del uso de la técnica de la onda elemental.
- Se desarrolló la técnica de la onda elemental en la fase 02 norte de la unidad minera.
- Se logró una reducción significativa de las vibraciones mediante la aplicación de la técnica de la onda elemental. A partir del análisis comparativo de los valores promedio de PPV, se determinó que en el año 2024 se registró un promedio de 173.2 mm/s, mientras que a inicios del año 2025 este valor se redujo a 60.86 mm/s. En consecuencia, se evidencia una disminución del 64.86% en las vibraciones generadas, lo cual confirma la efectividad de la técnica aplicada en la mitigación del impacto sobre los taludes.

4.1 CONCLUSIONES

- Se concluye que la aplicación de la técnica de onda elemental permitió reducir significativamente las vibraciones generadas por las voladuras en los taludes de la Fase 02 Norte de una mina superficial del sur del Perú. Esta reducción se evidenció al comparar los registros de velocidad pico partícula antes y después de la implementación de la técnica, verificándose que el promedio de PPV suma disminuyó de 173.2 mm/s en el periodo julio-diciembre de 2024 a 60.86 mm/s en el periodo enero-junio de 2025, lo que representa una reducción aproximada de 64.86 %.
- Se determinó que las vibraciones generadas durante el proceso de voladura en la Fase 02 Norte presentaban inicialmente valores elevados de PPV suma, con registros comprendidos entre 100.5 mm/s y 327.2 mm/s durante el segundo semestre de 2024. Estos valores evidenciaron la necesidad de optimizar los tiempos de retardo y mejorar el control de las vibraciones inducidas por voladura, debido al posible impacto sobre la estabilidad de los taludes y las condiciones de seguridad operacional.
- La técnica de onda elemental fue desarrollada mediante la detonación aislada de un taladro al inicio de la secuencia de voladura, el registro de la señal mediante sismógrafo y geófono triaxial, el recorte de la onda elemental en el software Blastware 10 y la posterior simulación de distintos tiempos de retardo entre taladros. Este procedimiento permitió analizar el comportamiento de la PPV y la frecuencia, identificando las combinaciones más favorables para reducir las vibraciones.

- A partir del análisis de la onda elemental y de las simulaciones realizadas, se determinó que los tiempos de 19, 20 y 21 ms presentaban condiciones favorables de baja vibración y alta frecuencia. Sin embargo, se seleccionó finalmente el tiempo de 19 ms como tiempo óptimo entre taladros para las voladuras de la Fase 02 Norte, debido a que mostró un comportamiento adecuado para disminuir la velocidad pico partícula y contribuir al incremento de la frecuencia de vibración.
- Luego de aplicar el tiempo óptimo de 19 ms en las secuencias de voladura posteriores, los valores de PPV suma registrados durante el periodo enero-junio de 2025 se ubicaron entre 29.4 mm/s y 79.5 mm/s, valores considerablemente menores respecto a la línea base del año 2024. Esto demuestra que la optimización de los tiempos de retardo mediante la técnica de onda elemental tuvo un efecto directo y favorable en la reducción de las vibraciones inducidas por voladura.
- La hipótesis planteada en la investigación queda comprobada, ya que la aplicación de la técnica de onda elemental sí permitió reducir las vibraciones en los taludes de la Fase 02 Norte. Además, la reducción obtenida superó ampliamente el porcentaje esperado del 10 %, alcanzando una disminución aproximada de 64.86 %, lo cual confirma la efectividad técnica de la metodología aplicada.
- La reducción de la PPV y el incremento de frecuencias más favorables contribuyen a disminuir el potencial de daño sobre las paredes del tajo, especialmente en zonas con presencia de fallas geológicas y condiciones geotécnicas sensibles. En consecuencia, la técnica de onda elemental representa una alternativa eficiente para

mejorar el control de vibraciones, proteger la estabilidad de los taludes y reducir el riesgo de caída de rocas.

- Finalmente, se concluye que la técnica de onda elemental constituye una herramienta aplicable y recomendable para operaciones de minería superficial que requieran controlar vibraciones inducidas por voladura. Su uso permite optimizar los diseños de secuencia, mejorar el desempeño geotécnico de las voladuras y fortalecer las condiciones de seguridad en áreas cercanas a taludes expuestos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, & Pereira. (2022). Reducción de vibraciones hacia comunidades mediante control de retardos. Minera Gold Fields, Cerro Corona.
- Bhandari, S., & Verma, S. (2013). Blasting-induced vibration effects on slope stability.
- Blastware. (2015). Blastware operator manual. Instantel Inc.
- Blomberg, J. M. (2018). Advanced techniques for high vibration reduction.
- Carrasco, R. (2017). Minería superficial y métodos de explotación minera.
- Cubillos, & Vallejos. (2018). Estudio de vibraciones inducidas por voladura en minería Spence [Tesis de grado].
- Devine, J. F., & Duvall, W. I. (1963). Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. U.S. Bureau of Mines.
- Gertsch, R. E., & Poole, R. D. (1983). Blast vibration and rock fragmentation.
- Gómez Tique, R. (2019). Aplicación de modelo predictivo de daño (Cross Hole) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud, Mina Constancia – 2019 [Tesis de grado].
- Guzmán, A. (2018). Detonadores electrónicos en voladuras controladas.
- Hudson, J. A. (2022). Rock engineering and slope stability in mining.
- Hustrulid, W. (1999). Blasting principles for open pit mining. A. A. Balkema.
- Jorge, P. (2022). Estudio de onda elemental para la optimización de tiempos de retardo y generación de frecuencias de menor daño a las paredes del talud por voladura – U.M. Las Bambas, Apurímac.
- Jun, M., et al. (2021). Experimental study on vibration reduction technology of hole-by-hole presplitting blasting.
- Lopes, et al. (2023). Seed wave modeling to natural caves protection in mining operations – Carajás.

- López, J. P. (2011). Riesgo en minería y seguridad operacional.
- Mattmet Lizares. (2017). Análisis de vibraciones inducidas por voladura y resonancia en estructuras.
- Neil, H. (2023). Peak particle velocity and blast vibration control in mining operations.
- Pacco, & Apaza. (2019). Reducción del daño generado por voladura a taludes finales por medio de técnicas de precorte para yacimiento tipo pórfido de gran escala superficial [Tesis de grado].
- Posner, M. I. (1979). Cognitive science and technique development.
- Scherpenisse, C., et al. (2000). Blast vibration prediction and control models in mining.
- Seccatore, J., et al. (2024). Detonation sequence and fragmentation optimization in blasting operations.
- Shi, X. Z., & Chen, S. H. R. (2011). Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Tong, J. C. (2020). Cuidado de infraestructuras en operaciones a tajo abierto modificando tiempos entre taladros y diseño de configuración de carga [Tesis de grado].
- Universidad Católica de Santa María. (2019). Líneas de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas: Auto N.º 019-VRINV-2019. Universidad Católica de Santa María.
- Zapata Porras, P. (2017). Análisis de vibraciones generadas por voladura en minería superficial

ANEXOS

Anexos 1

Onda Elemental F02N-3435-003

Deck Del	Hole Del	Row Del	T Peak	V Peak	L Peak	PVS	Frec. Max.	T Hz.	V Hz.	L Hz	T Ratio	V Ratio	L Ratio
0	1	100	42.44	70.26	73.3	76.81	16.25	11.75	11.75	16.25	0.034	0.03	0.03
0	2	100	36.74	49.33	61.89	66.35	15.75	11.63	11.75	15.75	0.048	0.043	0.041
0	3	100	24.78	36.03	44.85	53.34	14.75	11.63	11.75	14.75	0.169	0.146	0.132
0	4	100	18.04	25.89	29.5	36.66	14.25	10.13	11.63	14.25	0.05	0.04	0.03
0	5	100	10.69	17.24	16.07	21.85	12.13	10.13	10.13	12.13	0.012	0.009	0.01
0	6	100	9.168	13.35	11.43	15.51	11.75	10	10.13	11.75	0.076	0.06	0.06
0	7	100	6.874	10.48	9.671	12.17	19	10	10	19	0.241	0.18	0.194
0	8	100	5.171	8.631	10.44	10.46	17.5	10	10	17.5	0.083	0.068	0.067
0	9	100	5.605	8.187	10.86	12.22	16.5	16.5	14.75	16.13	0.039	0.035	0.033
0	10	100	5.187	9.043	8.93	12.06	14.88	14	13.75	14.88	0.305	0.263	0.25
0	11	100	5.335	9.741	8.161	11.19	14	12.13	12.13	14	0.189	0.159	0.157
0	12	100	5.343	9.249	8.075	10	12.88	11.75	11.75	12.88	0.869	0.722	0.705
0	13	100	5.002	9.107	7.427	10.03	12	11.5	11.5	12	2.187	1.839	1.715
0	14	100	5.303	9.17	7.05	10.12	17.5	10.13	11.25	17.5	0.317	0.276	0.268
0	15	100	5.396	9.059	6.21	10.02	16.5	10	10	16.5	0.012	0.011	0.013
0	16	100	5.062	8.861	5.939	9.806	15.5	10	10	15.5	0.192	0.164	0.159
0	17	100	4.56	8.631	5.384	9.556	57.63	10	57.63	14.75	0.491	0.396	0.396
0	18	100	4.725	8.409	5.54	9.312	54.75	13.88	54.75	14.13	0.114	0.093	0.09
0	19	100	4.6	8.298	5.562	9.811	52.13	52.13	51.88	13.38	0.066	0.055	0.051
0	20	100	4.685	9.02	5.441	10.65	49.75	49.75	49.63	17.38	0.312	0.271	0.251
0	21	100	4.363	9.21	5.07	10.34	47.88	47.38	47.88	16.63	0.092	0.078	0.076
0	22	100	3.901	9.471	4.942	10.05	45.75	45.75	45.5	15.88	0.148	0.123	0.122
0	23	100	4.247	9.511	4.785	9.75	44	44	42.88	15.25	0.485	0.403	0.392
0	24	100	4.387	9.249	4.999	9.558	41.5	10.13	41.5	14.63	0.375	0.32	0.311
0	25	100	4.54	8.996	5.077	9.553	40.13	10	40.13	39.75	0.776	0.659	0.64

