

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA**



**“MODELAMIENTO, MONITOREO Y CONTROL DE LAS  
VIBRACIONES PARA EVITAR DAÑOS INDUCIDOS POR LA  
VOLADURA DE ROCAS DE UNA OPERACIÓN MINERA  
SUPERFICIAL”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:  
YEISON JEHÙ PEÑA VIZARRETA**

**ASESOR:  
MSC. ING. JOSE ANTONIO CORIMANYA MAURICIO**

**LIMA-PERU**

**2014**

**DEDICATORIA:**

A mis padres, por apoyarme siempre a lo largo de mi vida.

**AGRADECIMIENTO:**

A los asesores de este proyecto, quienes apoyaron y aportaron con su tiempo en correcciones y modificaciones de esta tesis.

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron en la realización de esta tesis.

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se describe y analiza las vibraciones inducidas por la voladura de rocas.

Como se sabe, la causa principal de los impactos ambientales producidos por la voladura de rocas son las vibraciones que se propagan a través del macizo rocoso, como consecuencia de la detonación de las mezclas explosivas comerciales.

Se debe mencionar que en los primeros capítulos de la presente tesis, se describe y analiza todo lo relacionado a las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, luego se seleccionó el modelo matemático de Devine para campo lejano, para monitorear las vibraciones inducidas por la voladura de todos los disparos primarios que se realizaron tanto en el caso estudio N° 01 y el caso estudio N° 02.

Teniendo todos los resultados de monitoreo de vibraciones inducidas por los disparos primarios tanto del caso-estudio N° 01 y N° 02, fueron comparados con las normativas internacionales correspondientes, y se pudo comprobar que en todos los casos, dichos resultados están por debajo de los límites establecidos por dichas normativas internacionales de vibraciones.

Por otro lado, se debe enfatizar que el método usando la velocidad pico de partícula (PPV) es el más usado y que da resultados adecuados y sobre todo confiables.

## ABSTRACT

For the rock fragmentation the use of explosives is very necessary; which can generate several environmental impacts such as: Vibrations, air pressure, noise rock fragment projections, etc.

Some of the environmental impacts mentioned before will cause damage in the structure located near to the mining operations; and also some fatal accidents, etc.

The present thesis described and explains the latest developments for an efficient modeling, monitoring and control of the damage produced by the vibrations induced by the blasting unit mining operation. For this particular case the Devine mathematical model; is used for far field applications.

It is emphasized that good monitoring results were obtained using the Devine model; these results are shown in the tables and figures respectively. Two cases-studies were designed modeled and monitored to obtain the results with a good grade of reliability. The results obtained from the cases-study were compared with several damage criteria postulated by several investigators; and these were within the ranges which no cause any damage to the persons and the structures located near the mining operations.

## ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

	<b>Página</b>
INTRODUCCIÓN	21
CAPÍTULO I – GENERALIDADES	23
1.1 Introducción.	23
1.2 Objetivo Generales.	26
1.3 Objetivos Específicos.	27
1.4 Alcances.	29
1.5 Planteamiento del problema.	29
1.6 Hipótesis.	30
1.7 Metodología de la investigación.	30
1.8 Justificación de la investigación.	31
1.9 Plan de trabajo.	32
1.10 Cronograma de actividades.	32
CAPÍTULO II - MINERIA LIMPIA Y SOSTENIBLE RETO DEL TERCER MILENIO.	34
2.1 Introducción.	34
2.2 Aspecto técnico.	37
2.3 Aspecto económico.	38
2.4 Aspecto ambiental.	40

2.5	Aspecto social.	44
2.6	Las mega-tendencias del tercer milenio.	46
2.6.1	La economía de libre mercado.	46
2.6.2	La globalización.	47
2.6.3	Los impactos ambientales.	49

### CAPÍTULO III - VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA DE ROCAS. 53

3.1	Introducción.	53
3.2	Definición.	56
3.3	Ondas sísmicas inducidas por la voladura.	57
3.3.1	Tipos de ondas elásticas inducidas por la voladura de rocas	58
3.3.1.1	Ondas internas.	59
3.3.1.2	Ondas superficiales.	60
3.4	Propiedades básicas de las ondas.	61
3.4.1	Amplitud (A).	61
3.4.2	Frecuencia (F).	61
3.4.3	Duración.	62
3.4.4	Longitud de onda ( $\lambda$ ).	62
3.4.5	Velocidad de propagación (V).	62
3.4.6	Aceleración(a).	63
3.4.7	Velocidad de partícula (Vx, Vy, Vz).	64
3.4.8	Velocidad de la onda sísmica (Pwv).	64
3.4.9	Desplazamiento.	65

3.4.10	Distancia (D, d).	65
3.4.11	Movimiento armónico simple.	66
3.4.12	Ciclo.	66
3.4.13	Distancia escalada.	66
3.4.13.1	Carga cilíndrica.	67
3.4.13.2	Carga esférica.	68
CAPÍTULO IV - CAUSAS PRINCIPALES DE LAS EXCESIVAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA.		69
4.1	Introducción.	69
4.1.1	Variables no controlables.	70
4.1.2	La geología regional, local y estructural.	71
4.1.3	La hidrología y las condiciones climatológicas.	72
4.1.4	Variables controlables.	73
4.1.4.1	Geométricas.	74
4.1.4.2	Físico-químicas.	74
4.1.4.3	De tiempo.	75
CAPÍTULO V - REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES CRITERIOS DE DAÑO POSTULADOS A LA FECHA.		77
5.1	Introducción.	77
5.2	Parámetros incidentes en el daño.	78
5.3	Criterios de daño.	78
5.3.1	Definición.	81

5.4	Breve descripción de dichos modelos matemáticos.	82
5.4.1	Modelo general.	82
5.4.2	Devine y Duvall.	82
5.4.3	Langerfors.	82
5.4.4	Hendron y Dowding.	83
5.4.5	Holmberg y Persson.	83
5.5	Percepción humana.	84
CAPÍTULO VI - DAÑOS AL MACIZO ROCOSO.		89
6.1	Introducción.	89
6.2	Algunos criterios de daño seleccionados y basados en la Velocidad pico de partícula (PPV).	92
6.2.1	Langerfors, Kihlstrom and Westerberg.	93
6.2.2	USBM.	94
6.2.3	Hook & Bray.	94
6.2.4	Bauer & Calder.	95
6.2.5	Oriad.	95
6.3	Modelo matemático para campo lejano.	97
6.4	Modelo matemático para campo cercano.	99
CAPÍTULO VII - INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA MONITOREAR LAS VIBRACIONES.		100
7.1	Introducción.	100
7.2	Instrumentación para monitorear las vibraciones.	102

7.2.1	Transductores de vibración.	103
7.2.1.1	Precisión.	104
7.2.1.2	Costo.	104
7.2.1.3	Relación señal-ruido.	104
7.3	Acelerómetros.	105
7.4	Geófonos.	105
7.4.1	Frecuencia de los geófonos.	107
7.4.2	Sensibilidad.	107
7.4.3	Máximo desplazamiento de los geófonos.	107
7.4.4	Equipo de adquisición.	108
7.4.5	Equipo de análisis.	109
7.4.6	Instalación de los transductores.	109
7.4.7	Número de transductores.	110
CAPÍTULO VIII - CONTROL, MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA.		112
8.1	Introducción.	112
8.2	Reducir el peso de carga explosiva por retardo.	112
8.3	Proveer alivio.	114
CAPÍTULO IX - NORMATIVAS INTERNACIONALES.		118
9.1	Introducción.	118
9.2	Alemania: DIN 4150 – Deutsches Institut für Normung.	120
9.3	Escocia: PAN 50 Planning Advice Notes.	122

9.4	EE. UU: OSM 817.67.	124
9.5	EE. UU: USBM RI 8507.	125
9.6	España: UNE 22-381-93.	126
9.7	Suiza: SN 640 315.	130

CAPÍTULO X – CASOS ESTUDIO MONITOREADOS, APLICANDO  
LOS MODELOS MATEMÁTICOS ANALIZADOS Y REVISADOS  
EN ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN. 132

10.1 Introducción. 132

10.2 Caso-estudio N° 01: Monitoreo de vibraciones para la ciudad  
cercana al tajo abierto de la mina. 134

10.2.1 Voladura primaria N° 01 143

10.2.2 Voladura primaria N° 02 147

10.3 Caso-estudio N° 02: Monitoreo de vibraciones para la carretera  
cercana al tajo abierto de la mina. 152

10.3.1 Voladura primaria N° 01 160

10.3.2 Voladura primaria N° 02 163

CAPÍTULO XI – INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE  
RESULTADOS. 169

11.1 Introducción. 169

11.2 Resultados del monitoreo de vibraciones para la ciudad  
cercana al tajo abierto de la mina. 169

11.3 Resultados del monitoreo de vibraciones para la carretera cercana al tajo abierto de la mina.	171
CONCLUSIONES.	174
RECOMENDACIONES.	179
BIBLIOGRAFÍA.	182

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura N° 1.1: Fragmentación adecuada como resultado de la voladura de rocas.	24
Figura N° 1.2: Fragmentación no adecuada como resultado de la voladura de rocas.	25
Figura N° 1.3: Factores y entes para el crecimiento de un país.	29
Figura N° 2.1: Muestra cómo se interrelacionan estos factores.	36
Figura N° 2.2: Muestra a trabajadores capacitados por la empresa in-situ	38
Figura N° 2.3: Muestra el diseño de un banco en minería superficial.	39
Figura N° 2.4: Muestra la audiencia pública del estudio de impacto ambiental de una mina en Perú.	40
Figura N° 2.5: Campamentos de una compañía minera del centro del Perú.	42
Figura N° 2.6: Muestra cómo debe quedar el área de la explotación antes, durante y después del cierre de mina.	44
Figura N° 2.7: Muestra que la industria extractiva minera tiene un efecto multiplicador.	45
Figura N° 2.8: Muestra gráficamente la economía de libre mercado.	47
Figura N° 2.9: Muestra gráficamente el efecto de la globalización en la industria.	49
Figura N° 2.10: Muestra los impactos ambientales producidos por la actividad del hombre.	52

Figura N° 3.1: Muestra cómo afectan las vibraciones inducidas por la voladura de rocas a las infraestructuras aledañas a la zona del disparo	56
Figura N° 3.2: Muestra las ondas que producen la detonación de una mezcla explosiva comercial.	59
Figura N° 3.3: Se muestra el espectro de ondas que se generan en el momento de la detonación de una mezcla explosiva comercial cargada dentro de un taladro.	60
Figura N° 3.4: Muestra la variable amplitud.	61
Figura N° 3.5: Muestra Displacement, velocity and acceleration in simple harmonic motion.	63
Figura N° 3.6: Muestra la señal sinusoidal y parámetros que describen el movimiento en este tipo de ondas (amplitud A y frecuencia f)	64
Figura N° 3.7: Muestra las propiedades básicas de las ondas.	65
Figura N° 3.8: Muestra las variables típicas de las ondas inducidas por la voladura de rocas.	66
Figura N° 3.9: Muestra la carga cilíndrica típica de una mezcla explosiva comercial.	67
Figura N° 3.10: Muestra la carga esférica típica de una mezcla explosiva comercial.	68
Figura N° 4.1: Muestra la voladura de rocas y sus efectos de las ondas.	70
Figura N° 4.2: Muestra un macizo rocoso natural.	71
Foto N° 4.3: Muestra la geología del macizo rocoso.	72
Figura N° 4.4: Muestra un típico macizo rocoso.	73
Figura N° 4.5: Muestra la secuencia de salida de un disparo.	73

Figura N° 4.6: Muestra las variables controlables y no controlables.	75
Figura N° 4.7: Muestra la nomenclatura de las variables controlables.	76
Figura N° 5.1: Muestra una voladura de rocas y sus efectos de las vibraciones.	78
Foto N° 5.2: Muestra la construcción de una vivienda sin realizar los estudios del terreno.	79
Figura N° 5.3: Muestra las recomendaciones que deben ser tomadas en cuenta respecto al criterio de daño.	81
Figura N° 5.4: Muestra el diagrama conceptual que sirvió para postular el modelo matemático de Holmberg & Persson, para distancias $\leq 50$ metros	84
Figura N° 5.5 Muestra la percepción de las vibraciones producidas por la detonación de una mezcla explosiva comercial.	85
Figura N° 5.6: Muestra la guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones producidas por la voladura de rocas (Oriard, 1970).	86
Figura N° 6.1: Muestra el daño a las estructuras por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas.	92
Figura N° 6.2: Muestra la velocidad pico de partícula.	99
Figura N° 7.1: Muestra una voladura de rocas y medición de las vibraciones.	101
Figura N° 7.2: Muestra la posición de equipos para medir las vibraciones.	104
Figura N° 7.3: Muestra la colocación del equipo para medir las vibraciones.	111

Figura N° 8.1: Muestra el diseño de carga para mitigar las vibraciones.	113
Figura N° 8.2: Muestra el diseño de un banco.	114
Figura 8.3: Muestra el diseño de carga usados en taladros de producción.	115
Figura 8.4: Muestra el diseño de un banco.	116
Figura 8.5: Muestra la secuencia de la voladura de rocas de un banco	117
Figura N° 9.1: Muestra la gráfica de frecuencia Vs. velocidad pico de la norma Española, con sus respectivos límites para tres grupos de estructura.	130
Figura N° 10.1: Muestra la ubicación de la zona de trabajo con respecto a la carretera y ciudad.	134
Figura N° 10.2: Muestra la relación velocidad pico de partícula Vs. La Distancia Escalada.	137
Figura N° 10.3: Muestra la relación velocidad pico de partícula Vs. La Distancia.	138
Figura N° 10.4: Muestra la relación de carga de mezcla explosiva comercial Vs. La distancia (m).	139
Figura N° 10.5: Muestra la relación vibración máxima Vs. Frecuencia	140
Figura N° 10.6: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).	142
Figura N° 10.7: Muestra la relación de Amplitud Vs. El tiempo de retardo entre taladros (ms).	143
Figura N° 10.8: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a la voladura primaria.	144

Figura N° 10.9: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la ciudad Vs. El tiempo (ms)	145
Figura N° 10.10: Muestra el diseño de carga de un taladro.	145
Figura N° 10.11: El software muestra el resultado obtenido de PPV.	146
Figura N° 10.12: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria..	147
Figura N° 10.13: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la ciudad Vs. El tiempo (ms).	148
Figura N° 10.14: Muestra el diseño de carga de un taladro.	148
Figura N° 10.15: El software muestra el resultado obtenido de PPV (mm/s).	149
Figura N° 10.16: Muestra la relación vibración máxima (mm/s) Vs. Frecuencia (Hz).	150
Figura N° 10.17: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).	151
Figura N° 10.18: Muestra la relación Velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La Distancia Escalada ( $m/Kg^{1/2}$ ).	154
Figura N° 10.19: Muestra la relación de la velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La distancia (m).	155
Figura N° 10.20: Muestra la relación de carga de mezcla explosiva comercial (kg) Vs. La distancia (m).	156
Figura N° 10.21: Muestra la vibración máxima Vs. La frecuencia.	157
Figura N° 10.22: Muestra los valores de K Vs. La frecuencia.	159
Figura N° 10.23: Muestra la relación de amplitud Vs. Los tiempos de retardo entre taladros.	160

Figura N° 10.24: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.	161
Figura N° 10.25: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la carretera Vs. El tiempo (ms).	162
Figura N° 10.26: Muestra el diseño de carga de un taladro.	162
Figura N° 10.27: El software muestra el resultado obtenido del PPV	163
Figura N° 10.28: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.	164
Figura N° 10.29: En software muestra el PPV de la onda elemental de un taladro en dirección de la carretera Vs. El tiempo	165
Figura N° 10.30: Muestra el diseño de carga de un taladro.	165
Figura N° 10.31: El software muestra el resultado obtenido del PPV.	166
Figura N° 10.32: Muestra la relación vibración máxima Vs. La Frecuencia.	167
Figura N° 10.33: Muestra la relación de K Vs. La frecuencia.	168

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla N° 1.1: Actividades que se llevaron a cabo para esta tesis.	32
Tabla N° 5.1: Relación entre valores Kb y la percepción humana de vibraciones (DIN 4150/2).	88
Tabla N° 6.1: Muestra el criterio de daño de Langerfors, Kihlstrom & Westerberg.	93
Tabla N° 6.2: Muestra el criterio de daño de la USBM.	94
Tabla N° 6.3: Muestra el criterio de daño de Hook & Bray.	94
Tabla N° 6.4: Muestra el criterio de daño de Bauer & Calder.	95
Tabla N° 6.5: Muestra el criterio de daño de Oriard.	95
Tabla N° 6.6: Muestra los cálculos de la velocidad pico de partícula crítica para diferentes tipos de roca.	97
Tabla N° 7.1: Muestra los rangos de las principales características de las vibraciones.	102
Tabla N° 9.1: Muestra la normatividad internacional.	119
Tabla N° 9.2: Muestra el resumen de la norma DIN 4150.	120
Tabla N° 9.3: Muestra el resumen de la velocidad de partícula de la norma DIN 4150.	121
Tabla N° 9.4: Muestra el resumen de la norma DIN 4150.	122
Tabla N° 9.5: Muestra el resumen de la norma PAN 50.	124
Tabla N° 9.6: Muestra el resumen de la norma OSM 817.67.	125
Tabla N° 9.7: Muestra el resumen de la norma USBM RI8507.	126

