

**ANÁLISIS DE LA AFECTACIÓN POR VIBRACIONES DE LA CANTERA “LA
ROCA” EN ZONAS CERCANAS A POBLACIONES**

**JUAN DAVID BARBOSA MARTÍNEZ
CÓDIGO 505631
ANDRÉS ALFONSO VALLEJO RODRÍGUEZ
CÓDIGO 505672**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2019**

**ANÁLISIS DE LA AFECTACIÓN POR VIBRACIONES DE LA CANTERA “LA
ROCA” EN ZONAS CERCANAS A POBLACIONES**

**JUAN DAVID BARBOSA MARTÍNEZ
CÓDIGO 505631
ANDRÉS ALFONSO VALLEJO RODRÍGUEZ
CÓDIGO 505672**

**Trabajo de grado para adoptar el título de
Ingeniero Civil**

**Docente Asesor:
Lina Patricia Murcia Cano
Ingeniera civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá, 23, mayo de 2019

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, la responsabilidad y la sabiduría de poder culminar esta carrera tan importante. A mis padres por el apoyo incondicional moral y afectivo, por enseñarme a nunca desistir y siempre salir adelante en todas las cosas que me propongo, a mis hermanas por estar en cada paso que doy hacia un futuro mejor.

A la ingeniera Lina Patricia Murcia, por compartir su conocimiento y experiencia durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos que siempre me han apoyado en los malos y buenos momentos en este proceso universitario.

Juan David Barbosa

A Dios por ser nuestro guía y darnos las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo.

A mis padres y a mi hermano por estar siempre presentes y ayudando en cada momento.

A la ingeniera Lina Patricia Murcia por brindarnos su conocimiento y encaminarnos en el desarrollo de este trabajo.

Andrés Vallejo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos.	19
1.4 JUSTIFICACIÓN	19
1.5 DELIMITACIÓN	20
1.5.1 Espacio	20
1.5.2 Tiempo	20
1.5.3 Contenido	20
1.5.4 Alcance	20
1.6 MARCO DE REFERENCIA	21
1.6.1 Marco conceptual.	21
1.6.1.1 Ondas Sísmicas	21
1.6.1.2 Parámetros de las ondas	21
1.6.1.3 Parámetros de vibración	22
1.6.1.4 Instrumentos para monitoriar las vibraciones	23
1.6.1.5 Sismografo	24
1.6.1.6 Geofonos	27
1.6.1.7 Velocidad típica de la partícula.	28
1.6.1.8 Modelo de campo lejano	28
1.6.1.9 Estimación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica	31
1.6.2 Marco teórico.	34
1.6.2.1 La naturaleza cíclica de las vibraciones	34
1.6.2.3 Amplitud de las Vibraciones	36
1.6.2.4 Duración de las Vibraciones	37
1.6.2.5 Velocidad de propagación	38
1.6.2.6 Tipos de ondas de vibraciones	39
1.6.2.7 Onda longitudinal – onda de comprensión (p).	39
1.6.2.8 Onda transversal (s).	39
1.6.2.9 Onda de superficie	40
1.6.2.10 Unidades de vibraciones	40
1.6.2.11 Velocidad de las vibraciones	40
1.6.2.12 Vibraciones y esfuerzos	41
1.6.3 Marco legal	42
1.6.3.1 Normas y criterios de prevención de vibraciones del terreno	42
1.6.3.2 Norma Americana USBM RI 8507 (OSMRE).	43
1.6.3.3 Norma Alemana DIN 4150 (2001, efectos sobre estructuras)	43

1.6.4 Estado del arte.	45
1.6.4.1 Efecto de la onda aérea en los cristales por voladura de corte y demolición en una edificación	45
1.6.4.2 Guía de estudio de manejo de vibraciones para la especialización tecnológica en explosivos	45
1.7 METODOLOGIA	45
1.7.1 Etapa 1	46
1.7.2 Etapa 2	46
1.7.3 Etapa 3	47
2. DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS CON VOLADURA	48
2.1 NORMATIVIDAD EN VOLADURAS	48
2.1.1 Norma OSM – Estados Unidos	48
2.1.2 Norma Alemana DIN 4150 versión 1999	48
2.2 PARAMETROS PARA EL ANALISIS DE VIBRACIONES	49
2.2.1 Monitoreo de vibraciones causadas por voladura (41-120-1-PB)	49
2.2.2 importancia de la medición de las vibraciones	49
2.2.3 Impedancia	50
2.2.4 Características de las vibraciones	50
2.2.5 Generación de vibraciones	51
2.2.6 Medición de las vibraciones	51
2.2.7 Efectos de las Vibraciones Sobre los Macizos Rocosos	51
2.2.8 Emulind y detonadores	52
2.2.9 Carga operante	52
2.2.10 Carga por tiempo de retardo	52
2.2.11 Geología regional y local	53
2.2.12 Geomecánica	54
2.2.13 Geomorfología	54
2.2.14 Características de la composición mineralógica	54
3. TRABAJO DE CAMPO	56
4. RESULTADOS OBTENIDOS	58
4.1 ONDAS TRANSVERSALES	58
4.2 ONDAS VERTICALES	58
4.3 ONDAS LONGITUDINALES	58
4.4 NIVEL PRESION SONORA	59
4.5 CUADRO COMPARATIVO	59
5. ANALISIS DE RESULTADOS	61
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFIA	65

LISTA DE FIGURAS

	Pàg.
Figura 1. Movimiento de las Ondas y sus Parámetros – Manual de Kanya	22
Figura 2. Sismógrafo	24
Figura 3. Sismógrafo	25
Figura 4. Sismógrafo	26
Figura 5. Fotografía de un Geófono	27
Figura 6. Ciclo de Esfuerzo Sobre la Roca, Comprensión Seguida por Tensión – Centro de Innovación Tecnología de Explosivos de ENAEX (CINTEX)	34
Figura 7. Presión y Relajación no Simétrica a un Elemento de Roca – Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)	35
Ecuación 8. Movimiento de una Partícula por el Paso de una Onda	35
Figura 9. Imagen de frecuencia de las vibraciones – Blastware III, Instantel – operador manual	36
Figura 10. Velocidad de la partícula vs tiempo en segundos	37
Figura 11. Imagen de la velocidad de propagación de las ondas – Blastware III, Instantel - operador manual	38
Figura 12. Espectro de la norma alemana fuente DIN, Norma alemana “Structural Vibration in Buildings”	44
Figura 13. Composición Mineral de las Muestras a Diferentes Profundidades	55
Figura 14. Ubicación del Banco de Voladura y Carga Explosiva en la Cantera La Roca, Municipio de Mondoñedo, Cundinamarca	56
Figura 15. Banco de Voladura Intercalación de Areniscas con Limo Arenitas Formación Plaeners	56
Figura 16. Sismógrafo Instantel Junto con el Geófono Triaxial (Interno) y el Micrófono de Alta Sensibilidad	57

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Variabilidad en los parámetros del modelo de vibración. Devine, para diferentes minas y macizos rocosos APS Blastrocnics	31
Cuadro 2. Estimación de la Velocidad de Partícula Crítica Teórica de Distintos Tipos de Roca – Monitoreo y Modelamiento de Vibración para la Evaluación	33
Cuadro 3. Normas Internacionales para el Control de Vibraciones	42
Cuadro 4. Valores Admitidos por la Norma Americana	43
Cuadro 5. Valores Admitidos por la Norma Alemana DIN 4150 Para daños en Edificios	44
Cuadro 6. Rangos Admisibles, Factor de Distancia Escalada por varias Distancias	48
Cuadro 7. Valores Admitidos por la Norma Alemana para Daños en Edificios	49
Cuadro 8. Ondas Transversales, pruebas Mondoñedo	58
Cuadro 9. Ondas Verticales, Pruebas Mondoñedo	58
Cuadro 10. Ondas Longitudinales, Pruebas Mondoñedo	59
Cuadro 11. Ondas Frecuencia Sonora, Pruebas Mondoñedo	59
Cuadro 12. Comparativo de Valores a Analizar	59

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Movimiento Armónico Simple	21
Ecuación 2. Relación Periodo y Frecuencia	22
Ecuación 3. Longitud de la Onda	22
Ecuación 4. Velocidad Pico de la Partícula	29
Ecuación 5. Ecuación de Divene	29
Ecuación 6. Relación entre la velocidad de la partícula y la deformación inducida	32
Ecuación 7. Velocidad máxima o critica para las rocas	32
Ecuación 8. Velocidad de onda – Centro de innovación tecnológica de explosivos ENAEX (CINTEX)	41
Ecuación 9. Velocidad de la onda - Centro de innovación tecnológica de explosivos ENAEX (CINTEX)	41
Ecuación 10. Velocidad de la onda - Centro de innovación tecnológica de explosivos de ENAEX (CINTEX)	41
Ecuación 11. Distancia para el cálculo de distancia de la voladura al punto de monitoreo	48
Ecuación 12. Velocidad de la onda según el tipo de roca	50
Ecuación 13. Distancia mínima requerida	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Vibraciones Mondoñedo	69

GLOSARIO

VOLADURA: la voladura de roca es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

DETONADOR: dispositivo que permite iniciar altos explosivos, de acuerdo con un tiempo de retardo que contiene en el interior del “casquillo”. Son considerados explosivos, ya que en su interior tienen dos (primario y secundario) de alta sensibilidad.

ONDA: en física, una onda es una propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, que se propaga a través del espacio transportando energía. El medio perturbado puede ser de naturaleza diversa como aire, agua, un trozo de metal o el vacío.

SISMÓGRAFO: un sismógrafo es un instrumento usado para medir movimientos de la Tierra y consiste de un sensor que detecta el movimiento del terreno, llamado sismómetro que está conectado a un sistema de registro. Esta ficha técnica proporciona una visión general de los componentes básicos de un sismómetro y principios de las ciencias físicas detrás de su funcionamiento.

GEÓFONO: el servicio de geófono, es un sistema que envía ondas sonoras a una superficie, esta revota y las recibe un receptor, que las interpreta y las convierte en una imagen digital de la superficie, los imperfechos de las ondas se muestran en una señal digital inusual en el monitor, estas imperfecciones en el campo se traducen en fugas de agua, que por más pequeña que sea el geófono la reconoce.

VIBRACIÓN: la vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia.

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta los análisis de la afectación por vibraciones de la cantera “La Roca” en zonas cercanas a poblaciones, con el objetivo de identificar los parámetros que influyen para el control de las vibraciones.

Para lo anterior, se realizaron varias visitas de campo a la cantera La Roca en la cual se realizaron las voladuras, obteniendo datos exactos por medio de tres equipos los cuales fueron alquilados para estas pruebas. Los equipos utilizados fueron un sismógrafo, un geófono y un micrófono, como resultado se obtuvieron datos en tres sentidos, vertical, horizontal y transversal; a partir de los datos arrojados por estos equipos se investigaron los parámetros para analizar las vibraciones resultantes de las voladuras dentro de la cantera.

Además de esto se consultó en las normas de diferentes países y en la norma colombiana los parámetros y límites en los cuales se pueden determinar si una voladura se encuentra dentro de los parámetros de la norma vigente.

Este análisis también ayuda a determinar que tanto explosivo se necesita para realizar una voladura controlada y con los fines esperados sin tener afectaciones a predios cercanos o afectando zonas de macizo rocoso las cuales no se quieren tocar.

Después de obtener los resultados de estas pruebas se comenzó el análisis de los resultados identificando el alcance de cada dato, sus alcances de afectación hacia la zona que perimetralmente lo rodea.

Finalmente se entregan resultados obtenidos de los análisis que se le realizaron a cada voladura con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

Palabras claves: Voladura, Detonador, Onda Sismógrafo, Geófono Vibración.

ABSTRACT

This research work presents the analysis of the vibration affectation of the quarry "the rock" in areas near populations, with the aim of identifying the parameters that influence the control of vibrations.

For the above, several field visits were made to the La Roca quarry in which the blasting operations were carried out, obtaining exact data by means of three equipment which were rented for these tests. The equipment used was a seismograph, a geophone and a microphone, as a result data were obtained in three directions, vertical, horizontal and transverse; From the data thrown by these teams the parameters were analyzed to analyze the vibrations resulting from the blasting inside the quarry.

In addition to this, the standards and parameters of different countries and the Colombian standard were consulted in which it is possible to determine if a blasting is within the parameters of the current norm.

This analysis also helps determine how much explosive is needed to perform a controlled blasting and with the expected purposes without affecting nearby properties or affecting areas of rock mass that do not want to touch.

After obtaining the results of these tests, the analysis of the results was begun, identifying the scope of each data, its scope of affectation towards the zone that perimeter surrounds it.

Finally, results obtained from the analyzes that were made to each blast are delivered with their respective conclusions and recommendations.

Keywords: Blasting, Detonator, Seismograph Wave, Vibration Geophone.

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones que tienen una gran influencia la cual debemos ponerle mucha atención en la Ingeniería Civil son las causadas por terremotos, por obvias razones: su enorme potencial de daño. Pero hay otro tipo de vibraciones, aquellas generadas por el ser humano en el proceso mismo de la Ingeniería Civil como las voladuras que son de gran importancia porque también pueden incidir en la integridad de las estructuras y causar sensaciones molestas. Su conocimiento, evaluación y control es creciente, a medida que las fuentes de estas vibraciones aumentan presencia y potencia, aumentando de esa manera el potencial de daños, a medida que aumenta la percepción y el control de factores ambientales.

La voladura de rocas fue considerada como arte, basada en la experiencia y pericia de los operadores. Actualmente cuando las exigencias ambientales son cada vez más restrictivas, se necesita emplear procedimientos científicos y fundamentos basados en conceptos de la Dinámica de Rocas, aspecto que permite conocer mejor la acción de los explosivos en los macizos rocosos, a cargo de los mecanismos de rotura y respectivas propiedades geomecánicas.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El monitoreo de vibraciones fue constante en la zona de cantera “La Roca”, el cual usando sismógrafos se captaban resultados de las velocidades pico partículas de las poblaciones, como Mondoñedo, Mosquera, Oficinas de la planta de Producción y estructuras cercanas al punto de disparo, el cual exigía:

Alcanzar un correcto grado de fragmentación de la roca, de tal modo que se obtenga un costo mínimo combinado de las operaciones de carguío, transporte, chancado y molienda de la roca.

“Minimizar el daño al macizo rocoso en su entorno permitiendo una operación sin riesgos. Estos registros permitieron diseñar la zona explotada y conocer el comportamiento del macizo rocoso, a través del modelamiento y deformación dinámica del macizo rocoso influenciado por el esfuerzo representado por las vibraciones, lo cual posible establecer un criterio de daño basado en parámetros geo mecánicos”¹.

En la mayoría de los países desarrollados se ha diseñado normas aplicadas a su realidad (Tipos de Estructuras), las cuales les brinda la posibilidad a las unidades mineras ubicadas en esos países, de tener pautas para saber si sus voladuras realizadas en sus aéreas pueden generar daño a las estructuras cercanas. De esta forma estos estados pueden regular las vibraciones generadas proponiendo criterios de limitación a las minas y canteras.

En estos países, los límites generados equivalen a patrones de orden ambiental, los cuales son respetados por las empresas mineras. Los países que no han generado estos límites permisibles para los tipos de estructuras ubicadas en su terreno mayormente utilizan las normas realizadas por estos países, lo cual debemos anotar pueden no aplicarse adecuadamente para los diferentes tipos de estructuras que se tienen. Por lo que se recomienda que cada país genere sus propias leyes con respecto a estos temas para evitar los problemas existentes entre las diferentes realidades que hay entre las estructuras de los países desarrollados vs las estructuras de los países en vías de desarrollo.

¹ PAMPACATA HOLGADO, Lucio Raymundo. Análisis de Vibraciones Inducidos por la Voladura de Rocas en Cantera Atocongo en Zonas Cercanas a poblaciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2015. p. 20

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la necesidad de obtener la materia prima para la construcción de obras civiles en las cuales sea necesario realizar la estabilización o el mejoramiento del terreno en el cual estamos trabajando es necesario utilizar material granular llamado "Rajón o piedra partida", utilizando este material garantizamos mayor resistencia en la subrasante. Este material al ser tan importante para la ejecución de obras como vías, instalaciones de tubería, y mejoramiento del suelo para cimentaciones de edificaciones de gran tamaño, es necesario saber de dónde se extrae este material. El rajón o piedra partida se extrae de las montañas o macizos rocosos las cuales se convierten en canteras, que son las encargadas de organizar la extracción del material procesarlo y en algunos casos transportarlo hasta el lugar donde se está ejecutando la obra. En este caso se toma como referencia la cantera La Roca ubicada en el municipio de Mondoñedo.

Comenzando a estudiar y analizar el proceso de extracción y procesamiento en forma masiva de este material. Tradicionalmente se utilizaba maquinaria de fiabilidad que se caracteriza por un procedimiento de fracturación el macizo rocoso con maquinaria pesada como retroexcavadoras con punta roto martillo y línea húmeda con el fin de extraer grandes pedazos de roca, para posteriormente ser procesada en trituradoras para obtener el material requerido, donde en algunos casos simplemente la misma máquina retroexcavadora termina de picar la roca obteniendo pedazos de menor tamaño. Este proceso se utiliza en algunas canteras para la extracción de material, pero este proceso es un poco demorado demandando más tiempo y gastando más presupuesto en horas máquina y sueldo del operador para producir toneladas de rajón lo cual no es económicamente factible.

Actualmente se está utilizando explosivos y agentes de voladura, por medio de un diseño basado en la perforación de macizos rocosos, con el fin de fracturarlos y extraerlos de formas más rápida y efectiva, donde el volumen volado genera mayores rendimientos en la producción pétreo. De esta manera debe tenerse en cuenta el impacto que genera al medio ambiente por ruido, a las edificaciones cercanas por vibraciones y al terreno de la zona por las ondas provocadas por las voladuras en el macizo fomentando posibles deslizamientos y afectaciones a viviendas que se encuentran en veredas cercanas a las canteras.

Para el análisis de todas las anteriores condiciones generadas por las detonaciones en una voladura, se busca comparar con diferentes criterios de daño postulados a la fecha por medio de normatividades internacionales, con el fin de "obtener

condiciones para minimizar, mitigar, comparar, evaluar y/o evitar los daños producidos por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas”².

El trabajo de investigación cuenta con recursos accesibles esto debido a la proximidad del campo de estudio, además de los recursos humanos (colaboradores y especialistas en el tema) y materiales (sismógrafos, micrófonos, explosivos y detonadores) que determinarán en última instancia los alcances de la investigación.

¿Cómo se pueden analizar las vibraciones generadas por una detonación cuando se realiza un trabajo con explosivos en ingeniería civil?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Realizar un análisis a una detonación con explosivos por medio de instrumentación, con el fin de identificar los parámetros que influyen para el control de las vibraciones.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Identificar la normatividad existente, vigente y aplicable para determinar los tipos de daños causados por vibraciones generadas por voladuras con explosivos en poblaciones cercanas a canteras.
- Evaluar los parámetros, requerimientos y determinaciones necesarias para realizar un seguimiento a las voladuras, por medio de las vibraciones generadas tanto en el macizo como en la contaminación ambiental por ruido.
- Realizar pruebas de campo con detonaciones e instrumentación idónea para análisis de vibraciones, con el fin de evaluar el trabajo de una onda expansiva para la cantera la Roca.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación justifica la necesidad de la aplicación de diferentes modelos matemáticos y un análisis de vibraciones, ya que en dicha zona a explotar se encontraba cercanas a las poblaciones y ante la necesidad de extraer la materia prima denominada “Piedra partida o rajón”, es necesario realizar un estudio detallado para minimizar el riesgo de afectar sus construcciones accidentes personales, pérdida de materiales, equipo y daño a estructuras, gran parte de estos problemas que acarrear a las vibraciones, donde esto puede desencadenar en

² BENJUMEA CADAVID, Juan Manuel. Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías. Modalidad trabajo de grado, 2003. p .19

implicaciones judiciales, legales y económicos, que podrían repercutir con la empresa y asumir responsabilidades con terceros.

Durante y posteriormente a dicho trabajo de investigación, se podrían generar una serie de dificultades, debido a la proximidad de las poblaciones, además el cálculo de los resultados debido a la calibración del peso de la carga operante en una voladura, lo cual debe evaluarse en el transcurso del desarrollo.

1.5 DELIMITACIÓN

1.5.1 Espacio. La mayor limitación que se encontró a lo largo de la ejecución de las pruebas, fue la disponibilidad de los equipos, (geófono, sismógrafo, micrófono). Ya que para los días programados de ejecutar las pruebas de voladuras dentro de la cantera el contratista de los equipos no tenía la disponibilidad. Y cuando se tenía el espacio libre para trabajar con los equipos en la cantera no se podía ingresar.

1.5.2 Tiempo. Para realizar cada una de las pruebas, es necesario contar un tiempo estimado para cumplir con la normatividad. Esta indica la cantidad de dinamita o material explosivo que se debe utilizar la profundidad de la perforación en la que se va realizar la voladura. Teniendo un tiempo estimado de reacción de la carga explosiva antes de realizar la prueba.

1.5.3 Contenido. Para la propuesta es necesario dejar claro que la limitación principal fue encontrar la carga explosiva la cual tuvo que ser manipulada y transportada por el personal autorizado y especializado en este tema. Lo anterior se realizó con la intención de cumplir con las indicaciones expuestas por un ente normativo vigente del país.

1.5.4 Alcance. Según lo planteado dentro de la investigación se estipuló un trabajo de cinco (05) meses, a partir de la aceptación de la investigación, donde se realizaron visitas a zonas dentro de la cantera La Roca donde podía realizar las pruebas de detonación. Estos estudios son netamente académicos donde se registran resultados y posibles sugerencias para el análisis de las vibraciones pro voladuras dentro de la normativa.

Este proyecto busca como resultado conocer y desarrollar un análisis completo y útil, desarrollado aún en Colombia y así determinar los límites de una manera más precisa.

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1 Marco conceptual.