0	26	100	4.516	9.035	5.077	9.621	38.63	10	38.63	38.5	0.276	0.235	0.229
0	27	100	4.411	9.804	5.54	10.43	37.63	35.88	37.13	37.63	0.507	0.419	0.434
0	28	100	4.283	10.38	5.96	11.23	35.38	35	35.38	16	0.083	0.07	0.069
0	29	100	4.03	10.67	6.381	11.62	34.25	33.75	34.25	15.5	0.036	0.031	0.029
0	30	100	3.941	10.53	6.737	11.65	33.25	32.75	33.25	32.38	1.289	0.931	1.209
0	31	100	4.745	10.14	7.1	11.32	32.13	31.75	32.13	31.63	0.008	0.007	0.007
0	32	100	5.613	9.519	7.271	10.81	31.13	30.88	31.13	31	0.01	0.009	0.008
0	33	100	5.637	9.178	7.52	10.47	30.38	29.88	30.38	29.88	0.014	0.012	0.011
0	34	100	5.966	9.027	7.719	10.25	29.88	29.25	29.75	29.88	0.009	0.007	0.007
0	35	100	6.444	8.837	7.833	10.19	28.63	28.5	28.63	28.5	0.002	0.002	0.002
0	36	100	6.942	8.75	7.791	10.73	27.75	27.63	27.75	27.5	0.072	0.061	0.059
0	37	100	7.497	8.996	7.805	11.09	27.13	26.88	27.13	26.5	0.944	0.794	0.778
0	38	100	8.043	9.02	7.905	11.26	26.38	26.13	26.38	25.75	0.396	0.335	0.326
0	39	100	8.525	9.392	8.453	11.12	25.75	25.5	25.75	25.13	0.123	0.105	0.1
0	40	100	8.879	9.566	8.909	11.06	25.13	24.88	25.13	24.5	0.3	0.28	0.274
0	41	100	9.1	9.487	9.315	10.92	24.38	24.25	24.38	24	0.087	0.075	0.073
0	42	100	9.156	9.455	9.863	11.1	23.88	23.63	23.88	23.5	0.092	0.079	0.077
0	43	100	9.036	9.63	10.14	11.89	23.25	23.13	23.25	23	0.256	0.22	0.199
0	44	100	8.762	9.59	10.49	12.52	22.75	22.63	22.75	22.5	0.119	0.095	0.095
0	45	100	8.429	9.535	10.77	13.07	22.25	22.13	22.25	22	0.019	0.015	0.016
0	46	100	8.063	9.495	10.98	13.55	21.75	21.63	21.75	21.5	0.104	0.089	0.082
0	47	100	7.746	9.455	11.41	13.95	21.25	21.25	21.25	21.13	0.506	0.423	0.447
0	48	100	7.617	9.495	11.89	14.2	20.75	20.75	20.75	20.75	0.206	0.174	0.166
0	49	100	7.533	9.551	12.41	14.59	20.38	20.38	20.25	20.25	0.321	0.273	0.266
0	50	100	7.2	9.669	12.64	15.04	20	20	19.88	19.88	94.05	321.9	124.8

Deck Del	Hole Del	Row Del	T Peak	V Peak	L Peak	PVS	Max. Frec.	T Hz.	V Hz.	L Hz	T Ratio	V Ratio	L Ratio
0	1	100	81.56	115.5	126.6	151.6	15.94	10.25	9.625	15.94	0.003	0.001	0.006
0	2	100	54.93	62.91	60.93	94.13	14.5	9.375	9.125	14.5	0.004	0.003	0.006
0	3	100	32.25	39.27	26.52	48.03	10.63	8.688	8.5	10.63	0.005	0.003	0.002
0	4	100	19.94	21.35	20.49	28.97	17.56	7.5	7.875	17.56	0.002	0.001	0.004
0	5	100	15.04	14.56	17.39	21.11	15.06	6.063	6.875	15.06	0.026	0.022	0.024
0	6	100	12.26	12.17	13.98	17.58	12.88	11.56	11.63	12.88	0.004	0.002	0.002
0	7	100	10.16	11.34	13.63	16.29	17.5	10.31	10.25	17.5	0.005	0.003	0.004
0	8	100	8.877	8.918	11.72	14.72	15.56	9.25	9.125	15.56	0.011	0.003	0.004
0	9	100	8.003	8.21	9.096	12.23	14.06	8.438	8.438	14.06	0.007	0.002	0.003
0	10	100	7.439	7.242	8.242	10.91	17.31	7.688	7.813	17.31	0.047	0.022	0.014
0	11	100	6.632	6.412	7.432	9.97	15.88	7	7.25	15.88	0.014	0.005	0.01
0	12	100	6.445	5.915	6.911	9.169	14.63	10.31	10.25	14.63	0.041	0.017	0.023
0	13	100	6.077	5.46	6.534	8.82	13.56	9.563	9.5	13.56	0.034	0.013	0.02
0	14	100	5.772	5.224	6.346	8.246	16	8.938	8.875	16	0.018	0.007	0.011
0	15	100	5.504	4.955	5.984	7.781	15	8.375	8.375	15	0.007	0.001	0.015
0	16	100	5.174	5.004	5.68	7.386	14.13	7.875	7.938	14.13	0.008	0.003	0.005
0	17	100	4.945	4.996	5.427	7.07	16.19	10.25	10.25	16.19	0.012	0.005	0.006
0	18	100	4.792	5.419	5.196	6.902	15.31	9.688	9.625	15.31	0.008	0.004	0.006
0	19	100	4.706	5.964	5	6.962	14.5	9.188	9.188	14.5	0.006	0.003	0.004
0	20	100	5.428	8.885	5.326	9.526	49.44	49.44	49.44	16.25	0.024	0.023	0.014
0	21	100	4.759	9.365	4.848	10.6	47.75	47.75	47.75	15.5	0.007	0.002	0.006
0	22	100	4.783	9.764	5.55	10.46	45.44	45.44	45.38	14.81	0.009	0.003	0.004
0	23	100	5.141	10.11	5.239	10.43	43.69	43.69	43.44	43.13	0.008	0.003	0.007
0	24	100	5.294	9.984	5.217	10.22	42.06	42.06	41.69	41.56	0.019	0.007	0.015
0	25	100	5.356	9.683	5.138	9.951	40	9	39.94	40	590.8	61.99	150.5
0	26	100	5.318	9.601	5.261	9.632	38.56	8.688	38.56	38.5	0.017	0.006	0.011
0	27	100	5.356	9.772	5.5	9.824	37.13	36.69	37.13	37	0.008	0.004	0.004
0	28	100	5.361	9.796	5.898	9.876	35.88	35.5	35.63	35.88	0.004	0.002	0.004
0	29	100	5.485	9.772	6.274	10.28	34.69	34.38	34.38	34.69	0.003	0.001	0.002
0	30	100	5.681	9.764	6.614	10.65	33.31	33.25	33.31	32.88	0.02	0.018	0.024

0	31	100	5.843	9.65	6.867	10.94	32.31	32.13	32.31	32	0	0	0
0	32	100	6.182	9.552	7.149	11.28	31.25	31.13	31.25	31.13	0.001	0.001	0.001
0	33	100	6.426	9.504	7.403	11.16	30.31	30.19	30.31	30.31	0	0	0
0	34	100	6.613	9.219	7.605	11.11	29.44	29.31	29.38	29.44	0.001	0	0
0	35	100	6.761	9.137	7.743	10.93	28.63	28.5	28.56	28.63	0.04	0.011	0.01
0	36	100	6.942	8.845	7.938	10.89	27.81	27.75	27.81	27.69	0.004	0.001	0.003
0	37	100	7.004	8.592	8.061	10.62	27	27	27	26.94	0.017	0.006	0.011
0	38	100	7.028	8.405	8.155	10.49	26.31	26.31	26.31	26.19	0.023	0.009	0.013
0	39	100	7.114	7.494	8.336	10.5	25.69	25.63	25.69	25.56	0.009	0.003	0.006
0	40	100	7.721	8.063	8.503	10.14	25	25	25	24.88	0.006	0.005	0.014
0	41	100	8.347	8.617	9.053	10.34	24.44	24.31	24.44	24.31	0.006	0.002	0.005
0	42	100	8.591	9.186	9.899	10.76	23.81	23.75	23.81	23.69	0.006	0.003	0.003
0	43	100	8.538	9.17	10.36	11.23	23.25	23.19	23.25	23.19	0.007	0.001	0.003
0	44	100	8.442	9.243	10.77	11.85	22.69	22.69	22.69	22.63	0.005	0.002	0.002
0	45	100	8.285	9.341	11.12	12.43	22.19	22.19	22.19	22.13	0.01	0.001	0.024
0	46	100	8.008	9.333	11.43	12.89	21.75	21.69	21.75	21.69	0.005	0.002	0.004
0	47	100	7.716	9.3	11.85	13.23	21.25	21.25	21.25	21.25	0.004	0.002	0.007
0	48	100	7.501	9.268	12.47	13.7	20.81	20.81	20.81	20.81	0.007	0.003	0.013
0	49	100	7.277	9.325	12.9	14.12	20.44	20.44	20.44	20.38	0.023	0.009	0.016
0	50	100	6.894	9.3	13.11	14.3	20	20	20	20	295.3	111.4	32.69