Tabla N° 9.8: Muestra el resumen de la norma UNE 22-381-93.	128
Tabla N° 9.9: Muestra el resumen de la norma UNE 22-381-93.	129
Tabla N° 9.10: Muestra el resumen de la norma SN 640 315.	131
Tabla N° 10.1: Muestra el resumen de los resultados obtenidos.	136
Tabla N° 10.2: Muestra el resumen de resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad.	140
Tabla N° 10.3: Muestra los niveles de percepción.	141
Tabla N° 10.4: Muestra el resumen de nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad	150
Tabla N° 10.5: Muestra el resumen de los resultados obtenidos.	153
Tabla N° 10.6: Muestra el resumen de resultados de monitoreo de vibraciones en la carretera.	157
Tabla N° 10.7: Muestra los niveles de percepción.	158
Tabla N° 10.8: Muestra el resumen de nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la carretera.	167
Tabla N° 12.1: Muestra las velocidades de partícula máximas permitidas a varias distancias desde el disparo primario.	177

## INTRODUCCIÓN

Como se sabe, la operación minera unitaria de voladura de rocas induce los impactos ambientales tales como: Gases, subsidencia, polvo, ruido, lanzamiento de fragmentos de rocas, vibraciones, etc.; siendo las vibraciones el tema que trata el presente trabajo de investigación. Por otro lado, el alto grado de influencia de la fragmentación como resultado de la voladura de rocas en las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado, hace evidente la necesidad de contar con nuevas técnicas y modelos matemáticos que permitan evaluar y posteriormente optimizar esta operación unitaria. Como también es de conocimiento de todos los inmersos en la minería e investigadores, que sin el uso de los accesorios de voladura y mezclas explosivas comerciales sería casi imposible extraer los minerales de la corteza terrestre, claro que existen otros métodos, pero de elevados costos si se usarían. Es por ello, que en el mercado se continúa usando los explosivos, los cuales al ser iniciados detonan induciendo las vibraciones; si éstas no son controladas, monitoreadas, mitigadas, minimizadas y/o evitadas, traerían consigo fatales

consecuencias y grandes pérdidas económicas. Es por esta razón que en el presente trabajo de investigación se ha analizado varios modelos matemáticos, seleccionando el modelo matemático más adecuado de campo lejano de Devine, el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus" y un sismógrafo (Minimate Plus) con un geófono triaxial de superficie, la mezcla explosiva comercial ANFO, distancias al punto de monitoreo que varían entre 70 m. a 1550 m. Para lo cual, se monitorearon catorce voladuras primarias en bancos, con un promedio de 150 taladros (distribuidos en 10 filas de 15 taladros cada fila); efectuándose tres monitoreos en la ciudad cercana a la mina, cuatro monitoreos en el tajo en dirección a la ciudad, tres monitoreos en la carretera cercana a la mina y cuatro monitoreos en el tajo en dirección a la carretera. Los resultados de monitoreo son adecuados, sin embargo cada vez que se tenga un proceso de perforación y voladura más adecuado las vibraciones serán menos perceptibles para el hombre. Por tanto, con esta investigación se ha contribuido con las comunidades aledañas al proyecto minero, en demostrar que si se usa los modelos matemáticos respectivos en el diseño, carguío, conexiones, etc. se puede trabajar sin ocasionar ningún daño a los seres humanos y a las estructuras cercanas a las operaciones mineras.

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.11 Introducción**

En la actualidad han fracasado muchos proyectos mineros, por los opositores al desarrollo de esta industria extractiva, fundamentando su ignorancia en la contaminación ambiental. Como se sabe, en la extracción de los minerales que se encuentran dentro de la corteza terrestre y para hacer obras civiles, en algunos casos se requiere el uso de las mezclas explosivas comerciales, entonces se diría que dentro de cualquier rubro donde sea necesaria la utilización de la voladura de rocas, la temática ambiental hace referencia a los efectos adversos de dicha actividad en el aspecto socio-ambiental, que en ciertos casos han paralizado la actividad minera.

Si bien es cierto, la voladura de rocas produce impactos, tales como: subsidencia, ruido, polvo, vibraciones y gases, siendo estos dos últimos los más influyentes. Como se sabe, desde el punto de vista eminentemente productivo, el éxito o fracaso de una voladura de rocas depende en gran medida del cumplimiento de dos objetivos fundamentales, tales como: La optimización de la fragmentación y la minimización del daño. Estos objetivos representan un nuevo paradigma, ya que para lograrlos, los criterios y medidas necesarias tienden a contraponerse entre ellas, debiéndose buscar un punto de equilibrio, que permita obtener una fragmentación adecuada minimizando a la vez el daño a los bancos, taludes, infraestructuras, vías de transporte y sobre todo a la vida de los animales y principalmente la vida e integridad del ser humano.



Figura N° 1.1: Fragmentación adecuada como resultado de la voladura de rocas.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta



Figura N° 1.2: Fragmentación no adecuada como resultado de la voladura de rocas. Fuente: Yeison Peña Vizarrreta

El capricho de la naturaleza donde se ubican los yacimientos mineralizados, y el hombre que busca su bienestar, en muchas operaciones mineras del Perú y el mundo se ubican cercanamente en sus perímetros algún poblado o infraestructura. En el Perú, gran parte de la minería superficial tiene que afrontar debido a esta situación, demandas y protestas de los propietarios de estos inmuebles por daños tanto materiales y sobre todo de salud por la pérdida auditiva debido a la actividad minera cercana, que en el caso de muchos opositores a esta industria extractiva culpan a la operación minera de voladura de rocas. Sin embargo, hay que enfatizar que es verdad que la minería impacta el ambiente en sus tres estados, pero también hay que resaltar que la minería sostenible, limpia y responsable usando ciencia y tecnología puede minimizar, mitigar y/o evitar estos impactos negativos, subrayando que el mundo avanza a pasos agigantados por el uso de los

productos de la minería. Por otro lado, la liberación de energía en la voladura de rocas donde se explotan los yacimientos mineralizados genera una serie de ondas de choque que se desplazan por la corteza terrestre y ondas superficiales generadas en el aire. Las ondas internas que viajan por la tierra van acompañadas de ondas superficiales que parten del mismo punto de su origen y que se van diferenciando en la medida que los frentes de onda se van alejando de la fuente, debido principalmente a las diferentes velocidades de propagación y a los diferentes periodos de vibración. Las mezclas explosivas comerciales en conjunto con los accesorios de voladura usados en la industria minera al ser detonados generan ondas que se transmiten en todas las direcciones desde la fuente. Estas vibraciones causadas por las ondas, tales como onda principal (Pw), onda vertical (Vw) y ondas de corte (Sw) pueden ser registradas en forma de registros como el tiempo de aceleración, velocidad o desplazamiento. Estas vibraciones pueden afectar las edificaciones y/o estructuras cercanas al área de la voladura de rocas, así como también a las vías de transporte público y principalmente al hombre; es por esta razón, que en la tesis se presentan registros de vibraciones como producto de la detonación de las mezclas explosivas comerciales.

### **1.12 Objetivos Generales**

Los principales objetivos de la presente tesis de investigación son los siguientes:

- Dar a conocer e informar a todas las comunidades aledañas a los yacimientos mineros, que la minería si impacta al ambiente en sus tres estados, pero aplicando los conocimientos de la ciencia y tecnología adecuada y moderna se puede mitigar y/o evitar estos impactos.
- Prevenir, mitigar, reducir y evitar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas para así proteger las estructuras, animales y sobre todo la vida de los seres humanos que habitan en las comunidades aledañas a las operaciones mineras.
- Dar a conocer a todos los inmersos en la industria minero-metalúrgica los modelos matemáticos respecto a este tópico; y seleccionar el más adecuado para prevenir, mitigar, reducir y evitar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, e inclusive que el ser humano no las pueda percibir.

### **1.13 Objetivos Específicos**

- Que todas las compañías mineras deben tener un departamento de perforación y voladura, donde se pueda hacer investigación porque solo así se podrá minimizar los costos operacionales directos.
- Que la operación minera unitaria de voladura de rocas, antes de realizar trabajos en campo se debe hacer simulaciones, para evitar incidentes y accidentes.
- Superar los problemas producidas por las vibraciones, que estas no afecten las estructuras cercanas a la zona de la voladura de rocas y sobre todo que no sea percibida por los seres humanos.

- Sugerir a las compañías mineras los pasos a seguir en la operación minera unitaria de voladura de rocas, de cómo minimizar, mitigar y/o evitar las vibraciones.
- Investigar y analizar el impacto ambiental conocido como vibraciones como el resultado de la voladura de rocas, y comparar con la normatividad internacional.
- Evaluar los niveles de las vibraciones producidas por las voladuras de rocas de la mina, tanto de campo cercano y lejano, luego hacer las observaciones pertinentes teniendo como guía el marco de la normatividad internacional.
- Que la universidad promueva con sus docentes y alumnos, en conjunto con la industria minera y las entidades involucradas en la ingeniería, que en donde se usen mezclas explosivas comerciales hacer las normativas peruanas de todos los impactos ambientales producidos por la voladura de rocas.



Figura N° 1.3: Factores y entes para el crecimiento de un país.

Fuente: Yeison Peña Vizarrata

#### 1.14 Alcances.

La metodología del modelo matemático seleccionado es fácil de aplicar y entender, el cual servirá para prevenir, mitigar, reducir y evitar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas; evitando que estas vibraciones sean percibidas por el hombre, y sobre todo se debe evitar incidentes y accidentes fatales en la minería superficial.

#### 1.15 Planteamiento del problema.

Teniendo en cuenta que los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas entre otros son los siguientes: Vibraciones, ruido, presión de aire, lanzamiento de fragmentos de roca, polvo, subsidencias, etc.

Por otro lado, en este tercer milenio todos y cada uno de los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas deben ser monitoreados, controlados, minimizados y/o evitados. Porque como bien se sabe el reto del tercer milenio es practicar una minería limpia, sostenible y responsable, y sobre todo sin accidentes materiales y principalmente personales; es decir con cero daños. Es por esta razón que se ha decidido llevar a cabo el presente trabajo de investigación, en el cual se monitorea las vibraciones inducidas por la voladura de rocas en una operación minera superficial.

Los resultados del modelamiento y monitoreo de las vibraciones inducidas por la voladura, se usaran para compararlos con los diferentes criterios de daño postulados a la fecha, y de esta manera estar en condiciones de minimizar, mitigar y/o evitar los daños producidos por las vibraciones inducidos por la voladura de rocas.

#### **1.16 Hipótesis.**

Evitar los diversos daño de las vibraciones producidas por la voladura de rocas en una operación minera superficial, empleando los criterios de daño más relevantes postulados a la fecha.

#### **1.17 Metodología de la investigación.**

En primer lugar se ha realizado una revisión bibliográfica muy minuciosa, para analizar, investigar y conocer las investigaciones y los modelos matemáticos postulados recientemente que sean aplicables a las operaciones mineras superficiales de la minería peruana. Luego se eligieron

los modelos matemáticos respectivos que fueron aplicados en la presente investigación, después se monitorearon las vibraciones inducidas por la voladura de varios disparos llevados a cabo en una operación minera superficial. Luego los resultados de los monitoreos mencionados anteriormente se compararon con los diversos criterios de daños aplicables a los resultados de la presente investigación. También, los resultados obtenidos de la presente investigación fueron analizados teniendo en cuenta las diversas normativas internacionales.

#### **1.18 Justificación de la investigación.**

El presente trabajo de investigación está más que justificado, si se tiene en cuenta que no hay dinero en el mundo que pueda pagar la vida de una persona, y además entendiendo, modelando, monitoreando y controlando las vibraciones inducidas por la voladura se estará en condiciones de aplicar los diversos criterios de daño postulados a la fecha, de tal manera de controlar, minimizar y/o evitar accidentes personales y pérdida de materiales, equipo y daño a estructuras, y todos los problemas que acarrearán las vibraciones, tales como: judiciales, legales y económicos. Porque si ocurriera un incidente y/o accidente la empresa minera asumirá con todos los gastos e indemnizaciones.

### 1.19 Plan de trabajo.

El plan de trabajo se explica y describe en el cronograma de actividades respectivas.

#### 1.19.1 Cronograma de actividades.

Tabla 1.1: Actividades que se llevaron a cabo para esta tesis.

Actividades	Meses			
	1	2	3	4
1				
2				
3				
4				

1. Se revisara toda la información concerniente al tema de tesis, como los modelos matemáticos postulados a la fecha. Así mismo se hará una revisión de las estadísticas de los accidentes fatales y de los daños a las estructuras, tales como: oficinas, casas, plantas, talleres, etc. causados por las vibraciones inducidas por la operación minera unitaria de voladura de rocas.

2. Análisis e interpretación del modelo matemático que más se adecua, al tema de tesis, el cual será usado para calcular la velocidad pico de partícula (PPV) para campo lejano.
3. Se harán los controles y monitoreos de los disparos respectivos, usando el modelo matemático seleccionado.
4. Interpretación, análisis, evaluación y discusión de resultados.
  - Se tomaran las medidas de control, mitigación y prevención.
  - Conclusiones y recomendaciones
  - Bibliografía.
  - Organización y elaboración de la tesis, etc., etc.

## CAPÍTULO II

### MINERIA LIMPIA Y SOSTENIBLE RETO DEL TERCER MILENIO.

#### 2.7 Introducción.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Hasta fines de los años ochenta, el ambiente y su relación con el crecimiento económico y la justicia social no ocupaba un lugar destacado en las agendas nacionales ni internacionales. Esta situación empezó a cambiar con la emergencia del concepto de desarrollo sostenible, que se consolidó en 1987 con la publicación de “Nuestro futuro común”, también conocida como informe Brundtland.

Brundtland, define el **desarrollo sostenible**: Como “aquel que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las

generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”. En esta definición está implícito el concepto de equidad en dos formas: inter e intra generacional. El aspecto de equidad intergeneracional contenido en esta definición, es decir la necesidad de proteger los derechos de las generaciones futuras a su propio desarrollo, exige que el desarrollo económico se asocie a la protección del ambiente y a formas de uso de los recursos naturales que aseguren el acceso a estos por las generaciones futuras. Desde el punto de vista intergeneracional, en el informe se destaca la importancia de la erradicación de la pobreza y la relación entre pobreza y degradación ambiental. Como se sabe, en 1970 se publica la Ley Nacional Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica cuyo propósito fue declarar que los proyectos productivos puedan realizarse en armonía entre el hombre y el ambiente, y al mismo tiempo promover esfuerzos para prevenir o eliminar daños al ambiente y biosfera, estimulando la salud y el bienestar del hombre, enriquecer el conocimiento y comprensión de los ecosistemas y los recursos naturales y para establecer un Consejo sobre Calidad Ambiental. Entonces, se podría decir que con la publicación de esta Ley se inicia el interés en prevenir los daños que se pudieran causar al ambiente por la realización de diferentes actividades donde intervenga el hombre. Pero, en la actualidad se tiene claro que hay insuficiencia en los esfuerzos de protección al ambiente, y es evidente que no se aprecia mejoría o al menos indicios de desaceleración del deterioro; y ante las grandes necesidades en materia ambiental que se enfrentan a nivel mundial, se exigen cambios de fondo en los instrumentos de política ambiental. Siendo obligación de cada país, bajo

la dirección de sus gobernantes aprobar leyes al respecto, y que estas se cumplan. Respecto a la industria extractiva de la minería, si impacta el ambiente en sus tres estados; quienes hacen minería del tercer milenio debe ser una minería responsable, limpia y sostenible. Por lo cual, el reto del tercer milenio es usar ciencia y tecnología de última generación, de tal manera que la minería de este milenio sea una minería que optimice la producción y la productividad a un costo mínimo, con seguridad y sin depredar el ambiente, protegiendo el ambiente para las próximas generaciones. El desarrollo sostenible constituye un nuevo paradigma a alcanzar. Entonces, se entiende como un proceso que pretende la transformación productiva para mejorar la calidad de vida, haciendo uso racional del capital humano, natural, físico, financiero y cultural, sin poner en riesgo la satisfacción de las generaciones futuras, en un marco de equidad social.

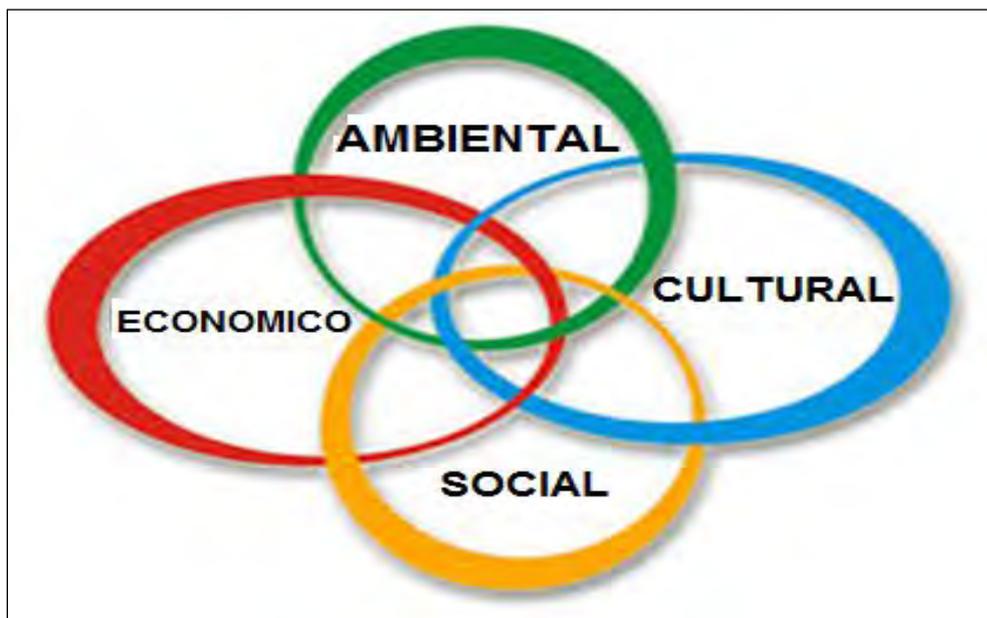


Figura N° 2.1: Muestra cómo se interrelaciona estos factores.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

## **2.8 Aspecto técnico.**

Se puede precisar que para explotar los cuerpos mineralizados que se ubican dentro del macizo rocoso, es fundamental que las empresas mineras usen toda la ciencia y la tecnología existente y disponible en países desarrollados; de tal manera que se pueda minimizar, mitigar y/o evitar los impactos negativos inducidos por la voladura de rocas. Por otro lado, todas las compañías mineras, deben capacitar y actualizar a su personal en todos los niveles, logrando que estos se identifiquen con la empresa, y sobre todo trabajen con seguridad y conociendo la labor que desempeñaran. También, es recomendable realizar las inspecciones periódicas de los trabajos mineros, la identificación de riesgos y adopción de medidas de control y/o prevención, por parte del personal técnico y de supervisión; la consideración de los factores geológicos y estructurales que inciden en la explotación minera, tomar medidas de control de incendios, planes de contingencia para afrontar eventualidades derivadas de la operación minera o las aleatoriedades de la naturaleza, etc.