1.1.2.1 Ondas Sísmicas. Las ondas sísmicas son “ondas que viajan a través de la tierra. Estas ondas representan la transmisión de la energía a través de la capa sólida de la tierra. Otros tipos de transmisión de energía son las ondas sonoras, las ondas de luz y las ondas de radio. Los terremotos generan ondas sísmicas. La ciencia que estudia los terremotos es la sismología; el nombre se deriva de la palabra griega seísmos que significa agitar”³. Además de las ondas sísmicas generadas naturalmente, existen muchas fuentes de ondas sísmicas usadas por el hombre. Cuando estas ondas sísmicas creadas por el hombre son sensibles, esto es, que se pueden sentir, se les nombra "vibración".

1.6.1.2 Parámetros de las ondas. Las propiedades fundamentales que describen el movimiento de las ondas se denominan parámetros de las ondas. Estos se miden y cuantifican cuando se analiza el movimiento de las ondas o vibración. Considérese el movimiento armónico simple visto en la Figura 1 y representado por la ecuación:

Ecuación 1. Movimiento Armónico Simple

$$y = A \sin(\omega t)$$

Dónde:

y = Desplazamiento en cualquier tiempo t, medido desde la línea cero o eje del tiempo

t = tiempo

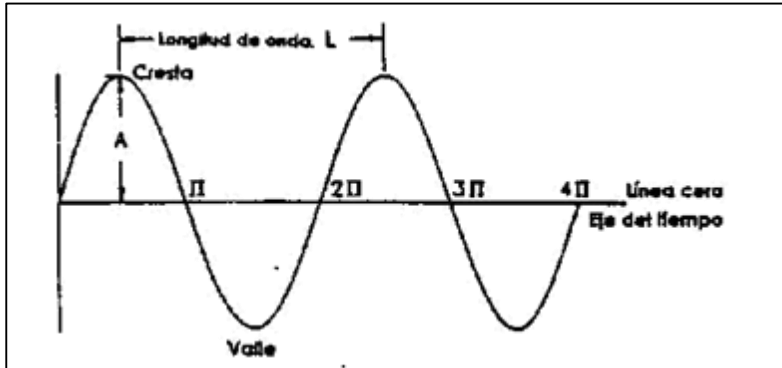
A = Amplitud o valor máximo de y $\omega = 2\pi f$

T = Periodo o tiempo para una oscilación completa o ciclo

f = Frecuencia, el número de vibraciones u oscilaciones que ocurren en un segundo, conocido como Hertz (Hz).

³ GUTIÉRREZ, Valeria. Vibración y Ondas Sísmicas [en línea]. Bogotá: Scribd [citado 10 marzo, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/414200851/225-10-Vibracion-y-Ondas-Sismicas>>

Figura 1. Movimiento de las Ondas y sus Parámetros – Manual de Kanya



Fuente. GUTIÉRREZ, Valeria. Vibración y Ondas Sísmicas [en línea]. Bogotá: Scribd [citado 10 marzo, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/414200851/225-10-Vibracion-y-Ondas-Sismicas>>

El periodo y la frecuencia son recíprocos, por lo tanto:

Ecuación 2. Relación Periodo y Frecuencia

$$f = \frac{1}{T} \text{ ó } t = \frac{1}{f}$$

La longitud de la onda L es la distancia de cresta a cresta o de valle. Se mide en metros y es igual al periodo de la onda multiplicado por la velocidad de propagación v .

Ecuación 3. Longitud de la Onda

$$L = v T$$

1.6.1.3 Parámetros de vibración. Ya se han discutido los parámetros de las ondas. “Los parámetros de la vibración son las propiedades fundamentales del movimiento que se utilizan para describir el carácter del movimiento del suelo”⁴. Estos son: desplazamiento, velocidad, aceleración y frecuencia. Al tiempo que una onda sísmica pasa a través de la roca, las partículas de la roca vibran, o se mueven de su punto de reposo. Esto es desplazamiento. Cuando la partícula es desplazada y se mueve, tiene entonces una velocidad y puede ejercer una fuerza, que es proporcional a la aceleración de la partícula. Estos parámetros fundamentales de la vibración se definen a continuación:

➤ **Desplazamiento:** Es la distancia que una partícula del terreno se mueve desde su punto de reposo. Se mide en milímetros. (Desplazamiento = $v / 2\pi f$)

⁴ BENITO, Belén y CABAÑAS, Luis. Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica [en línea]. Madrid: Asociación Red Latin Geo [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: http://redgeomatica.rediris.es/sismo/pdf/pub_015.pdf>

➤ **Velocidad:** La rapidez con la que una partícula se mueve cuando deja su punto de reposo. Empieza en cero, se eleva a un máximo y regresa a cero. La velocidad de la partícula se mide en milímetros por segundo.

➤ **Aceleración:** Es el rango al cual la velocidad de la partícula cambia. La fuerza ejercida por la partícula que vibra es proporcional a la aceleración de la partícula. La aceleración se mide en fracciones de “g”, la aceleración de la fuerza de gravedad. ($g = 2\pi fV/9810$)

➤ **Frecuencia:** El número de vibraciones u oscilaciones que ocurren en un segundo, designados como Hertz (Hz).

“Los sismógrafos para vibración normalmente miden la velocidad de partícula ya que las normas para determinar daños se basan en la velocidad de partícula. Existen, sin embargo, sismógrafos de desplazamiento y sismógrafos de aceleración”⁵.

“Los sismógrafos de velocidad pueden ser equipados también para integrar o diferenciar electrónicamente las señales de velocidad y producir un registro de desplazamiento o de aceleración”⁶.

1.6.1.4 Instrumentos para monitoriar las vibraciones. La instrumentación es vital y su propósito es localizar transductores en puntos estratégicos al objeto de obtener una base de información consistente y representativa.

Para ello pasa por conocer algunos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura a su alrededor. Estas son de gran importancia, puesto que transportan la energía vibracional, por lo tanto, debemos tener presente sus relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto, son importantes su medición en un campo lejano, al contrario de las ondas P y S que son más significativas cerca de la voladura⁷.

Por esto los registros de las vibraciones producidas por voladuras son almacenados en los sismógrafos, ver ilustración 2, los cuales graban las amplitudes y duración de los movimientos de la tierra, producto de dichas voladuras, usando los siguientes componentes:

⁵ ORTIZ OLIVARES, Arturo Elías. Monitoreo de vibraciones, ondas acústicas y determinación de la onda de sopro por efecto de voladura, en el túnel de aducción de la central hidroeléctrica Chaglla. departamento de Huánuco. Arequipa: universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Facultad de Geológica, Geofísica y Minas. Modalidad trabajo de grado, 2016. p. 20

⁶ CONTRERAS, J. Manual de perforación y voladura de rocas. Caracas: Escuela de geología, minas y geofísica, 2001. p. 45

⁷ TOVAR LLOCCLLA, Franklin Anderson. Aplicación del principio de la velocidad pico partícula (VPP), para minimizar el daño al macizo rocoso-utilizando Retardos- Veta Lourdes consorcio minero horizonte - La Libertad. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2015. p. 33

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.
- Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria.
- Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis (véase la Figura

Figura 2. Sismógrafo



Fuente. Los Autores

1.6.1.5 Sismografo. Un sismógrafo es un instrumento usado para medir movimientos de la Tierra. Se basa en el principio de inercia de los cuerpos, como sabemos este principio nos dice que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad (véase la Figura 3).

Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo.

“El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo, cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo. Posteriormente cuando la masa sale del reposo, tiende a oscilar. Sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla”⁸. En la figura de la derecha se ha representado un aparato en el que el amortiguamiento se logra por medio de una lámina sumergida en un líquido (comúnmente aceite).

⁸ ESPÍNDOLA, J. M. Terremotos y ondas sísmicas. Bogotá: UNAM, 1994. p. 18

Este era el método utilizado en los aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa. Si se sujeta un lápiz a la masa suspendida, para que pueda inscribir en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se podrá registrar una componente del movimiento del suelo. El instrumento hasta aquí descrito detecta la componente vertical del movimiento del suelo y se conoce como sismógrafo vertical. El papel donde traza el movimiento se conoce como sismograma⁹.

Figura 3. Sismógrafo



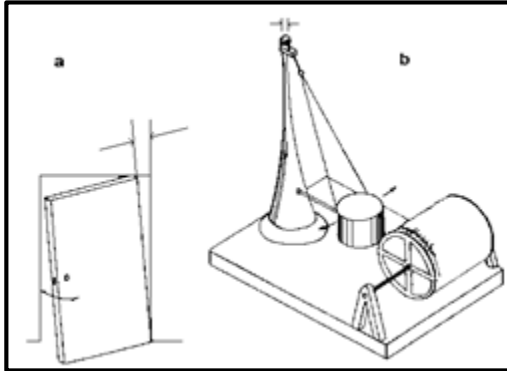
Fuente. Los Autores

Como el movimiento del suelo tiene lugar en las tres dimensiones del espacio, los movimientos del suelo también tienen dos componentes horizontales.

Para medir este movimiento se requiere de péndulos horizontales que oscilan como una puerta, aunque con el eje ligeramente inclinado para lograr un punto de estabilidad. Uno de estos sismógrafos horizontales se orienta en la dirección N-S y otro en la E-O. Un ejemplo de sismógrafo horizontal es el que se muestra en la Figura 4.

⁹ UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. El sismógrafo [en línea]. Valladolid: La Universidad [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Sismografo/Sismografo.html>

Figura 4. Sismógrafo



Fuente. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. El sismógrafo [en línea]. Valladolid: La Universidad [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Sismografo/Sismografo.html>

Además del péndulo y el sistema de amortiguamiento “los sismógrafos emplean un sistema de amplificación para producir registros que puedan ser analizados a simple vista. Antiguamente la amplificación se realizaba por medio de un sistema mecánico, en la actualidad la amplificación se realiza electrónicamente”¹⁰.

Los sismómetros actuales son sumamente sensibles a los movimientos de tierra; por ejemplo, movimientos tan pequeños como 1/10,000,000 de centésima (distancias casi tan pequeñas como espacios atómicos) pueden ser detectados en lugares sumamente quietos.

Los sismómetros comúnmente registran movimientos de muchas y diferentes fuentes naturales; como también aquellas causadas por el hombre; por ejemplo, movimientos de los árboles a causa del viento, olas golpeando las playas, y ruidos de coches y grandes camiones¹¹.

El movimiento del suelo con respecto a la masa se efectuaba en los primeros instrumentos por medio de una pluma o estilete que inscribía sobre un tambor giratorio.

Después se introdujo la inscripción sobre película o papel fotográfico de un haz de luz reflejado en la masa o sistema amplificador del sismógrafo. “Actualmente existen sismógrafos que detectan el movimiento de la masa electrónicamente y lo digitalizan para ser almacenado en cinta magnética u otros medios de almacenamiento digital”¹².

¹⁰ ESPÍNDOLA, Op. cit., p. 19

¹¹ INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. Como Trabaja un Sismógrafo? [en línea]. New York: National Science Foundation [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.iris.edu/hq/files/publications/brochures_onepagers/doc/SP_1pager_7.pdf>

¹² ESPÍNDOLA, Op. cit., p. 20

1.6.1.6 Geofonos. Los geófonos entregan una medición directa de la velocidad y consisten por lo general en un sistema de bobina móvil soportada por resorte, y un imán fijo. Al contrario del acelerómetro, el geófono opera sobre su frecuencia natural. Cuando se miden frecuencias muy bajas, la salida se ve influenciada por sus características de respuesta (véase la Figura 5).

Figura 5. Fotografía de un Geófono



Fuente. Los Autores

El geófono no es tan robusto como el acelerómetro, por lo cual podría eventualmente dañarse si es mal manipulado. Los geófonos son de bajo costo y su señal de salida es simple de analizar, no requieren fuente de poder adicional y normalmente no es necesario pre amplificar su señal, antes de su grabación (véase la Figura 5).

Cuando los transductores a instalar no son recuperables, es preferible utilizar geófonos sensibles a la velocidad. Poco es lo que se puede hacer para mejorar el rango de respuesta dinámica de éstos, por lo tanto, debe tenerse el cuidado de no usarlos donde sus especificaciones probablemente puedan ser excedidas.

En primera instancia el equipo de vibraciones debe ser tal que los geófonos asociados a la medición sean los adecuados para medir el nivel de vibraciones esperado, es decir si su sensibilidad es la adecuada. Para tal efecto se debe conocer los niveles máximos esperados en la medición, tanto en frecuencia como velocidad, para determinar si los geófonos son aptos para ello¹³.

➤ **Características Generales:**

- ✓ Su unidad de medida es el Volt/mm/s
- ✓ Entregan una medición directa de la velocidad
- ✓ Miden bien en el rango de 1mm/s hasta 1200mm/s
- ✓ Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz
- ✓ La sensibilidad varía entre 0.003Volts/[mm/s] a 0.041Volts/[mm/s] Bajo costo (aprox. US\$ 100).

¹³ ORTIZ OLIVARES, Op. cit., p. 30

1.6.1.7 Velocidad típica de la partícula.

➤ **Análisis de vibraciones producidas por voladura.** “La señal de vibraciones producida por una voladura consiste en un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo. El primer paso en el análisis de la señal es determinar que carga representa cada paquete de vibración. De la capacidad para realizar esto depende determinar la diferencia entre la detonación real y la secuencia diseñada”¹⁴. Con el Monitoreo y Análisis de las Ondas de Vibraciones es posible determinar y calcular lo siguiente:

- ✓Tiempo real de detonación de una carga o cargas (Dispersión)
- ✓Velocidad de partículas de cada carga en la voladura.
- ✓Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.

Detonación instantánea de cargas; detonación de cargas por simpatía, acoplamiento por insuficiente tiempo entre retardo de los taladros:

- ✓Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares.
- ✓Diferencia entre Cargas Explosiva de Producción y Contorno.
- ✓Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.
- ✓Análisis de Frecuencia, etc.

“La mayoría de los registros emitidos por los sismógrafos actuales, graban los efectos de las vibraciones en unidades de velocidad de partícula, aunque este parámetro es usado desde hace muchas décadas es aún un concepto de difícil entendimiento. Otra manera de cuantificar la vibración en un terreno es el desplazamiento y la aceleración de la partícula. Esta última es raramente usada, pero juega un papel importante en la evaluación de los efectos de las vibraciones”¹⁵.

1.6.1.8 Modelo de campo lejano. Como se ha mencionado, los modelos de vibraciones que permitan predecir el nivel de vibraciones se pueden determinar a partir de mediciones de terreno, de estas mediciones se deben obtener principalmente tres antecedentes, a saber:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo.
- La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones, y
- La distancia a de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

¹⁴ ZAPATA PORRAS. Jonathan Marcial. Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas en la Compañía de Minas Caudalosa S.A. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2012. p. 19

¹⁵ PAMPACATA HOLGADO, Op. cit., p. 32

➤ Modelo General

Ecuación 4. Velocidad Pico de la Partícula

$$PPV = K * D^\alpha$$

Dónde:

PPV = Velocidad Pico de Partícula (mm/s)

D = Distancia Escalar

K = Factor de Velocidad

α = Factor de Decaimiento.

Con el modelo de Devine, se asume que el término de pérdida friccional ha sido aproximado por una ecuación poderosa e incluida en el término α de una dispersión geométrica.

El término “**D**” o **distancia escalar**, da cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de explosivo en kg. En relación con esta formulación matemática existen varios criterios derivados de los cuales se emplea comúnmente el de **DEVINE**.

Ecuación 5. Ecuación de Devine

$$V = K * \left[\frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-\alpha}$$

En la expresión de la ecuación de Devine, “**W**” corresponde a la carga detonada en forma instantánea en kilogramos y “**d**” la distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula. Teóricamente, este criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración, para el campo lejano (aproximadamente $d > 3$ largo de la carga), generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras a tajo abierto, esto es, columnas explosivas cilíndricas, donde se tiene por análisis adimensional que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga.

Claramente el parámetro α en la ecuación de Devine está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo, el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo. Los factores que controlan la transferencia de la energía del explosivo desde el taladro a la roca son la densidad y la VOD del explosivo, producto que representa la Característica de Impedancia, Z^{16} .

¹⁶ ZAPATA PORRAS, Op. cit., p. 35

➤ Cuando la Característica de Impedancia de la roca es igual a la Característica de impedancia del explosivo, el 100% de la energía de choque en el taladro se transmite a la roca, (es decir no hay energía reflejada devuelta al taladro).

➤ Cuando la Característica de Impedancia de la roca es mayor que la del explosivo ($z < 1$) el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es compresivo, y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es mayor que la presión en el taladro, con un máximo esfuerzo del doble de la presión de taladro cuando $z = 0$.

Cuando la Característica de Impedancia de la roca es menor que la del explosivo ($z > 1$), el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es de tensión ($\sigma_{\text{reflected}}$ es negativo), y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es menor que la presión en el taladro.

La onda transmitida es siempre compresiva (el termino σ_{rock} es siempre positivo). Si una voladura contiene diferentes cargas y diferentes taladros, entonces se deberían usar valores diferentes de K para estimar los niveles de vibración producidos por taladros individuales.

En el Cuadro 1, se presentan diferentes valores para los parámetros del Modelo de Devine (K y Alfa), obtenidos en diferentes tipos de roca y distintas faenas mineras. Esta gran variabilidad para el factor K desde un mínimo de 99 hasta un máximo de 703 (7 veces mayor) y para el Factor de Atenuación Alfa desde -1.54 hasta -2.49, determinan que el uso indiscriminado de estos modelos y¹⁷.

La transferencia de estos desde una mina a otra o desde un sector a otro en la misma mina puede significar estimar un gran margen de error las vibraciones y como consecuencia de ello las restricciones a las voladuras y los criterios de daño.

¹⁷ CANO MUCHA, Jonatan Christian. Estudio de vibraciones para la selección de explosivo Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2019. p. 36

Cuadro 1. Variabilidad en los parámetros del modelo de vibración. Devine, para diferentes minas y macizos rocosos APS Blastrocnicos

Factor de Amplitud K	Factor de Atenuación Alfa	Factor de Amplitud K	Factor de Atenuación Alfa
507	-2.24	99	-2.23
500	-2.11	227	-1.60
321	-2.39	499	-2.01
495	-2.12	175	-1.63
262	-2.28	112	-1.94
284	-1.72	428	-2.49
481	-1.74	168	-1.54
299	-2.48	703	-2.21
597	-2.32	177	-2.04
K Máximo =	703	Alfa Máximo =	-2.49
K Mínimo =	99	Alfa Mínimo =	-1.54
K Promedio =	357	Alfa Promedio =	-2.07

Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 32

Esta variabilidad en los parámetros del Modelo de Devine, da cuenta de la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular, la ecuación de comportamiento de las vibraciones, la que está directamente relacionada con las propiedades geo mecánicas, tipos de explosivos, aspectos geométricos, etc., y por tanto, deben ser estimados como consecuencia de una campaña de monitoreo y modelamiento, en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geo mecánicos de la misma.

1.6.1.9 Estimación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica. Los altos niveles de vibración pueden dañar al macizo rocoso, produciéndose fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

Con bajos niveles de vibración, tales como los presentes a grandes distancias de las voladuras, los niveles de deformación son muy pequeños para inducir un fracturamiento del macizo rocoso. A menores distancias, las vibraciones son suficientemente altas para extender las fracturas preexistentes, pero insuficientes para inducir nuevo fracturamiento. Muy cerca de las cargas explosivas, sin embargo, los niveles de vibración son lo suficientemente altos como para afectar a la matriz de roca y producir diferentes grados de fracturamiento a su alrededor.

Dada esta relación con la deformación, es que el análisis de velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un buen método para estimar el grado de fracturamiento inducido por la voladura. De acuerdo con lo indicado:

Ecuación 6. Relación entre la velocidad de la partícula y la deformación inducida

$$\varepsilon = PPV / Vp$$

Esta ecuación presenta la relación entre la Velocidad de Partícula; **PPV**, la deformación inducida ε , para una roca con Velocidad de la Onda de Compresión; Vp . Esta ecuación supone una elasticidad lineal de la roca a través de la cual la vibración está propagándose y hace una estimación razonable para la relación entre la roca fracturada y la vibración inducida.

De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico de la roca, “la Velocidad de Partícula Máxima (Crítica), **PPVc**, que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo la Resistencia a la Tracción σ_t , el Módulo de Young, **E**, y la Velocidad de propagación de la Onda P, Vp ”¹⁸, usando la ecuación:

Ecuación 7. Velocidad máxima o crítica para las rocas

$$PPVc = (\sigma_t * Vp) / E$$

“En función de los antecedentes proporcionados a ASP BLASTRONIC por diferentes Minas, se empleó la ecuación anterior para estimar en primera aproximación la Velocidad de Partícula Máxima o Crítica para algunos tipos de roca más frecuentes”¹⁹.

En la Figura 7, se resume los datos y el valor calculado para los tipos de roca analizados. En la última columna, se muestra el cálculo del $PPVc$, definido como el nivel sobre el cual se generará un daño produciendo nuevas fracturas a la roca. Una estimación del nivel de Velocidad de Partícula sobre el cual se produce el daño más intenso (trituration), puede ser estimada como el valor aproximado a 4 veces el nivel para el daño incipiente ($4 \times PPVc$).

¹⁸ PAMPACATA HOLGADO, Op. cit., p. 28

¹⁹ CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 35

Cuadro 2. Estimación de la Velocidad de Partícula Crítica Teórica de Distintos Tipos de Roca – Monitoreo y Modelamiento de Vibración para la Evaluación

Tipo de Roca	Resistencia a la Tracción [MPa]	Velocidad de Onda P [m/s]	Módulo Young [GPa]	Velocidad de Partícula Crítica [mm/s]
Cuarzo-1	14.0	5 102	55.5	1 286
Brecha-1	7.3	4 298	30.2	1 037
Milonita	1.9	2 940	14.6	380
Ox-1	6.7	4 373	35.2	836
Ox-2	7.2	4 804	44.4	774
Cuarzo-2	8.4	4 207	42.7	823
Brecha-2	3.9	4 041	39.3	401
Andesita-1	14.9	4 975	67.3	1 100
Dionita	13.2	4 650	48.6	1 260
Brecha-3	11.3	4 650	58.3	900
Pórfido-1	6.7	3 829	31.2	823
Pórfido-2	5.1	3 661	46.6	401

Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 35

Finalmente, se estima que un nivel equivalente a la cuarta parte, es decir el 25% del valor de PPVc, es suficiente para iniciar extensión de fracturas preexistentes. Se sugiere ocupar este nivel de $\frac{1}{4}$ PPVc, como límite conservador y a partir del cual se deben controlar los diseños de carguío para que las voladuras no ocasionen daño al macizo rocoso.