Deck Del	Hole Del	Row Del	T Peak	V Peak	L Peak	PVS	Max. Frec.	T Hz.	V Hz.	L Hz	T Ratio	V Ratio	L Ratio
0	10	100	7.439	7.242	8.242	10.91	17.31	7.688	7.813	17.31	0.047	0.022	0.014
0	11	100	6.632	6.412	7.432	9.97	15.88	7	7.25	15.88	0.014	0.005	0.01
0	12	100	6.445	5.915	6.911	9.169	14.63	10.31	10.25	14.63	0.041	0.017	0.023
0	13	100	6.077	5.46	6.534	8.82	13.56	9.563	9.5	13.56	0.034	0.013	0.02
0	14	100	5.772	5.224	6.346	8.246	16	8.938	8.875	16	0.018	0.007	0.011
0	15	100	5.504	4.955	5.984	7.781	15	8.375	8.375	15	0.007	0.001	0.015
0	16	100	5.174	5.004	5.68	7.386	14.13	7.875	7.938	14.13	0.008	0.003	0.005
0	17	100	4.945	4.996	5.427	7.07	16.19	10.25	10.25	16.19	0.012	0.005	0.006
0	18	100	4.792	5.419	5.196	6.902	15.31	9.688	9.625	15.31	0.008	0.004	0.006
0	19	100	4.706	5.964	5	6.962	14.5	9.188	9.188	14.5	0.006	0.003	0.004
0	1	100	81.56	115.5	126.6	151.6	15.94	10.25	9.625	15.94	0.003	0.001	0.006
0	20	100	5.428	8.885	5.326	9.526	49.44	49.44	49.44	16.25	0.024	0.023	0.014
0	21	100	4.759	9.365	4.848	10.6	47.75	47.75	47.75	15.5	0.007	0.002	0.006
0	22	100	4.783	9.764	5.55	10.46	45.44	45.44	45.38	14.81	0.009	0.003	0.004
0	23	100	5.141	10.11	5.239	10.43	43.69	43.69	43.44	43.13	0.008	0.003	0.007
0	24	100	5.294	9.984	5.217	10.22	42.06	42.06	41.69	41.56	0.019	0.007	0.015
0	25	100	5.356	9.683	5.138	9.951	40	9	39.94	40	590.8	61.99	150.5
0	26	100	5.318	9.601	5.261	9.632	38.56	8.688	38.56	38.5	0.017	0.006	0.011
0	27	100	5.356	9.772	5.5	9.824	37.13	36.69	37.13	37	0.008	0.004	0.004
0	28	100	5.361	9.796	5.898	9.876	35.88	35.5	35.63	35.88	0.004	0.002	0.004
0	29	100	5.485	9.772	6.274	10.28	34.69	34.38	34.38	34.69	0.003	0.001	0.002
0	2	100	54.93	62.91	60.93	94.13	14.5	9.375	9.125	14.5	0.004	0.003	0.006
0	30	100	5.681	9.764	6.614	10.65	33.31	33.25	33.31	32.88	0.02	0.018	0.024
0	31	100	5.843	9.65	6.867	10.94	32.31	32.13	32.31	32	0	0	0
0	32	100	6.182	9.552	7.149	11.28	31.25	31.13	31.25	31.13	0.001	0.001	0.001
0	33	100	6.426	9.504	7.403	11.16	30.31	30.19	30.31	30.31	0	0	0
0	34	100	6.613	9.219	7.605	11.11	29.44	29.31	29.38	29.44	0.001	0	0
0	35	100	6.761	9.137	7.743	10.93	28.63	28.5	28.56	28.63	0.04	0.011	0.01
0	36	100	6.942	8.845	7.938	10.89	27.81	27.75	27.81	27.69	0.004	0.001	0.003
0	37	100	7.004	8.592	8.061	10.62	27	27	27	26.94	0.017	0.006	0.011

0	38	100	7.028	8.405	8.155	10.49	26.31	26.31	26.31	26.19	0.023	0.009	0.013
0	39	100	7.114	7.494	8.336	10.5	25.69	25.63	25.69	25.56	0.009	0.003	0.006
0	3	100	32.25	39.27	26.52	48.03	10.63	8.688	8.5	10.63	0.005	0.003	0.002
0	40	100	7.721	8.063	8.503	10.14	25	25	25	24.88	0.006	0.005	0.014
0	41	100	8.347	8.617	9.053	10.34	24.44	24.31	24.44	24.31	0.006	0.002	0.005
0	42	100	8.591	9.186	9.899	10.76	23.81	23.75	23.81	23.69	0.006	0.003	0.003
0	43	100	8.538	9.17	10.36	11.23	23.25	23.19	23.25	23.19	0.007	0.001	0.003
0	44	100	8.442	9.243	10.77	11.85	22.69	22.69	22.69	22.63	0.005	0.002	0.002
0	45	100	8.285	9.341	11.12	12.43	22.19	22.19	22.19	22.13	0.01	0.001	0.024
0	46	100	8.008	9.333	11.43	12.89	21.75	21.69	21.75	21.69	0.005	0.002	0.004
0	47	100	7.716	9.3	11.85	13.23	21.25	21.25	21.25	21.25	0.004	0.002	0.007
0	48	100	7.501	9.268	12.47	13.7	20.81	20.81	20.81	20.81	0.007	0.003	0.013
0	49	100	7.277	9.325	12.9	14.12	20.44	20.44	20.44	20.38	0.023	0.009	0.016
0	4	100	19.94	21.35	20.49	28.97	17.56	7.5	7.875	17.56	0.002	0.001	0.004
0	50	100	6.894	9.3	13.11	14.3	20	20	20	20	295.3	111.4	32.69
0	5	100	15.04	14.56	17.39	21.11	15.06	6.063	6.875	15.06	0.026	0.022	0.024
0	6	100	12.26	12.17	13.98	17.58	12.88	11.56	11.63	12.88	0.004	0.002	0.002
0	7	100	10.16	11.34	13.63	16.29	17.5	10.31	10.25	17.5	0.005	0.003	0.004
0	8	100	8.877	8.918	11.72	14.72	15.56	9.25	9.125	15.56	0.011	0.003	0.004
0	9	100	8.003	8.21	9.096	12.23	14.06	8.438	8.438	14.06	0.007	0.002	0.003

Anexos 2

Onda elemental F02N-3570-006

Hole Del	Row Del	T Peak	V Peak	L Peak	PVS	Frec. Max.	T Hz.	V Hz.	L Hz	T Ratio	V Ratio	L Ratio	Peak Ratio
1	100	95.73	160.8	112.5	169	15	15	11.81	11.75	0.018	0.01	0.017	
2	100	76.19	137.7	87.86	141.2	11.81	10.94	11.81	11.75	0.022	0.013	0.023	
3	100	48.8	103.1	60.5	107.2	11.81	10.94	11.81	11.75	0.079	0.046	0.078	-0.19
4	100	36.43	75.6	45.06	79.13	11.81	10.94	11.81	11.75	0.021	0.01	0.02	-0.19
5	100	28.57	58.66	36.91	61.67	11.81	10.94	11.81	11.75	0.003	0.002	0.004	-0.19
6	100	23.17	38.4	24.83	41.39	11.81	10.94	11.81	11.75	0.033	0.019	0.033	-0.19
7	100	13.38	24.09	19.17	26.87	11.75	10.94	11.75	11.31	0.112	0.064	0.111	-0.25
8	100	12.24	20.24	14.3	24.28	15.63	15.63	15	15.5	0.04	0.024	0.04	3.63
9	100	11.5	24.18	13.52	26.56	15.5	15	15	15.5	0.02	0.012	0.02	3.5
10	100	11.68	25.96	14.97	26.84	15	15	15	12.56	0.154	0.082	0.149	
11	100	15.06	26.07	17.96	28.02	15	15	11.88	11.75	0.094	0.055	0.095	
12	100	13.97	25.56	16.36	26.48	11.81	10.94	11.81	11.75	0.423	0.25	0.429	-0.19
13	100	11.03	22.43	13.21	22.67	11.81	10.94	11.81	11.75	1.077	0.624	1.083	-0.19
14	100	10.61	17.13	12.44	18.61	11.81	10.94	11.81	11.75	0.153	0.088	0.155	-0.19
15	100	9.422	16.53	12.04	18.75	11.75	10.94	11.75	11.31	0.008	0.005	0.008	-0.25
16	100	9.952	16.81	11.54	19.42	15.5	15	15	15.5	0.093	0.054	0.093	3.5
17	100	8.003	17.41	10.43	19.92	15	15	15	14.94	0.234	0.136	0.233	3
18	100	9.489	16.05	12.54	19.7	14.94	14.94	14.94	12.56	0.054	0.032	0.056	2.94
19	100	9.271	17.24	10.07	17.31	12.56	12.5	11.94	12.56	0.032	0.018	0.032	
20	100	10.87	17.38	12.45	18.77	12.5	12.5	11.88	11.75	0.153	0.095	0.145	
21	100	11.84	22.43	13.41	24.5	45.94	45.94	11.81	11.75	0.046	0.027	0.045	
22	100	15.49	25.57	13.09	27.86	45.63	45.63	45.56	11.75	0.072	0.043	0.072	
23	100	17.59	24.01	14.01	26.67	42.19	42.19	42.13	11.31	0.242	0.142	0.242	
24	100	19.79	19.89	16.39	23.31	42.13	42.13	42.13	42.13	0.184	0.111	0.189	
25	100	22.7	20.38	21.84	30.06	42.13	42.13	42.13	38.13	0.383	0.225	0.386	