Figura N° 2.2: Muestra a trabajadores capacitados por la empresa in-situ.

Fuente: Web internet

## 2.9 Aspecto económico.

En este aspecto, como es de suponer los accionistas invierten sus capitales para ganar. Por lo tanto, es necesario aplicar los diversos modelos matemáticos existentes a nivel mundial para maximizar la producción y productividad, minimizando de esta manera los costos operacionales y por ende maximizando la rentabilidad de las empresas mineras. Por lo cual, es fundamental que para lograr buenos resultados de la voladura de rocas, se debe aplicar los modelos matemáticos existentes para el diseño de mallas y paralelamente usar los modelos matemáticos de la voladura controlada para proteger el macizo rocoso remanente; obviamente que con la adecuada aplicación de ciencia y tecnología los impactos ambientales, como son las

vibraciones se minimizaran, logrando que no sean percibidas por el hombre. Por tanto hay una paradoja, por un lado fragmentar adecuadamente el macizo rocoso para cumplir con la producción y por el otro lado al realizar la voladura de rocas, se debe proteger el macizo rocoso remanente, para este caso, en minería superficial proteger los taludes existentes y el talud del siguiente banco; así como también minimizar, mitigar y/o evitar los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas, en especial las vibraciones que son percibidas por el hombre.

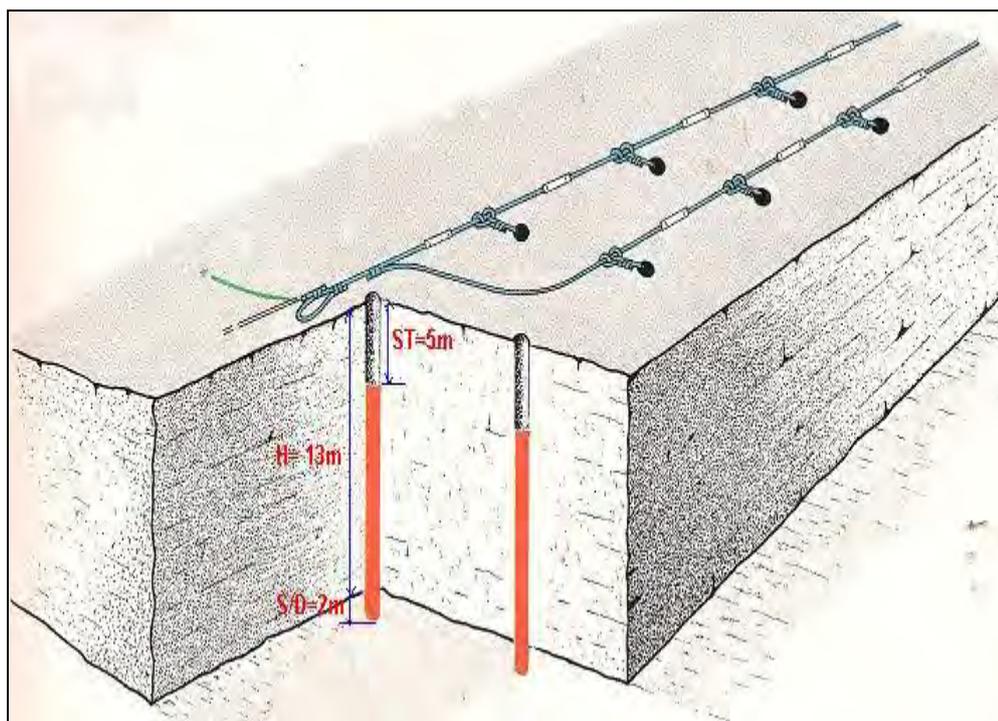


Figura N° 2.3: Diseño de un banco en minería superficial.

Fuente: ISEE

## 2.10 Aspecto ambiental.

Como se sabe, en la mayoría de países exigen una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) antes de dar luz verde a un proyecto minero. Los procesos de EIA es una importante y valiosa oportunidad para que los ciudadanos y en especial las comunidades aledañas participen en las decisiones sobre los proyectos mineros, en esta audiencia pública quienes no están de acuerdo que se lleve a delante este proyecto debe opinar y fundamentar su negativa.



Figura N° 2.4: Muestra la audiencia pública del estudio del impacto ambiental de una mina en Perú. Fuente: web Internet

La industria extractiva minera produce prosperidad en las zonas donde se lleva a cabo, pero indudablemente tiene un impacto ambiental. Así por ejemplo, los países desarrollados o del primer mundo continúan explotando

sus yacimientos mineralizados; y como ejemplo más cercano a las fronteras de Perú, se tiene la mina más conocida en Chile denominada La Escondida, creando gran cantidad de puestos de trabajo directo e indirecto. Sin embargo, los impactos ambientales aun a menor escala pueden crear conflictos por el uso de la tierra y oposición a la explotación minera por grupos ambientalistas, sobre todo en países desarrollados más poblados. La solución de estos conflictos puede involucrar pagos de compensaciones, derechos de paso y eventualmente el costo de rehabilitar zonas explotadas o directamente al abandono de proyectos mineros. Por otro lado, en algunos países el riesgo político constituye una barrera para la inversión minera, mientras que en otros el riesgo ambiental constituye una barrera tanto o más importante. Actualmente el abrir una nueva mina en EEUU o Canadá es muy difícil, debido a las condicionantes ambientales impuestas en las últimas décadas. Sin embargo, si los proyectos mineros no se politizaran, sería más fácil de resolver, he aquí la importancia del reto de los ingenieros junior que deben liderar estos proyectos y dialogar con los opositores a la minería, haciéndoles entender la importancia de la extracción de minerales para el desarrollo de un país. En el caso que un proyecto minero se ubique en una zona remota y sin desarrollo, quien propone el proyecto puede necesitar empezar por desbrozar la zona para la construcción de campamentos que alojarían al personal y equipos. Aun antes que inicie la extracción del mineral, las actividades asociadas con la preparación y desbroce de esta zona pueden tener impactos ambientales significativos, especialmente si estos se encuentran al interior o al lado de zonas ecológicamente sensibles.



Figura N° 2.5: Campamentos de una compañía minera del centro del Perú.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

La minería a tajo abierto es un tipo de minería superficial, en la cual el mineral metálico se extiende muy profundamente en el sub-suelo, lo cual demanda la remoción de grandes capas de desmonte y mineral. Entonces, se enfatiza que la minería tanto subterránea como superficial si impacta el ambiente. Sin embargo, se puede decir que actualmente cualquier proyecto minero antes de llevarse a cabo se hace un depósito denominado fideicomiso, el cual garantiza el cierre de operaciones. Pero, también se puede afirmar que la industria minera debidamente constituida legal y formal, es sostenible, limpia y responsable; la cual trabajando con ciencia y tecnología si se puede minimizar, mitigar y/o evitar los impactos ambientales producidos por la minería. Actualmente la legislación exige la realización de estudios de impacto ambiental para todas las operaciones mineras y declaraciones de impacto ambiental desde las actividades de exploración

minera. Los estudios ambientales deben incluir los efectos sobre la sociedad, vegetación, fauna, lugares de interés arqueológico, clima, calidad del aire, ruido, aguas superficiales y subterráneas, los métodos propuestos para la recuperación de los terrenos al término de la operación minera, etc.

En algunos países se exige además una garantía para asegurar que la recuperación de los terrenos realmente ocurra al final de la minería. Los estudios deben incluir un registro de la condición del ambiente en el área potencial minera, cuando se hizo la solicitud respectiva (nivel base ambiental). Las compañías recogen esta información en la etapa de exploración, incluyendo la descripción de la superficie y fotografías, análisis geoquímicos para mostrar los valores medios de metales y acidez y detalles de la flora y fauna locales previos a la operación minera. Esto es esencial dado que localmente puede existir contaminación natural.



Figura N° 2.6: Muestra cómo debe quedar el área de la explotación antes, durante y después del cierre de mina. Fuente: Yeison Peña Vizarreta

### 2.11 Aspecto social.

Una de las características principales de la industria extractiva minera, es tener un efecto multiplicador que genera, tanto directa como indirectamente, y vinculados con esta, la creación de puestos de trabajo para todos los niveles desde ejecutivos hasta obreros y comerciantes, el flujo de ingresos que se produce a partir de la compra de insumos nacionales, las divisas generadas por las exportaciones, los impuestos pagados, a nivel nacional, provincial y municipal y los beneficios indirectos que reciben las poblaciones de las áreas de influencia, como consecuencia del desarrollo de

infraestructura de salud, educación, transportes y comunicaciones, etc. Siendo la industria minera la más completa de todas las industrias y es perfectamente comprobable, tanto a nivel nacional como internacional, ya sea en el caso de megaproyectos, y aún en los casos de pequeñas operaciones mineras, porque suelen llevarse a cabo en zonas remotas, de difícil acceso, escasa población y de menor desarrollo relativo. Por tanto, se puede afirmar que la minería, es la industria más completa y dando trabajo directos e indirectos desde profesionales hasta nivel obrero.



Figura N° 2.7: Muestra que la industria extractiva minera tiene efecto multiplicador. Fuente: Yeison Peña Vizarreta

En el contexto de la sociedad, la minería contribuye con la sociedad peruana a través del pago de tributos, regalías y derechos de vigencia, del aporte voluntario y fondo-empleo en el 2011 con S/. 13,300 millones. Según la jefe

de SUNAT en el 2012 se logró una recaudación tributaria récord de S/. 84.146 millones, registrándose un incremento de 7,4% respecto al año anterior. A pesar de que en el 2012 hubo problemas en el sector minero, al recaudarse S/. 900 millones menos, se superó la meta preestablecida y se amplió la base tributaria a 16% del Producto Bruto Interno. Para el 2013 al cerrar el periodo económico, se estima recaudar unos S/. 93.290 millones y expandir la base tributaria a 16,4%. Cabe enfatizar que cuando se habla de base tributaria aún falta mucho, porque casi siempre son los mismos que pagan los impuestos, aun sin haberse vencido ya son cobrados por SUNAT.

## **2.12 Las mega-tendencias del tercer milenio**

Este tercer milenio, está caracterizado por tres mega-tendencias, siendo estas las siguientes:

### **2.12.1 La economía de libre mercado**

Al respecto, se refiere a la industria minero-metalúrgica en comparación de décadas atrás, esta se ha visto obligada a llevar a cabo investigaciones en cada una de las operaciones minero-metalúrgicas que componen el ciclo total del complejo minero metalúrgico. Estas investigaciones llevadas a cabo siempre han tenido, tienen y tendrán como objetivo principal maximizar producción y productividad en cada una de las operaciones minero-metalúrgicas, de tal manera, de minimizar costos operacionales; y por tanto, ser más competitivos en los precios de venta. La economía de libre mercado, en general todas las empresas que no cuentan con un

departamento de investigación, la historia lo afirma que estas empresas no llegan a la longevidad; y que muchas tienen que cerrar prematuramente. Por lo tanto, teniendo siempre presente que la compañía que no investiga en este tercer milenio no será competitiva y por tanto saldrá del mercado.



Figura N° 2.8: Muestra gráficamente la economía de libre mercado.

Fuente: Yeison Peña Vizarrata

### 2.12.2 La globalización.

El término denominado globalización, esta interrelacionada entre los países del mundo, se puede decir que la globalización ha sido fundamental hoy en día, porque gracias a esta los medios de comunicación y transportes terrestre, marítimo y aéreo llegan a todos los lugares. Entonces, las empresas transnacionales con la globalización se extienden al mundo,

afectando a las microempresas y empresas nacionales que hacen que la mano de obra barata beneficie de gran manera a la empresa transnacional, así abarcando el mercado a nivel nacional e internacional. He aquí la importancia que toda empresa debe tener un departamento de investigación científica y/o aplicada. La globalización es un proceso a gran escala en los ámbitos que marcan el desarrollo social, cultural, tecnológico y económico, debido a las capacidades de comunicación y a las relaciones interdependientes entre los diferentes países del mundo. Este proceso produce una unificación de mercados, de relaciones sociales, de costumbres y de intereses culturales. Se considera a la globalización como un proceso dinámico, fruto de las formas de vida actuales. La globalización a las empresas a traído consigo los cambios de política en la economía mundial, concretamente la liberalización de las corrientes de capital y de comercio, la desregulación de los mercados, y el desarrollo del sector privado incluida la privatización, que han abierto nuevas oportunidades de inversión en la mayoría de los países. La aceleración del progreso tecnológico que ha cambiado las reglas del juego tanto para las empresas transnacionales como para los países en desarrollo anfitriones y las empresas de estos países. Las nuevas estructuras orgánicas de las empresas, que en parte han sido posibles gracias a la reducción de los costos de transporte provenientes de los adelantos tecnológicos en las industrias de la información y las comunicaciones. Algunos países en desarrollo que han participado satisfactoriamente en el proceso de globalización comparten dos características comunes: Un entorno de políticas conducente a la

movilización de las inversiones industriales, trabajadores capaces de competir con la mano de obra de calificaciones bajas y medias de las economías industrializadas.

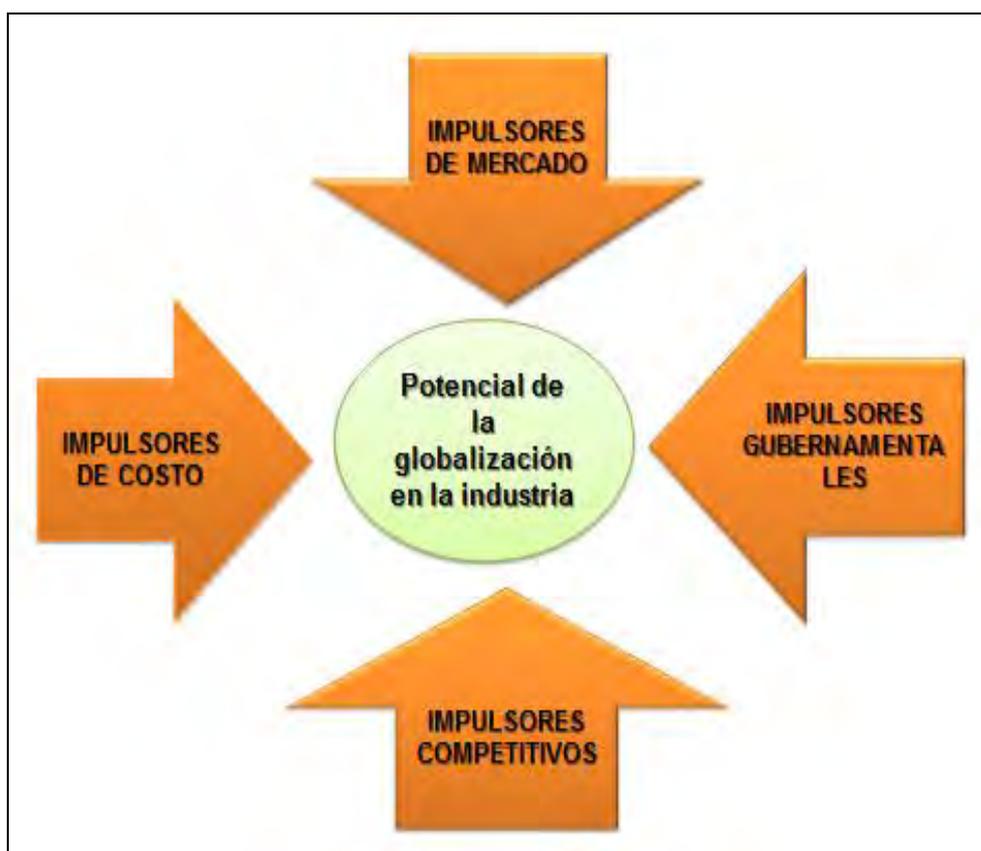


Figura N° 2.9: Muestra gráficamente el efecto de la globalización en la industria. Fuente: Yeison Peña Vizarrera

### 2.12.3 Los impactos ambientales.

El crecimiento económico de un país le impone un reto a la capacidad de gestión de las instituciones ambientales, las cuales deben acompañar a los sectores productivos en el cumplimiento de sus objetivos, buscando equidad inter e intra generacional, es decir, propender por un crecimiento que mejore

la calidad de vida de la población sin detrimento significativo de su calidad ambiental y buscar un desarrollo sostenible en beneficio de las generaciones actuales y futuras. Se sugiere que con el objetivo de reducir la vulnerabilidad, preparar al país para la adaptación al cambio climático, y aprovechar las oportunidades que se deriven en el marco Internacional se deberá:

- Implementar la Política Nacional de Cambio Climático;
- Conformar el Sistema Nacional de Cambio Climático, que fortalezca la gestión de la información en cambio climático y la gestión financiera para atender y ejecutar proyectos y programas de mitigación y adaptación.
- Identificar y priorizar medidas de adaptación al cambio climático, a partir del análisis de vulnerabilidad, en el marco de un Plan Nacional de Adaptación soportado en una estrategia financiera que contemple recursos nacionales y recursos internacionales de cooperación.
- Fortalecer la generación de información para los análisis de vulnerabilidad sectorial y territorial.
- Diseñar, de la mano con los sectores y las regiones, una estrategia de desarrollo bajo en carbono, que incluya la reducción por deforestación evitada para que el país acceda a recursos financieros favorables de bajo costo, a transferencia de tecnología apropiada, participe en mecanismos de mercado de carbono y fondos de mitigación.
- Identificar y valorar barreras comerciales asociadas a actividades productivas, productos y servicios con una huella de carbono alta y

oportunidades de negocio generadas por ventajas competitivas de carbono-intensidad.