Los valores de Velocidad de Partícula Crítica calculados en la anterior, son producto de las características físicas de la roca, y la precisión en su estimación depende de la calidad y cantidad de los datos de ensayos ocupados en su cálculo, recordándose que sigue siendo una estimación y deben constantemente ajustarse con mediciones en terreno, que den cuenta cuantitativamente del daño y que permitan establecer con mayor precisión e in-situ, la capacidad del macizo rocoso para soportar niveles de vibración en el rango estimado.

Estas diferencias reflejan la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular los límites de daño, los que están directamente relacionados con sus propiedades geo mecánicas.

Y por tanto deben ser estimados en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geo mecánicos de la misma²⁰.

²⁰ CASTILLA GÓMEZ, Jorge y HERRERA HERBERT, Juan. Modelización de parámetros de voladura para la optimización. Memorias IX Jornads Iberoamericanas de Materiales de Construcción. (9 y 10 de agosto). Quito: Universidad Politecnica de Madrid, 2011. p. 2

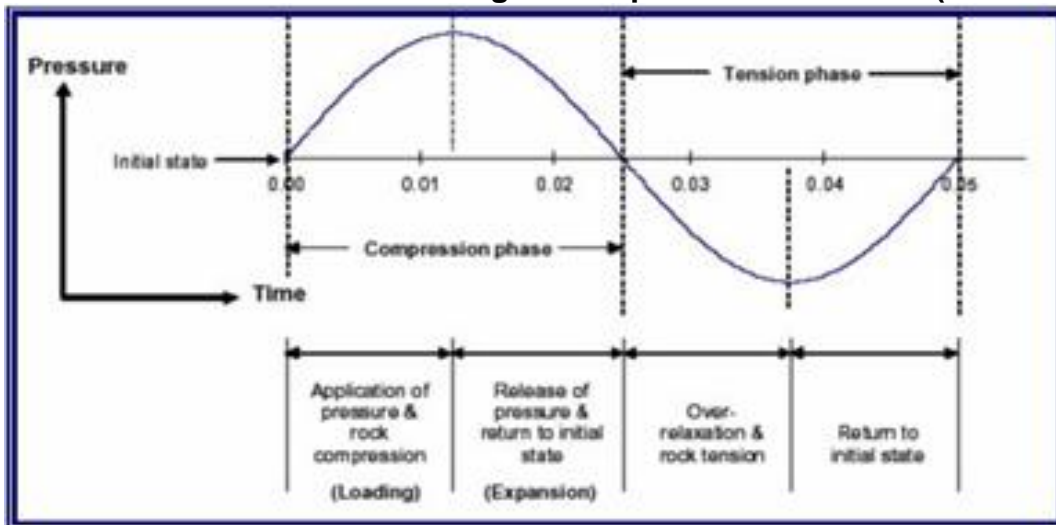
1.6.2 Marco teórico.

1.6.2.1 La naturaleza cíclica de las vibraciones. Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

Consideremos un caso simple, de un solo taladro de voladura con una pequeña carga de explosivo (Largo = 6 * diámetro, aproximando a una carga esférica). Cuando la carga es detonada, la masa rocosa alrededor de la carga es inmediatamente sometida a compresión. Esto produce la componente de compresión del ciclo de vibraciones (véase la Figura 6).

Después de la fase de compresión, la roca sufre una fase de expansión en un intento a volver a su estado original. Ya que todos los materiales se comportan, en mayor o menor medida, como un resorte, una vez que la fuerza de compresión es removida, la roca se relaja y vuelve a su estado original pasando más allá de ésta.

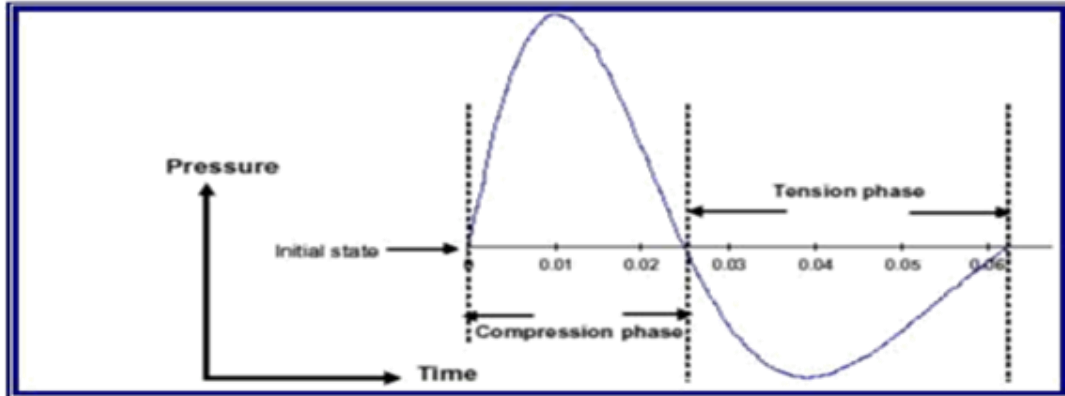
Figura 6. Ciclo de Esfuerzo Sobre la Roca, Compresión Seguida por Tensión – Centro de Innovación Tecnología de Explosivos de ENAEX (CINTEX)



Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 13.

Como la roca se mueve más allá de su posición original, esto crea una fase de tensión del ciclo de vibraciones.

Figura 7. Presión y Relajación no Simétrica a un Elemento de Roca – Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)



Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 15.

Ya que la roca responde como un resorte al paso de las ondas de vibraciones, (el módulo de Young representa la rigidez del resorte), el ritmo al cual la roca se relaja puede ser diferente al ritmo a la cual es sometida la roca por un pulso de corta duración, que genera la detonación de una carga explosiva, véase la Figura 9. En este caso, no es inusual ver, en rocas débiles con módulo de Young relativamente bajos, que las fases de compresión y tensión tienen diferentes amplitudes y diferentes duraciones.

La ecuación que explica las características del movimiento de una partícula por el paso de una onda suele ser de la siguiente forma:

Ecuación 8. Movimiento de una Partícula por el Paso de una Onda

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi f t)$$

“Donde A(t) representa la amplitud de la onda en un tiempo t, A₀ es el peak de amplitud sobre la onda completa y f es la frecuencia de la onda”²¹.

1.6.2.2 Propiedades Básicas de las Ondas.

➤ **Frecuencia De Las Vibraciones.** La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene una gran influencia en esto

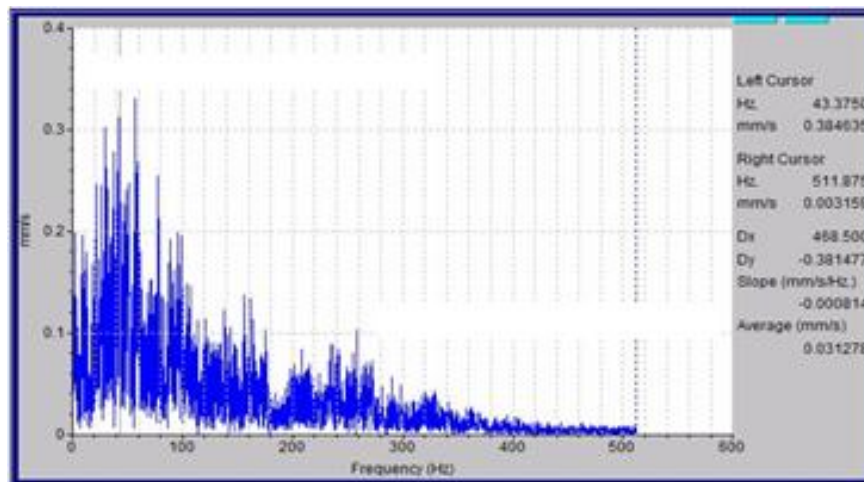
²¹ PAMPACATA HOLGADO, Lucio Raymundo. Análisis de Vibraciones Inducidos por la Voladura de Rocas en Cantera Atocongo en Zonas Cercanas a poblaciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2015. p. 20

son las dimensiones de las cargas, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo, otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación). La frecuencia dominante es considerada generalmente como el inverso del tiempo del ciclo completo (véase la Figura 9).

A través de todo tipo de roca el hecho que las ondas registradas a grandes distancias tengan frecuencias menores a aquellas registradas a cortas distancias confirma que las ondas de vibraciones contienen un amplio rango de frecuencias, y que las ondas de altas frecuencias son atenuadas preferentemente, dejando un espectro dominado por componentes de bajas frecuencias.

Si la frecuencia es baja, el desplazamiento es mayor, por lo que se produce un mayor daño en el medio en que se transmite las vibraciones.

Figura 9. Imagen de frecuencia de las vibraciones – Blastware III, InstanTel – operador manual



Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 15

1.6.2.3 Amplitud de las Vibraciones. La amplitud de las vibraciones es una medida de su “Fuerza” y la energía de una onda de vibraciones es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de una vibración continua, en la cual cada ciclo de propagación tiene la misma forma, un valor único es suficiente para describir la “fuerza” de la vibración o la amplitud.

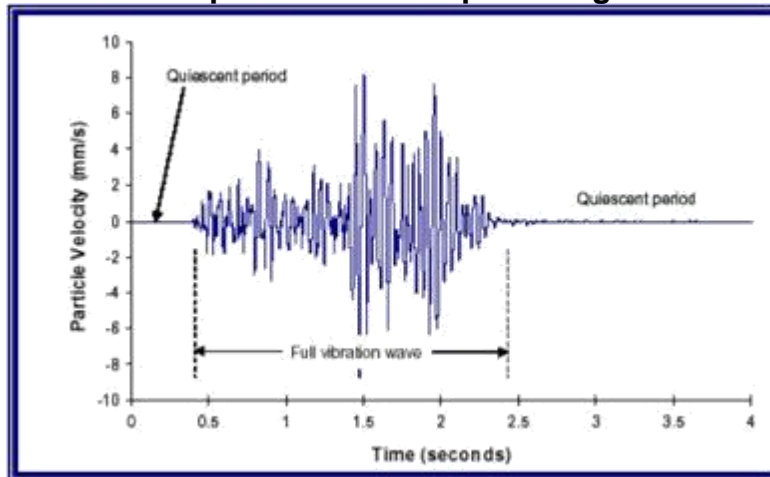
Es importante tener en cuenta, que, en la medición de vibraciones en macizos rocosos, no se hacen distinciones entre amplitudes positivas o negativas, siendo éstas reportadas sólo como positivas o su valor absoluto.

Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor utilizado para detectar el paso de la onda cíclica de esfuerzo.

Ya que la frecuencia del movimiento de la partícula puede ser alta (cientos de Hertz), en la práctica es fácil encontrar y usar dispositivos que tengan una adecuada respuesta a la frecuencia y sensibilidad para medir velocidad (geófonos) o aceleración (acelerómetros). Debido a que el desplazamiento, velocidad y aceleración están relacionados, la medida de cualquiera de éstas teóricamente podría permitir el cálculo de las otras dos. La amplitud de la vibración, medida como velocidad de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca²².

1.6.2.4 Duración de las Vibraciones. La duración de las vibraciones depende de dos factores principales – la duración de la voladura y la distancia del punto de monitoreo a la voladura. Para asegurar que el peak de velocidad de vibraciones (generado por una voladura) sea registrado y que la cantidad máxima de información pueda ser extraída de un registro de vibración, es importante que se registre completamente la duración de las ondas (véase la Figura 10).

Figura 10. Velocidad de la partícula vs tiempo en segundos



Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 17

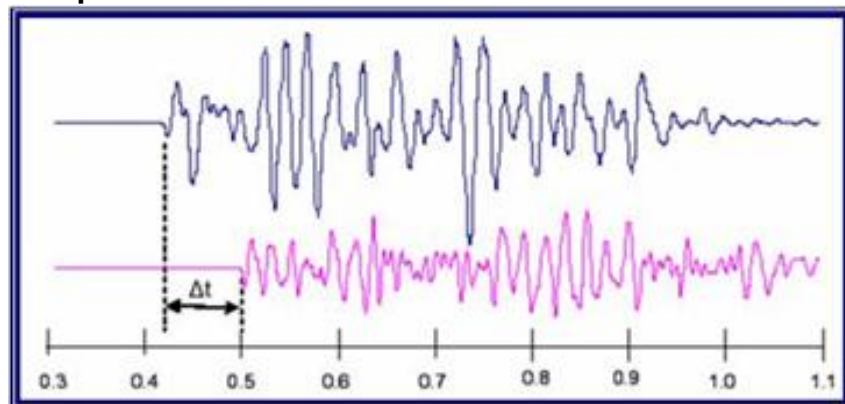
La onda total de vibración, que es medida a partir de una voladura de producción, es el resultado de pulsos individuales producidos por cada taladro de voladura combinados todos en el punto de medición. El modelo en el cual ellas se combinan para formar la onda resultante variará de acuerdo con la dirección y distancia de la

²² CONTRERAS PÉREZ, Op. cit. p. 25

voladura, por lo tanto, dos registros de la misma voladura no producirán la misma onda de vibración. La duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la voladura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último taladro). Normalmente la duración de la vibración es alrededor de 200 a 300 ms más larga que la duración de la voladura, debido al tiempo requerido para que la vibración llegue desde el último taladro detonado al punto de medición (véase la Figura 10).

1.6.2.5 Velocidad de propagación. La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal. Cuando se usan múltiples geófonos para medir velocidad de propagación, la distancia de separación de los geófonos debe ser lo suficientemente grande para permitir un cálculo más preciso. En la Figura 11, los geófonos están separados 300 metros, y la diferencia de tiempo de arribo, t , es de 80 ms, correspondiendo a una velocidad de propagación de 3.750 m/s.

Figura 11. Imagen de la velocidad de propagación de las ondas – Blastware III, Instantel - operador manual



Fuente. CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. p. 18

La mayoría de las rocas tienen una velocidad de propagación entre 3000 m/s y 5000 m/s. Mediciones de la velocidad de propagación en roca menores que 1500 m/s son consideradas poco confiables, y se debe revisar cuidadosamente el sistema de medición antes de aceptar un valor tan bajo, ya que ellas implican un grado de fracturamiento muy alto y que las distancias de transmisión de vibración sean probablemente muy cortas. Mediciones de velocidades de propagación que excedan los 6000 m/s son consideradas también poco confiables, y nuevamente los sistemas

de medición debieran ser cuidadosamente analizados antes de aceptar dichos valores tan altos²³.

1.6.2.6 Tipos de ondas de vibraciones. La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas crea tensiones que producen el fracturamiento en la roca. Esta además se propaga en forma esférica (en todos los sentidos) y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso que es transmitida por una combinación de mecanismos que se representa fundamentalmente a través de ondas.

Ondas de Compresión; Ondas de Corte o Cizalle y Ondas de Superficie. “Las ondas de compresión y de corte viajan dentro de la roca y pueden penetrar cientos de metros, aún kilómetros en la corteza terrestre, y están referidas como ondas de cuerpo. Las ondas de superficie, sin embargo, se transmiten muy cercanas a la superficie del terreno, y penetran dentro de la corteza terrestre no más que 1,5 a 2 veces su longitud de onda”²⁴ (aunque esto pueda representar algunos cientos de metros).

1.6.2.7 Onda longitudinal – onda de comprensión (p). Normal a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento a lo largo de una línea que une la fuente y el punto de registro. Consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión, con oscilaciones de las partículas en la misma dirección de propagación. El término primario se origina en que esta onda tiene una gran velocidad de propagación y, por ende, es la primera en llegar al punto de medición.

1.6.2.8 Onda transversal (s). Perpendicular a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento en ángulos rectos a una línea que une la fuente y el punto de registro.

Al momento que se genera la onda P, se produce un segundo tipo de onda que corta o tiende a cambiar la forma del material transmisor y genera movimientos en las partículas perpendiculares al frente de choque, acentuadas por el pulso de presión inicial; por la duración de la onda P o por discontinuidades del macizo rocoso. A este tipo de onda se le denomina de Onda S, de Corte, Forma o Secundaria. Las ondas P pueden desplazarse a través de un sólido, un líquido o gas, porque que estas materias resisten compresión o cambios de volumen. En cambio, las ondas S viajan sólo en los sólidos, puesto que su existencia depende de módulos de corte o de la habilidad del material transmisor para resistir cambios de forma. Ambas ondas - P y S - viajan en trayectoria esférica desde el cráter, a través del cuerpo de los materiales, por dicha razón a esta clase de ondas también se les denomina ondas de cuerpo²⁵.

²³ BENITES CORREA, Agapito Gabriel. La distancia mínima entre taladros para evitar los daños de los detonadores electrónicos por presión dinámica, en mina Lagunas Norte. Lima: Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2017. p. 18

²⁴ *Ibíd.*, p. 19

²⁵ CONTRERAS PÉREZ, Op. cit., p. 20

1.6.2.9 Onda de superficie. Son generadas en la superficie en respuesta a la interacción de las ondas P y S con la superficie. Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie de la tierra, ésta experimenta movimientos verticales y horizontales. “Las ondas así producidas son denominadas “elásticas de superficie” y también como ondas Rayleigh y Love. La onda Rayleigh, predicha matemáticamente por Lord Rayleigh, imprime un movimiento en trayectoria elíptica contraria a la de propagación de avance de la onda. La onda Love (onda-Q) más rápida que la Rayleigh, da lugar a un movimiento transversal, relativo a la dirección de avance de la onda”²⁶.

1.6.2.10 Unidades de vibraciones. Debido a que la vibración es un campo de esfuerzos oscilantes, el movimiento resultante de la partícula es en las tres direcciones ortogonales, y puede ser detectado utilizando diferentes dispositivos. Cada dispositivo tendrá las características de vibración (amplitud, duración y frecuencia) de acuerdo con las características de respuesta del dispositivo de medición utilizado. La mayoría de los instrumentos utilizados para medir vibraciones utilizan geófonos, los cuales miden la velocidad del movimiento de las partículas, o acelerómetros los cuales miden la aceleración del movimiento de la partícula. Algunos sistemas de medición permiten medir desplazamiento de la partícula.

1.6.2.11 Velocidad de las vibraciones. La mayoría de los instrumentos que monitorean vibraciones por voladuras utilizan geófonos, y por lo tanto producen una señal de voltaje que varía con el tiempo, $V(t)$, proporcional a la velocidad del movimiento de la partícula, $v(t)$, la cual también varía con el tiempo. La velocidad es el método preferido de medición de las vibraciones generadas por voladura, ya que la velocidad de vibración es proporcional al esfuerzo y por lo tanto al potencial daño.

Si la onda de vibración es continua y armónica simple, (es decir una única frecuencia sinusoidal, f), ésta puede ser representada por una simple ecuación, $v(t) = A_0 \text{seno}(2\pi ft)$, donde A_0 representa el peak de amplitud de la velocidad de partícula. En la práctica, el peak de amplitud está controlado fuertemente por la cantidad de explosivo por taladro, ya que esto controla la fuente de energía que generan posteriormente las vibraciones. El otro factor que tiene una gran influencia en la amplitud de la vibración, a diferentes distancias, es la atenuación del macizo rocoso, ya que esto controla cuan rápidamente se disipa la energía. La atenuación del macizo rocoso depende de factores tales como la cantidad de fracturas o grietas en el macizo y el módulo de la roca. Rocas con un bajo Módulo tienden a presentar una deformación plástica, resultando en una gran pérdida de energía, mientras que rocas con un alto módulo se comportan de una manera elástica removiendo pequeñas cantidades de energía cuando pasa la onda²⁷.

²⁶ ZAPATA PORRAS, Op. cit., p. 22

²⁷ SUÁREZ CUEVA, Hans Josein y TORRES DÍAZ, Omar Michel. "Sistema Autónomo de Monitoreo Remoto para la Optimización del Registro de Vibraciones en Procesos de Voladuras en Minería y Construcción Civil. Lima: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Modalidad trabajo de grado, 2015. p. 21

1.6.2.12 Vibraciones y esfuerzos. El fundamento para usar el peak de velocidad de partículas, PPV, es debido a que la mayoría de los análisis consideran que el daño, o potencial daño, está relacionado con la velocidad de la onda P, V_p , y la deformación inducida, ϵ , es decir, la velocidad de vibración tiene una correlación directa con el esfuerzo cuando la onda está viajando como una onda plana y la deformación es elástica.

Ecuación 8. Velocidad de onda – Centro de innovación tecnológica de explosivos ENAEX (CINTEX)

$$\epsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E}$$

Si el macizo rocoso es duro y quebradizo, y presenta un comportamiento elástico hasta el momento de su ruptura, la velocidad máxima de partícula que la roca puede tolerar antes de su ruptura puede ser calculada a partir de:

Ecuación 9. Velocidad de la onda - Centro de innovación tecnológica de explosivos ENAEX (CINTEX)

$$PPV_{\max} = \epsilon_{\max} V_p = \frac{\sigma_{\max} V_p}{E}$$

Puesto que las vibraciones viajan con una componente sinusoidal de compresión y tensión aproximadamente iguales y la resistencia a la tensión es siempre mucho menor que la resistencia a la compresión, “el máximo esfuerzo que la roca puede resistir es el esfuerzo a la tensión. Este valor es difícil de medir, por lo tanto, es normal estimar la resistencia a la tensión a partir de la resistencia a la compresión, UCS, (típicamente en el rango de 1/10 a 1/20 de la resistencia a la compresión), o a partir de una medición indirecta tal como el Índice de Resistencia Brasileño”²⁸.