26	100	15.98	17.34	16.66	22.26	38.19	38.13	38.19	38.13	0.134	0.08	0.137	
27	100	17.07	16.45	15.81	20.73	38.19	38.13	38.19	38.13	0.249	0.146	0.256	
28	100	17.26	24.51	18.43	29.36	34.63	34.63	34.63	34.63	0.04	0.025	0.041	
29	100	19.47	26.32	23.74	33.48	34.63	34.63	34.63	34.44	0.018	0.01	0.017	
30	100	22.16	25.4	21.93	32.91	34.63	34.63	34.63	34.38	0.699	0.43	0.775	
31	100	22.35	29.98	22.81	35.51	30.88	30.88	30.88	30.88	0.004	0.003	0.004	
32	100	21.58	36.5	25.91	42.83	30.88	30.88	30.88	30.56	0.005	0.003	0.005	
33	100	21.06	32.14	25.4	39.14	30.56	30.5	30.56	30.56	0.007	0.004	0.007	
34	100	20.24	31.06	24.72	39.88	30.56	30.5	30.56	30.56	0.004	0.003	0.004	
35	100	18.66	28.07	21.74	35.81	28.56	27.31	27.19	28.56	0.001	0.001	0.001	
36	100	21.74	31.76	19.7	36.94	27.31	27.19	27.19	27.31	0.035	0.021	0.036	
37	100	23.99	38.36	22.98	44.75	27.31	27.19	27.19	27.31	0.464	0.274	0.467	
38	100	21.2	32.91	22.06	38.02	26.19	26.19	26.19	26.19	0.195	0.113	0.197	14.19
39	100	20.11	26.96	18.53	33.07	26.19	26.19	26.19	26.19	0.06	0.036	0.061	14.19
40	100	25.61	26.26	21.03	35.48	25.38	24.5	24.44	25.38	0.152	0.069	0.151	13.38
41	100	27.95	31.2	20.12	37.95	24.5	24.44	24.44	24.5	0.044	0.026	0.044	12.5
42	100	27.78	32.83	19.62	43.59	23.75	23.75	23.69	23.69	0.045	0.028	0.046	11.75
43	100	33.82	36.17	20.16	44.37	23.75	23.75	23.69	23.19	0.125	0.076	0.128	11.75
44	100	32.89	38.08	18.88	43.3	23.19	23.19	23.13	23.13	0.057	0.035	0.056	11.19
45	100	23.96	27.56	16.47	34.59	21.5	21.5	21.5	21.5	0.008	0.006	0.009	9.5
46	100	28.97	30.95	19.51	37.11	21.5	21.5	21.5	21.5	0.052	0.028	0.052	9.5
47	100	32.46	33.27	21.57	41.43	21.5	21.5	21.44	21.5	0.238	0.144	0.24	9.5
48	100	27.43	28.5	19.2	35.41	21.5	21.5	21.44	21.5	0.1	0.059	0.101	9.5
49	100	20.64	27.03	14.22	29.85	21.5	21.5	19.69	21.44	0.156	0.094	0.159	9.5
50	100	16.63	24.57	15.18	26.85	20.56	19.69	19.69	20.56	1194.6	1033.9	1035.3	8.56

Anexos 3

Onda elemental F02N-3600-008

T Peak	V Peak	L Peak	PVS	Frec. Max.	T Hz.	V Hz.	L Hz	T Ratio	V Ratio	L Ratio	Peak Ratio
49.46	42.43	48.21	77.76	15.5	15.5	15.5	12.13	0.002	0.004	0.008	
44.72	37.34	40.78	67.28	15.5	15.5	15.5	12.13	0.003	0.008	0.012	
37.24	29.69	31.21	53.53	15.5	10.06	15.5	12.13	0.013	0.033	0.039	3.5
27.92	21.75	21.78	40.04	15.5	10.06	15.5	10.31	0.008	0.013	0.014	3.5
17.81	15.07	13.59	25.18	12.13	10.06	12.13	10.31	0.004	0.002	0.003	0.13
10.79	9.075	9.737	14.26	10.31	10.06	10.06	10.31	0.014	0.014	0.025	-1.69
7.312	8.226	6.334	9.621	10.31	10.06	10.06	10.31	0.029	0.046	0.062	-1.69
6.959	8.647	7.107	13.12	15.5	10.06	15.5	10.31	0.005	0.015	0.019	3.5
8.735	8.364	8.76	14.26	15.5	15.5	15.5	15.5	0.001	0.012	0.016	3.5
9.199	7.822	8.32	13.9	15.5	15.5	15.5	15.31	0.054	0.071	0.139	
7.59	7.616	6.811	10.88	15.5	15.5	15.5	12.13	0.011	0.039	0.053	
6.556	6.363	4.936	9.314	12.25	12.25	12.13	12.13	0.047	0.151	0.207	
5.689	5.546	5.116	7.597	12.13	10.31	12.13	12.13	0.144	0.464	0.653	
5.272	6.339	4.477	7.584	11.5	10.06	11.5	10.31	0.018	0.057	0.077	
5.814	6.072	4.672	8.247	15.5	10.06	15.5	10.31	0.001	0	0.004	
5.309	5.316	4.394	7.669	15.5	10.06	15.5	10.31	0.01	0.024	0.037	
4.497	4.329	4.139	6.669	15.5	10.06	15.5	15.31	0.043	0.104	0.141	
4.293	3.921	3.963	6.682	15.5	13.63	15.5	13.63	0.007	0.02	0.027	
3.853	3.468	3.653	5.976	12.25	12.25	12.13	12.13	0.004	0.015	0.019	
3.551	4.2	3.602	5.741	12.25	12.25	12.13	12.13	0.034	0.047	0.097	
5.109	5.607	4.033	8.247	12.25	12.25	12.13	12.13	0.005	0.017	0.023	
5.536	6.181	4.329	8.602	15.5	15.5	15.5	10.94	0.009	0.029	0.04	
5.123	5.898	5.607	7.656	15.5	15.5	15.5	10.31	0.032	0.1	0.141	
3.774	4.596	5.204	6.398	15.5	10.31	15.5	10.31	0.022	0.069	0.094	
3.556	3.198	3.672	5.316	10.31	10.06	10.06	10.31	0.047	0.15	0.207	
3.584	3.97	3.885	5.238	10.31	10.06	10.06	10.31	0.017	0.053	0.074	
4.622	5.457	4.223	7.667	15.69	10.06	15.69	12.13	0.025	0.079	0.112	

5.554	6.427	5.741	10.04	15.5	15.5	15.5	12.13	0.005	0.015	0.02	
5.36	6.068	4.885	9.148	15.5	15.5	15.5	12.13	0.003	0.007	0.01	
4.826	5.344	6.042	7.775	31.19	15.5	15.5	31.19	0.029	0.053	0.115	
3.57	4.511	7.005	7.468	31.19	10.94	31.13	31.19	0.001	0.004	0.006	19.19
3.779	5.583	6.413	6.915	31.19	30.88	31.13	31.19	0.001	0.003	0.004	19.19
4.636	5.473	5.797	6.675	31.19	30.88	30.13	31.19	0.001	0.002	0.003	19.19
4.697	6.165	6.626	7.442	27.69	10.31	27.69	27.69	0.001	0.002	0.002	15.69
5.188	6.472	8.348	8.554	27.69	15.5	27.69	27.5	0	0	0	15.69
5.67	7.677	9.2	9.683	27.69	26.94	27.69	27.5	0.004	0.015	0.019	15.69
5.499	6.759	7.635	9.019	27.44	26.94	27	27.44	0.055	0.177	0.244	15.44
4.701	6.945	5.885	7.824	27.44	26.94	27	27.44	0.022	0.071	0.098	15.44
4.942	7.321	6.454	8.614	27.06	26.94	24.94	27.06	0.006	0.021	0.03	15.06
4.451	6.088	5.278	7.745	24.94	24.25	24.94	24.75	0.007	0.042	0.095	12.94
6.148	7.268	5.19	7.488	24.75	24.25	23.31	24.75	0.004	0.014	0.019	12.75
6.584	8.364	5.399	8.511	23.38	23.31	23.31	23.38	0.004	0.017	0.024	11.38
7.121	7.899	5.505	8.735	23.38	23.31	23.31	23.38	0.019	0.056	0.07	11.38
6.185	6.545	6.612	8.106	23.31	23.31	23.31	22.5	0.007	0.021	0.027	11.31
6.876	6.686	6.973	9.93	22.5	21.75	22	22.5	0.001	0.001	0.003	10.5
7.108	7.434	6.149	11.25	21.75	21.75	21.56	21.75	0.006	0.019	0.03	9.75
7.706	9.496	6.088	11.18	20.94	20.31	20.44	20.94	0.027	0.091	0.116	8.94
11	9.455	7.899	14.2	20.44	20.31	20.44	20.13	0.013	0.042	0.056	8.44
12.38	10.95	9.714	16.26	20.44	19.13	20.44	20.13	0.02	0.057	0.079	8.44
12.89	11.76	10.95	17.79	19.31	19.13	19.31	19.06	91.12	132.8	63.92	7.31

Anexos 4

Ficha técnica monitor de vibraciones Micromate

Ficha Técnica

Monitor de vibraciones

Marca: INSTANTEL

Modelo: MICROMATE

El monitor de vibraciones InstanTEL MICROMATE establece unidades de monitoreo de sobrepresión de aire y sonido.

El campo de aplicaciones es amplio: construcción, voladuras, demoliciones, manejo de pilotes, compactación, transporte pesado, ambiental, túneles y subterráneos, ruido, estructural y puentes.