Para lograr un crecimiento sostenible se tiene que tener la capacidad de satisfacer las actuales necesidades económicas, sociales y ambientales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para cubrirlas. Desde una perspectiva ambiental, esta premisa cobra mayor relevancia puesto que son los recursos naturales, el lugar y la materia prima necesaria para el desarrollo de las actividades económicas y sociales.

Las principales preocupaciones ambientales actuales incluyen la excesiva emisión de gases del efecto invernadero, que está dando lugar al cambio climático, la calidad del aire, el estrés hídrico y la calidad del agua, las pautas de consumo no sostenibles, el tratamiento de los residuos, la pérdida de la biodiversidad, la degradación del suelo y, en general, el uso insostenible de los recursos naturales. Todos estos elementos han sido señalados en los informes sobre la sostenibilidad en las Naciones Unidas.

Para entender mejor este ítem, se presentaran algunas definiciones:

**Impacto ambiental:** Es el efecto que produce la actividad humana sobre el ambiente. El concepto puede extenderse a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base ambiental. En la industria minera, para que un proyecto minero sea aprobado primero debe hacerse la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA)

Otra definición, es cualquier cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas causadas por materia o energía resultante directa o indirectamente de las actividades cotidianas del ser humano.



Figura N° 2.10: Muestra los impactos ambientales producidos por la actividad del hombre. Fuente: Yeison Peña Vizarreta e Internet

## **CAPÍTULO III**

### **VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA DE ROCAS.**

#### **3.1 Introducción.**

En las últimas décadas la minería ha cobrado gran importancia dentro del contexto nacional por su aporte a la economía, representada en el aumento de las exportaciones y contribución al crecimiento del producto bruto interno (PBI). El escenario minero nacional está dominado por los sectores auríferos, la plata, el plomo, el cobre, etc. Este último su explotación mayormente es mediante el método de open pit. En este tercer milenio o casi toda la extracción de los minerales ubicados dentro de la corteza terrestre se lleva a cabo mediante la detonación de las mezclas explosivas comerciales cargadas dentro de los taladros que han sido perforados previamente de acuerdo al diseño respectivo. Obviamente, que este diseño

ha sido efectuado tomando en cuenta las características geomecánicas del macizo rocoso. Es por esta razón que a las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura se les llama operaciones mineras binomiales. Por otro lado, también se debe mencionar que la voladura de rocas representa la operación minera unitaria más importante dentro de la cadena de valor que representa el ciclo total de minado. Como bien se sabe, el objetivo principal de la voladura de rocas es obtener una fragmentación adecuada, de tal manera de lograr maximizar la producción y la productividad en las operaciones mineras unitarias de: Carguío, acarreo, chancado primario, etc. Entonces, los ingenieros que trabajan en voladura de rocas se encuentran en la disyuntiva siguiente: Obtener una fragmentación adecuada y uniforme, y no causar ningún daño a la roca remanente al área del disparo. También, se sabe que uno de los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas son las vibraciones que se propagan a través del macizo rocoso como consecuencia de la detonación de las mezclas explosivas comerciales cargadas y confinadas dentro de los taladros que conforman los disparos primarios. Por otro lado, se debe mencionar que el proceso de la fragmentación del macizo rocoso usando mezclas explosivas comerciales está influenciado por un gran número de variables que se clasifican en:

- Variables controlables y
- Variables no controlables.

La compleja inter-relación entre estas variables, complica aún más el fenómeno vibracional, lo cual hace que los resultados de la voladura sean

completamente aleatorios y muchas veces impredecibles. Entonces, se puede enfatizar que las variables no controlables, se encuentran en el macizo rocoso, ya que a medida que se va profundizando el pit, las características físico-mecánicas del macizo rocoso no son las mismas que se determinaron al iniciar las operaciones, es decir el macizo rocoso es cambiante o totalmente aleatorio. Es por esta razón, que para continuar explotando los yacimientos mineralizados, es importante tomar muestras representativas del macizo rocoso y hacer siempre los análisis en el laboratorio de mecánicas de rocas para determinar las características físico-mecánicas; de tal manera de obtener una adecuada fragmentación como resultado de una voladura de rocas. Por qué conociendo las características físico-mecánicas del macizo rocoso, se seleccionará la mezcla explosiva comercial adecuada.

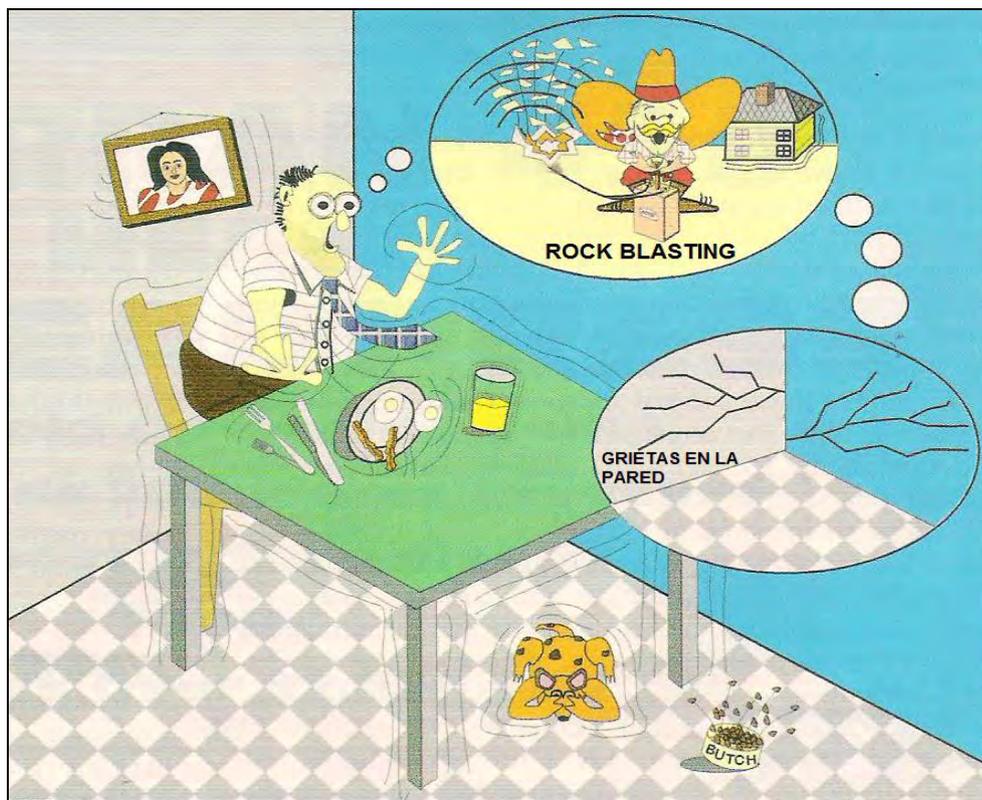


Figura N° 3.1: Muestra cómo afectan las vibraciones inducidas por la voladura de rocas a las infraestructuras aledañas a la zona del disparo.

Fuente: ISEE

### 3.2 Definición.

Se conoce por vibraciones un fenómeno de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. El fenómeno vibracional queda caracterizado por una fuente o emisor o sea un generador de vibraciones; y por un receptor de las mismas.

El fenómeno vibracional es manifestado mediante un movimiento ondulatorio. Las vibraciones causadas por la voladura de rocas, tienen el

potencial de afectar estructuras y provocar molestias en las personas. Éstas presentan parámetros que la definen, como amplitud de aceleración, frecuencia y desplazamiento, pero es la amplitud de velocidad pico de partícula a una frecuencia predominante la que mejor se relaciona con un potencial de daño estructural. En general la energía vibracional es directamente proporcional a la cantidad del explosivo detonado y matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$E = (P)(Q) \rightarrow (1)$$

Dónde:

E: Energía vibracional

Q: Energía total producida por el explosivo

P: Proporción de la energía total producida por la detonación del explosivo empleada para generar vibraciones.

### **3.3 Ondas sísmicas inducidas por la voladura.**

Cuando una mezcla explosiva comercial cargada dentro de un taladro es detonada, se produce una onda de choque, la cual crea una serie de tensiones las que producen el fracturamiento del macizo | Reiterando que la voladura de rocas genera vibraciones en el macizo rocoso, las cuales pueden tener diferentes efectos negativos sobre las infraestructuras; y además, ocasiona daños a la misma roca remanente, como fallas y

diaclasas, las cuales podrían dar origen a deslizamientos en los bancos, lo cual traería consigo consecuencias muy graves, tanto a la maquinaria y principalmente para los trabajadores y consecuentemente grandes pérdidas económicas para la empresa minera. Cabe enfatizar que por indemnizaciones que se haga a la familia de los accidentados fatales, no se recompensará en su totalidad la pérdida de un familiar.

### **3.3.1 Tipo de ondas elásticas inducidas por la voladura de rocas**

En la industria minera, para realizar la explotación de los yacimientos mineralizados, tienen como factor común que para su diseño, es básico determinar la composición, estructura, características y comportamiento del macizo rocoso es totalmente aleatorio. Es importante conocer las características del macizo rocoso que se encuentran a medida que se va profundizando el pit, pero en muchos casos este dato es difícil de obtener, la información de laboratorio de mecánica de rocas son estáticos y la voladura es un evento dinámico. Como bien se sabe, las ecuaciones clásicas de ondas elásticas han sido adecuadas para describir el fenómeno vibracional inducido por la voladura de rocas, pero se debe considerar otras variables, tales como: atenuación, dispersión, cambio de longitud de onda y superposición de ondas, etc. Se debe mencionar que a pesar de sus limitaciones del método; este representa el mejor modelo postulado hasta la fecha para entender y analizar el complejo fenómeno vibracional inducido por la voladura e rocas.

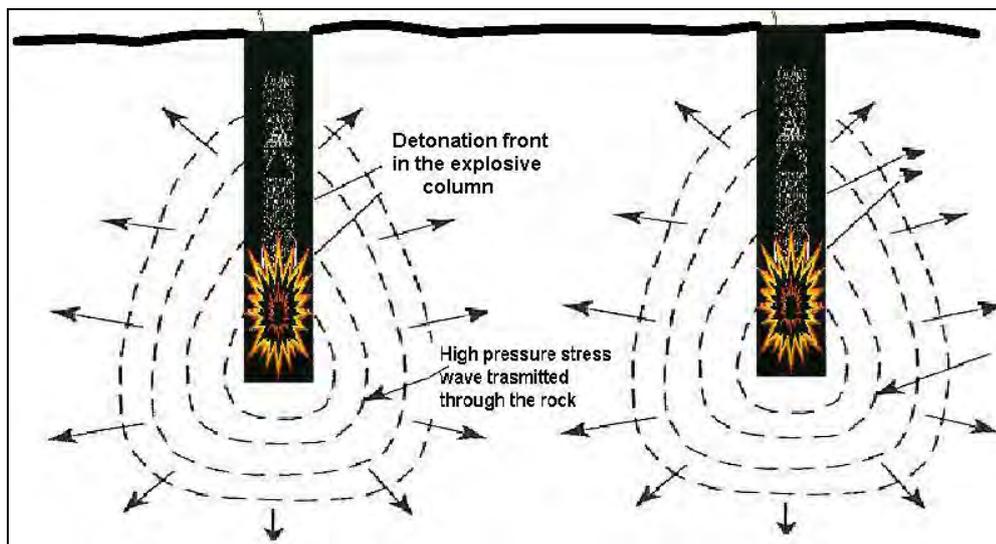


Figura N° 3.2: Muestra las ondas que produce la detonación de una mezcla explosiva comercial. Fuente: ISEE.

También, se debe enfatizar que en este caso solo interesa la propagación de las ondas en la zona exterior o elásticas circundante a los taladros; en la cual las únicas ondas representativas que se propagan son ondas elásticas de baja energía.

Los tipos de ondas elásticas son:

#### 3.3.1.1. Ondas internas.

Este tipo de ondas se propagan por el interior del macizo rocoso dentro de estas se tienen:

- Ondas longitudinales, de compresión o principales (P).
- Ondas transversales, de cizallamiento o secundaria (S).
- Ondas verticales (V)

### 3.3.1.2. Ondas superficiales.

Entre las principales, se tienen las siguientes:

- Ondas rayleigh (R)
- Ondas love (L)

Se debe mencionar que las ondas “P” se caracterizan porque provocan la oscilación de las partículas en la misma dirección en la que las ondas se propagan. Las ondas (S) se caracterizan por provocar la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección en la que la onda se propaga, etc.

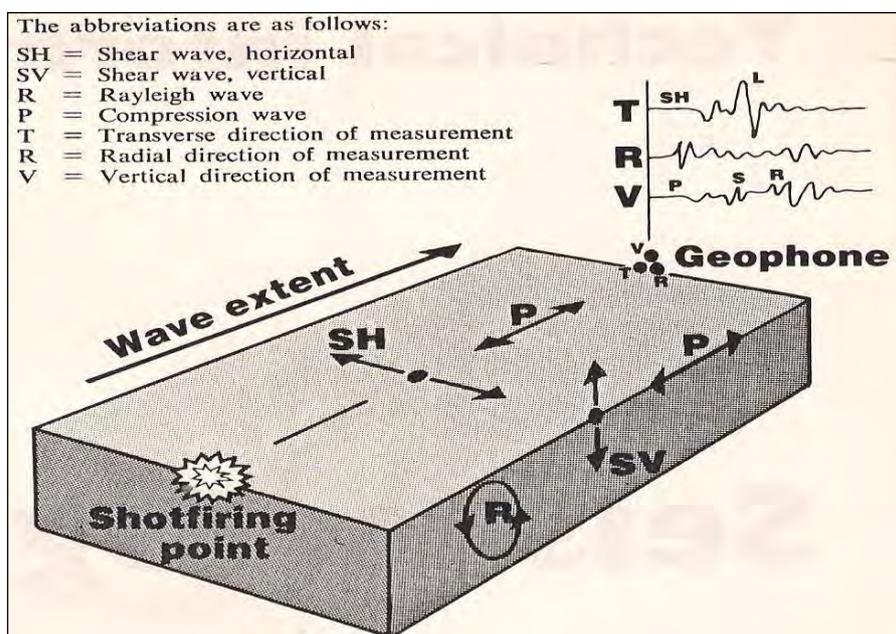


Figura N° 3.3: Se muestra el espectro de ondas que se generan en el momento de la detonación de una mezcla explosiva comercial cargada dentro de un taladro.

Fuente: ISEE

### 3.4 Propiedades básicas de las ondas.

#### 3.4.1 Amplitud (A).

Una variación del tiempo o la cantidad de desplazamiento, velocidad o aceleración de una vibración cinemática. Todas estas propiedades tienen valores instantáneos en cualquier momento.

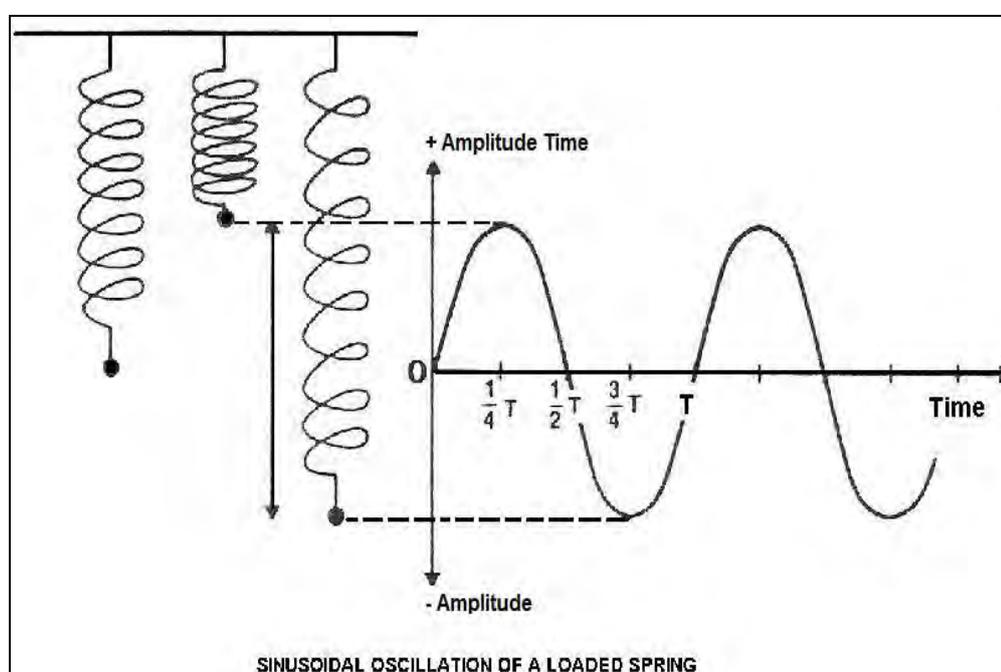


Figura N° 3.4: Muestra la variable amplitud.