Como resultado de esto, uno puede estimar la velocidad de partícula que probablemente causará una ruptura por tensión, utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Velocidad de la onda - Centro de innovación tecnológica de explosivos de ENAEX (CINTEX)

$$PPV_{\max} = \epsilon_{\max} V_p = \frac{\sigma_t V_p}{E} \approx \frac{UCS \times V_p}{12 \times E}$$

En la ecuación anterior, el factor de 12 se ha usado como la razón entre la resistencia a la compresión y la tensión. Altos valores generan estimaciones de PPV críticos más conservadores (es decir bajos valores de PPV) y pueden ser más

²⁸ ZAPATA PORRAS, Op. cit., p. 24

apropiados en zonas donde la estabilidad es crítica y donde existe incertidumbre acerca del valor real de la resistencia a la tensión.

1.6.3 Marco legal

1.6.3.1 Normas y criterios de prevención de vibraciones del terreno. Existen más de 16 normas internacionales para el control de vibraciones, se presentan las normativas internacionales vigentes más relevantes. Normas internacionales para el control vibraciones generadas por voladura de rocas (véase el Cuadro 3).

Cuadro 3. Normas Internacionales para el Control de Vibraciones

PAIS	NORMA	FECHA
Estados Unidos	USBM RI8507 OSM 817.67	1980 1983
Alemania	DIN 4150, Parte 3	1999
R. D. Alemana	Directriz KDT 046	1972
España	UNE 22.381-93	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Francia	GFEE	2001
Escocia	PAN50	2000
Inglaterra	BS 7385 Parte 2	1993
Canadá	NPC 2001	1983
Suiza	SN 640 312a	1992
Portugal	NP2074	1983
Italia	UNI 9916	1991
Internacional	ISO 4866	1990
India	CMRI	1991
Australia	AS2187.2	1993
Brasil	NBR 9653	1986

Fuente. Los Autores

Por lo general los espectros de umbral de daño, trabajan en función de la velocidad de partícula pico PPV (mm/s) y la frecuencia de las oscilaciones (Hz), como es el caso de la norma Alemana DIN 4150, sin embargo existen otras normativas que trabajan en función del desplazamiento, la velocidad y la frecuencia del movimiento oscilatorio, como es el caso de la norma americana USBM RI8507 y la norma española UNE 22.381-93, sin embargo existen otras como la norma Sueca SS 460 48 46, que tiene en cuenta la velocidad de la partícula pico PPV (mm/s), en función de la distancia (m), veamos una descripción general de las normas antes mencionadas.

1.6.3.2 Norma Americana USBM RI 8507 (OSMRE). La USBM (Reporte RI8507, U.S. Bureau of Mines), elaboró un gráfico utilizando una combinación de velocidad y desplazamiento, en el cual se presentan los niveles seguros de vibración para diferentes estructuras (véase el Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores Admitidos por la Norma Americana

Norma Americana USBM RI 8507 (United States Bureau of Mines)		
TIPO DE ESTRUCTURA	f < 40 Hz	f > 40 Hz
Hogares modernos-interiores de tabla roca.	19.05 mm/s	50.8 mm/s
Hogares antiguos-interiores de yeso sobre listones de madera.	12.5 mm/s	50.8 mm/s
VELOCIDAD DE LA PARTICULA (mm/s)		DAÑOS
Menos de 50.8		Zona segura
Mayor de 50.8		Zona de daño
Diseño de voladura. Dr Valvin Korva, Ing. Enrique Abarran. Mexico 1998.		

Fuente. SISKIND, D. E. STAGG, M. S; KOPP, J. W. y DOWDING, C. H. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting [en línea]. United States: Bureau of Mines [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/USBM/RI8507BlastingVibration1989.pdf>>

1.6.3.3 Norma Alemana DIN 4150 (2001, efectos sobre estructuras). La norma alemana DIN 4150 (1986 revisada en el 2001), ofrece valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de construcción civil con el intervalo de frecuencia en Hz, (véase las Figuras 12 y el Cuadro 5).

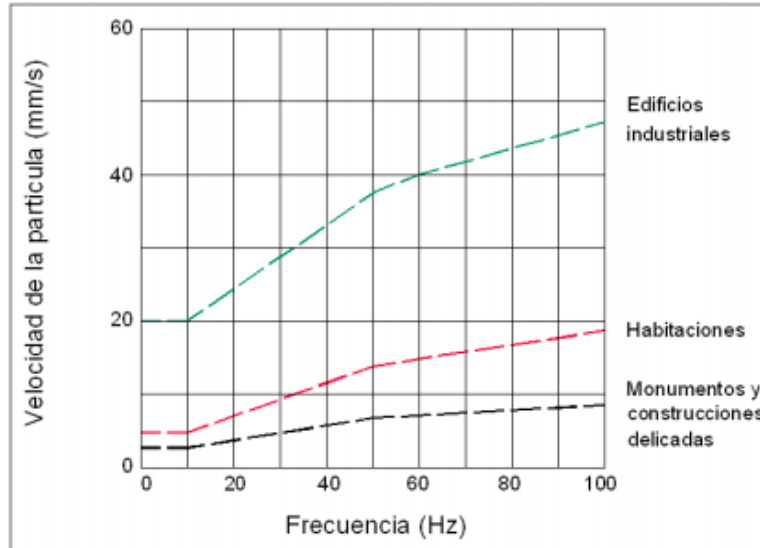
Actualizaciones de La Norma Alemana DIN 4150 en el año 2001.

2001a. Efectos sobre estructuras

2001b. Predicciones de parámetros de medición y registro.

2001c. Efectos sobre personas

Figura 12. Espectro de la norma alemana fuente DIN, Norma alemana “Structural Vibration in Buildings”



Fuente. PETROBLAST SAS. Estudio de vibraciones generadas por vibrocaminos LITTON 315, para la exploración sísmica petrolera. Coyaima, Tolima. 2017

Cuadro 5. Valores Admitidos por la Norma Alemana DIN 4150 Para daños en Edificios

TIPO DE ESTRUCTURA	FUNDACIONES			PISOS MAS ALTOS DE EDIFICIOS
	FRECUENCIAS PRINCIPALES (Hz)			
	< 10	10 - 50	50 - 100	Cualquier frecuencia
Industriales	20 mm/s	20-40 mm/s	40-50 mm/s	40 mm/s
Habitacionales	5 mm/s	5-15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
Edificios particularmente delicados	3 mm/s	3-8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Fuente. DIRGUA ANGARITA, Martin Alfonso. Seguimiento y análisis de la medición de velocidad de partículas generadas por vibraciones sísmicas en la línea 13 del proyecto de adquisición geofísica VSM 2d-2017 en el departamento del Tolima. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Modalidad trabajo de grado, 2018. p. 39

Parámetros medidos. Velocidad de partícula pico PPV (mm/s) Vs Frecuencia (Hz), velocidad pico en la componente vertical **V_z** (2.4 – 4 mm/s), para edificios particularmente delicados y monumentos históricos.

1.6.4 Estado del arte.

1.6.4.1 Efecto de la onda aérea en los cristales por voladura de corte y demolición en una edificación. Los materiales explosivos son compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que llega a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones.

Nuestra sociedad moderna no podría existir en su forma actual sin empleo de los explosivos; ya que proveen una fuente de energía irremplazable, en una forma muy útil. Sin embargo, junto con estos grandes beneficios, el empleo de explosivos tiene un efecto secundario como es la onda aérea. Los residentes pueden oír o sentir niveles muy bajos de sonidos y vibraciones, y así concluir intuitivamente que estos sonidos y movimientos indican un daño potencial.

1.6.4.2 Guía de estudio de manejo de vibraciones para la especialización tecnológica en explosivos. Considerando que la mayor parte de los costos radica en las operaciones unitarias de perforación y voladura de rocas, se requiere mejorar cada vez más utilizando las técnicas modernas de voladura de rocas.

La presente Guía tiene por objetivo contribuir al desarrollo de los conocimientos actuales en Voladura de Rocas y su aplicabilidad en las Operaciones Mineras. La guía está orientada básicamente a dos aspectos muy importantes: el primero, la elección del explosivo adecuado para la realización de un trabajo determinado minimizando el daño al macizo rocoso remanente y el segundo, determinar la cantidad máxima de explosivo permitido por retardo. Ambos trabajos se realizaron usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones.

Mediante el monitoreo de vibraciones se puede obtener diversos datos, entre los cuales se tiene las velocidades pico partícula en las tres direcciones para poder realizar una base de datos, modelar, analizar y evaluar el daño potencial que una voladura puede producir²⁹.

1.7 METODOLOGÍA

El primer paso dentro de la metodología es la formulación y realización del proyecto, donde se define con claridad cuál es la problemática que presentamos respecto a el análisis de la afectación por vibraciones en la cantera la Roca y que actividades son necesarias para la solución de la necesidad.

²⁹ LÓPEZ QUINTERO, C. Guía de estudios de manejo de vibraciones para la especialización tecnológica en explosivos. Lima: Universidad Nacional de Perú, 2007. p. 2

Ante la formulación realizada y teniendo la claridad respecto a las actividades que se necesitan, definimos los costos básicos o necesarios para saber la viabilidad del proyecto.

Para la ejecución del proyecto de investigación, se manejó una metodología teórico-práctica; inicialmente se realizó una inversión de tiempo para la revisión de la información existente, lo que permitió establecer en orden cronológico y de manera adecuada las pautas de trabajo. Siguiendo las necesidades propuestas y establecidas que se presentaron para el proyecto de grado, se desarrollaron 3 etapas donde se agruparon las partes más importantes y relevantes de la investigación de la siguiente manera:

1.7.1 Etapa 1.

- Realizar una indagación, búsqueda y recolección de la información normativa que se utilizara a nivel nacional e internacional que sea aplicable para el control de las vibraciones, cuando se hace un trabajo de extracción y detonación de explosivos cerca a poblaciones en canteras.
- Conocer por los diferentes medios de búsqueda bibliográficos las características físicas, geomorfológicas y geomecánicas del macizo rocoso en el cual se va a trabajar dentro de la cantera, adicionalmente adquirir información histórica y de relevancia sobre sus reacciones a diferentes agentes externos.
- Realizar una búsqueda bibliográfica y una recopilación de la información para definir los explosivos utilizados para las detonaciones, la máxima carga permisible y utilizada conocida como carga operante y la impedancia de la cantera.

1.7.2 Etapa 2.

- Se va a consultar por medio de las diferentes fuentes bibliografías la descripción, datos históricos, ubicación de la cantera para realizar el estudio previo de su macizo rocoso.
- Hacer una recopilación de información para determinar cuáles son los equipos correspondientes que serán utilizados para hacer el respectivo monitoreo de las vibraciones terrestres y aéreas de la cantera y determinar así, cual es el más idóneo.
- Conocer los diferentes tipos y cargas de explosivos que se van a usar en cada detonación para determinar las vibraciones de las ondas en las poblaciones cercanas a la cantera la Roca.

1.7.3 Etapa 3.

- Una vez realizadas las diferentes y múltiples pruebas de campo hacer una recopilación de datos para poder aplicar un análisis desde el punto de vista de ingeniería.
- Efectuar un cuadro comparativo con las pruebas realizadas en el campo a través de los equipos anteriormente calibrados para determinar los valores máximos de las pruebas y establecer posibles soluciones.
- Realizar una descripción final, con todos los análisis realizados a las vibraciones monitoreadas en la cantera la roca por medio de las dos normas que están establecidas en la normatividad colombiana.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS CON VOLADURA

2.1 NORMATIVIDAD EN VOLADURAS

2.1.1 Norma OSM – Estados Unidos. Para análisis de las vibraciones de la voladura con explosivos, se realiza un control de la cantidad de con el fin de controlar la afectación estructural por uso de explosivos y las ondas generadas por el micro temblor. Dicho control se efectúa con el método de la OSM (United States Office of Surface Mininig) para las regulaciones finales concernientes al uso de explosivos, dicho método utiliza los siguientes parámetros:

Ecuación 11. Distancia para el cálculo de distancia de la voladura al punto de monitoreo

$$D = SD * \sqrt{W}$$

SD: Factor de distancia escalada.

D: Distancia desde la voladura a la vivienda.

W: Peso del explosivo por cada 8 milisegundos.

Cuadro 6. Rangos Admisibles, Factor de Distancia Escalada por varias Distancias

Distancia del sitio de voladura (m)	Factor de distancia escalada para ser utilizada sin monitoreo sísmico.
0 a 100	22.5
100 a 1500	25
1500 en adelante	30

Fuente. Los Autores

2.1.2 Norma Alemana DIN 4150 versión 1999. Esta norma proporciona los límites de velocidad de las partículas de vibración en mm/s, teniendo en cuenta el tipo de estructura civil y el rango de frecuencia en Hz .

Las tres clases de construcciones que define la norma DIN 4150 son:

- Edificios estructurales.
- Viviendas.
- Los monumentos y construcciones delicadas.

“Las frecuencias se analizan en tres intervalos: menor de 10 Hz, entre 10 y 50 Hz y entre 50-100 Hz. La norma establece que, para frecuencias superiores a 100 Hz, la estructura soporta altos niveles de vibración (Véase el Cuadro 4) y se muestra la

representación gráfica de los valores de velocidad máximos permitidos contra las frecuencias, para los tres tipos de construcciones”³⁰.

Cuadro 7. Valores Admitidos por la Norma Alemana para Daños en Edificios

Tipos de estructuras	Fundación			Pisos altos de los edificios
	Frecuencia (Hz)			
	< 10	10-50	50-100	Cualquier frecuencia
Industrial	20 mm/s	20-40 mm/s	40-50 mm/s	40 mm/s
Viviendas	5 mm/s	5-15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
Edificios particularmente delicados	3 mm/s	3-8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Fuente. DIRGUA ANGARITA, Martin Alfonso. Seguimiento y análisis de la medición de velocidad de partículas generadas por vibraciones sísmicas en la línea 13 del proyecto de adquisición geofísica VSM 2d-2017 en el departamento del Tolima. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Modalidad trabajo de grado, 2018. p. 39

2.2 PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

2.2.1 Monitoreo de vibraciones causadas por voladura (41-120-1-PB). La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas se propaga en forma esférica y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso. Estas ondas sísmicas transmiten a la roca movimientos de partículas en todas direcciones, con “intensidades que dependen de la energía del explosivo, geometría de la voladura y la secuencia de detonación. Por lo tanto, para limitar estos efectos se debe emplear una técnica de voladura controlada, de manera tal de minimizar los efectos sobre el macizo rocoso. El control de las vibraciones hoy en día es un importante factor para considerar cuando se requiere que los taludes sean más estables y el resultado de la voladura sea el esperado”³¹.

2.2.2 importancia de la medición de las vibraciones.

- Medir las vibraciones producidas por una voladura ayuda a estimar la probabilidad de daño que el macizo rocoso puede sufrir.
- El monitoreo ayuda a determinar la velocidad crítica en cada uno de los materiales del terreno para conocer los límites máximos permisibles de vibración sin causar daño al macizo rocoso remanente.

³⁰ COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 334 (28, febrero, 2002). Por el cual se establecen normas en materia de explosivos. Bogotá: La Presidencia, 2002. p. 1

³¹ QUIROZ-COTRINA, Christa. Monitoreo de vibraciones causadas por voladuras en taludes. En: REFI UPN. Enero – marzo, 2014. vol. 2, no. 2, p. 54

➤ Se puede utilizar el monitoreo de las vibraciones como una herramienta de diagnóstico, para determinar el grado de interacción entre las variables de la voladura, así como predecir las vibraciones producidas por voladuras futuras.

A continuación, se detalla los principales pronósticos del estudio que se ha venido realizando en el trabajo de grado para generar un nuevo punto de partida para este estudio.

➤ Geología local y características de las rocas: En los macizos rocosos homogéneos y masivos las vibraciones se propagan en todas direcciones; mientras que, en estructuras geológicas complejas, la propagación de ondas puede variar con la dirección y presentar diferentes tipos de atenuación y formas de propagación.

➤ Cantidad de explosivo: Es el factor más importante que afecta a la generación de vibraciones, a mayor carga explosiva, mayor magnitud de vibraciones.

➤ Distancia al punto de voladura: Conforme aumenta la distancia, la intensidad de las vibraciones disminuye.

2.2.3 Impedancia.

Ecuación 12. Velocidad de la onda según el tipo de roca

$$E = pQ$$

Donde:

E: Energía vibratoria

Q: Energía producida por la detonación de la mezcla explosiva comercial. Función de la resistencia de la roca.

p: Es la proporción de energía total del explosivo empleada en generar vibración en voladuras convencionales, en las que no existe gran confinamiento, este valor es 0.4 aprox³².

2.2.4 Características de las vibraciones. La simple caída de un objeto sobre la tierra, hasta la detonación de un explosivo enterrado, o un deslizamiento súbito a lo largo de una falla geológica en profundidad causando un sismo, son eventos que se transmiten a través de los suelos o rocas.

Estos movimientos de propagación ondulatoria se dan a través de los terrenos con una velocidad de propagación que cada una depende de cada tipo de macizo, el cual se verá afectado por las tensiones dinámicas que a onda transporta.

³² ANICAMA LUJÁN, Alberto Hermógenes. Monitoreo De Los Efectos De Las Vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de grado, 2010. p. 22

2.2.5 Generación de vibraciones. La liberación súbita de cualquier forma de energía en el terreno desencadena la propagación en todas las direcciones, de ondas volumétricas y superficiales que actúan sobre personas y estructuras próximas con amplitudes de vibración que dependen de varios factores:

- Cantidad de energía liberada por el fenómeno que la ocasiona.
- Distancia entre el origen y el punto donde se registran los eventos.
- Resistencia dinámica de las estructuras y sus componentes más frágiles.
- Propiedades trasmisoras o disipadoras de los terrenos involucrados.

Es importante conocer que la intensidad de las vibraciones originadas por esta operación, así como otras similares varíen con ciertas propiedades del equipo, normalmente de la característica del martillo vibrador, la deformación de la cabeza de la estaca o distorsión elástica de la estaca y la velocidad de penetración en el terreno.

2.2.6 Medición de las vibraciones. Los requisitos de las vibraciones se hacen a partir de modernos geófonos equipos para el control de vibraciones, recomendando un nivel de vibración típico de las situaciones de referencia, para un acoplamiento de rutina en las canteras que se están interviniendo. El procesamiento de los registros obtenidos se realiza por medio de programas que se adaptan a los datos, obtenidos con los equipos según sus requerimientos de las canteras y los parámetros captados por estos, los cuales son el resultado de las transformaciones en mayor grado, cuya función realizada en este tipo de canteras estudia los parámetros medidos en el dominio de la frecuencia con la que se intervengan.

2.2.7 Efectos de las Vibraciones Sobre los Macizos Rocosos. Las vibraciones tienen un doble ámbito de actuación sobre los macizos rocosos, por un lado, afectan a la integridad de las rocas o parámetros resistentes de estas y por otro lado pueden llegar a provocar colapsos en los taludes al introducir acciones desestabilizadoras.

Muchas de las primeras investigaciones sobre límites de seguridad para vibraciones pecaban por la mala definición de la palabra daño, o quizás por la falta completa de definición. Notable excepción son los primeros trabajos canadienses (Edwards y Northwood, 1960 y Northwood et al., 1963), que definen con precisión:

- Límite de daño: «apertura de viejas fisuras y formación de nuevas fisuras en el revoque, desplazamiento de objetos sueltos»;
- Daño menor: «superficial, no afectando la resistencia de la estructura (por ejemplo, quebradura de ventanas, caída de revoque, formación de fisuras en la mampostería)»

- Daño mayor: «sería debilitación de la estructura (por ejemplo, grandes fisuras, movimientos de cimientos o muros conductores, recalques en distorsión o debilitamiento de la superestructura, paredes fuera de plomo) (Edwards y Northwood, 1960)³³.

2.2.8 Emulind y detonadores. Es un explosivo de alta potencia sensible al detonador común, fabricado a base de una fase oxidante de nitrato de amonio y nitrato de sodio, y una fase aceite-combustible que está compuesto por aceite mineral, parafinas y ceras con aditivos emulsificantes.

“Es empleado en minería y obras civiles, especialmente diseñados para voladuras en pequeños diámetros, en rocas duras y semiduras con presencia de agua. Sus aplicaciones más comunes son la explotación de minerales, obras de construcción, demoliciones de edificios e infraestructura civil y en voladuras subterráneas con adecuada ventilación en ausencia de gas grisú y polvo de carbón”³⁴.

“El detonador es un dispositivo que permite iniciar altos explosivos, de acuerdo con un tiempo de retardo que contiene en el interior del “casquillo”. Son considerados explosivos, ya que en su interior tienen dos (primario y secundario) de alta sensibilidad”³⁵

2.2.9 Carga operante. Hay que aclarar, en este punto, que la carga explosiva, no es la carga total de la voladura sino la carga operante: la máxima carga que interviene en el conjunto secuenciado de detonaciones de la voladura, con una secuenciación siempre superior a 8 milisegundos entre cada dos detonaciones independientes.

Cuando esas voladuras son de mayor importancia, sin que existan superficies de discontinuidad para la onda sísmica, se plantea la necesidad de conocer las cargas explosivas máximas para garantizar que la roca situada a determinada distancia no se verá afectada. La normativa relacionada con las vibraciones, UNE 22.381.93, tiene el objetivo de salvaguardar las estructuras próximas a las voladuras, normalmente en la superficie, por lo que no es aplicable a este tipo de situaciones. Limitación de carga operante para voladuras en canteras de roca ornamental.

2.2.10 Carga por tiempo de retardo. Un detonador eléctrico está conformado por una cápsula de aluminio conteniendo la carga brizante, la carga sensible, el elemento de retardo y la gota eléctrica que se encuentra unida a los alambres conductores de energía. La gota eléctrica del detonador eléctrico se inflama al paso

³³ MUCHO PONCE, Elwis Anthony. Aplicación de un modelo de vibraciones para el control de voladuras en Tajo San Gerardo Mina Atacocha. Tacta: Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2016. p. 20

³⁴ COLORADO, Carlos Alberto. Clasificación y características de los explosivos. Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares, 2016. p. 11

³⁵ CHILE. MINISTERIO DE MINERÍA. Detonador [en línea]. Santiago: El Ministerio [citado 20 mayo, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-d/detonador/>>

de la energía eléctrica y está activa al elemento de retardo que a su vez inicia la carga del fulminante. El detonador eléctrico permite a los usuarios disponer de una amplia gama de retardos que generalmente son utilizados en reemplazo de la tradicional Mecha de Seguridad y Fulminante Común.