Cuenta con el software avanzado THOR para el análisis de datos



Especificaciones Técnicas:

Canales Micromate de geófono	Micrófono y geófono triaxial (ISEE o DIN)	
	ISEE	DIN
Distancia:	Hasta 254 mm/s (10 pulg/s)	Hasta 254 mm/s (10 pulg/s)
Estándar de respuesta:	Especificación de sismógrafo ISEE (2017)	DIN 45669-1
Resolución:	0.00788 mm/s (0.00031 pulg/s)	0.00788 mm/s (0.00031 pulg/s)
Rango de frecuencia:	2 a 250 Hz	1 a 315 Hz
Precisión:	De 2 a 4 Hz y de 125 a 250 Hz: + 5% a -3 dB de una respuesta plana ideal, de 4 a 125 Hz: $\pm 5\%$ o ± 0.5 mm/s (0.02 pulg/s) lo que sea mayor.	DIN: 45669-1 estándar
Respuesta de fase:	Desplazamiento de fase de 2.5 a 250 Hz < 10% del valor absoluto máximo de 2 vibraciones armónicas superpuestas.	
Densidad de transductor:	2.2 g/cc (137 libras/pie)	2.2 g/cc (137 libras/pie)
Longitud máxima del cable:	1000 m (3280 pies)	1000 m (3280 pies)
Micrófonos	Micrófono lineal ISEE	Micrófono de nivel de sonido
Escalas de ponderación:	Micrófono lineal ISEE	Ponderación A o Ponderación C

Estándar de respuesta:	Especificación de sismógrafo ISEE (2017)	Rápido (125 s) o lento (1 s)
Distancia:	Hasta 500 Pa (0.0725 psi) (148 dB)	30 a 140 dB (A o C)
Resolución:	0.0156 Pa (2.2662 x 10 ⁻⁶ psi)	0.05 dB (límite de visualización 0.1 dB)
Rango de frecuencia:	2 a 250 Hz	Hasta 20 KHz
Precisión:	2 Hz: -3 dB ± 1 dB, 3 Hz: -1 dB ± 1 dB, de 1 Hz a 125 Hz: ± 1 dB, 200 Hz: +1 dB a -3 dB, 250 Hz: +1 dB a -1 dB	IEC 61672 Class 1
Longitud máxima del cable:	75 m (250 pies)	75 m (250 pies)

Grabación de Waveform

Modos de grabación:	Waveform, Manual de Waveform
Disparador sísmico:	0.13 a 254 mm/s (0.005 a 10 pulg/s)
Disparador acústico lineal:	2.0 a 500 Pa (0.00029 a 0.0725 psi) (100 a 148 dB)
Disparador de micrófono de nivel de sonido:	33 a 140 dB (A o C)
Frecuencia de muestreo:	1024 / 2048 / 4096 S/s por canal (independientemente del tiempo de grabación)
Modo de parar grabación:	Tiempo de grabación fijo, AutoRecord™ (consulte Tiempo de registro automático a continuación)
Tiempo de grabación:	1 - 90 segundos (programable en pasos de un segundo) más un pre-disparador a 0.25, 0.50, 0.75 o 1.0 segundos
Tiempo de auto grabación:	El evento se registra hasta que la actividad permanece por debajo del nivel de activación durante la ventana automática o hasta que se llena la memoria disponible.
Tiempo de ciclo:	Grabación ininterrumpida por procesamiento de eventos, monitoreo o comunicación: cero tiempo muerto entre eventos.
Capacidad de almacenamiento Waveform:	1000 eventos de 1 segundo a 2048 S/s (actualización de memoria opcional hasta 4000 eventos de 1 segundo a 2048 S/s)

Grabación de histograma

Modo de grabación:	Histograma e Histograma-Combo™ (la unidad captura formas de onda activadas mientras graba en modo Histograma)
Intervalo de grabación:	De 2 a 30 segundos (incrementos de 1 segundo) y de 30 segundos a 30 minutos (incrementos de 30 segundos)
Capacidad de almacenamiento de histograma:	222000 intervalos (Ejemplos: 5 días a intervalos de 2 segundos, 150 días a intervalos de 1 minuto)
Capacidad de almacenamiento del combo de histograma:	30 días de grabación de histograma a intervalos de 1 minuto y más de 900 eventos de Waveform de 1 segundo

Información general:

Dimensiones:	101.6 x 135.1 x 44.5 mm (4.15 x 5.32 x 1.75 pulg)
Peso:	0.5 Kg (1.1 libras)
Batería:	Recargables en lones de litio de 10 días (actualización de batería opcional de 15 días disponible)
Interfaz de usuario:	10 teclas táctiles abovedadas, pantalla táctil a color, con teclado de pantalla y atajos dedicados para funciones comunes
Pantalla:	QVGA, pantalla táctil a color de 320 x 240
Interfaz de PC:	USB
Entradas y Salidas Auxiliares Ambientales	Disparador externo y alarma remota (opción instalada de fábrica)
• Temperatura de funcionamiento LCD:	• -10 a 55 °C (14 to 131 °F)
• Temperatura de funcionamiento de electrónica:	• -40 a 45 °C (-40 a 113 °F)
• Temperatura de funcionamiento:	• -40 a 55 °C (-40 a 131 °F) (protector de pantalla LCD habilitado y configurado en un tiempo de espera máximo de 2 minutos (sin sensores USB)
Comunicaciones remotas:	Módems compatibles: Sierra Wireless™ Airlink® RV-50, GX-400, LS-300. Transfiere automáticamente eventos cuando ocurren a través de la función Auto Call Home, monitorea el temporizador de inicio / parada.
Estándares eléctricos:	CE Clase B: el Micromate ha sido probado y aprobado IEC 61010-1: 2010 (informe de prueba del esquema CB disponible)

Equipos y accesorios opcionales*:

Impresora con precisión de alta resolución

GPS para sincronizar tiempo y descargar coordenadas

Vision (software basado en la nube) que proporciona a las partes interesadas acceso seguro y encriptado a los datos de eventos y permite el intercambio instantáneo para proyectos

*Consultar con el ejecutivo comercial

Anexos 5

Estándar monitoreo de vibraciones en campo cercano

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

1. Objetivo

Establecer los lineamientos que aseguren y garanticen que el monitoreo de vibraciones en campo cercano se realice de manera correcta, segura y responsable con el medio ambiente, alineado al cumplimiento de todos los requisitos legales.

2. Alcance:

Este estándar tiene alcance a todo el personal de la gerencia de operaciones de Enaex Perú para su aplicación durante el monitoreo de vibraciones en campo cercano en la unidad minera.

3. Referencias Laborales y otras normas:

NUMERO DE DOCUMENTO	TÍTULO DE DOCUMENTO
Ley N° 29783	Ley de Seguridad y Salud en el trabajo, y modificatorias.
D.S. N° 005-2012-TR	Reglamento de la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, y modificatorias.
D.S. N° 024-2016-EM	Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería.
D.S. N° 023-2017-EM	Modificatoria del DS N° 024-2016 – EM
D.S. N° 034-2023-EM	Modificatoria del DS N° 024-2016 – EM
Norma ISO 9001:2015	Sistemas de Gestión de la Calidad – Requisitos.
Norma ISO 14001:2015	Sistemas de Gestión Ambiental – Requisitos.
Norma ISO 45001:2018	Sistemas de Gestión de la seguridad y salud en el trabajo – Requisitos.
R.M. N° 375-2008-TR	Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico
NTP 900.058: 2019	Gestión de residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos.
NTP 399.010-1 2016	SENALES DE SEGURIDAD: Símbolos gráficos y colores de seguridad. Parte 1: Reglas para el diseño de las señales de seguridad y franjas de seguridad
LEY N° 30299	Ley de armas de fuego, municiones, explosivos, productos pirotécnicos y

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	
		materiales relacionados de uso civil.	
D.S. N° 010-2017-IN		Reglamento de la ley de armas de fuego, municiones, explosivos, productos pirotécnicos y materiales relacionados de uso civil.	
R.S. N° 309-2018-SUCAMEC		Directiva N° 02-2018-SUCAMEC "Clasificación y compatibilidad de explosivos y materiales relacionados".	
R.S. N° 592-2021-SUCAMEC		Directiva que establece lineamientos para gestionar el registro y emisión de carné digital de manipulador de explosivos y materiales relacionados; y carnet digital de manipulador de productos pirotécnicos y materiales relacionados a través de la plataforma virtual- SUCAMEC en línea.	
AAQ-ESTANDAR-GEOTEC-001		Estándar de Gestión de control de Terreno	
P- 001		Política integrada de calidad, medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo de Enaex Perú.	
P- 002		Política sobre alcohol, drogas y tabaco.	
P- 003		Política de fatiga y somnolencia.	
P- 004		Política de negativa al trabajo inseguro.	
RG-001		Reglamento interno de seguridad y salud en el trabajo.	
-		Reglas que salvan vidas Enaex	

4. Definiciones y Abreviaturas:

- **RT:** Representante técnico.
- **EV:** Especialista de voladura.
- **SAT:** Supervisor de asistencia técnica.
- **BA:** Blasting assistant.
- **TS:** Trainee de servicio.
- **OP:** Personal que brinda soporte en piso.
- **PETS:** Procedimiento escrito de trabajo seguro.
- **IPERC:** Identificación de peligros, evaluación de riesgos y controles.
- **OPT** (Observación Planeada de Tarea): Técnica de verificación mediante la observación directa de una tarea para asegurar su cumplimiento conforme a los procedimientos establecidos.

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

- **Refugio:** Lugar equipado para proteger al personal de descargas de rayos directos e indirectos. Este refugio seguro debe cumplir con el principio de la jaula de Faraday y los mencionados por el estándar/ procedimiento de mina, como validados por ellos.
- **Geófono:** Sensor de alta sensibilidad utilizado para captar y convertir las vibraciones del suelo en señales eléctricas que son registradas por el sismógrafo.
- **Sismógrafo:** Dispositivo electrónico que registra la intensidad y características de las vibraciones del terreno durante una voladura.
- **Caja de conexión:** Dispositivo intermedio que permite conectar los geófonos al sismógrafo, protegiendo las conexiones y asegurando la transmisión adecuada de las señales.
- **Acelerante de fraguado:** Aditivo utilizado en las mezclas de cemento para reducir el tiempo necesario para que la mezcla endurezca y alcance resistencia.
- **Vinilit:** Adhesivo especializado empleado para unir tubos de PVC, garantizando la estanqueidad y resistencia de las uniones.