Fuente: ISEE

#### 3.4.2 Frecuencia (F).

Es el número de ciclos ejecutados por la unidad de tiempo. En cualquier estudio de vibraciones, la unidad de tiempo es el segundo; entonces, las unidades de frecuencia son ciclos por segundo o Hertz (Hz). Por otro lado, El espectro de frecuencias del movimiento vibratorio es tan importante como la

velocidad vibracional en la evaluación del potencial de daños en estructuras. Investigaciones llevadas a cabo en dinámica estructural han mostrado que las estructuras responden de modo diferente a diferentes vibraciones. Una estructura residencial responderá menos a un movimiento de terreno de 12mm/s a una frecuencia principal de 80Hz que a una frecuencia principal de 10Hz. Entonces, el movimiento a 80Hz tiene menos probabilidad de producir una fisura en la estructura que el movimiento a 10Hz (según Dowding, 1985).

### **3.4.3 Duración.**

La duración de las vibraciones depende de dos factores principales que son:

- La duración de la voladura.
- La distancia del punto de monitoreos a la voladura.

### **3.4.4 Longitud de onda ( $\lambda$ )**

Viene a ser la longitud de un ciclo completo

### **3.4.5 Velocidad de propagación (V).**

Es el desplazamiento por unidad de tiempo ( $V = s/t$ ).

También, se puede definir como el rango del cambio del desplazamiento, o con que velocidad una partícula se mueve de su estado de reposo hasta una posición de máximo desplazamiento y su retorno.

### 3.4.6 Aceleración (a).

Se define como la velocidad por unidad de tiempo

$$a = \frac{V}{t^2}$$

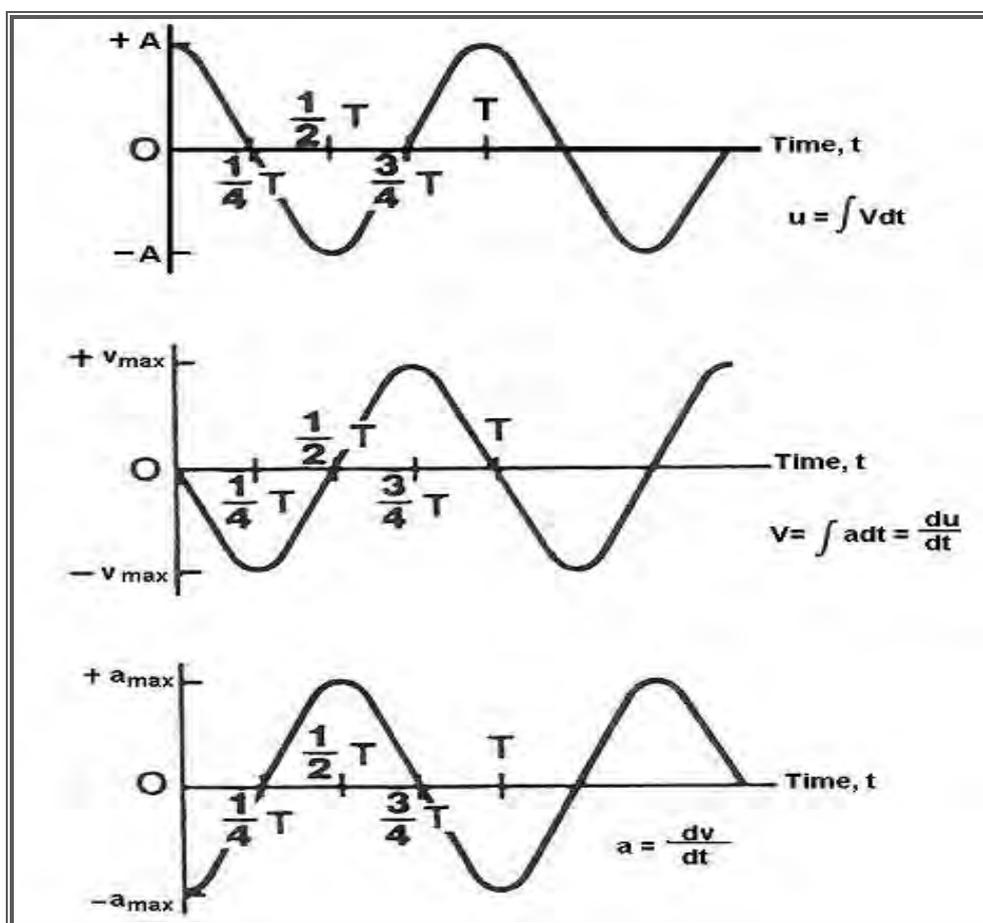


Figura N° 3.5: Muestra Displacement, velocity and acceleration in simple harmonic motion. Fuente: ISEE

### 3.4.7 Velocidad de partícula ( $V_x$ , $V_y$ , $V_z$ )

Se define como el desplazamiento por unidad de tiempo, tomando como referencia la velocidad de las partículas dentro del macizo rocoso, como consecuencia del movimiento vibracional.

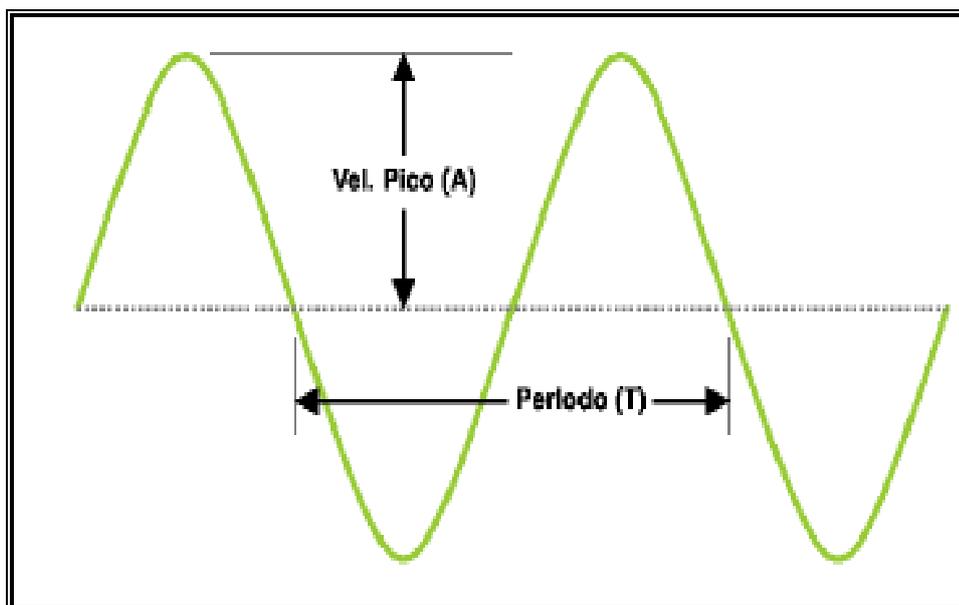


Figura N° 3.6: Muestra la señal sinusoidal y parámetros que describen el movimiento en este tipo de ondas (amplitud  $A$  y frecuencia  $f$ )

Fuente: ISEE

### 3.4.8 Velocidad de la onda sísmica ( $P_{wv}$ ).

Se define como el desplazamiento por unidad de tiempo tomando como referencia a una acción compresiva que se propaga a través de cualquier medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso. También, se le denomina velocidad sónica o velocidad de propagación de la onda.

### 3.4.9 Desplazamiento.

Es la cantidad de desviación o distancia de cualquier partícula o un punto desde su posición de reposo.

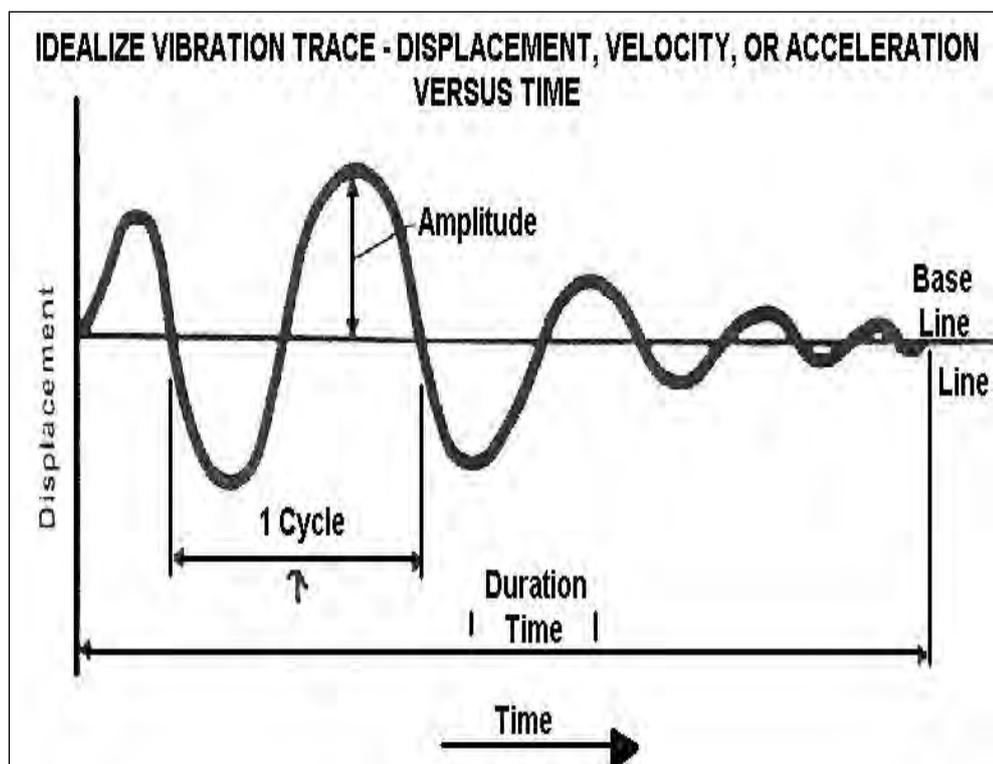


Figura N° 3.7: Muestra las propiedades básicas de las ondas.

Fuente: ISEE

### 3.4.10 Distancia (D, d).

Es la longitud total de la dirección de viaje tomada por un objeto comenzando en su posición de reposo hasta su posición final.

### 3.4.11 Movimiento armónico simple.

Se define como la combinación de las oscilaciones de ida y vuelta indefinidamente y con cualquier grado de libertad de un objeto que tiene la forma de resorte.

### 3.4.12 Ciclo.

Se define como una oscilación completa de eventos repetidos.

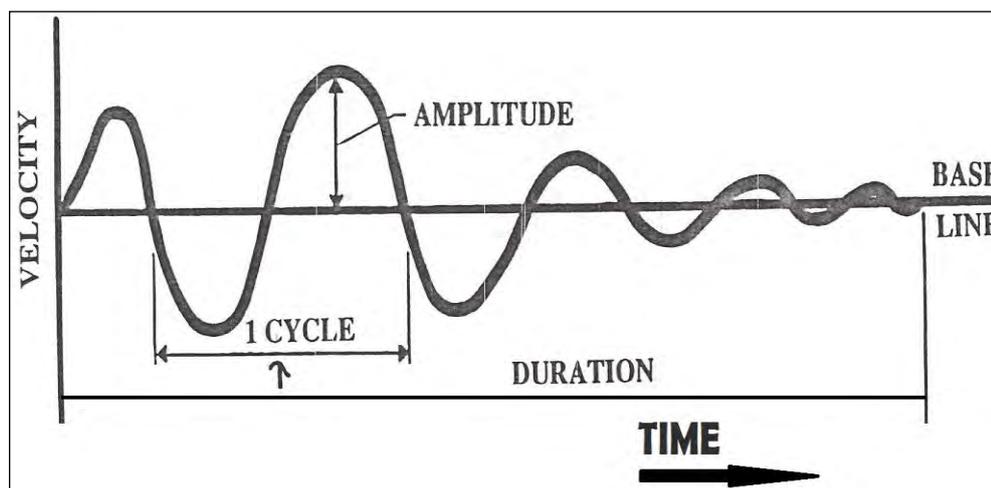


Figura N° 3.8: Muestra las variables típicas de las ondas inducidas por la voladura de rocas. Fuente: ISEE

### 3.4.13 Distancia escalada.

Este factor es definido como la relación entre la distancia  $d$  sobre la raíz cuadrada del peso de la mezcla explosiva comercial por retardo.

Así, se tiene:

$$S.D = \frac{d}{(W / \text{Retardo})^{1/2}} \rightarrow \text{Cargas cilíndricas}$$

$$S.D = \frac{d}{(W / \text{Retardo})^{1/3}} \rightarrow \text{Cargas esféricas}$$

### 3.4.13.1 Carga cilíndrica: Definida como:

L:  $D \geq 6:1$

Dónde:

L: Longitud de la columna explosiva

D: Diámetro del taladro



Figura N° 3.9: Muestra la carga cilíndrica típica de una mezcla explosiva comercial.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

**3.4.13.2 Carga esférica:** Esta definida como:

$$L: D \leq 6:1$$

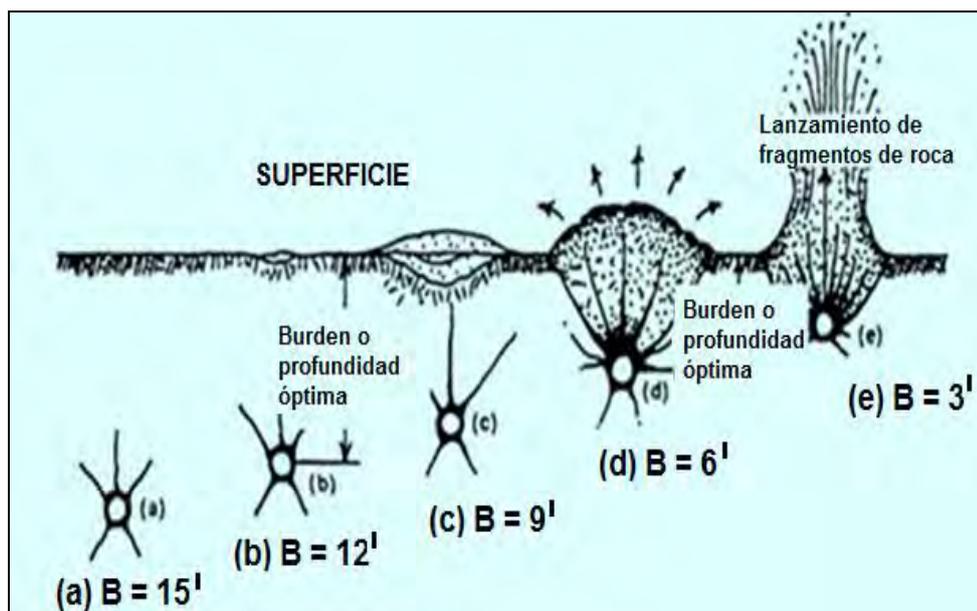


Figura N° 3.10: Muestra la carga esférica típica de una mezcla explosiva comercial.

Fuente: Livingston – Teoría de los cracters, USA 1970.

## **CAPÍTULO IV**

### **CAUSAS PRINCIPALES DE LAS EXCESIVAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA.**

#### **4.2 Introducción.**

Para entender mejor las causas principales de las excesivas vibraciones inducidas por la voladura de rocas, se debe tener en cuenta las variables controlables y no controlables que intervienen en el complejo y estocástico proceso que representa la operación minera unitaria de voladura de rocas.

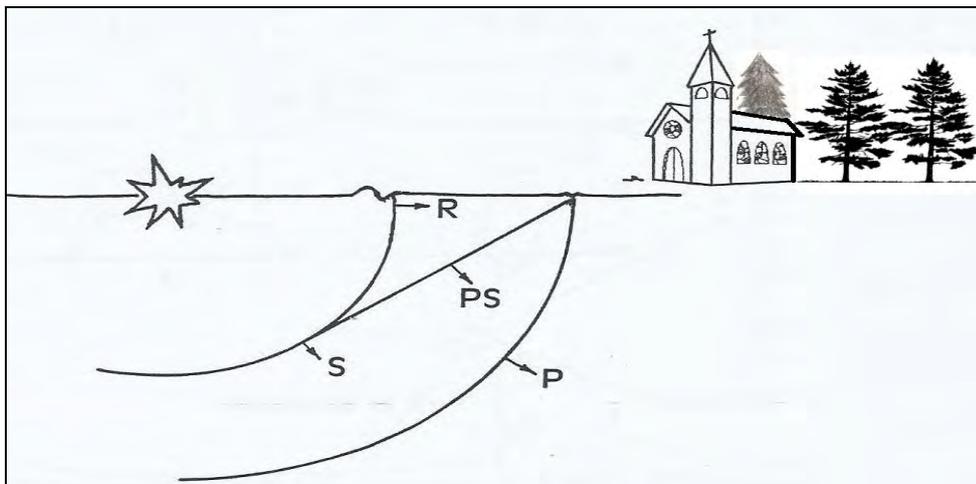


Figura N° 4.1: Muestra la voladura de rocas y sus efectos de las ondas.

Fuente: Persson, Holmberg & Lee.

#### 4.2.1 Variables no controlables

Estas variables se caracterizan por su gran aleatoriedad y entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

La gran variedad y naturaleza del macizo rocoso, al respecto se debe mencionar que los macizos rocosos no son homogéneos. El movimiento vibracional de las ondas que viajan a través de los estratos de diferentes impedancias del macizo rocoso. Por otro lado, la presencia de contactos, fracturas, fallas geológicas y zonas de corte en la dirección del movimiento vibracional de las ondas actúan también para esparcir y disipar las máximas vibraciones.



Figura N° 4.2: Muestra un macizo rocoso natural.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

#### **4.2.2 La geología regional, local y estructural.**

En este sentido se debe indicar que las características físico-mecánicas, así como la litología del macizo rocoso tiene que conocerse si se pretende diseñar un disparo primario.