Los tiempos de retardo permiten realizar secuencias en la formación de caras libres de una voladura, optimizando así el disparo.

- La iniciación retardada dentro del taladro optimiza la fragmentación del material volado.
- Los retardos permiten realizar voladuras de una gran cantidad de taladros que explotan de acuerdo a los tiempos previstos, lo que ayuda a minimizar las vibraciones del terreno en el área circundante.
- Facilita el control de ruido, evitando anomalías en las áreas de trabajo e inmediaciones.
- La precisión de los tiempos de retardo proporciona economía y seguridad.
- Los circuitos eléctricos permiten chequear los sistemas de iniciación, haciendo uso de instrumentos adecuados, antes de iniciar el disparo.

2.2.11 Geología regional y local. La zona de estudio se encuentra localizado en la cordillera oriental, geomorfológicamente se diferencian dos sectores, uno plano, que consta de depósitos de origen fluvio glacial, fluvial y lacustre de la edad Plioceno, periodo cuaternario.

La segunda es montañosa que se encuentra formada por rocas sedimentarias, areniscas, arcillolitas, limolitas, entre otras, de origen marino y continental, de edad Cretácico Superior Paleógeno. El municipio cuenta en este momento con un alto grado de erosión, básicamente en la cuenca del río Bojacá. Sus causas se centran básicamente en la deforestación, talas, quemas, transformación del suelo, deficiencias en disponibilidad del agua, fenómenos de heladas, factores históricos de tenencia, baja rentabilidad en las condiciones económicas y tecnológicas actuales y mal uso de los elementos químicos aplicados al suelo. Esta problemática implica pérdida de los suelos productivos y agotamiento de la capa vegetal ya que en la cantera se harán unas series de detonaciones para la extracción del material generando una serie de limitantes geológicas, principalmente por la presencia de areniscas con intercalaciones de lilitas friables y erodables, por lo que las aguas de escorrentía superficial han formado grandes cárcavas del cauce central, observándose una erosión progresiva³⁶.

³⁶ PEDRO ALEXANDRE, Antonio M.; JOE BOY, Seidu Amadu y OTAÑO NOGUEL, José. Análisis del diseño de voladuras con cargas compactas en la cantera de áridos el cacao. En: Minería y Geología. Octubre-diciembre, 2006. vol. 22, no. 4, p. 3

2.2.12 Goemecánica. Una parte importante de la caracterización geo mecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geo mecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas el sostenimiento en túneles.

Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geo mecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño para la detonación de las canteras para la extracción de material para la construcción. Además de las obras subterráneas, se destacan las aplicaciones en taludes y cimentaciones. Las clasificaciones llevan más Una parte importante de la caracterización geo mecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geo mecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de detonación. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geo mecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y las cargas operantes que serán utilizadas comúnmente en las detonaciones de la cantera para la extracción de material³⁷.

2.2.13 Geomorfología. En el municipio de Mosquera está compuesto en su gran mayoría por depósitos pertenecientes al período cuaternario, que morfológicamente se denominan Valles Aluviales, y otros de origen fluvial, llamados Abanicos Aluviales. La zona de la montaña presenta tres tipos de formas de origen:

- "Pendientes denudadas: Son laderas sin forma particular, que presentan un relieve alto de pendientes inclinadas y de longitud muy larga.
- Colinas Irregulares: Relieves de colinas, con pendientes muy inclinadas.
- Valles denudacionales: Geoformas del desgaste de las montañas"³⁸

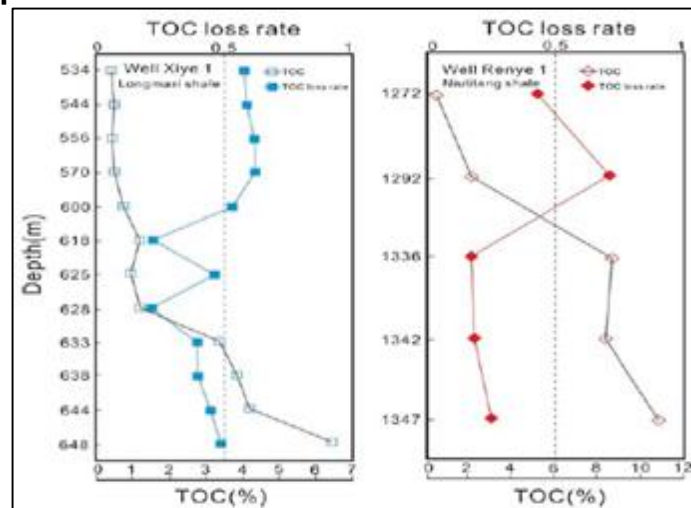
2.2.14 Características de la composición mineralógica. El contenido mineral frágil es un factor importante lo que influye en el poro de la matriz, el grado de Desarrollo de micro fracturas, el contenido de hidrocarburos y el modo de fracturamiento del esquisto. Adicionalmente Cuarzo, feldespato y dolomita también son quebradizos componentes minerales de las lutitas negras. Cuanto mayor sea el contenido de minerales frágiles tales Como el cuarzo, el feldespato y la calcita en lutita, cuanto más Propicios son para formar naturales e inducidos. Grietas bajo la acción de la fuerza externa, la composición mineral de las muestras de esquisto

³⁷ SUAREZ BURGOA, Ludger; VALENCIA GONZÁLEZ, Yamile; ORDÓÑEZ CARMONA, Oswaldo; NAVARRO MONTOYA, Andrés y HIDALGO GÓMEZ, Bayron. Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del proyecto hidroeléctrico Porce III, Colombia. En: Boletín De Ciencias De La Tierra. Junio - Noviembre, 2009. no. 26, p. 69-86

³⁸ ROJAS PERILLA, Laura Lizeth y RIVERA PARDO, Sebastián Alberto. Caracterización de suelos arcillosos desecados al Occidente de la Sabana de Bogota. Bogotá: Universidad de La Sabana. Facultad Ingeniería Civil. Modalidad Trabajo de grado, 2012. p. 22

(véase la Figura 13). Es claro que el quebradizo contenido mineral en las muestras de núcleo es significativamente Más alto que las muestras de afloramiento, pero el mineral de arcilla es más bajo que las muestras de afloramiento. “Elementos principales cambian poco a través de la intemperie perfil. En contraste, Na y K se agotan en relación A las concentraciones previstas por la abundancia de las fases minerales, los feldespatos, la illita y la esmectita de la illita albergan estos elementos cuyas bajas proporciones Puede representar la disolución incongruente y el cambio. en la capa intermedia abundan los cationes en respuesta a las condiciones climáticas ácidas”³⁹.

Figura 13. Composición Mineral de las Muestras a Diferentes Profundidades



Fuente. YANG, Liu; JINCHUAN, Zhang; XUAN, Tang; CHAO, Yang y SHUAI, Tang. Weathering characteristics of the Lower Paleozoic black shale in northwestern Guizhou Province, south China. En: Indian Academy of Sciences. July - agots, 2016. vol. 125, no. 5, p. 1072

³⁹ YANG, Liu; JINCHUAN, Zhang; XUAN, Tang; CHAO, Yang y SHUAI, Tang. Weathering characteristics of the Lower Paleozoic black shale in northwestern Guizhou Province, south China. En: Indian Academy of Sciences. July - agots, 2016. vol. 125, no. 5, p. 1062

3. TRABAJO DE CAMPO

La siguiente imagen muestra el sitio de estudio de la voladura en cercanías al municipio de Mondoñedo, el objetivo de la voladura es producir fractura miento de la roca, fueron usados 400 gramos de explosivo repartido en dos barrenos separados 2m aproximadamente.

Figura 14. Ubicación del Banco de Voladura y Carga Explosiva en la Cantera La Roca, Municipio de Mondoñedo, Cundinamarca



Fuente. Los Autores

En la Figura 14 se muestra el banco a volar y el explosivo que se está utilizando, Emulin E de la industria militar INDUMIL; cada barreno es cargado con una barra de 245gr y se detona en total dos con diámetro de 2" y longitud de 1.6m, para un total de 490gr de explosivo por tiempo de retardo.

El sitio de la voladura se encuentra perforado en un estrato de areniscas, roca dura clase R4 tomada con el martillo geológico, con intercalaciones de limo arenita como muestra la siguiente imagen. La altura del banco es de 1.5m con una cara libre que genera buen desplazamiento de la roca fragmentada (véase la Figura 15).

Figura 15. Banco de Voladura Intercalación de Areniscas con Limo Arenitas Formación Plaeners



Fuente. Los Autores

Para el registro de las vibraciones de la voladura con explosivos en canteras en sitios donde se realiza explotación minera u obras civiles, es necesario llevar un control de los niveles de amplitud y frecuencia de la señal sísmica con el fin de comparar dichos niveles con los permitidos en normas internacionales.

Fue usado un sismógrafo Abem Vibraloc SN: 138 con un sensor triaxial con rango dinámico de un 1 a 200Hz y que realiza registros tanto en la componente vertical, como en las dos componentes horizontales, también es usado un micrófono de alta sensibilidad para registrar la intensidad del sonido producido por la Voladura (véase la Figura 16).

Para el cálculo de la distancia mínima requerida para no afectar estructuras cercanas al lugar de la voladura se utilizó la formulación de la OSM con la cual se analiza la cantidad de explosivo por tiempo de retardo. La formulación es:

Ecuación 13. Distancia mínima requerida

$$D = SD * \sqrt{W}.$$

Para la cantera La Roca se obtuvo la distancia crítica de afectación de 15.75m, donde el factor de distancia escalada para el presente caso es de 22.5 utilizado según la norma para monitoreo sísmico a distancias de voladura entre 0m a 100m.

Figura 16. Sismógrafo Instantel Junto con el Geófono Triaxial (Interno) y el Micrófono de Alta Sensibilidad



Fuente. Los Autores

4. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en campo por el geófono y el micrófono los cuales describen datos numéricos en componentes como la velocidad, desplazamiento, aceleración, tiempo y frecuencia. Estos resultados están organizados por fecha y hora de la prueba de campo.

4.1 ONDAS TRANSVERSALES

A continuación se presentan los resultados de las ondas transversales (véase el Cuadro 8)

Cuadro 8. Ondas Transversales, pruebas Mondoñedo

GEOFONO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	4ta Prueba	5ta Prueba
PPV (Ponderado)	0.684 mm/s	0.339 mm/s		0.013 mm/s	0.015 mm/s
Veocidad maxima de la partícula	21.598 dB	20.774 dB		18.963 dB	
Frecuencia de cruce cero	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Tiempo (relativo al disparo)	17.255 seg	80.965 seg	8:55:43	0.145 seg	0.135 seg
Aceleracion Maxima	0.237 g	0.304 g		0.012 g	0.013 g
Desplazamiento maximo	0.000 mm	0.000 mm		0.000 mm	0.000 mm
Comprobacion del sensor	Disabled	Disabled	Passed	Disabled	Disabled

Fuente. Los Autores

4.2 ONDAS VERTICALES

A continuación se presentan los resultados de las ondas verticales (véase el Cuadro 9)

Cuadro 9. Ondas Verticales, Pruebas Mondoñedo

GEOFONO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	4ta Prueba	5ta Prueba
PPV (Ponderado)	1.766 mm/s	0.769 mm/s		0.013 mm/s	0.015 mm/s
Veocidad maxima de la partícula	21.344 dB	21.320 dB		18.894 dB	
Frecuencia de cruce cero	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Tiempo (relativo al disparo)	17.209 seg	80.959 seg	8:55:43	0.062 seg	0.135 seg
Aceleracion Maxima	0.717 g	0.247 g		0.012 g	0.013 g
Desplazamiento maximo	0.000 mm	0.000 mm		0.000 mm	0.000 mm
Comprobacion del sensor	Disabled	Disabled	Passed	Disabled	Disabled

Fuente. Los Autores

4.3 ONDAS LONGITUDINALES

A continuación se presentan los resultados de las ondas longitudinales (véase el Cuadro 10)

Cuadro 10. Ondas Longitudinales, Pruebas Mondoñedo

GEOFONO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	4ta Prueba	5ta Prueba
PPV (Ponderado)	1.343 mm/s	0.547 mm/s		0.015 mm/s	0.015 mm/s
Velocidad maxima de la partícula	23.657 dB	22.361 dB		19.392 dB	
Frecuencia de cruce cero	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Tiempo (relativo al disparo)	17.204 seg	80.960 seg	8:55:43	0.135 seg	0.135 seg
Aceleracion Maxima	0.417 g	0.392 g		0.013 g	0.013 g
Desplazamiento maximo	0.000 mm	0.000 mm		0.000 mm	0.000 mm
Comprobacion del sensor	Disabled	Disabled	Passed	Disabled	Disabled

Fuente. Los Autores

4.4 NIVEL PRESIÓN SONORA

A continuación se presentan los resultados de las ondas longitudinales (véase el Cuadro 11)

Cuadro 11. Ondas Frecuencia Sonora, Pruebas Mondoñedo

MICROFONO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	4ta Prueba	5ta Prueba
Nivel máximo de presión sonora	148 dB (L)	99.8 dB (L)	<88 dB (L)	<88 dB (L)	<88 dB (L)
Tiempo (relativo al disparo)	17,201 seg	80.958 seg	8:55:43	3.204 seg	3.204 seg
Frecuencia de cruce cero	85.3 Hz	>100 Hz	2.9 Hz	2.9 Hz	2.9 Hz
Comprobacion del sensor	Disabled	Disabled	Passed	Disabled	Disabled

Fuente. Los Autores

4.5 CUADRO COMPARATIVO

La finalidad de estos resultados y el análisis de estos mismos va hacer transferida a los ingenieros que trabajan y supervisan la cantera “La Roca”, Identificando los picos más altos y más bajos que se encontraron en los datos obtenidos por las voladuras realizadas para analizar (véase el Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparativo de Valores a Analizar

	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	4ta Prueba	5ta Prueba
Carga operante	0.60 Kg	0.50 Kg	0.40 Kg	0.40 Kg	0.40 Kg
PPV (Ponderado) X Longitudinal	1.343 mm/s	0.547 mm/s		0.015 mm/s	0.015 mm/s
PPV (Ponderado) Y Transversal	0.684 mm/s	0.339 mm/s		0.013 mm/s	0.015 mm/s
PPV (Ponderado) Z Vertical	1.766 mm/s	0.769 mm/s		0.013 mm/s	0.013 mm/s
Nivel maximo de presion sonora	148 dB (L)	99.8 dB (L)	<88 dB (L)	<88 dB (L)	<88 dB (L)

Fuente. Los Autores

Se va a mostrar los límites en los cuales las ondas viajan en los 3 ejes cartesianos, (vertical, horizontal y transversal), ya que esto influye en los daños físicos a personas y materiales a edificaciones alrededores de la cantera. Esto va a permitir que los ingenieros de la cantera conozcan y si en dado caso ya están enterados del

tema hacer un recordatorio de los límites según la norma que se utilice, para la operación de explosivos por medio de voladuras para la extracción del material del macizo dentro de la cantera.

Esto va evitar que en un futuro se ocasionen daños a terceros por operaciones dentro de la cantera “La Roca”. También se va a comunicar a la alcaldía y junta de acción comunal detalladamente las actividades realizadas de la cantera para la extracción de material. Determinando y enseñándoles los límites mínimos en los cuales se puede construir una edificación para que no se haya ningún tipo de afectación a predios o a personas. Para el análisis de resultados se graficaron todos los resultados, las memorias de cálculo arrojadas por el geófono y el micrófono se presentan como Anexos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La finalidad de este trabajo de grado es verificar que las ondas producidas por las voladuras estén cumpliendo y estén bajo los valores que exige la norma como punto crítico, o valor máximo permitido en una detonación.

En el momento de realizar la detonación para producir la voladura en una zona específica del macizo el valor de la carga operante supero los valores permitidos por la norma que rige dentro de la cantera. Pero el valor de las vibraciones registrado por los equipos, (geófono y micrófono); no supero los valores máximos de daño, esto quiere decir que no había posibilidad de que surgiera algún daño a las viviendas cercanas por la voladura producida.

Este dato evita posibles conflictos con las personas que habitan en las viviendas próximas a la cantera en veredas o caseríos.

Los cálculos de formulación de la OSM determinan la distancia crítica de 15.75m, entre el lugar de la voladura y la vivienda más cercana.

Las viviendas ubicadas en proximidad a la cantera están a distancias superiores de 15.75m, por tal razón los trabajos de voladura para cantidades de explosivo de 0.49kg no afectan las viviendas cercanas a la cantera La Roca sector de Mondoñedo.

La Cantidad de explosivo utilizado no realiza un trabajo de conminación a diámetros pequeños de material rocoso, el único trabajo que efectúa es fracturamiento del macizo rocoso generando sobre tamaños que requieren fragmentación secundaria, dicha fragmentación se evidencio de forma mecánica y con uso de cementos expansivos.

Para una cantidad de Emulin E de 0.49kg el volumen de tiro por barreno es de 5.73 m³/barreno y en total para la detonación realizada el volumen fragmentado fue de 11.46 m³/voladura demostrando que se efectuó un proceso de fracturación del macizo y no conminación a diámetros pequeños.

Según las gráficas arrojadas por el geófono y el micrófono no muestran datos muy similares los cuales nos muestran que el tiempo de disparo es muy rápido los cuales oscilan entre 17 y 18 segundos hubo dos disparos los cuales el equipo registro un dato de 80 segundos en los cuales se evidencio la detonación y después de la detonación las ondas que se efectuaron alrededor.

En una de las voladuras efectuadas la comprobación del sensor fue permisible esto arrojó una frecuencia de la onda de 19.7 Hz. Esta frecuencia es mayor a todas las frecuencias tomadas y registradas en todas las voladuras que se realizaron. Sin

embargo, el desplazamiento de la onda no fue tan alto para alcanzar afectar algún predio cercano a la cantera.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las pruebas de campo se realizaron seguimiento constante por medio del geófono y micrófono en el frente o zona de cada voladura permitiendo tomar datos como frecuencia de ondas, velocidades de las ondas y de las partículas del macizo. Por lo tanto, estos datos son analizados reconociendo la posibilidad de que estos valores monitoreados se encuentren por encima o por debajo de los valores permitidos por la norma controlando las afectaciones a predios cercanos.

Se establecieron puntos estratégicos para el monitoreo de las vibraciones producidas por las voladuras para poder obtener valores reales y claros, esto quiere decir que no haya ninguna interrupción de la onda en el momento de la explosión y que ningún otro sonido como carros u otras detonaciones en otras zonas de la cantera fueran afectar los datos que se están tomando para este análisis.

Además de la ubicación estratégica de los equipos se escogió muy cuidadosamente, con autorización y recomendación de los ingenieros de la cantera; puesto que en este macizo se extrae diferentes materiales como: arenas, rocas y gravas. En la zona donde se realizaron las voladuras el macizo tenía una característica rocosa y con poca probabilidad de producir fracturas nuevas o extender y dilatar fracturas existentes.

Para las voladuras realizadas con 0.49kg de Emulin E no presentan afectación a las edificaciones cercanas puesto que estas se ubican a distancias superiores a 15.75m. Si se realizan cambios al diseño de voladura para detonar mayor cantidad de explosivo se recomienda realizar un chequeo previo con la normatividad para asegurar los resultados en cuanto a la no afectación de estructuras cercanas.

Si se necesita realizar voladuras de gran tamaño con mayores cantidades de explosivo, se recomienda utilizar agentes de voladura con menor velocidad de detonación y uso de Exel Connectadet con línea de inicio y evitar el uso de cordón detonante, esta metodología ayudara a disminuir las vibraciones en voladuras de gran dimensión y volumen final. Es claro según las cuatro voladuras realizadas que para la cantidad de explosivo usada en la voladura (400gr), los niveles de sismicidad en la vivienda de observación, no superan los valores permitidos por la norma DIN4150.

Sin embargo, en el sitio de la vivienda los test de ruido culturales muestran que los valores de velocidad llegan a ser un 16% aproximadamente antes de llegar al valor permitido (3mm/s), debido a la presencia de la vía y a una exposición prolongada de vibraciones de este orden se pueden producir afectaciones muy mínimas en estructuras sensibles como las viviendas, debidas en su mayor parte al paso de vehículos pesados. Seguramente exceso de carga y velocidad en los vehículos superarán en gran medida los valores de velocidad permitida.

Los valores de velocidad de las ondas producidas por la maquinaria dentro de la cantera superan el máximo permitido por la norma, pero esta situación es normal debido al mismo hecho de la explotación. Se recomienda hacer estudio en diferentes sitios, a menos que la cantidad de carga en las voladuras se aumente, esto permitirá reconocer de mejor forma como el macizo rocoso y suelos del área distribuyen las ondas sísmicas.

También se recomienda a toda la población del sector que transite en vehículos pesados manejar a bajas velocidades, ya que están produciendo vibraciones prolongadas en las estructuras que afectan las viviendas cercanas debido a la exposición prolongada de estas.

Es muy importante antes de comenzar el monitoreo de las vibraciones por voladuras del macizo tener la seguridad de que los equipos que se van a utilizar en este caso el geófono y el micrófono estén debidamente calibrados, se encuentren con buena energía para la prueba de campo y que estén certificados por el fabricante. Esto garantizará que los datos tomados en campo sean completamente confiables.

Para realizar todas estas pruebas con este tipo de materiales con alto grado de manipulación es necesario contar con personal calificado para manipular los explosivos, utilizar los equipos de monitoreo, personal de la cantera que conozca la zona y estar guiado por una persona especializada en el tema de explosivos.

BIBLIOGRAFÍA

ANICAMA LUJÁN, Alberto Hermógenes. Monitoreo De Los Efectos De Las Vibraciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de grado, 2010. 110 p.