5. Especificaciones del estándar:

5.1 Equipos de protección personal:

Todo el personal deberá usar el equipo de protección personal básico requerido en la operación como se muestra a continuación:

- Casco de seguridad.
- Chaleco de seguridad con cinta reflectiva.
- Lentes o sobrelentes de seguridad (lunas claras u oscuras de acuerdo a la exposición de radiación solar).
- Zapatos de seguridad dieléctrico.

Tener en cuenta que se deberá usar prendas de seguridad de material reflectivo, con camisas de manga larga y pantalones

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

Todo el personal deberá usar el equipo de protección personal específico según la actividad que se va a realizar, exposición y factor climático:

- Guantes de seguridad anticorte (Tipo: HyFlex 11- 727).
- Guantes de seguridad anticorte y protección contra MATPEL (Tipo: EDGE 48-919).
- Bloqueador solar (mínimo SPF 90).
- Respirador media cara con cartuchos para polvo (P100), gases ácidos y vapores orgánicos.
- Tapones auditivos y/u orejera.
- Ropa de agua con cinta reflectiva (en caso de lluvia, granizo, etc.).
- Ropa térmica con cinta reflectiva (en caso de bajas temperaturas).
- Botas de jebe de seguridad (en caso de lluvia).
- Traje overol impermeable descartable (Tipo: DUPONT™ TYVEK® 400, ALPHATEC 2000 COMFORT - Modelo 129).

5.2 Equipos/Herramientas y materiales:

5.2.1 Equipos:

- Refugio (Camioneta Enaex).
- Sismógrafo (Calibración anual).
- Geófono campo cercano (Calibración anual).
- Radio Handy troncalizada.

5.2.2 Herramientas:

- Multitester (Calibración anual).
- Cajas de conexión (de geófonos empotrados a sismógrafos).
- Caja metálica de protección del sismógrafo.
- Cinta métrica topográfica (wincha) o flexómetro.
- GPS.
- Pelacables.

5.2.3 Materiales:

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO		
		Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

- Conos de seguridad de color anaranjado.
- Cinta amarilla de advertencia.
- Tubos PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Adhesivo para PVC (Tipo: Vinilit).
- Detritus fino.
- Señalética "Atención equipos instalados" y bastón.
- Brocha pequeña y fina, para aplicar el adhesivo para PVC.
- Palas, para añadir y mezclar los implementos en la carretilla.
- Rollo de cable UTP.
- Cinta ducto tape.
- Cinta aislante 3M.
- Coligues o estacas para centrar el tubo del geófono.

En caso la mezcla de cemento lo realice el equipo Enaex, considerar los siguientes materiales:

- Carretilla.
- Cemento.
- Acelerante para el fraguado (Tipo: Sika).
- Sacos de cemento.
- Recipiente de plástico graduado, capacidad de 1 litro o 2 litros.
- Botellones de agua, de 20 litros.

5.2.4 Herramientas de gestión, permisos requeridos y autorizaciones

- IPERC continuo.
- GO-EMTS-F-005 "Inspección pre uso de sismógrafo"
- Carnet de manipulador de explosivos y materiales relacionados, categoría III, vigente emitido por la SUCAMEC.

5.3 Desarrollo de la Actividad:

5.3.1 Actividades preliminares:

- El RT/EV/SAT/BA coordinará con el área responsable, designada por el área de

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO		
		Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

perforación y voladura de la unidad minera, el diseño final para realizar el monitoreo de vibraciones en campo cercano, definiendo conjuntamente el área, los taladros a perforar y distancias.

- El RT/EV/SAT/BA/TS realizará en oficina una inspección previa de operatividad, la cual consistirá en establecer la configuración del equipo y conectar los geófonos al sismógrafo para verificar el correcto estado de las conexiones. Posteriormente, se descargará la información registrada con el fin de validar que los datos en los tres ejes sean consistentes con la configuración previamente establecida.
- El RT/EV/SAT/BA/TS registrará la resistencia nominal establecida en la placa de información del geófono, para luego poder hacer las comprobaciones en terreno.
- El RT/EV/SAT/BA comunicará y coordinará con el supervisor de voladura Enaex la realización de la actividad.
- El RT/EV/SAT/BA realizará la difusión de la actividad a todos los involucrados en el reparto de guardia y/o previo a la instrumentación.
- El RT/EV/SAT/BA deberá contar con su radio troncalizada y estar en la frecuencia radial correspondiente a la zona geográfica de la mina, a fin de tener conocimiento sobre el estado actual del tipo de alerta por tormenta eléctrica, incidentes, cambios de las condiciones de la mina, etc.
- En caso la actividad se realice en campo y se tenga voladura y/o proyectos con avance de carguío de explosivo se deberá contar con el plano del radio de influencia de voladura impreso o digital durante la ejecución de esta actividad.
 - Para ingresar al área/zona de operaciones mina, el RT/EV/SAT/BA solicitará autorización vía radial al responsable del área de operaciones mina de la unidad minera.
 - Para ingresar al proyecto de voladura, el RT/EV/SAT/BA solicitará autorización vía radial al supervisor de voladura Enaex e inspeccionará el área de trabajo identificando los peligros relativos a la labor: taludes (rocas sueltas, material inestable), crestas, muros de seguridad, presencia de agua en nivel, equipos en movimiento, ubicación de equipos (perforadoras, tractores, palas, etc.), y factores de riesgos físicos, químicos, disergonómicos y/o psicosociales, entre otros.

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

- El RT/EV/SAT/BA comunicará y coordinará con el supervisor de voladura de la unidad minera y con el supervisor de voladura Enaex la instrumentación, la ubicación de los equipos para el monitoreo de vibraciones en campo cercano.
- El RT/EV/SAT/BA/TS realizará el IPERC continuo antes de ejecutar la tarea, el cual deberá ser firmado por el supervisor de voladura Enaex.
- El RT/EV/SAT/BA/TS inspeccionarán los sismógrafos a utilizar antes de iniciar la tarea. Estos deben contar con sus baterías cargadas y la memoria debe tener suficiente espacio para almacenar los datos registrados. Esto deberá estar registrado en el formato de "Inspección pre uso de sismógrafo" con código GO-EMTS-F-005.
- Todo el personal que participen en la actividad inspeccionará y asegurarán la operatividad de las herramientas, verificando que las herramientas cuenten con la cinta de inspección trimestral de acuerdo con el estándar de la unidad minera.

5.3.2 Frecuencia de muestreo

Se realizará el monitoreo según la coordinación con el cliente, estudios específicos que se requieran realizar y los KPI establecidos en la operación, excepto cuando las condiciones de seguridad para el equipo no lo permitan, siempre con comunicación entre Enaex y la unidad minera.

5.3.3 Instalación de los geófonos:

- El RT/EV/SAT/BA/TS trasladará a donde se realizará el monitoreo de vibraciones todos los equipos y herramientas:
- Geófono campo cercano.
- Tubos PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Adhesivo para PVC (Tipo: Vinilit).
- Detritus fino.
- Palas, para añadir y mezclar los implementos en la carretilla
- Brocha pequeña y fina, para aplicar el adhesivo para PVC.
- Señalética "Atención equipos instalados" y bastón.

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

- Rollo de cable UTP.
- Cinta ducto tape.
- Cinta aislante 3M.
- Coligues o estacas para centrar el tubo del geófono.
- Conos de seguridad color anaranjado y cinta de advertencia
- Coligues o estacas para centrar el tubo del geófono

En caso la mezcla de cemento lo realice el equipo Enaex, considerar los siguientes materiales:

- Bolsas de cemento.
- Acelerante para el fraguado (Tipo: Sika).
- Sacos de cemento.
- Recipiente de plástico graduado, capacidad de 1 litro o 2 litros.
- Botellones de agua, de 20 litros.
- RT/EV/SAT/BA/TS/OP deberá señalizar toda el área donde se realizará la medición de vibraciones en campo cercano con conos de seguridad de color anaranjado y comunicará al supervisor de voladura de la unidad minera.
- El RT/EV/SAT/BA/TS verificará que la longitud del taladro y punto de ubicación este de acuerdo con el diseño presentado. Además, verificará la presencia de agua, de haber agua en el taladro debe acotar con material de gravilla hasta aproximadamente 50cm.

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá instalar el geófono como mínimo a una distancia vertical de 1 m del fondo del taladro (Ver imagen 01) y además deberá garantizar que la altura del geófono sea equidistante a la carga explosiva.

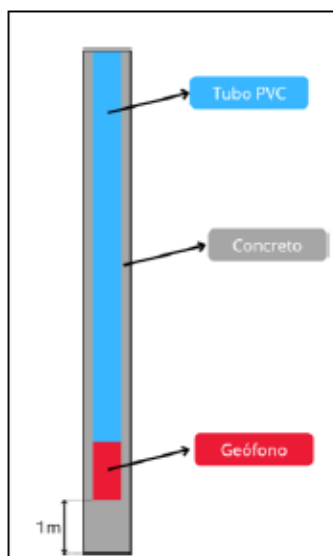


Imagen 1: Distancia vertical para la instalación del geófono

- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá fijar el geófono en el extremo del tubo de PVC, asegurándose de identificar claramente su componente radial. En todas las uniones de los tubos PVC se deberá emplear vinilit y cinta ducto tape para garantizar su estabilidad. Posteriormente, incorporará el siguiente tramo de tubo de PVC, evitando unir más de 4 metros a la vez para facilitar el descenso dentro del pozo.
- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá asegurar que el cable del geófono pase por cada tubo sin dañar las terminales de las componentes al final de la extensión de cable. Se deberá adherir con cinta aislante una pequeña piedra al extremo del cable del geófono (no a las terminales) para hacer más fácil que descienda por el tubo.
- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá asegurar que todos los tubos que se unirán tengan una marca a lo largo de su superficie, la cual deberá coincidir con la dirección

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO		
		Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

de la componente radial del geófono. Al unir los tubos, estas marcas deberán alinearse correctamente para asegurar que, la componente radial del geófono esté claramente identificada y orientada hacia la voladura.