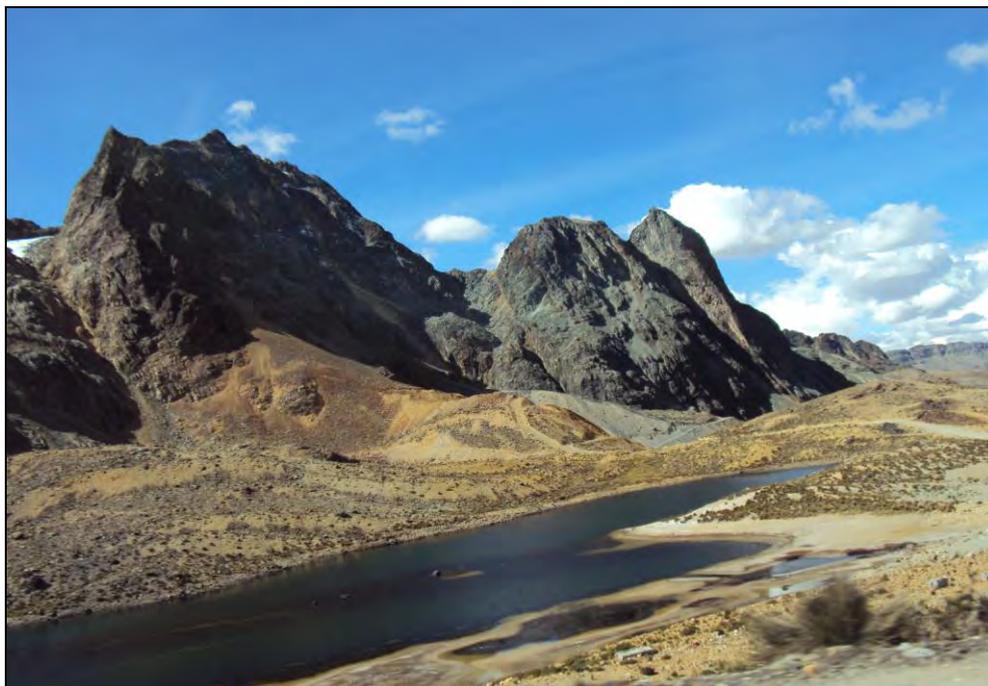


Figura N° 4.3: Muestra la geología del macizo rocoso.

Fuente Yeison Peña Vizarreta

#### **4.2.3 La hidrología y las condiciones climatológicas.**

Al respecto se debe referir que varios estudios hidrogeológicos y climáticos deben ser llevados a cabo previamente al diseño de los disparos primarios. Como se ha mencionado anteriormente las características físico-mecánicas geológicas del macizo rocoso son totalmente aleatorias; es por esta razón que los frentes de ondas sísmicas generadas por la voladura de rocas, se rigen en este caso por las leyes básicas de la reflexión y refracción de las ondas compresivas o de choque que son generadas en el momento de la detonación de una mezcla explosiva cargada dentro de los taladros.



Figura N° 4.4: Muestra un típico macizo rocoso.

Fuente: Yeison Peña Vizarrata

#### 4.2.4 Variables controlables

Estas variables se llaman controlables porque están bajo la decisión y control del hombre.

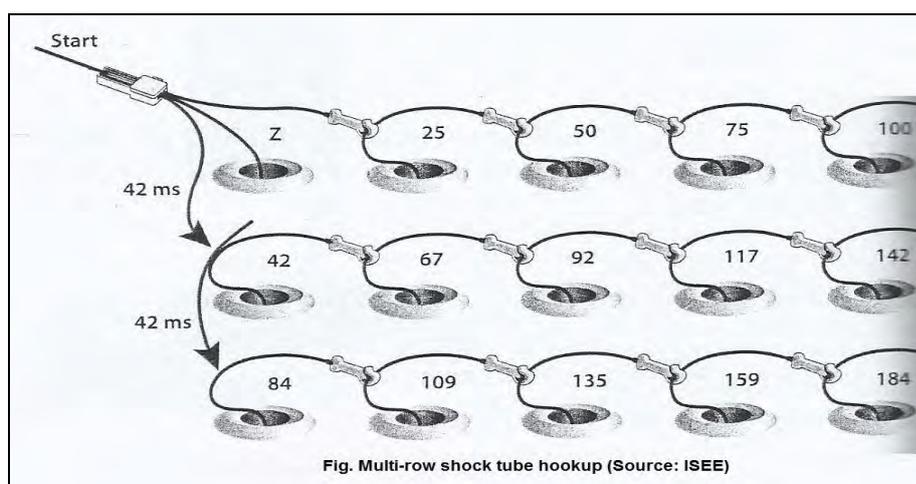


Figura N° 4.5: Muestra la secuencia de salida de un disparo. Fuente: ISEE

Estas variables controlables se clasifican en:

#### **4.2.4.1 Geométricas**

Entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Burden (B).
- Espaciamiento (S)
- Diámetro de los taladros ( $BH\phi$ )
- Longitud de carga (BH)
- Sobre perforación (S/D)
- Taco (T)
- Profundidad del taladro (BHD)

#### **4.2.4.2 Físico-químicas**

Estas variables están referidas a las mezclas explosivas comerciales, y entre otras se tienen las siguientes:

- Tipo de mezcla explosiva comercial
- Densidad de mezcla explosiva comercial ( $\rho_1$ )
- Parámetros de detonación (VOD,  $P_2$ ,  $T_2$ , etc.)
- Parámetros de explosión ( $Q_3$ ,  $P_3$ ,  $T_3$ , etc.)
- Boostering

#### 4.2.4.3 De tiempo

Entre las cuales se tienen:

- Tipo y tiempos de retardo
- Tipos y secuencia de salida, etc.

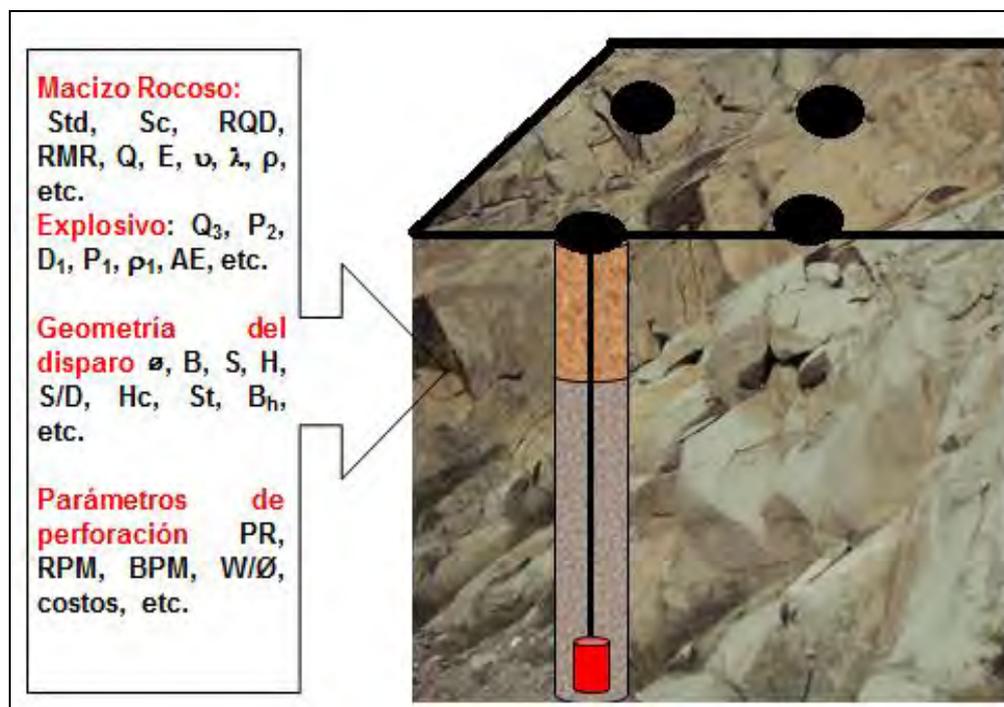


Figura N° 4.6: Muestra las variables controlables y no controlables.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

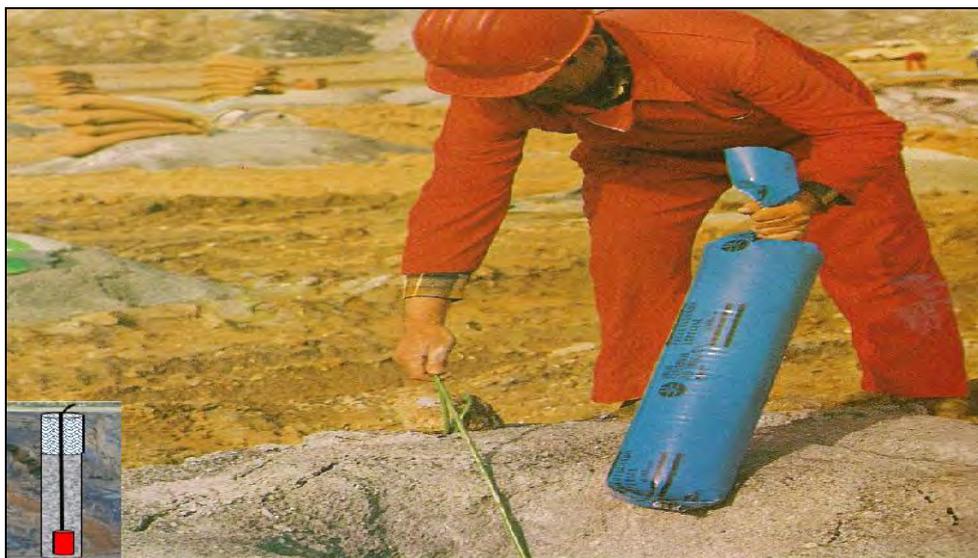


Figura N° 4.7: Muestra la nomenclatura de las variables controlables.

Fuente: ISEE, Blasting Meeting 1995.

Se debe enfatizar que para no causar excesivas vibraciones inducidas pro la voladura de rocas, se debe tener el mayor conocimiento posible de las variables no controlables mencionadas anteriormente.

## **CAPÍTULO V**

### **REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES CRITERIOS DE DAÑO POSTULADOS A LA FECHA.**

#### **5.6 Introducción.**

Durante las últimas décadas varios criterios de daño han sido postulados y aplicados, dependiendo de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Conocimiento o desconocimiento de las variables controlables y no controlables mencionadas en el capítulo anterior.
- Capacitación y actualización del personal encargado de llevar a cabo la voladura de rocas, etc.
- Instrumentación y equipamiento adecuados y de última generación, y sobre todo que al monitorear las vibraciones inducidas por la voladura entreguen resultados adecuados y confiables.

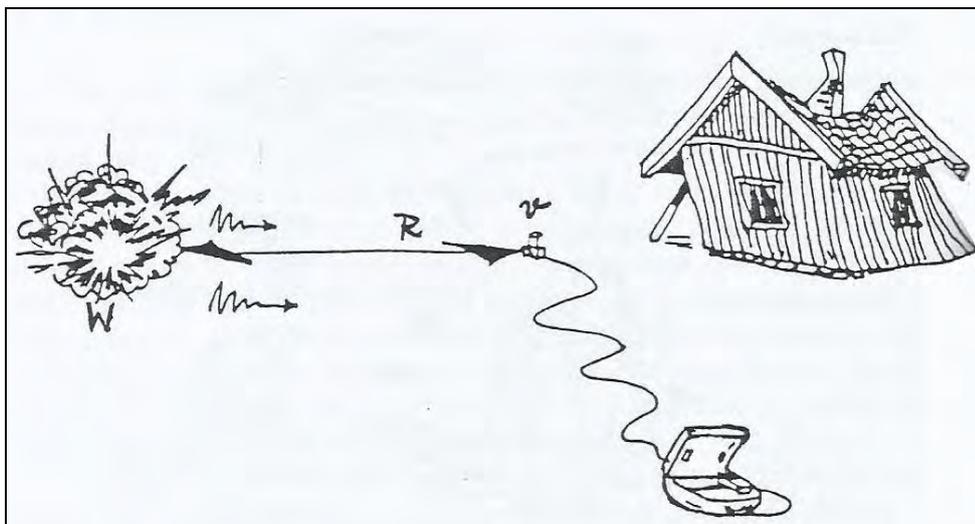


Figura N° 5.1: Muestra una voladura de rocas y sus efectos de las vibraciones. Fuente: Persson, Holmberg & Lee.

### 5.7 Parámetros incidentes en el daño.

Teniendo en cuenta que cada tipo de macizo rocoso y cada tipo de explosivo poseen una serie de particularidades en lo referido al tipo y magnitud (amplitud y frecuencia) de las vibraciones inducidas. Por otro lado, factores como el estado del macizo rocoso y como la velocidad de detonación del explosivo expresada como onda de choque, influyen en la amplitud y frecuencia de las vibraciones inducidas, y en su variabilidad de acuerdo como estas ondas van transmitiéndose.

### 5.8 Criterios de daño.

El concepto criterio de daño es relativo dado que puede involucrar desde la generación de micro fisuras hasta la aparición de grietas que puedan inducir algún tipo de colapso. Adicionalmente, la aparición o no de daños, grietas y

fisuras está directamente relacionada con la calidad del suelo y de los materiales de las estructuras y de los modelos matemáticos y/o técnicas construcción y sobre todo a que distancia de la zona del disparo se encuentran estas.



Figura N° 5.2: Muestra la construcción de una vivienda sin realizar los estudios del terreno. Fuente: Web Internet

Se debe mencionar que en Perú, muchas estructuras (casas) son construidas por los mismos propietarios y/o albañiles, sin tener en cuenta el estudio del suelo, ni mucho menos tener la opinión o recomendaciones de algún ingeniero civil o arquitecto, es por esta razón que cada estructura debería ser estudiada individualmente o específicamente. Para realizar un

estudio del efecto de las vibraciones sobre las estructuras aledañas a la zona del disparo, se deben tener en cuenta lo siguiente:

- Definición de límites para evitar daño en sistemas estructurales de acuerdo con las normas internacionales más conservadoras.
- Medición de los movimientos del macizo rocoso producidos por las voladuras de rocas en las proximidades de las estructuras.
- Modelación dinámica de los sistemas estructurales que permitan establecer la respuesta estructural dinámica ante los desplazamientos del macizo rocoso. Esta modelación es posible realizarla mediante modelos simplificados o mediante análisis dinámicos más complejos (análisis modal espectral, análisis dinámicos lineales y no lineales, etc.) mediante técnicas numéricas como los elementos finitos, etc.

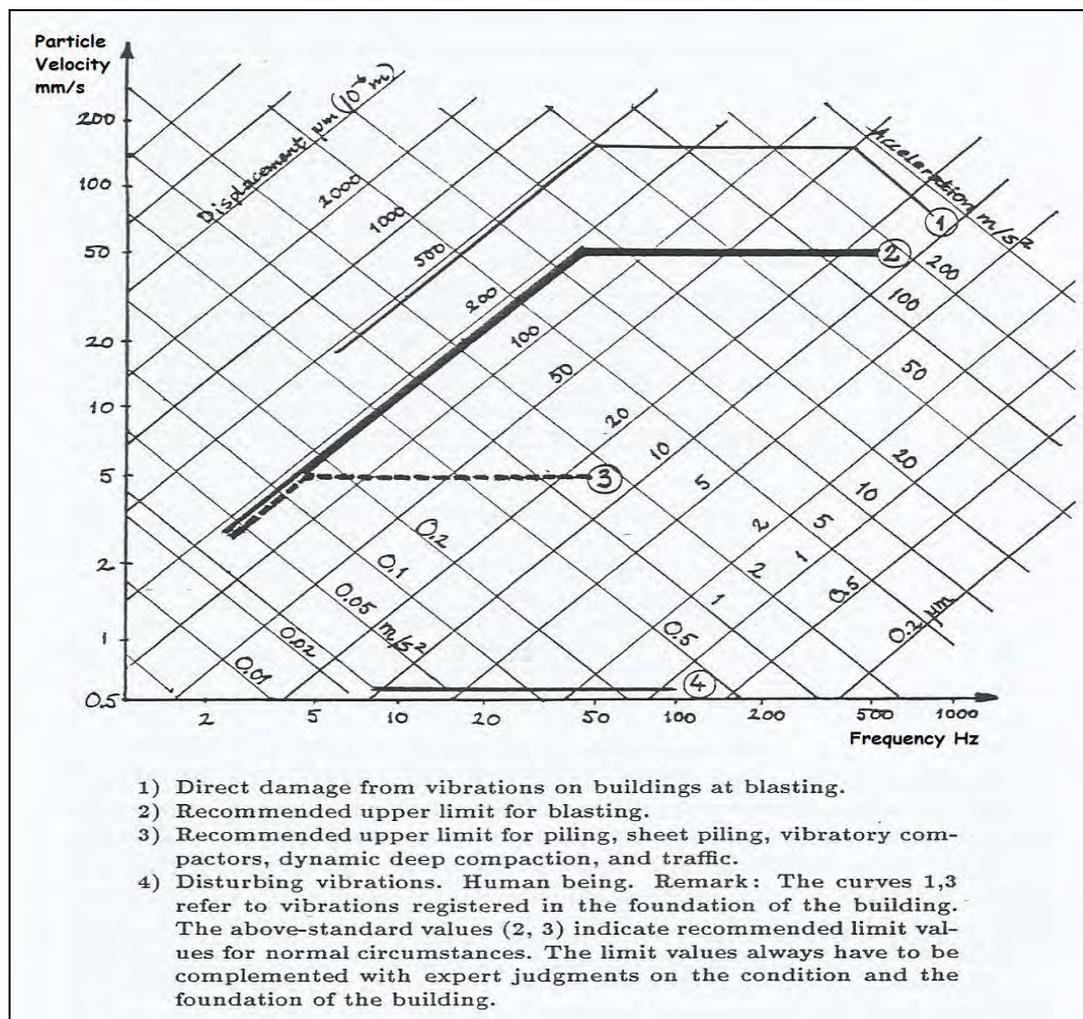


Figura N° 5.3: Muestra las recomendaciones que deben ser tomados en cuenta respecto al criterio de daño. Fuente: ISEE

### 5.8.1 Definición.

Varios son los investigadores que han postulado modelos matemáticos, que sirven para cuantificar el daño producido por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas.