BENITES CORREA, Agapito Gabriel. La distancia mínima entre taladros para evitar los daños de los detonadores electrónicos por presión dinámica, en mina Lagunas Norte. Lima: Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2017. 98 p.

BENITO, Belén y CABAÑAS, Luis. Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica [en línea]. Madrid: Asociación Red Latin Geo [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: http://redgeomatca.rediris.es/sismo/pdf/pub_015.pdf>

BENJUMEA CADAVID, Juan Manuel. Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías. Modalidad trabajo de grado, 2003. 120 p .

CANO MUCHA, Jonatan Christian. Estudio de vibraciones para la selección de explosivo Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2019. 115 p.

CASTILLA GÓMEZ, Jorge y HERRERA HERBERT, Juan. Modelización de parámetros de voladura para la optimización. Memorias IX Jornads Iberoamericanas de Materiales de Construcción. (9 y 10 de agosto). Quito: Universidad Politecnica de Madrid, 2011.

CHILE. MINISTERIO DE MINERIA. Detonador [en línea]. Santiago: El Ministerio [citado 20 mayo, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-d/detonador/>>

COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 334 (28, febrero, 2002). Por el cual se establecen normas en materia de explosivos. Bogotá: La Presidencia, 2002. 10 p.

COLORADO, Carlos Alberto. Clasificación y características de los explosivos. Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares, 2016. 185 p.

CONTRERAS PÉREZ, Willy José. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones.

Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2009. 98 p.

CONTRERAS, J. Manual de perforacion y voladura de rocas. Caracas: Escuela de geologia, minas y geofisica, 2001. 210 p.

DIRGUA ANGARITA, Martin Alfonso. Seguimiento y análisis de la medición de velocidad de partículas generadas por vibraciones sísmicas en la línea 13 del proyecto de adquisición geofísica VSM 2d-2017 en el departamento del Tolima. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Modalidad trabajo de grado, 2018. 87 p.

ESPÍNDOLA, J. M. Terremotos y ondas sísmicas. Bogotá: UNAM, 1994.358 p.

GUTIÉRREZ, Valeria. Vibración y Ondas Sísmicas [en línea]. Bogotá: Scribd [citado 10 marzo, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/414200851/225-10-Vibracion-y-Ondas-Sismicas>>

INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. Como Trabaja un Sismógrafo? [en línea]. New York: National Science Foundation [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.iris.edu/hq/files/publications/brochures_onepagars/doc/SP_1pager_7.pdf>

LÓPEZ QUINTERO, C. Guia de estudios de manejo de vibraciones para la especializacion tecnologica en explosivos. Lima: Universidad Nacional de Peru, 2007. 145 p.

MUCHO PONCE, Elwis Anthony. Aplicación de un modelo de vibraciones para el control de voladuras en Tajo San Gerardo Mina Atacocha. Tacta: Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna. Facultad de Ingeniería. Modalida trabajo de grado, 2016. 74 p.

ORTIZ OLIVARES, Arturo Elias. Monitoreo de vibraciones, ondas acústicas y determinación de la onda de soplo por efecto de voladura, en el túnel de aducción de la central hidroeléctrica Chaglla. Departamento de Huánuco. Arequipa: universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Facultad de Geológica, Geofísica y Minas. Modalidad trabajo de grado, 2016. 89 p.

PAMPACATA HOLGADO, Lucio Raymundo. Análisis de Vibraciones Inducidos por la Voladura de Rocas en Canteras Atocongo en Zonas Cercanas a poblaciones. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Modalidad trabajo de grado, 2015. 116 p.

PEDRO ALEXANDRE, Antonio M.; JOE BOY, Seidu Amadu y OTAÑO NOGUEL, José. Análisis del diseño de voladuras con cargas compactas en la cantera de áridos el cacao. En: Minería y Geología. Octubre-diciembre, 2006. vol. 22, no. 4.

PETROBLAST SAS. Estudio de vibraciones generadas por vibrocamiones LITTON 315, para la exploración sísmica petrolera. Coyaima, Tolima. 2017 86 p.

QUIROZ-COTRINA, Christa. Monitoreo de vibraciones causadas por voladuras en taludes. En: REFI UPN. Enero – marzo, 2014. vol. 2, no. 2.

ROJAS PERILLA, Laura Lizeth y RIVERA PARDO, Sebastián Alberto. Caracterización de suelos arcillosos desecados al Occidente de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Universidad de La Sabana. Facultad Ingeniería Civil. Modalidad Trabajo de grado, 2012. 87 p.

SISKIND, D. E. STAGG, M. S; KOPP, J. W. y DOWDING, C. H. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting [en línea]. United States: Bureau of Mines [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/USBM/RI8507BlastingVibration1989.pdf>>

SUÁREZ CUEVA, Hans Josein y TORRES DÍAZ, Omar Michel. "Sistema Autónomo de Monitoreo Remoto para la Optimización del Registro de Vibraciones en Procesos de Voladuras en Minería y Construcción Civil. Lima: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Modalidad trabajo de grado, 2015. 85 p.

SUAREZ BURGOA, Ludger; VALENCIA GONZÁLEZ, Yamile; ORDÓÑEZ CARMONA, Oswaldo; NAVARRO MONTOYA, Andrés y HIDALGO GÓMEZ, Bayron. Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del proyecto hidroeléctrico Porce III, Colombia. En: Boletín De Ciencias De La Tierra. Junio - Noviembre, 2009. no. 26.

TOVAR LLOCCLA, Franklin Anderson. Aplicación del principio de la velocidad pico partícula (VPP), para minimizar el daño al macizo rocoso-utilizando Retardos- Veta Lourdes consorcio minero horizonte - La Libertad. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2015. 74 p.

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. El sismógrafo [en línea]. Valladolid: La Universidad [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Sismografo/Sismografo.html>

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. El sismógrafo [en línea]. Valladolid: La Universidad [citado 10 abril, 2019]. Disponible en Internet: <URL: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Sismografo/Sismografo.html>

YANG, Liu; JINCHUAN, Zhang; XUAN, Tang; CHAO, Yang y SHUAI, Tang. Weathering characteristics of the Lower Paleozoic black shale in northwestern Guizhou Province, south China. En: Indian Academy of Sciences. July, 2016. vol. 125, no. 5.

ZAPATA PORRAS. Jonathan Marcial. Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas en la Compañía de Minas Caudalosa S.A. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería de Minas. Modalidad trabajo de grado, 2012. 98 p.

ANEXOS

Anexo A. Vibraciones Mondoñedo



Waveform Trigger Source
 Trigger Level(s)
 Pre-Trigger/Record Time
 Sample Rate
 Operator/Setup File Name
 Job Number

Tran at November 24, 2018 09:17:08
 Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
 0.00 sec/66.8 sec (Fixed)
 2048 sps
 CARLOS VALENCIA/SUPER
 BELALCAZAR.MMB

Serial Number
 Model Number
 Battery Level
 Unit Calibration
 Event File Name
 USB Sensor Support



UM12094
 Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
 3.7 volts
 June 7, 2017 by Instantel
 UM12094_20181124091708.IDFW
 Disabled

Notes

Location:
 Client:
 User Name:
 General:

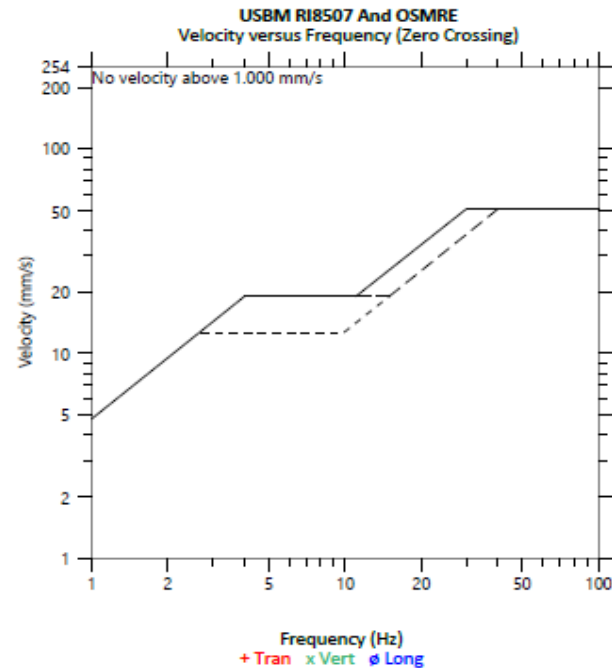
YUMBO COLOMBIA
 PRUEAS ESING
 GRCO SAS

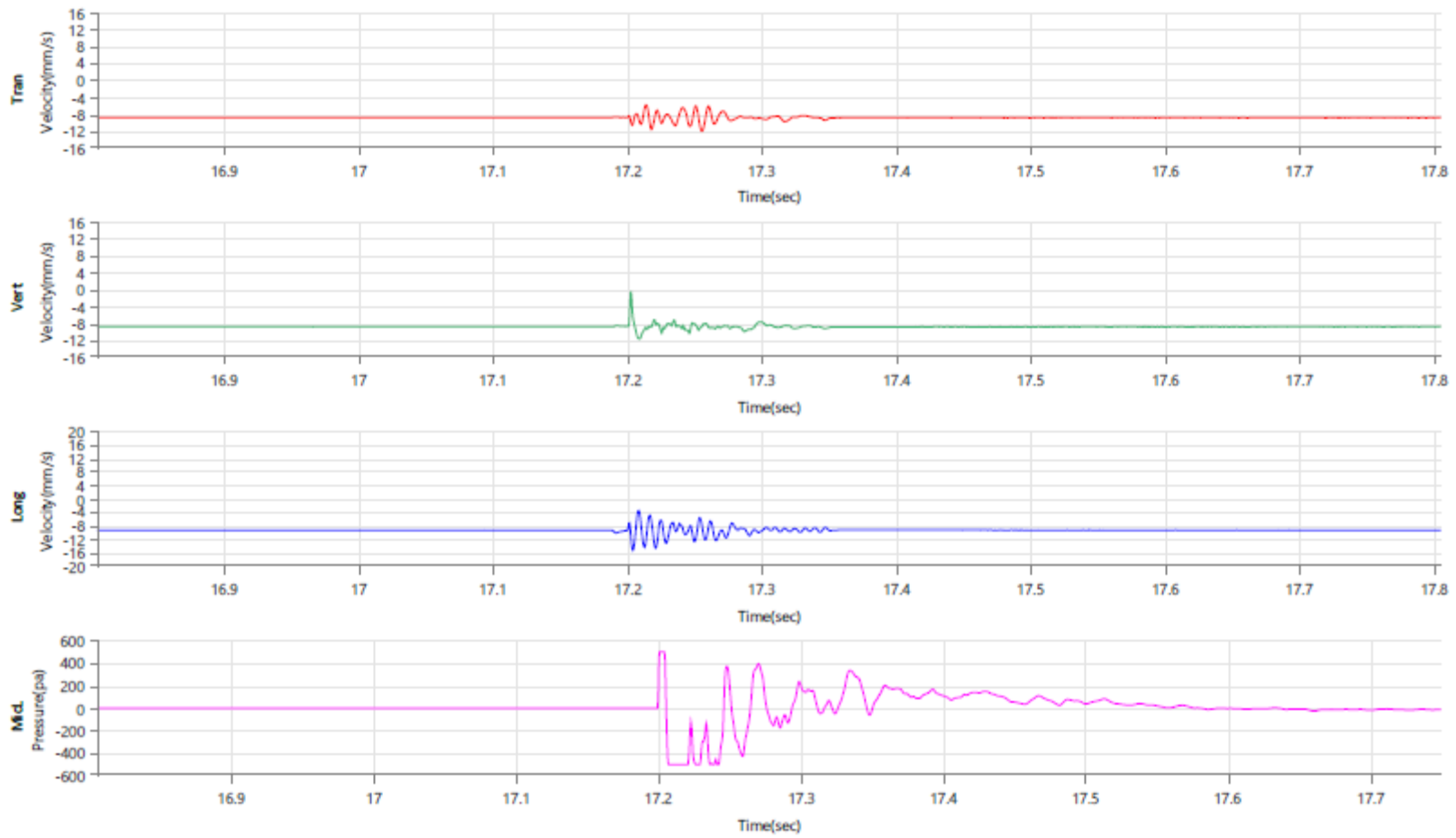
Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	12.020 mm/s	11.673 mm/s	15.236 mm/s
PPV (Ponderated)	0.684 mm/s	1.766 mm/s	1.343 mm/s
Peak Particle Velocity	21.598 dB	21.344 dB	23.657 dB
Zero Crossing Frequency	N/A	N/A	N/A
Time (Relative to Trigger)	17.255 sec	17.209 sec	17.204 sec
Peak Acceleration	0.237 g	0.717 g	0.471 g
Peak Displacement	0.000 mm	0.000 mm	0.000 mm
Sensor Check	Disabled	Disabled	Disabled
Peak Vector Sum	19.545 mm/s at 17.204 sec		

ISEE Linear Microphone
 Peak Sound Pressure Level
 Peak Sound Pressure Level
 Time (Relative to Trigger)
 Zero Crossing Frequency
 Sensor Check

 148.0 dB(L)
 17.201 sec
 85.3 Hz
 Disabled







Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 09:17:08
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/66.8 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support



Geophysical Researchers Consulting
INGENIEROS EN GEOLÓGIA CONSULTORES
Quality of Service Made Real and Secure

UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124091708.IDFW
Disabled

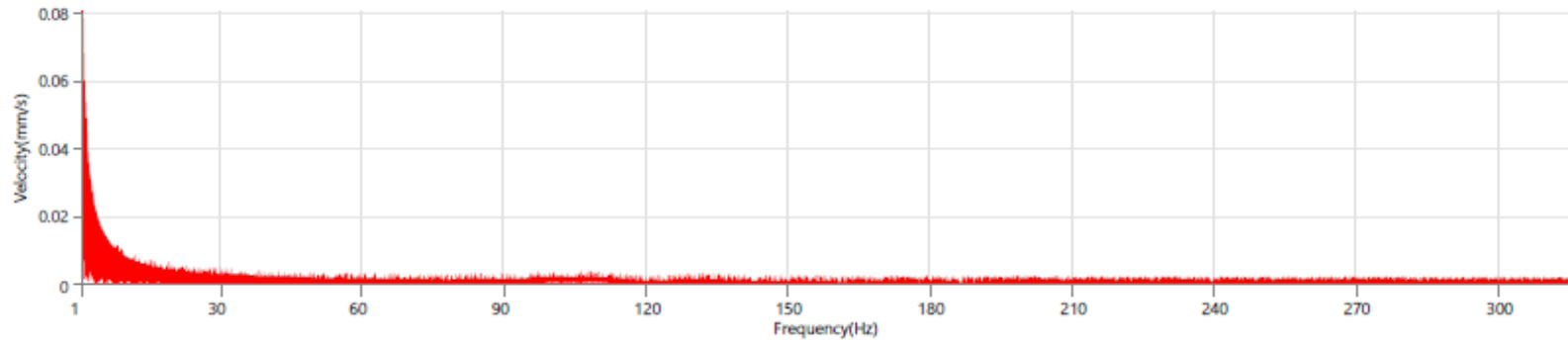
Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

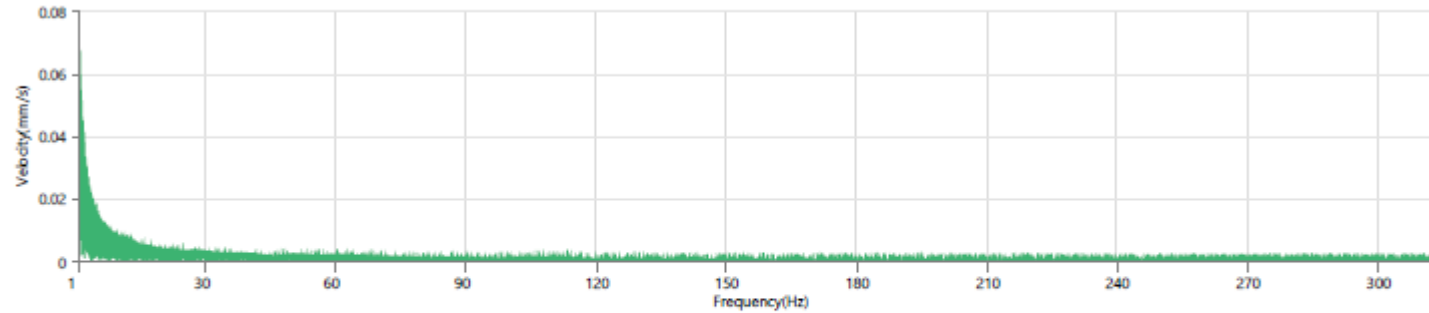
YUMBO COLOMBIA
PRUEAS ESING
GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

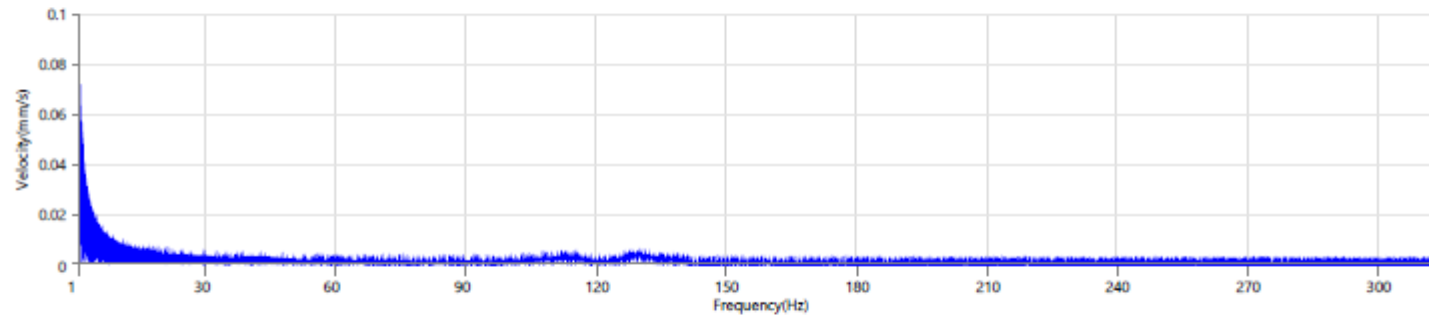
Tran - Dominant Frequency 1.1 Hz, Amplitude 0.078 mm/s (Peak Particle Velocity: 12.020 mm/s)



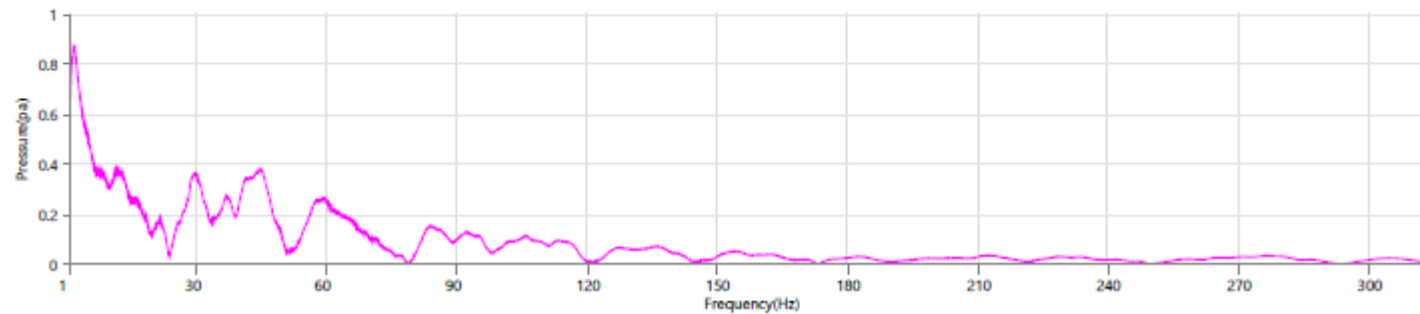
Vert - Dominant Frequency 1.1 Hz, Amplitude 0.077 mm/s (Peak Particle Velocity: 11.673 mm/s)



Long - Dominant Frequency 1.1 Hz, Amplitude 0.082 mm/s (Peak Particle Velocity: 15.236 mm/s)



MicL - Dominant Frequency 2.0 Hz, Amplitude 0.87 pa (Peak Sound Pressure Level: 500.03 pa)





Vibraciones Mondoñedo



Geophysical Researchers Consulting
INVESTIGACIONES EN GEOPHISICA CONSULTORIA
Geology & Geotechnical Studies Assistance and Geomatics Applications

Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 09:34:25
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/90.0 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support

UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124093425.IDFW
Disabled

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

YUMBO COLOMBIA
PRUEAS ESING
GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