5.3.4 Para la preparación de la mezcla:

- En caso la mezcla de cemento lo realice el equipo Enaex, RT/EV/SAT/BA/TS/OP comenzará a preparar la mezcla cemento-arena, la relación cemento arena es 1.5:2 (esto para lograr una mayor cohesión de la mezcla), si en el taladro existe presencia de agua, se debe incorporar a la mezcla el acelerante sika en una proporción de 250cm³ por 1.5 palas de cemento, la mezcla debe quedar homogénea y con una consistencia espesa.
- En caso la mezcla lo realice personal externo al del equipo Enaex el RT/EV/SAT/BA/TS verificará que la mezcla este homogénea y con una consistencia espesa.
- Una vez preparada la mezcla, dos integrantes del equipo (RT/EV/SAT/BA/TS/OP) introducirán cuidadosamente la tira de PVC de 4 metros en el taladro, bajándola lentamente para evitar impactos contra las paredes, para esto deberán colocar coligües o estacas para centrar el tubo del geófono dentro del taladro. Durante esta operación, se deberá mantener la orientación de la componente radial del geófono en la dirección previamente definida.
- Antes de descender todo el tubo, se debe unir las tiras de 4m restante, mientras una persona sujeta la porción de tubo que está en el taladro, las otras se dividirán las tareas en: un ayudante pasa el cable del geófono por la tira de PVC restante, mientras el segundo ayudante une, aplica vinilit y encinta la unión, también se asegura que la marca del tubo que está ingresando esté alineada con la marca del tubo que ya está en el taladro, una vez segura la unión y alineadas las marcas se baja el tubo de PVC completo, debe sobresalir aproximadamente 50cm del collar del taladro.
- RT/EV/SAT/BA/TS/OP deberá asegurar que en todo momento la componente

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

radial esté identificada y apuntando en la dirección que se ha establecido.

- Una vez que el tubo haya sido completamente insertado en el taladro, quedando a un metro de distancia vertical del fondo (ver Imagen 01), y mientras el personal aún lo sostiene en su posición final, RT/EV/SAT/BA/TS/OP deberá agregar lentamente la mezcla de cemento, arena, agua y acelerante en el pozo utilizando una pala. La mezcla debe incorporarse por ambos lados del taladro para asegurar su distribución uniforme. Durante este proceso, se deberá sujetar firmemente el tubo en su posición final por al menos 5 minutos.
- RT/EV/SAT/BA/TS/OP deberá asegurar que en todo momento el tubo se encuentre centrado con la estaca o el coligue.

5.3.5 Finalizado el proceso de tapado con cemento

- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá asegurar adecuadamente el tubo y el cable del geófono, enrollándolo y fijándolo con cinta en la parte superior del tubo. Finalmente, se deberá colocar una bolsa de protección para resguardar el conjunto del polvo y/o la lluvia.
- Una vez seca la mezcla, el personal que brinda soporte de piso deberá tapar por completo el taladro con gravilla. Si el taladro está seco esta operación puede realizarse como mínimo 48 horas después, si el taladro está con agua, al menos dejar pasar unos 3 días para permitir el correcto fraguado de la mezcla.
- RT/EV/SAT/BA/TS/OP deberá señalar el geófono siguiendo el anexo 02. Todo el personal que participe en esta actividad realizará la segregación de los residuos sólidos en el contenedor correspondiente, de acuerdo con la NTP 900.058: 2019 "Gestión de residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos".

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

5.3.6 Medición de vibraciones:

- Transcurrido el tiempo establecido para que la mezcla del cemento este completamente seca, el RT/EV/SAT/BA/TS deberá llevar el sismógrafo previamente configurado (en oficina) con las características de: número de canales activos, rango de voltaje, frecuencia de toma de datos, tiempo de monitoreo total, modo de trigger, etc., establecidas para el registro que se llevará a cabo. Algunas de las configuraciones, dependiendo del equipo a utilizar pueden ser efectuadas en terreno, no obstante, es mejor realizar dichas configuraciones en la oficina.
- El RT/EV/SAT/BA/TS tomará los conectores del geófono empotrado para revisar la resistencia (el valor debe encontrarse dentro de un rango en relación a la resistencia nominal establecida en la placa de información del geófono), en caso de que una de las componentes no registre resistencia, se deberá descartar dicha componente de las conexiones posteriores y deberá notificar al supervisor de voladura Enaex. Si se trata de un geófono uniaxial (de una componente, el geófono ha quedado inutilizable. Si se trata de un geófono triaxial, el registro puede considerarse como biaxial). En el caso que en ninguna de las componentes del geófono registre resistencia se comunicará con el supervisor de voladura de la unidad minera y se evaluará la posibilidad de volver a instalar un nuevo geófono.
- El RT/EV/SAT/BA/TS deberá tomar el cable UTP y extenderlo a una distancia mínima de 75 metros desde el último taladro cargado. Una vez en la posición de seguridad donde se colocará el sismógrafo, el RT/EV/SAT/BA/TS revisará también la resistencia de las hebras del cable UTP (para asegurar que la señal del geófono se está transmitiendo a lo largo del cable UTP). Este valor será mayor al chequeado directamente del geófono, y el delta de incremento se puede calcular en función de la cantidad de metros de cable UTP extendidos (conocida la resistencia del cable en cada metro).
- Si la prueba es correcta, el RT/EV/SAT/BA/TS conectará los terminales del cable UTP a la caja de conexión y procederá a tomar las mediciones; si no, el

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO		
		Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

RT/EV/SAT/BA/TS revisará la integridad del cable UTP, de encontrar algún corte o desperfecto, de ser el caso se reemplazará el cable UTP y se volverá a verificar la resistencia.

- Una vez verificado que la prueba de resistencia del cable UTP es correcta, el RT/EV/SAT/BA/TS conectará los terminales del cable UTP a la caja de conexión y realizará una verificación de resistencias en esta.
- Si la prueba resulta satisfactoria, se conectará la caja de conexión al sismógrafo y se procederá a tomar las mediciones.
- En caso contrario, el RT/EV/SAT/BA/TS revisará la integridad de la caja de conexión; si se detecta algún corte o desperfecto, esta será reemplazada y se volverá a verificar la resistencia.
- Si la prueba es correcta, el RT/EV/SAT/BA/TS conectará la caja de conexión al sismógrafo y procederá a tomar las mediciones. Para mantener un buen control de las componentes se deberá utilizar un código de colores para realizar las conexiones.
- El RT/EV/SAT/BA/TS ubicará los equipos (sismógrafo y caja universal) a una distancia no menor de 75 m.
- El RT/EV/SAT/BA/TS ubicará en la zona más segura el sismógrafo, tomando en consideración los siguientes puntos:
 - Posible impacto de fragmentos eyectados de la voladura: inicio de secuencia, secuencia, tiempos de retardo entre taladro y entre fila, longitud de taco, factor de carga, condiciones de cara libre con o sin material acumulado y desnivel.
 - Posible impacto por elementos que no provienen de la voladura: distancia del equipo hacia el talud o material no consolidado.
 - Revisión de las zonas de tránsito y movimiento de material.
 - El equipo no será ubicado en dirección del inicio de la secuencia de voladura, para reducir la probabilidad de caída de fragmentos de la voladura. En ningún caso será colocado a nivel de piso del proyecto de voladura.
- Una vez conectados todos los componentes y el cable de trigger del equipo, el RT/EV/SAT/BA/TS deberá: (1) presionar el botón ON, (2) presionar SET UP para

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

verificar la configuración del equipo, y (3) presionar el botón START MONITOR para iniciar el registro; aparecerá un mensaje indicando Waveform Monitoring.

- El RT/EV/SAT/BA/TS colocará la caja metálica de protección, sobre el sismógrafo, verificará que no haya contacto interno entre el equipo y la caja metálica protectora. El RT/EV/SAT/BA/TS dejará señalizado el equipo siguiendo el ANEXO 02.
- Una vez instalados todos los equipos, el RT/EV/SAT/BA/TS deberá ser el último en salir del proyecto de voladura y comunicará al supervisor de voladura de Enaex que nadie más debe transitar por la zona después del inicio del monitoreo.
- Estando fuera de la zona, el RT/EV/SAT/BA/TS comunicará a supervisor de voladura Enaex su ubicación final.
- El RT/EV/SAT/BA/TS comunicará al supervisor de voladura de la unidad minera si se encuentra fuera del radio de voladura.
- Terminado el proceso de voladura, el EV/SAT/BA/TS deberá recoger los equipos y la señalización además deberá verificar los accesorios y equipos utilizados, así como su integridad. En caso de detectar alguna anomalía, deberá reportarlo de inmediato al RT/EV/SAT/BA responsable del área EMTS en la operación.
- Todo el personal que participe en esta actividad realizará la segregación de los residuos sólidos en el contenedor correspondiente, de acuerdo con la NTP 900.058: 2019 "Gestión de residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos".