## 5.9 Breve descripción de dichos modelos matemáticos.

### 5.9.1 Modelo general.

$$V = (K)(D)^\alpha \rightarrow (1)$$

Dónde:

V: Velocidad de partícula (mm/sec.)

D: Distancia escalada

K: Factor de velocidad

a: Factor de atenuación

El factor "D" distancia escalada toma en cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de mezcla explosiva comercial (Kg.) por retardo.

### 5.9.2 Devine y Duvall

$$V = K \left[ \frac{D}{W^{1/2}} \right]^\alpha ; n = 1/2 \rightarrow (2)$$

### 5.9.3 Langerfors

$$V = K \left[ \frac{D}{W^{3/2}} \right]^\alpha ; n = 3/2 \rightarrow (3)$$

#### 5.9.4 Hendron y Dowding

$$V = K \left[ \frac{D}{W^{1/3}} \right]^\alpha ; n = 1/3 \rightarrow (4)$$

#### 5.9.5 Holmberg y Persson.

$$PPV = K\gamma^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dH}{\left[ R_0^2 (R_0 \tan \phi - H) \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha \rightarrow (5)$$

Dónde: K,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que pertenecen al macizo rocoso in-situ, donde se realiza la voladura de rocas.

$\int_0^H$ : *Integral definida*

$\gamma$ : Densidad lineal del explosivo cargado dentro del taladro (Kgs/m)

dH: Diferencial de altura (H)

$R_0$ : Distancia entre el punto de monitoreo y la carga explosiva detonada.

H: Altura de banco

$\phi$ : Angulo formado entre la horizontal y la línea de monitoreo.

Se debe mencionar que el modelo matemático postulado por Holmberg & Persson fue desarrollado para ser aplicado en campo cercano, es decir para una distancia entre la carga detonada y el punto de monitoreo  $\leq 50$  metros (campo cercano).

Para campo lejano  $D \geq 50$  metros se deben aplicar los otros modelos matemáticos mencionados anteriormente.

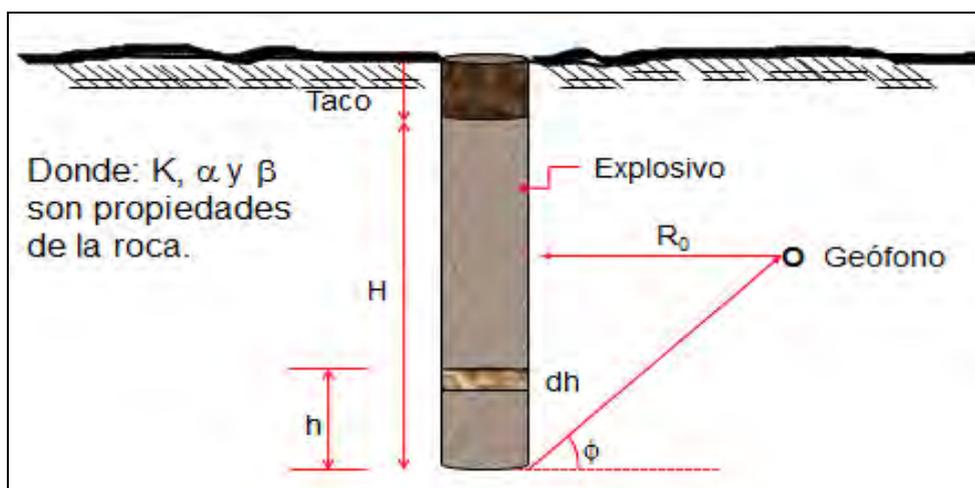


Figura N° 5.4: Muestra el diagrama conceptual que sirvió para postular el modelo matemático de Holmberg & Persson, para distancias  $\leq 50$  metros.

Fuente: Persson & Holmberg

### 5.10 Percepción humana.

En el presente trabajo de investigación se presenta una serie de opiniones sobre el tema de afectación de las vibraciones sobre los seres humanos, los diferentes estudios que se han realizado durante el siglo pasado sobre la sensibilidad del hombre a las vibraciones y se describe la norma más importante y representativa relacionada con el tema. Estos elementos conceptuales son las bases para la ejecución de medidas en áreas particularmente sensibles a las actividades relacionadas con las detonaciones de mezclas explosivas comerciales producidas por voladuras de rocas.

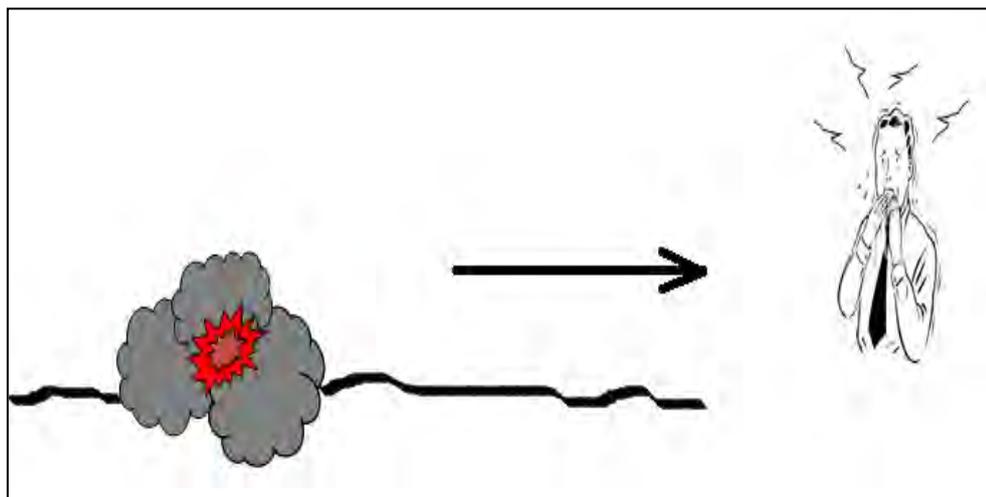


Figura N° 5.5 Muestra la percepción de las vibraciones producidas por la detonación de una mezcla explosiva comercial.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

**Crandell** (1949) resumió los datos disponibles para su época donde la amplitud de un movimiento con un efecto concreto sobre el cuerpo humano es casi inversamente proporcional a la frecuencia.

**Rathbone** (1963) hizo una síntesis de la información disponible en donde adoptó un criterio en función de la velocidad de la partícula. En realidad los datos presentados son abstractos y corresponden a estudios de laboratorio, en la realidad la reacción de los seres humanos es función de otros factores como la continuidad del movimiento y los ruidos simultáneos al movimiento. El ser humano es dos veces más sensible a vibraciones permanentes que a las pulsátiles producidas por una detonación de una mezcla explosiva comercial aislada. Por otra parte el ser humano percibe las vibraciones con el oído interno y con el oído externo los sonidos que las acompañan que son de dos clases:

- El de la propia detonación de una mezcla explosiva comercial.
- El que se produce cuando vibran las construcciones.

La experiencia demuestra que este último estímulo influye en forma decisiva en la apreciación subjetiva de la importancia de una vibración.

**Oriard** (1970) presento una guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones en las que toma en cuenta la continuidad del movimiento y los ruidos producidos por este.

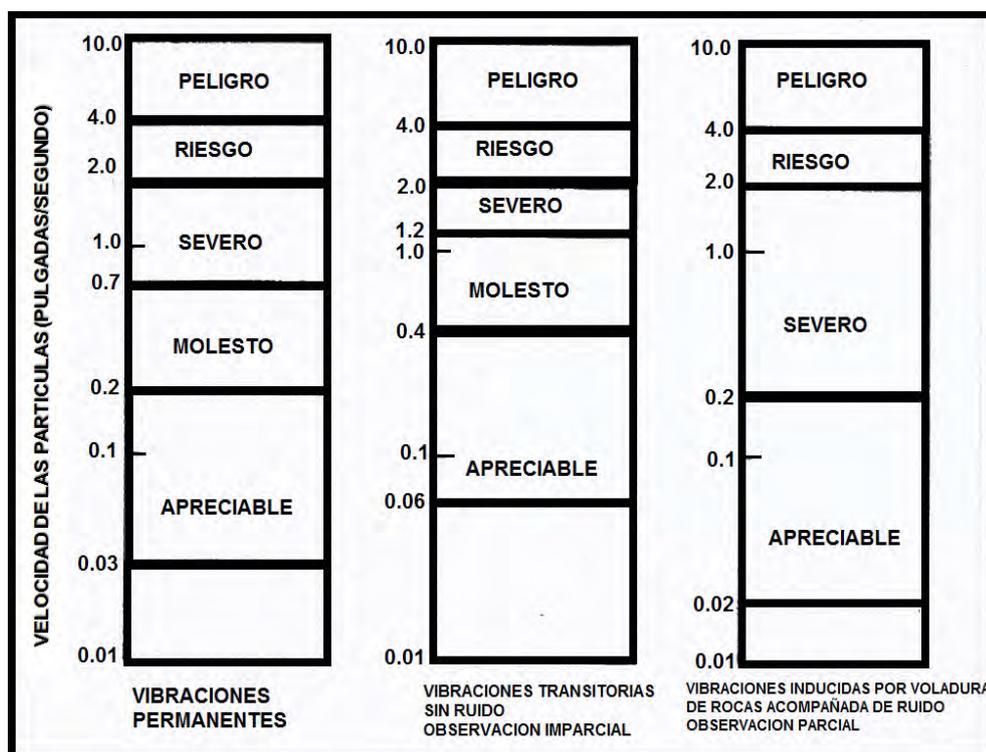


Figura N° 5.6: Muestra la guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones producidas por la voladura de rocas (Oriard, 1970).

Una percepción individual de que es normal o anormal puede depender en experiencia y expectativas previas. Por ejemplo, alguien que trabaja en los últimos pisos en un edificio alto puede ser menos afectado por la vibración del edificio que alguien que no trabaja en el edificio. Bajo ciertas condiciones el cuerpo humano puede detectar amplitudes tan bajas como un micrón; amplitudes del orden de 0.5 micrón puede ser detectado con la puntas de los dedos (todos los desplazamientos son picos de amplitudes). El dato básico concerniente a la sensibilidad de todo el cuerpo a las vibraciones son descritas en la escala Reiher-Mesiter. En la investigación Reiher-Mesiter se notó que las vibraciones verticales son detectadas por humanos con mayor facilidad estando de pie, mientras las vibraciones horizontales son percibidas mayormente estando acostados. La sensación producida depende de frecuencia y amplitud. Una amplitud de 100 micrones constituye una vibración molesta si la frecuencia excede 5Hz y una vibración dolorosa si la frecuencia excede 20Hz. Una amplitud de 10 micrones es solo perceptible a 5Hz, pero sería de molestia a 50Hz. En término de velocidad pico el límite de percepción corresponde a una velocidad de 0.3mm/s y una vibración es molesta si la velocidad excede 2.5mm/s.

El problema relacionado a la percepción humana del movimiento casual es tratado en la norma DIN 4150/2. Los valores por el grado de percepción (valores  $K_b$ ) son derivados de la relación:

$$K_b = \frac{0.005(A)(f^2)}{100 + f^2}$$

Dónde:

A = Desplazamiento en micrones.

F = Frecuencia en Hertz

Tabla N° 5.1: Relación entre valores Kb y la percepción humana de vibraciones (DIN 4150/2).

<b>Valor Kb</b>	<b>Grado de percepción</b>
< 0.1	No percibido
0.1	Límite de percepción
0.25	Escasamente percibido
0.63	Apreciable
1.16	Fácilmente apreciable
4.0	Fuertemente detectable
10.0	Detectable muy fuertemente

## **CAPÍTULO VI**

### **DAÑOS AL MACIZO ROCOSO.**

#### **6.5 Introducción**

El efecto de una detonación de una voladura de rocas es: Se siente una detonación, vibra el macizo rocoso y pueden caer fragmentos de roca. La detonación es transmitida a través del macizo rocoso como una onda P de compresión que produce un incremento de la presión atmosférica (con riesgo de rotura de cristales, tabiques, etc.) y es percibido como un ruido por los seres vivos a los que puede dañar si es de gran intensidad. El macizo rocoso transmite vibraciones complejas que incluyen ondas P de compresión con origen en el foco, ondas S de corte que provienen de reflexiones y/o refracciones de las ondas P cuando encuentran discontinuidades del macizo rocoso y finalmente ondas L o R de superficie que se transmiten a través de la superficie y tienen componentes de compresión y de corte. Estas vibraciones pueden causar daño a las construcciones.

Hay con frecuencia lanzamientos de fragmentos de roca en la zona de la voladura de rocas, que al caer puedan originar daños importantes a los equipos, infraestructuras, materiales y especialmente a las personas. Teniendo en cuenta la ley de Hooke, y asumiendo un comportamiento elástico; la velocidad de partícula la máxima (crítica);  $PPV_c$  que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo la resistencia a la tensión ( $St$ ), el módulo de Young ( $E$ ) y la velocidad de propagación de la onda "P", y usando la siguiente expresión matemáticas:

$$PPV_c = \frac{(St)(V_p)}{E} \rightarrow (1)$$

También, se ha demostrado que:

$4 \times PPV_c \rightarrow$  sucederá la trituración del macizo rocoso.

$1/4 \times PPV_c \rightarrow$  sucederá el inicio de la extensión de fracturas pre existentes.

Por otro lado, Langerfors relaciona la deformación inducida ( $\varepsilon$ ) con el rango de daño a construcciones en superficie a través de la siguiente expresión matemática.

$$\varepsilon = \frac{PPV_c}{V_p} \rightarrow (2)$$

Dónde:

$\varepsilon$  : Deformación inducida (mm/sec)

PPVc: Velocidad de partícula crítica (mm/sec)

Vp: Velocidad de la onda "P" (m/sec)

Por otra parte, se sabe que el primer tipo de daño inducido por las vibraciones producidas por la voladura de rocas es la rotura por descostramiento. Esto sucede cuando la tensión generada por la onda de choque actuando en el macizo rocoso; que está representada por el producto de la impedancia del macizo rocoso y la velocidad pico de partícula supera a la resistencia tensional dinámica de dicho macizo rocoso.

Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$Std = (\rho_R \times V_p) \times PPVc \times 10^{-6} \rightarrow (6)$$

Dónde:

Std: Resistencia tensional dinámica (MPa)

$\rho_R$ : Densidad del macizo rocoso (Tm/m<sup>3</sup>)

PPVc: Velocidad de partícula crítica (mm/sec.)

Vp: Velocidad de la onda "P" (m/sec.)

## 6.6 Algunos criterios de daño seleccionados y basados en la velocidad pico de partícula (PPV).

El desarrollo de la presente tesis de investigación se hará mediante un diagnóstico técnico, enfocado a evaluar la eficiencia general y los actuales estándares de la voladura de rocas de producción y como las vibraciones podrían causar algún daño. La gran cantidad de variables que interactúan en una voladura de rocas hace necesario adaptar y desarrollar modelos matemáticos que permitan una correcta evaluación de este proceso, antes, durante y después de su ocurrencia, así como de una adecuada cuantificación y control del daño que esta pueda producir.



Figura N° 6.1: Muestra el daño a las estructuras por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas. Fuente: Yeison Peña Vizarreta

Estos movimientos de propagación ondulatoria se dan a través de macizos rocosos con una velocidad de propagación dada, y que dependen de cada tipo de macizo rocoso, el cual se verá afectado por las tensiones dinámicas que la onda transporta. Estas últimas dependen de los desplazamientos oscilatorios, respecto a su posición de reposo, que sufren las partículas del macizo rocoso a medida que una perturbación se propaga denominándose velocidad vibratoria.

Tomando en cuenta su aplicabilidad en el campo y la fecha de su postulación se han seleccionados los siguientes criterios.

#### **6.6.1 Langerfors, Kihlstrom and Westerberg.**

Tabla N° 6.1: Muestra el criterio de daño de Langerfors, Kihlstrom & Westerberg.

<b>Forma de daño</b>	<b>Velocidad de partícula (in/sec.)</b>
Ningún daño	2.8
Pequeñas fisuras y caída de yeso de las estructuras	4.3
Fracturamiento del yeso de las paredes y algunas fisuras de las paredes.	6.3
Serio fracturamiento	9.1

### 6.6.2 . USBM.

Tabla N° 6.2: Muestra el criterio de daño de la USBM.