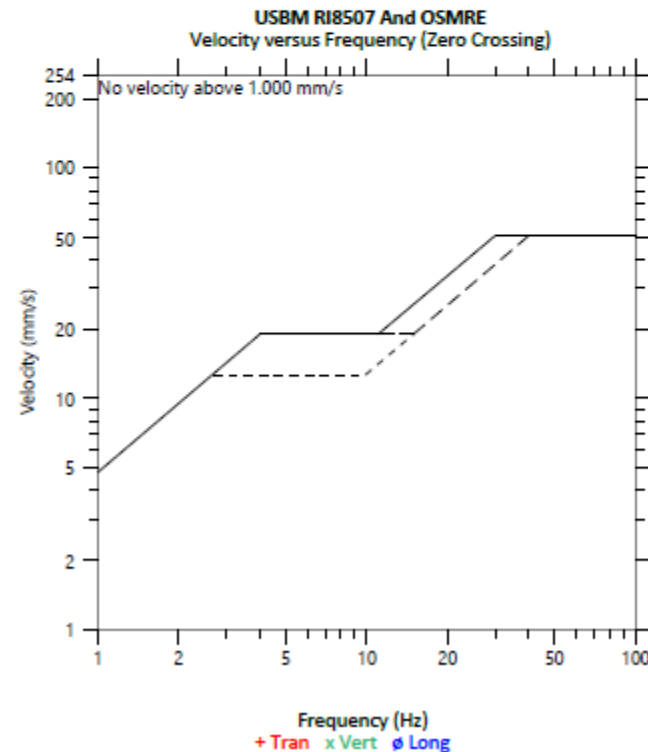
Geophone

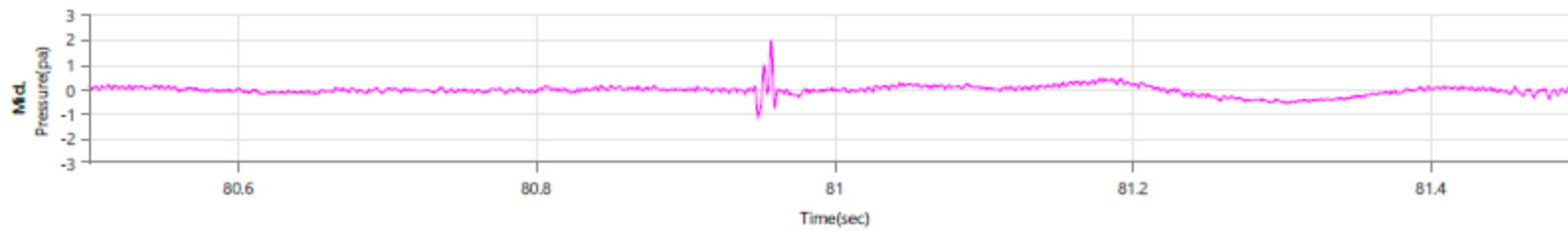
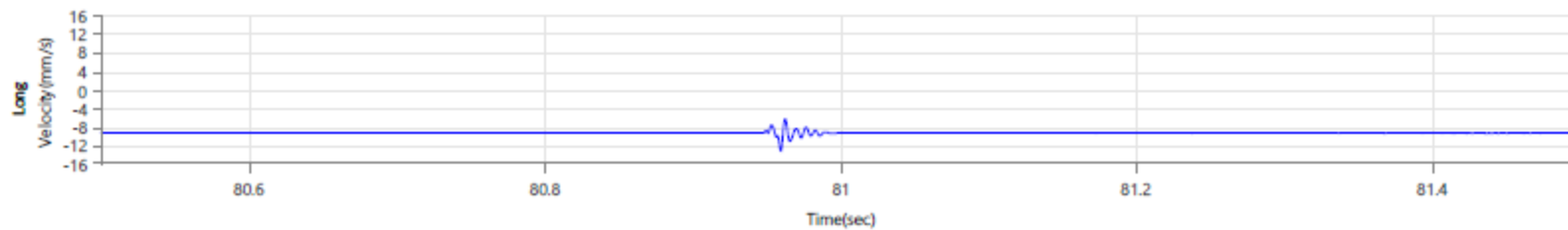
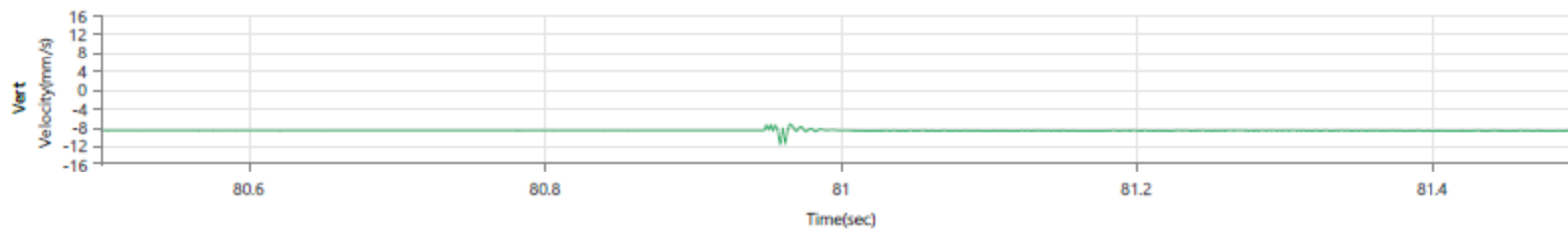
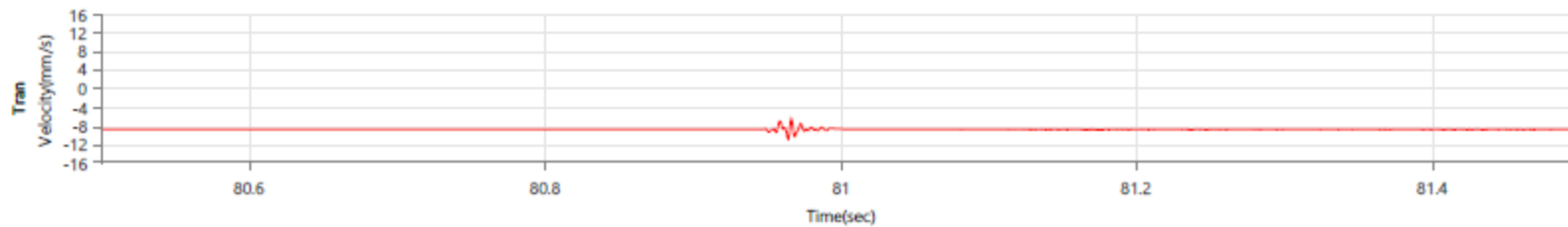
	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	10.932 mm/s	11.641 mm/s	13.123 mm/s
PPV (Ponderated)	0.339 mm/s	0.769 mm/s	0.547 mm/s
Peak Particle Velocity	20.774 dB	21.320 dB	22.361 dB
Zero Crossing Frequency	N/A	N/A	N/A
Time (Relative to Trigger)	80.965 sec	80.959 sec	80.960 sec
Peak Acceleration	0.304 g	0.247 g	0.392 g
Peak Displacement	0.000 mm	0.000 mm	0.000 mm
Sensor Check	Disabled	Disabled	Disabled

Peak Vector Sum 18.667 mm/s at 80.959 sec

ISEE Linear Microphone

Peak Sound Pressure Level	1.95 pa
Peak Sound Pressure Level	99.8 dB(L)
Time (Relative to Trigger)	80.958 sec
Zero Crossing Frequency	>100 Hz
Sensor Check	Disabled







Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 09:34:25
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/90.0 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support



Geophysical Researchers Consulting
INVESTIGACIONES EN GEOFISICA CONSULTORIAS
Guarantee of Services and Quality of Geophysical Research

UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124093425.IDFW
Disabled

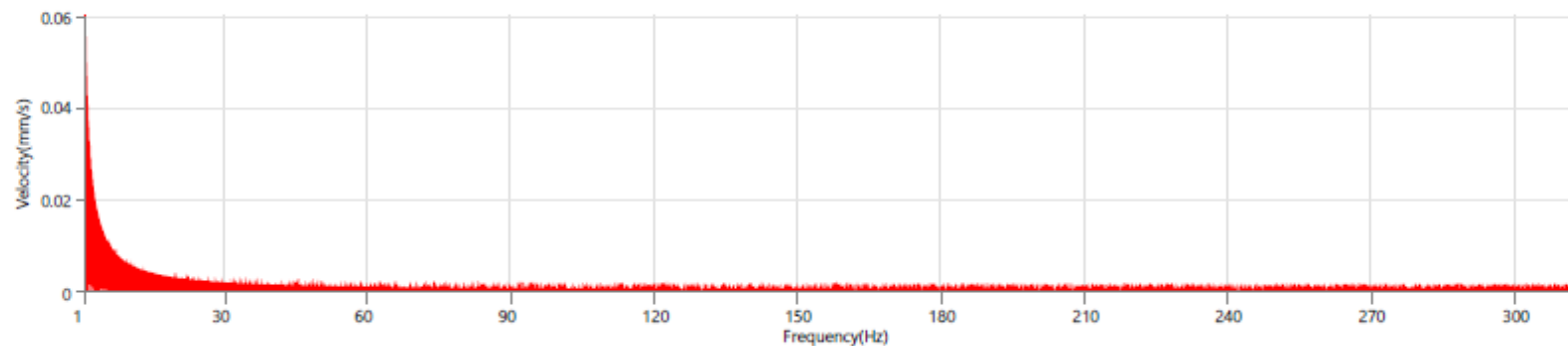
Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

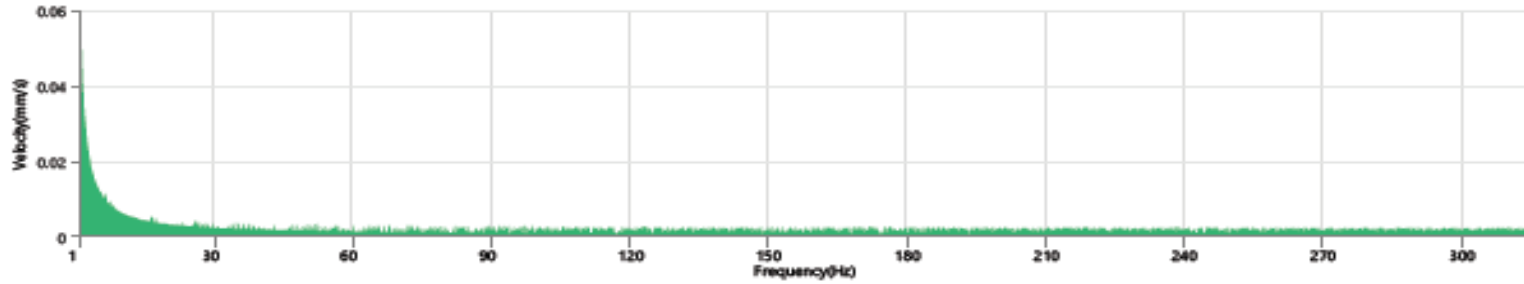
YUMBO COLOMBIA
PRUEAS ESING
GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

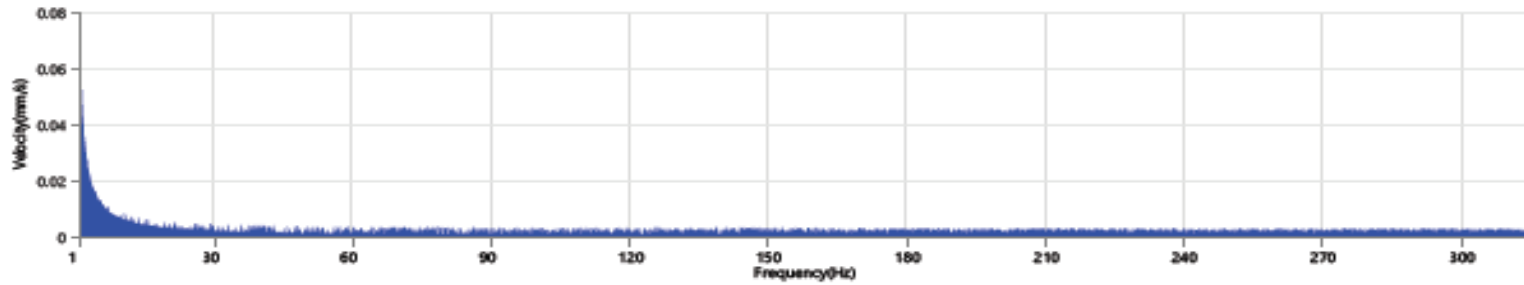
Tran - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 0.060 mm/s (Peak Particle Velocity: 10.932 mm/s)



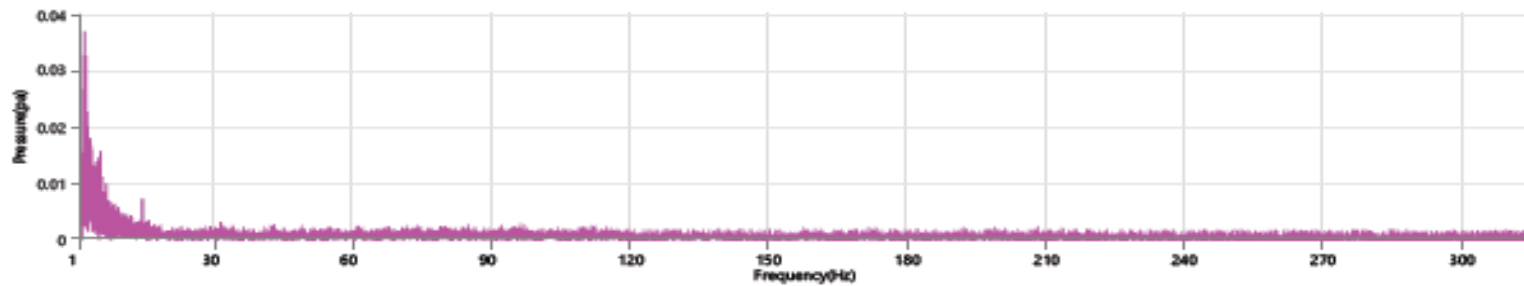
Vert - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 0.060 mm/s (Peak Particle Velocity: 11.641 mm/s)



Long - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 0.063 mm/s (Peak Particle Velocity: 13.123 mm/s)



MicL - Dominant Frequency 2.1 Hz, Amplitude 0.04 pa (Peak Sound Pressure Level: 1.95 pa)





Vibraciones Mondoñedo



Start
Finish
Number of Intervals/Interval
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

November 24, 2018 08:55:40
 November 24, 2018 08:55:43
 0.74/5 sec
 2048 sps
 CARLOS VALENCIA/SUPER
 BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support

UM12094
 Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
 3.7 volts
 June 7, 2017 by Instantel
 UM12094_20181124085540.IDFH
 Disabled

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

YUMBO COLOMBIA
 PRUEAS ESING
 GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone

Peak Particle Velocity
Zero Crossing Frequency
Date
Time
Sensor Check

Tran	Vert	Long
8.875 mm/s	8.804 mm/s	9.324 mm/s
N/A	N/A	N/A
Nov 24, 2018	Nov 24, 2018	Nov 24, 2018
08:55:43	08:55:43	08:55:43
✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed

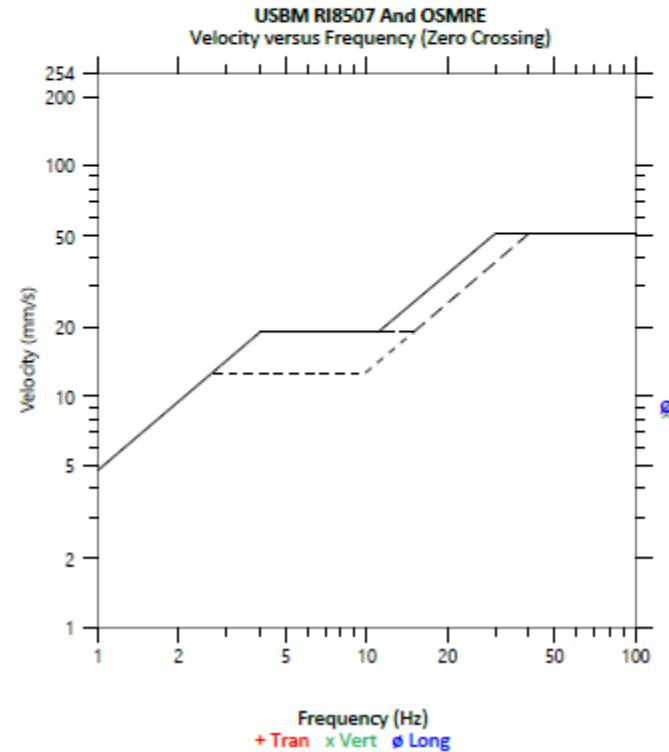
Peak Vector Sum

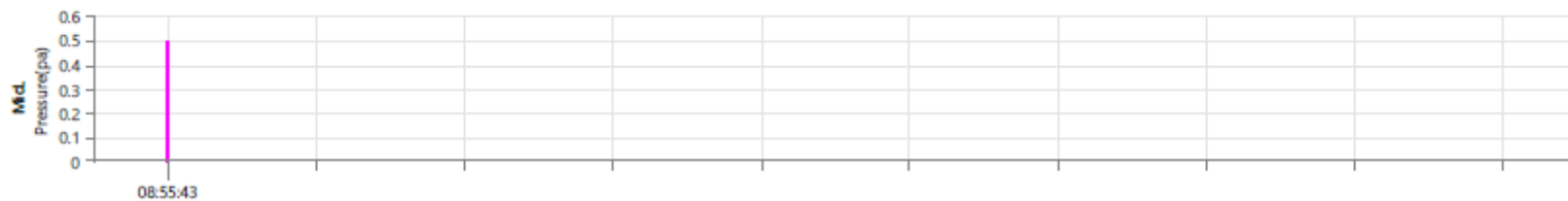
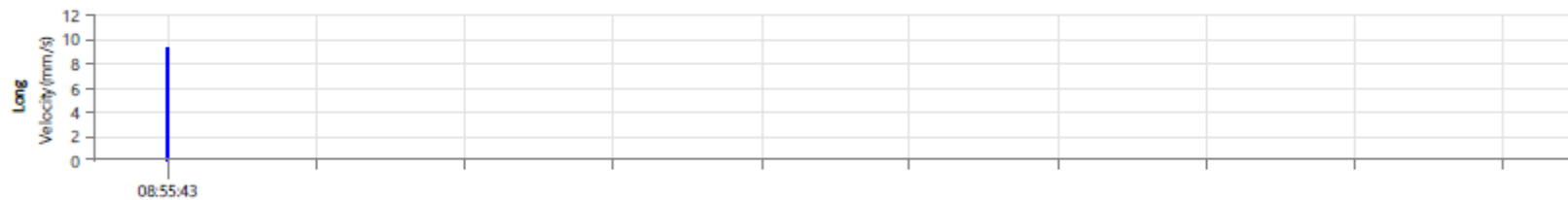
15.591 mm/s at November 24, 2018 08:55:45

ISEE Linear Microphone

Peak Sound Pressure Level
Peak Sound Pressure Level
Date
Time
Zero Crossing Frequency
Sensor Check
Frequency
Test Amplitude

<0.5 pa
 <88 dB(L)
 Nov 24, 2018
 08:55:43
 2.9 Hz
 ✓ Passed
 19.7 Hz
 1298 mv







Vibraciones Mondoñedo



Waveform Trigger Source
 Trigger Level(s)
 Pre-Trigger/Record Time
 Sample Rate
 Operator/Setup File Name
 Job Number

Tran at November 24, 2018 08:55:40
 Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
 0.00 sec/3.8 sec (Fixed)
 2048 sps
 CARLOS VALENCIA/SUPER
 ELALCAZAR.MMB

Serial Number
 Model Number
 Battery Level
 Unit Calibration
 Event File Name
 USB Sensor Support

UM12094
 Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
 3.7 volts
 June 7, 2017 by Instantel
 UM12094_20181124085540.IDFW
 Disabled

Notes

Location: YUMBO COLOMBIA
 Client: PRUEAS ESING
 User Name: GRCO SAS
 General:

Post Event Notes No text to be displayed.

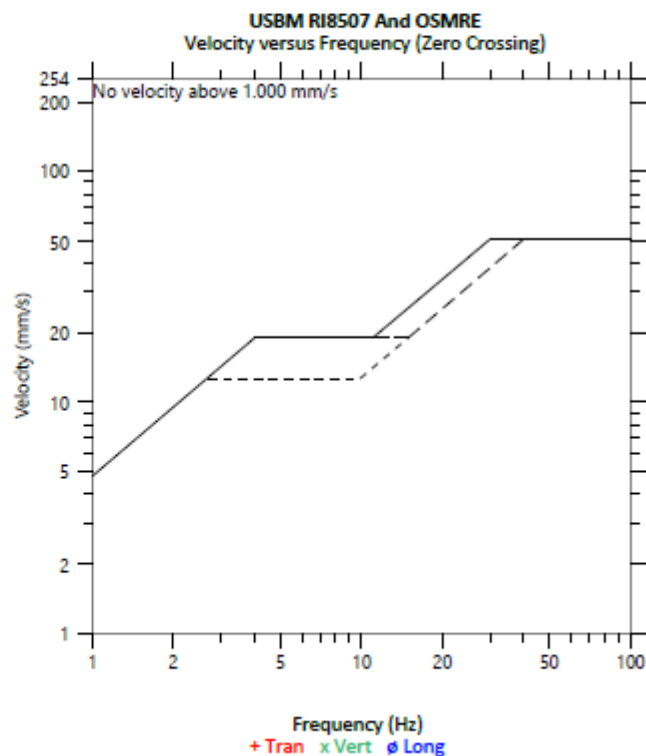
Geophone

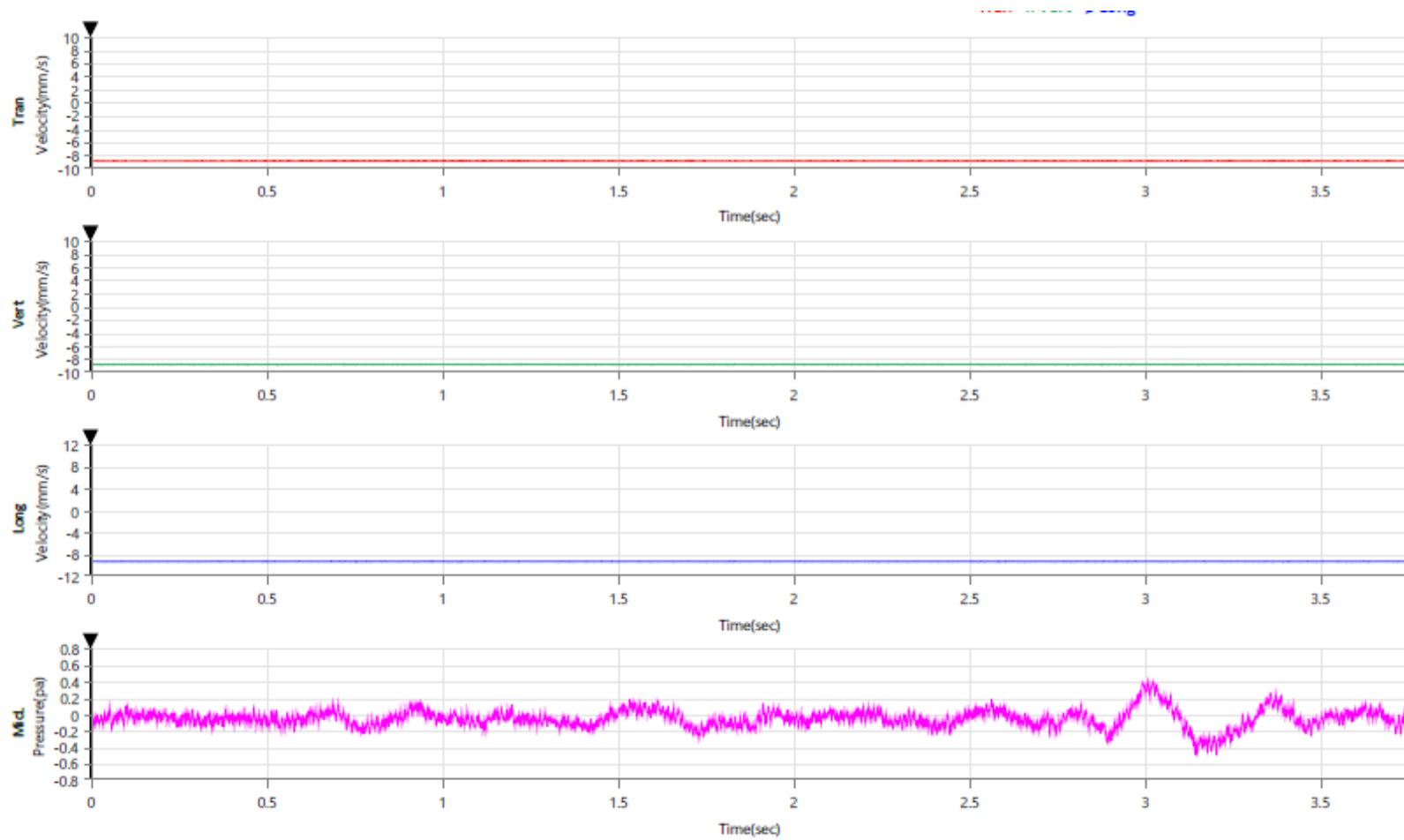
	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	8.875 mm/s	8.804 mm/s	9.324 mm/s
PPV (Ponderated)	0.013 mm/s	0.013 mm/s	0.015 mm/s
Peak Particle Velocity	18.963 dB	18.894 dB	19.392 dB
Zero Crossing Frequency	N/A	N/A	N/A
Time (Relative to Trigger)	0.145 sec	0.062 sec	0.135 sec
Peak Acceleration	0.012 g	0.012 g	0.013 g
Peak Displacement	0.000 mm	0.000 mm	0.000 mm
Sensor Check	Disabled	Disabled	Disabled