5.3.7 Análisis de datos

- Con la ayuda del software Blastware el RT/EV/SAT/BA/TS analizarán los datos registrados y toda la información obtenida se registrará en una base de datos administrada por el área EMTS, según la operación correspondiente.
- El RT/EV/SAT/BA/TS emitirá al cliente la información registrada dentro de las 48 horas que se realizó la prueba.
- Si hubiera resultados fuera de los rangos establecidos, el RT/EV/SAT/BA

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

encargado de la operación lo comunicará de inmediato al supervisor de voladura de la unidad minera.

- Al primer día del siguiente mes el RT/EV/SAT/BA/TS deberá emitir el reporte zonificado y global de estos análisis; asimismo, archivará los registros.
- El RT/EV/SAT/BA/TS mantendrán los datos históricos dentro de los plazos de contrato.
- Se va a comparar el resultado de la VPP y Frecuencia Dominante con el criterio de daño de campo cercano de acuerdo a la clasificación Litológica y Alteración detalladas en el siguiente cuadro según el Estandar Angloamerican AAQ-ESTANDAR-GEOTEC-001

LITOLOGIA	ALTERACION	Velocidad Pico partícula (mm/s)				Frecuencia Dominante (Hz)			
		Confianza 90%	Naranja -9%	Amarillo -10%	Verde -10%	Valor Andes	Naranja +9%	Amarillo +10%	Verde +10%
PORFIDO TEMPRANO	ARGILICO	173	204	206	247	12.00	12.2	12.9	14.0
	FILICO	260	295	241	238	6.70	7.8	7.4	7.7
GRANODIORITA	ARGILICO	200	317	107	177	6.80	6.9	6.2	6.4
	FILICO	237	225	212	202	5.40	5.9	6.2	6.4
PORFIDO INTERMEDIAL	ARGILICO	134	128	121	114	7.30	7.5	7.8	8.2
	FILICO	296	243	230	217	7.30	7.5	7.8	8.2
LATE	LATE	180	178	169	159	4.40	4.6	4.8	5.1
BRECHA HIDROTHERMAL	ARGILICO	213	281	190	179	7.30	7.5	7.8	8.2
	FILICO	277	283	249	236	7.30	7.5	7.8	8.2
BRECHA MAGMATICA	FILICO	262	268	264	240	4.40	4.6	4.8	5.1
PORFIDO GRAVOCORITICO	ARGILICO	140	133	126	119	5.60	5.9	6.2	6.4
	FILICO	212	281	191	189	5.60	5.9	6.2	6.4
IONMBRITA DEBIL	FRESCO	104	96	80	80	2.30	2.3	2.3	2.4
IONMBRITA INTERMEDIA		126	130	123	116	2.30	2.2	2.3	2.4
TUFO		69	56	53	60	3.35	3.3	3.5	3.6
INTEGRAR		262	287	272	257	3.35	3.3	3.5	3.6
AGLON		95	90	85	80	3.35	3.3	3.5	3.6
PORFIDO TEMPRANO FOLIS	FILICO	173	204	206	247				
Sin datos aparente									
Datos aparente									

VPP realizar a campo cercano, mínimo 50 m del proyecto de voladura

Tabla 1: Umbrales de F & VPP según litología y alteración

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO		
		Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

6. Personal y Responsabilidades:

PERSONAL	RESPONSABILIDADES
Gerente de Operaciones	• Aprobar procedimientos, estándares y documentos de gestión del área de operaciones. • Brindar los recursos necesarios para la implementación del presente estándar.
Superintendente de operaciones	• Vigilar el cumplimiento del presente estándar en las operaciones a cargo.
Jefe de Servicio/ Jefe de Operaciones	• Asegurar el cumplimiento del presente estándar en la operación a cargo. • Gestionar y solicitar los recursos necesarios para la implementación del presente estándar. • Coordinar con la supervisión el pleno cumplimiento del presente estándar. • Asegurar el cumplimiento de las "Reglas que salvan vidas" de Enaex Perú. • Asegurar que personal a cargo que participe en la actividad se encuentre capacitado y/o instruido, entienda y cumpla el presente estándar.
Jefe Asistencia Técnica	• Liderar implementación y revisar el presente estándar. • Difundir a los líderes del equipo EMTS el presente estándar para la correcta implementación en la operación asignada. • Asegurar el cumplimiento de las "Reglas que salvan vidas" de Enaex Perú.
Supervisor de voladura	• Brindar autorización de ingreso al proyecto de voladura previo a la realización de la actividad. • Brindar soporte en las coordinaciones para el empotramiento de los geófonos. • Firmar el IPERC continuo.
Representante Técnico	• Elaborar el presente estándar. • Instruir y verificar que todo el personal que participe en el

		ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
			Versión:	
			Fecha:	
		monitoreo de vibraciones en campo cercano conozca, entienda y cumpla el presente estándar.		
		• Supervisar y/o ejecutar el monitoreo de vibraciones en campo cercano. • Verificar el cumplimiento del presente estándar mediante OPT (Observación Planeada de Tarea) de acuerdo con lo establecido en el PCRO. • Identificar la necesidad de revisión y actualización del presente estándar. • Participar en la elaboración del IPERC continuo. • Generar propuestas de valor al cliente alineado al cumplimiento del presente estándar. • Elaborar el respectivo PETS para su operación a cargo en cumplimiento con el presente estándar.		
	Especialista de voladura	• Supervisar y/o ejecutar el monitoreo de voladuras mediante filmación con cámara y/o dron. • Participar en la elaboración del IPERC continuo.		
	Supervisor de asistencia técnica / blasting assistant	• Elaborar el presente estándar. • Instruir y verificar que todo el personal que participe en el monitoreo de vibraciones en campo cercano conozca, entienda y cumpla el presente estándar. • Supervisar y/o ejecutar el monitoreo de vibraciones en campo cercano. • Verificar el cumplimiento del presente estándar mediante OPT (Observación Planeada de Tarea) de acuerdo a lo establecido en el PCRO. • Identificar la necesidad de revisión y actualización del presente estándar. • Participar en la elaboración del IPERC continuo. • Elaborar el respectivo PETS para su operación a cargo en cumplimiento con el presente estándar.		
	Gerente HSECQ	• Revisar el presente estándar. • Proporcionar asesoría al área EMTS para actualizar el presente estándar.		
	Supervisor HSECQ/ Ingeniero de Seguridad	• Verificar que todo el personal asignado en su operación que realice el monitoreo de vibraciones en campo cercano conozca, entienda y cumpla el presente estándar. • Verificar que el PETS de su operación cumpla con el presente estándar.		
	Trainee de servicio	• Cumplir con el presente estándar. • Participar en la elaboración del IPERC continuo. • Ejecutar la actividad en base a las coordinaciones con el representante técnico/supervisor de asistencia técnica/blasting assistant. • Reportar/informar comportamientos y condiciones inseguras existentes antes o durante la ejecución de la actividad.		

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	
Personal que brinda soporte en piso: Operario de piso/Operador de camión fábrica/Operario de equipo auxiliar	• Ejecutar la actividad en base a las coordinaciones del supervisor de voladura Enaex con el representante técnico/supervisor de asistencia técnica/blasting assistant. • Reportar/informar comportamientos y condiciones inseguras existentes antes o durante la ejecución de la actividad.		

7. Registros, Controles y Documentación:

- GO-EMTS-F-005 "Inspección pre uso de Sismógrafo"

8. Revisión:

VERSION	FECHA	DESCRIPCION DEL CAMBIO	SECCIONES AFECTADAS
01	22/07/2025	Elaboración del documento	-

9. Anexos:

- ANEXO 01: GO-EMTS-F-005 "Inspección pre uso de Sismógrafo"
- ANEXO 02: "Señalización para equipos"

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

ANEXO 01: GO-EMTS-F-005 "Check list de Sismógrafo"

				Código:	
				Versión:	
				Fecha:	
INSPECCIÓN PRE USO DE SISMÓGRAFO					
Marca/Modelo del equipo:				Fecha:	
N° serie del equipo inspeccionado:				Hora:	
Usuario del equipo:					
#	PARTES DEL EQUIPO	SI	NO	N/A	OBSERVACIONES
1	Las baterías se encuentran completamente cargadas en buen estado, sin fugas o signos de daño.				
2	El geófono está en funcionamiento correcto, sin daños visibles en el cableado y con una señal estable.				
3	El micrófono está operativo, sin obstrucciones ni daños que afecten la captura del sonido.				
4	Los puertos de conexión están libres de suciedad, corrosión o daños que impidan una conexión adecuada.				
5	Los certificados de calibración del sismógrafo, geófono y micrófono se encuentran vigentes.				
#	ACCESORIOS DEL EQUIPO	SI	NO	N/A	OBSERVACIONES
1	El soporte para el geófono está en buen estado y se fija de forma segura al suelo, proporcionando estabilidad al geófono.				
2	La caja protectora está intacta y cierra adecuadamente, asegurando protección durante el transporte y almacenamiento.				
#	CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA ANTES DE UTILIZARLO	SI	NO	N/A	OBSERVACIONES
1	La configuración del trigger es adecuada para la actividad de monitoreo, con sensibilidad y parámetros ajustados según lo necesario.				
2	Todos los sensores han pasado el "sensor check" (Pass).				
INSPECCIÓN PRE USO REALIZADO POR:		INSPECCIÓN PRE USO VALIDADO POR:		APRUEBA QUE LA INSPECCIÓN PRE USO FUE REALIZADO ANTES DE UTILIZAR LOS EQUIPOS	
Nombre, cargo y firma		Nombre, cargo y firma		Nombre, cargo y firma	

	ESTÁNDAR MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO	Código:	
		Versión:	
		Fecha:	

ANEXO 02: "Señalización para equipos"



Nota: Para señalar los equipos, se deberá colocar como mínimo 3 conos de seguridad color anaranjado.