Peak Vector Sum 15.591 mm/s at 0.145 sec

ISEE Linear Microphone

Peak Sound Pressure Level	<0.5 pa
Peak Sound Pressure Level	<88 dB(L)
Time (Relative to Trigger)	3.204 sec
Zero Crossing Frequency	2.9 Hz
Sensor Check	Disabled







Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 08:55:40
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/3.8 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support



Geophysical Researchers Consulting
INVESTIGACIONES EN GEOPHISICA CONSULTORIAS
Geology & Geotechnical Studies Institute of Economic Development

UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124085540.IDFW
Disabled

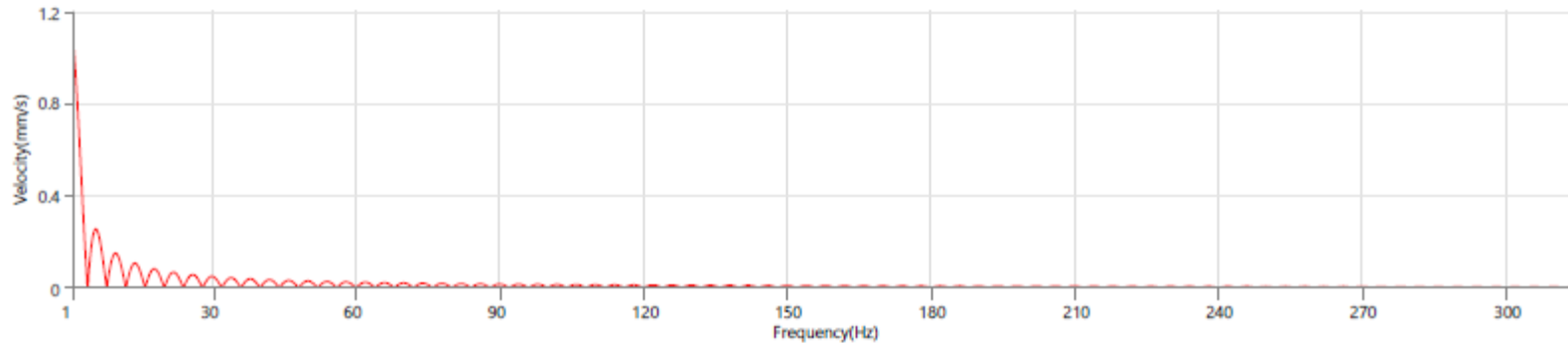
Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

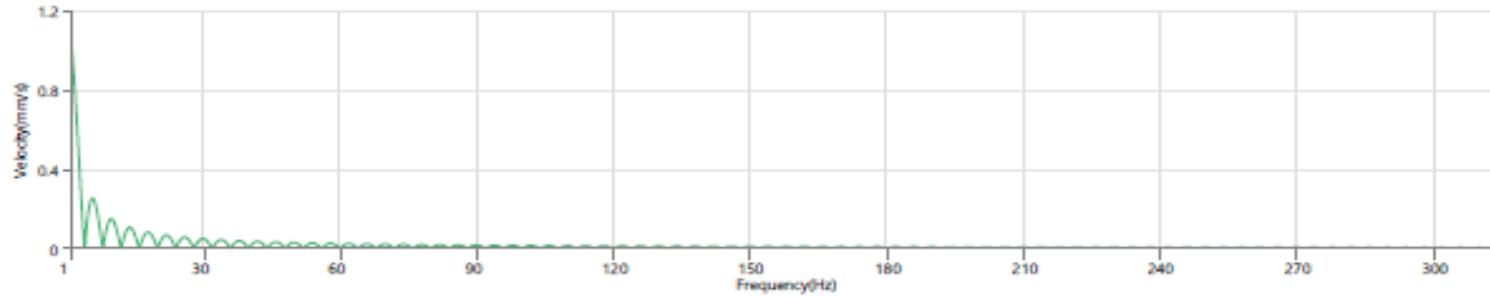
YUMBO COLOMBIA
PRUEAS ESING
GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

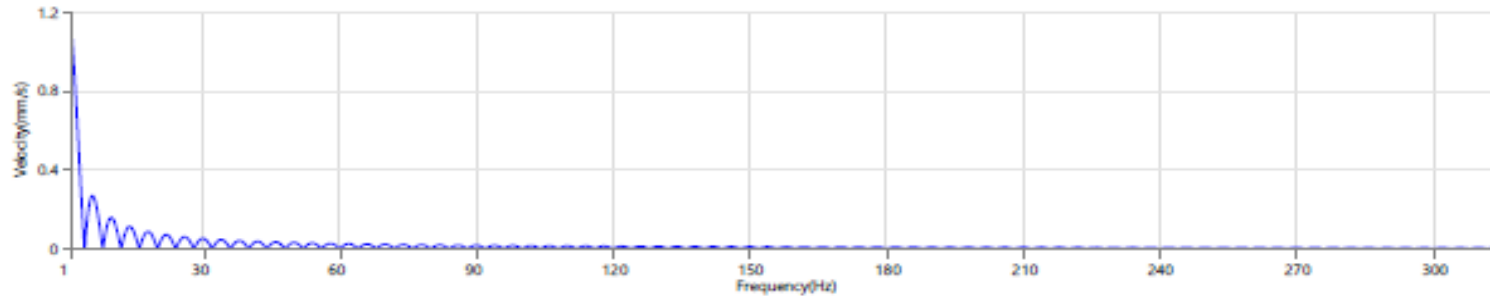
Tran - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.061 mm/s (Peak Particle Velocity: 8.875 mm/s)



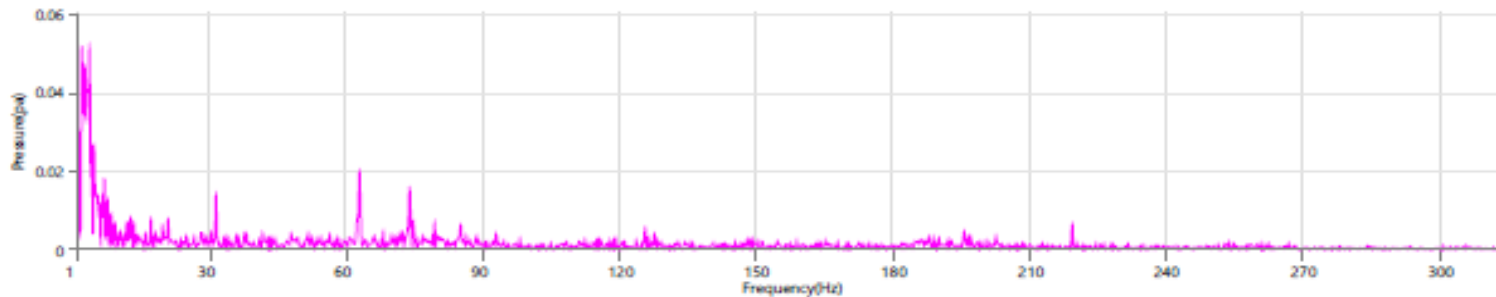
Vert - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.052 mm/s (Peak Particle Velocity: 8.804 mm/s)



Long - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.114 mm/s (Peak Particle Velocity: 9.324 mm/s)



MicL - Dominant Frequency 3.8 Hz, Amplitude 0.05 pa (Peak Sound Pressure Level: 0.50 pa)





Vibraciones Mondoñedo



Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 08:55:40
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/3.8 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support

UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124085540.IDFW
Disabled

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

YUMBO COLOMBIA
PRUEAS ESING
GRCO SAS

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone

Peak Particle Velocity
PPV (Ponderated)
Peak Particle Velocity
Zero Crossing Frequency
Time (Relative to Trigger)
Peak Acceleration
Peak Displacement
Sensor Check

Tran	Vert	Long
8.875 mm/s	8.804 mm/s	9.324 mm/s
0.013 mm/s	0.013 mm/s	0.015 mm/s
18.963 dB	18.894 dB	19.392 dB
N/A	N/A	N/A
0.145 sec	0.062 sec	0.135 sec
0.012 g	0.012 g	0.013 g
0.000 mm	0.000 mm	0.000 mm
Disabled	Disabled	Disabled

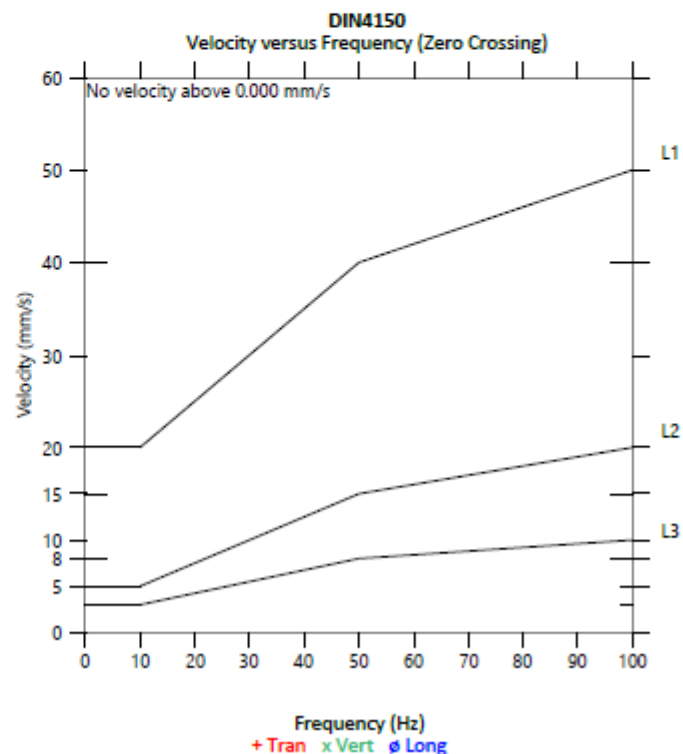
Peak Vector Sum

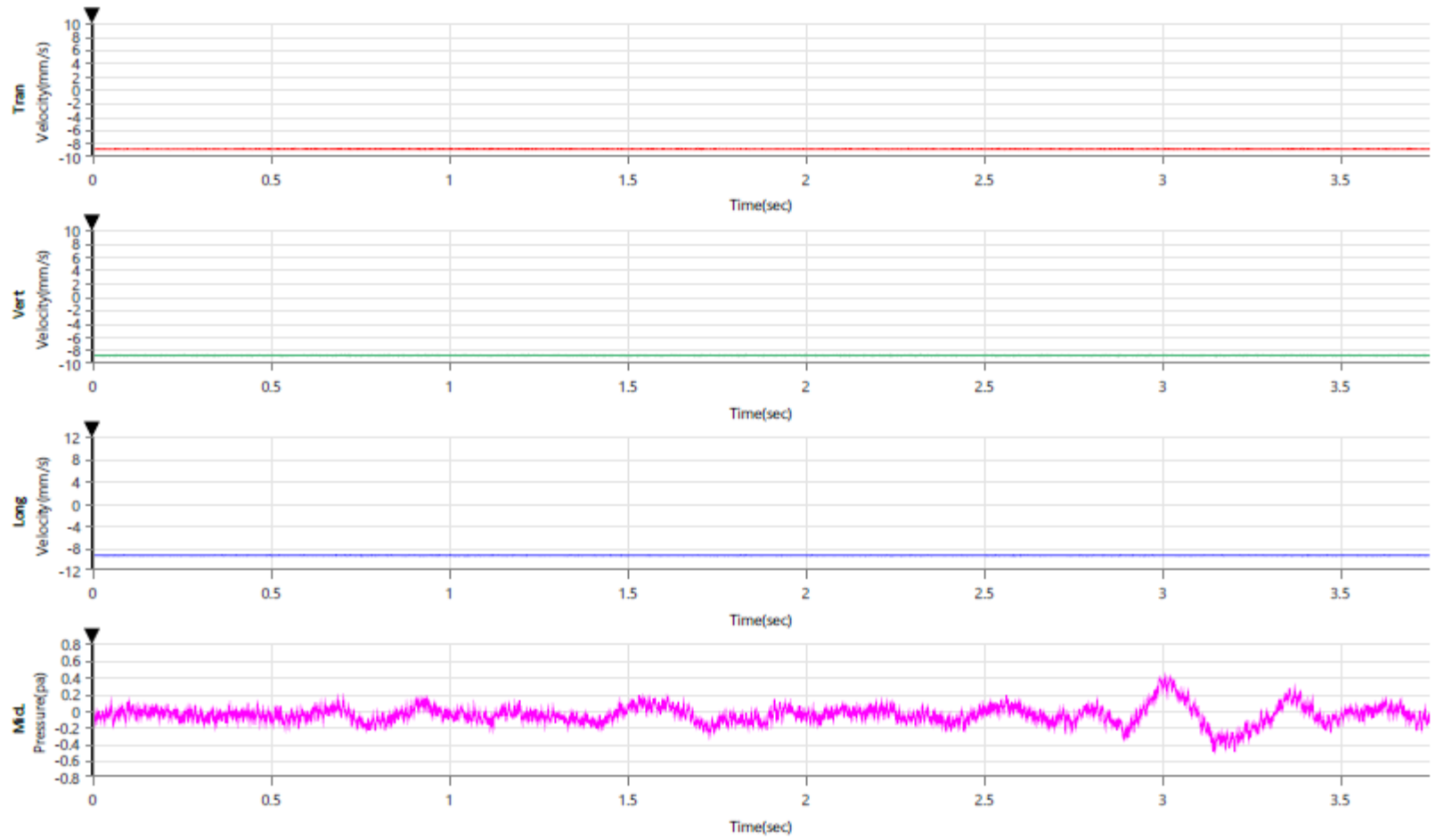
15.591 mm/s at 0.145 sec

ISEE Linear Microphone

Peak Sound Pressure Level
Peak Sound Pressure Level
Time (Relative to Trigger)
Zero Crossing Frequency
Sensor Check

<0.5 pa
<88 dB(L)
3.204 sec
2.9 Hz
Disabled







Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Operator/Setup File Name
Job Number

Tran at November 24, 2018 08:55:40
Geo 4.700 mm/s, Mic 2.24 pa
0.00 sec/3.8 sec (Fixed)
2048 sps
CARLOS VALENCIA/SUPER
BELALCAZAR.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level
Unit Calibration
Event File Name
USB Sensor Support



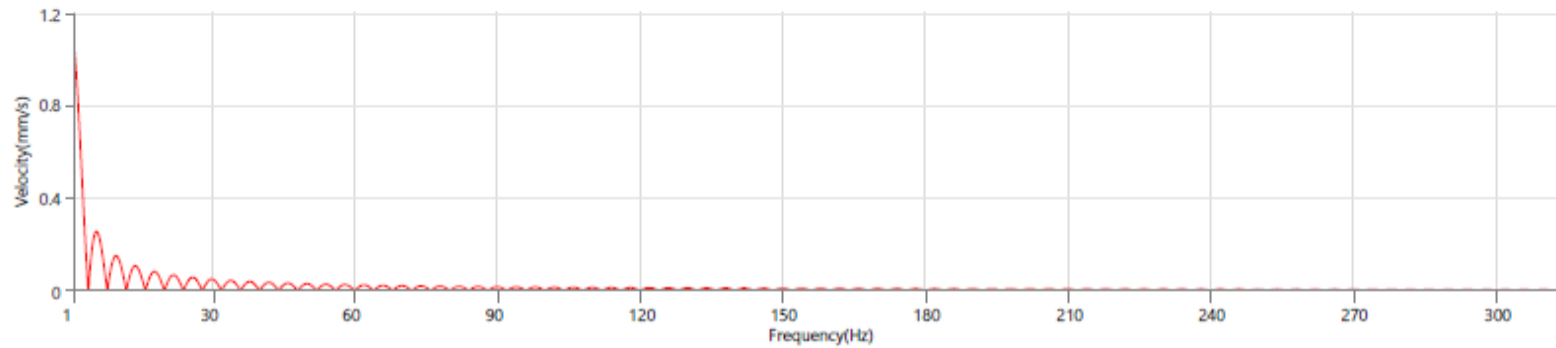
UM12094
Micromate DIN 10.87 SmartGeo™
3.7 volts
June 7, 2017 by Instantel
UM12094_20181124085540.IDFW
Disabled

Notes

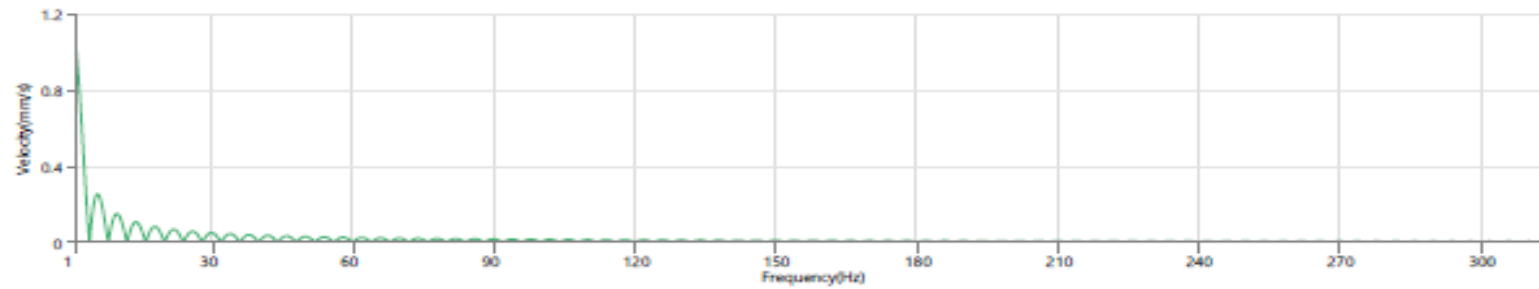
Location: YUMBO COLOMBIA
Client: PRUEAS ESING
User Name: GRCO SAS
General:

Post Event Notes No text to be displayed.

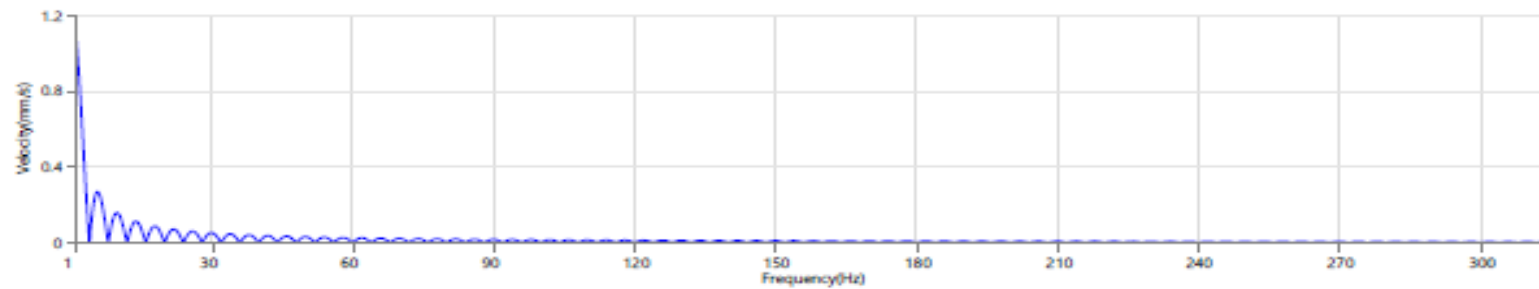
Tran - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.061 mm/s (Peak Particle Velocity: 8.875 mm/s)



Vert - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.052 mm/s (Peak Particle Velocity: 8.804 mm/s)



Long - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 1.114 mm/s (Peak Particle Velocity: 9.324 mm/s)



MicL - Dominant Frequency 3.8 Hz, Amplitude 0.05 pa (Peak Sound Pressure Level: 0.50 pa)