<b>Forma de daño</b>	<b>Velocidad de partícula (in/sec.)</b>
Ningún daño	< 2.0
Fracturamiento del yeso de las paredes.	2.0 – 4.0
Daño menor	4.0 – 7.0
Daño mayor a estructuras	> 7.0

### 6.6.3 Hook & Bray.

Tabla N° 6.3: Muestra el criterio de daño de Hook & Bray

<b>Forma de daño</b>	<b>Velocidad de partícula (mm/sec.)</b>
Fracturamiento de roca	2500
Inicio del fracturamiento	650
Caída de rocas en galerías	300
Daño menor, agrietamiento de yeso o estuco.	130

#### 6.6.4 Bauer & Calder.

Tabla N° 6.4: Muestra el criterio de daño de Bauer & Calder

<b>Efectos sobre el macizo rocoso</b>	<b>Velocidad de partícula (in/sec.)</b>
No hay peligro en roca competente	< 250
Puede aparecer descostramiento en lajas por fracturamiento tensional	250 – 650
Grandes fracturas por tensión o algunas grietas radiales	650 – 2500
Agrietamiento total del macizo rocoso	> 2500

#### 6.6.5 Oriad.

Tabla N° 6.5: Muestra el criterio de daño de Oriad

<b>Forma de daño</b>	<b>Velocidad de partícula (mm/sec.)</b>
Caída ocasional de roca suelta	5 - 100
Caída de secciones de roca parcialmente suelta	130 - 380
Daño al macizo rocoso poco competente	> 600
Daño significativo a macizos rocosos competentes	> 2500

Como se puede, observar en todos los criterios de daños revisados anteriormente, se usa el método para evaluar las diversas formas de daño, el método de la velocidad de partícula se debe mencionar que existen también otros métodos para evaluar los diversos criterios de daño. Por otro lado, diversos investigadores han demostrado que el daño provocado por una voladura de rocas tiene una relación directa con la velocidad máxima de pico partícula (PPVc). En el capítulo anterior del presente trabajo de investigación se han mencionado y descrito los modelos matemáticos más conocidos y usados. Para calcular la velocidad pico de partícula (PPV). Así, por ejemplo en la tabla 6.5 se muestra los cálculos de la velocidad pico de partícula (PPVc) para diferentes tipos de roca; para lo cual se usó el siguiente modelo matemático.

$$PPVc = \frac{(St)(Vp)}{E} \rightarrow (1)$$

Dónde:

PPVc: Velocidad pico de partícula crítica (mm/sec.)

St: Resistencia tensional dinámica del macizo rocoso.

Vp: Velocidad de propagación de la onda "P" (m/sec.)

E: Modulo de Young.

Tabla N° 6.6: Muestra los cálculos de la velocidad pico de partícula crítica para diferentes tipos de roca.

<b>Tipo de Rocas</b>	<b>St (Mpa)</b>	<b>Vp (m/sec)</b>	<b>E (Gpa)</b>	<b>PPVc (mm/sec.)</b>
Cuarzo I	1.40	5,102	55.5	1,286
Brecha	7.3	4,298	30.2	1,037
Cuarzo II	8.4	4,207	42.7	823
Brecha II	3.9	4,041	39.3	401
Andesita	14.9	4,975	67.3	1,100
Diorita	13.2	4,650	48.6	1,260
Brecha III	11.3	4,650	58.3	900
Pórfido I	6.7	3,829	31.2	823
Pórfido II	5.1	3,661	46.6	401

### **6.7 Modelo matemático para campo lejano.**

Como bien se sabe, los diversos investigadores en esta materia han clasificado a los modelos matemáticos desarrollados para campo lejano cuando la distancia entre el área del disparo y el lugar de monitoreo es mayor a 50 metros.

De los diversos monitoreos de campo relacionados con las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, se deben obtener principalmente lo siguiente:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una mezcla explosiva comercial
- La cantidad de mezcla explosiva comercial que genera el nivel de vibraciones obtenido.
- La distancia de la mezcla explosiva comercial al punto de monitoreo.

Se debe referir que el modelo matemático postulado por Devine es uno de los más usados cuando se trata de monitorear, cuantificar y aplicar los resultados de un estudio de vibraciones inducidos por la voladura de rocas, el modelo matemático de Devine es expresado de la siguiente manera:

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

Dónde:

V: Velocidad de las partículas (mm/sec)

D: Distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula (m)

W: Carga explosiva por retardo (Kgs).

Según varias opiniones el criterio de Devine es el que mejor representa el comportamiento de las vibraciones para campo lejano.

### 6.8 Modelo matemático de campo cercano.

El modelo matemático para campo cercano; cuando la distancia entre la zona del disparo primario y el punto de monitoreo es menor a 50 metros, fue postulado por Holmberg & Persson. Este modelo matemático toma en cuenta la forma alargada y cilíndrica de la mezcla explosiva comercial. Matemáticamente este modelo se expresa de la siguiente forma:

$$PPV = K\gamma^\alpha \left\{ \int_0^H \frac{dh}{\left[ R_0^2 (R_0 \tan\phi - X^2) \right]^{\beta/2\alpha}} \right\}^{-\alpha}$$

Fuente: "Rock blasting explosive Engineering", Holmberg, Persson & Lee.

Todas las variables de este modelo y el gráfico correspondiente para su interpretación han sido mencionados y descritos en el capítulo V del presente trabajo de investigación.

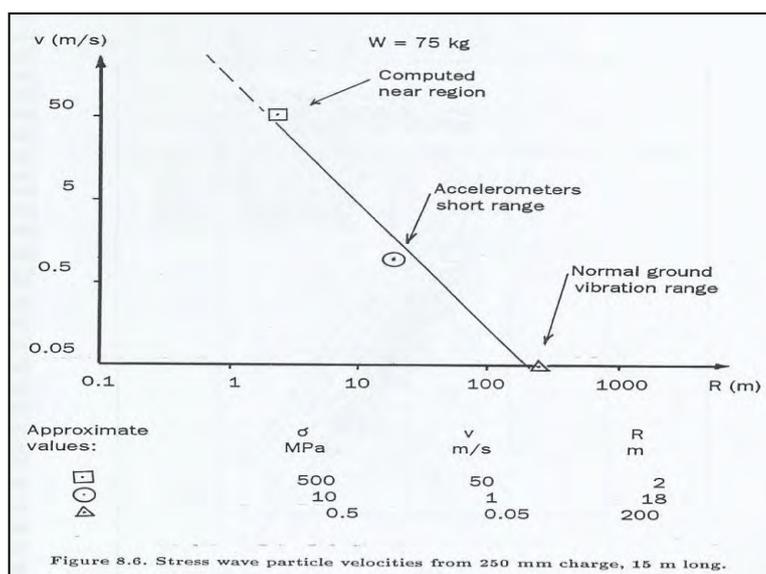


Figura N° 6.2: Muestra la velocidad pico de partícula.

Fuente: Persson, Holberg & Lee

## **CAPÍTULO VII**

### **INSTRUMENTACION NECESARIA PARA MONITOREAR LAS VIBRACIONES.**

#### **7.5 Introducción.**

Las vibraciones de cualquier material, son las oscilaciones de las partículas en torno a su posición de equilibrio. En el macizo rocoso, la velocidad, periodo y amplitud de las oscilaciones pueden determinar para un tipo de macizo rocoso si este sufrirá alguna alteración o colapso. Con el monitoreo de las vibraciones inducidas por la voladura de rocas en puntos estratégicos y cercanos a dicha voladura, se podrá estimar la probabilidad que este punto de monitoreo puede sufrir.

Por otro lado, es posible relacionar los resultados del monitoreo de las vibraciones con la voladura, de tal manera de obtener importantes conclusiones.



Figura N° 7.1: Muestra una voladura de rocas y la medición de las vibraciones. Fuente: Yeison Peña Vizarreta

En general, se puede mencionar que las principales características de las vibraciones, que son medidas cercanamente a una voladura de producción pueden ser enunciadas de la siguiente manera:

Tabla N° 7.1: Muestra los rangos de las principales características de las vibraciones.

<b>Concepto</b>	<b>Rangos</b>
Velocidad de partículas	100 – 1000 mm/sec.
Desplazamiento dinámico	0.01 – 2.00 mm
Rango de frecuencia	10 - 1000 Hz.
Frecuencia dominante	50 – 500 Hz

### **7.6 Instrumentación para monitorear las vibraciones**

Como se sabe, la instrumentación y equipamiento es fundamental ya que tiene por objetivo principal obtener una buena información representativa y consistente y sobre todo confiable. Para lo cual, se deben manejar ciertos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura llevada a cabo en los taladros de producción; así por ejemplo se sabe que la transmisión es ortogonal y su descomposición se convierte en ondas del tipo P, S, V, R, etc. Dichas ondas se encargaran de transmitir la energía vibracional. Por lo tanto, se debe tener presente que sus implicancias que dependerán de la geometría, posición de la voladura y el respectivo sistema estructural; así por ejemplo, se tiene que las ondas superficiales son de menor amplitud, y viaja una mayor distancia. Por lo tanto, es importante su monitoreo en campo lejano; por el contrario las ondas: P, S, V que son de mayor importancia en campo cercano. La instrumentación necesaria y

suficiente para monitorear las vibraciones inducidas por la voladura de rocas es la siguiente:

- Transductores (geófono o acelerómetros) que deben ser instalados adecuadamente
- Un sistema de cables que se encargan de llevar la señal captada por los transductores al correspondiente equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual se encarga de recibir la señal y la guarda en la memoria.
- Una computadora, la cual tiene incorporado el software necesario para el traspaso de la información desde el equipo de monitoreo para su posterior análisis.

### **7.2.1 Transductores de vibración.**

Gran parte de las capacidades y ventajas de los métodos de monitoreo de vibraciones estriba en la habilidad para la recolección de datos de vibraciones que son confiables. Las características de dichos datos, tienen directa relación con el tipo de transductor utilizado y el método empleado para su instalación y orientación. Por otro lado, se debe mencionar que existe una gran variedad de estos equipo disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas, su función es convertir el movimiento físico generado por el paso de la vibración en una señal de voltaje equivalente, según su sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas características, tales como:

**7.2.1.1 Precisión:** Gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibraciones; es entonces muy importante que ellos sean confiables en un largo plazo.

**7.2.1.2 Costo:** Muchas veces es necesario instalar transductores permanentes en el macizo rocoso; lo que evita efectos superficiales, y permitirá un análisis completo de una voladura de rocas. Bajo estas circunstancias los transductores no podrán recuperarse, y en este caso el costo de cada equipo debe ser minimizado.

**7.2.1.3 Relación señal-ruido:** Si la salida del transductor es de gran magnitud en relación a los niveles de ruidos, los problemas detectados en operaciones mineras subterráneas con respecto a campos magnéticos podrían ser minimizados.

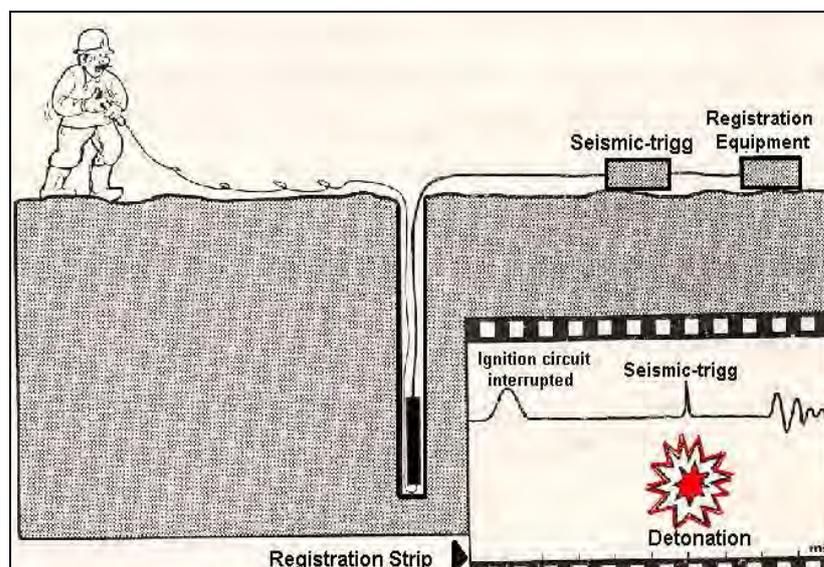


Figura N° 7.2: Muestra la posición de equipos para medir las vibraciones.

Fuente: ISEE

Por otro lado, para medir las vibraciones del macizo rocoso existen dos tipos de transductores básicos, y estos son:

**7.3 Acelerómetros:** Los acelerómetros del tipo piezoeléctrico tienen alta frecuencia natural y una respuesta lineal bajo su frecuencia resonante. La señal de salida es proporcional a la aceleración, la cual por lo general debe ser amplificada previamente a su grabación. Los acelerómetros reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, de buena calidad; pero caros. Son más complejos de usar, ya que requieren de equipamiento auxiliar, como fuentes de poder y pre amplificadores; los cuales pueden inducir problemas de ruidos significativos.

Las características generales, son las siguientes:

- Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1 Hz – 20,000 Hz)
- Su unidad de medida es el g ( $1g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ .) con rangos de 0.250g
- No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor confiabilidad
- La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que debe amplificarse con elementos externos.
- Son de pequeño tamaño
- Tienen un costo alto.

**7.4 Geófonos:** Estos equipos dan una medición directa de la velocidad, y consisten por lo general de un sistema de bobina móvil soportada por resortes y un imán fijo. Al contrario del acelerómetro, el geófono trabaja

sobre su frecuencia natural. Por otro lado, cuando se miden frecuencias muy bajas, la salida es influenciada por sus características de respuesta a la frecuencia y la señal resultante en términos de nivel de vibraciones debe ser adecuadamente corregida. Los geófonos no son tan resistentes como los acelerómetros; por lo que pueden eventualmente dañarse si son maltratados o mal manipulados. Por otro lado, los geófonos no son tan costosos y su señal de salida es simple de analizar, no requiere una fuente de poder adicional, y generalmente no es necesario pre-amplificar su señal antes de su grabación. Cuando los transductores a instalar no son recuperables, mejor usar geófonos sensibles a la velocidad. Poco es lo que se puede hacer para mejorar el rango de respuestas dinámicas de estas, por lo tanto, se debe tener cuidado de no usarlos donde sus especificaciones técnicas probablemente pueden ser excedidas. Mediante la comparación entre señal obtenida por un geófono y la señal integrada registradas por un acelerómetro en el mismo punto, se ha demostrado en el mismo punto, que los geófonos no están habilitados para responder a altas frecuencias, lo que sin embargo no es impedimento en su capacidad para medir la velocidad de partícula según los requerimientos de los datos antes mencionados. Como regla general, se debe referir que resulta inadecuado usar un transductor de velocidad del tipo bobina móvil, cuando las frecuencias dominantes sean muy superiores a 500 Hz.

Las características generales de los geófonos son las siguientes:

- Su unidad de medida es volt/(mm/s)

- Entregan una medición directa de la velocidad
- Miden bien en el rango de 1 mm/s hasta 1200 mm/s.
- Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz.
- La sensibilidad varía entre 0.003 volts/(mm/s) a 0.04 volts/(mm/s)
- Su costo no es muy alto.

**7.4.1 Frecuencia de los geófonos:** se tienen dos tipos de geófonos, tales como: Los de campo cercano y campo lejano, los cuales poseen un rango de aceptabilidad para la medición que depende de la frecuencia que es capaz de registrar, diferenciándose los geófonos de 14 Hz y los de 28 Hz. Los geófonos de 14 Hz tienen la capacidad de medir vibraciones a partir de esa frecuencia con una muy buena precisión, mientras que los geófonos de 28 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de frecuencias superiores a los 28 Hz.

**7.4.2 Sensibilidad:** La sensibilidad del geófono indica magnitud máxima de vibraciones que puede recibir un geófono, la cual se indica en unidades de volt/(mm/s) para obtener el rango máximo de vibraciones que permita registrar un geófono es necesario ingresar el valor de sensibilidad de este y el equipo de medición entregará el valor máximo de la velocidad automáticamente.

**7.4.3 Máximo desplazamiento de los geófonos:** los geófonos son bobinas que al moverse producen un voltaje inducido, pero este movimiento no puede ser infinito, por lo que los geófonos poseen una característica que se refiere a su máximo desplazamiento permitido, por lo tanto, los geófonos

son capaces de registrar vibraciones reales siempre y cuando el desplazamiento del geófono no exceda cierto valor. Generalmente los geófonos más usados tienen un desplazamiento máximo de 2 mm.

**7.4.4 Equipo de adquisición:** Los transductores son comúnmente instalados en un arreglo triaxial y la señal de cada uno recolectada separadamente en algunos casos requieren múltiples canales, cada uno de los cuales puede ser amplificado o atenuado. Después de dicha amplificación, las señales de salida de los transductores son grabadas como una señal analógica o convertida en señal digital, y posteriormente grabadas.

El equipo seleccionado generalmente debe poseer las siguientes características:

- Múltiples canales de adquisición
- Diferentes rangos de entrada para cada canal
- Cubrir un ancho de banda entre 1 Hz a 5 Hz.
- Velocidad de conversión (AD) y almacenamiento
- Bajo consumo de energía que facilite su independencia
- Gran portabilidad (tamaño y peso)
- Iniciación remota o automática (según un umbral o circuito abierto)
- Adecuada protección física para el trabajo de campo.

**7.4.5 Equipo de análisis:** La información de vibraciones es generalmente almacenada y analizada usando una computadora.

El análisis de la información requiere de una computadora y un software con capacidad para un manejo integral de la forma de la onda y donde los principales trabajos que deben realizar son los siguientes:

- Comunicación externa hacia impresora o plotter
- Filtro de frecuencia
- Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia
- Generar el vector suma de las tres componentes ortogonales
- Derivación, integración e inversión de las ondas
- Cursor móvil sobre la señal para un análisis minucioso de los tiempos y amplitudes.
- Amplificación de partes de la señal
- Desplegar múltiples señales

**7.4.6 Instalación de los transductores:** La cantidad de información utilizable de cada registro de vibraciones depende de la ubicación y orientación de los transductores. Así por ejemplo, si un transductor es instalado cercanamente (50 m) a una columna de explosivo observara la detonación como una fuente en movimiento debido a la descomposición físico química del explosivo en múltiples elementos que detonan en un tiempo finito. La forma de la onda recibida por la detonación del explosivo es función de:

- Las propiedades y cantidades del explosivo
- Configuración geomecánica de la fuente y detector
- Propiedades del transductor
- Propiedades del macizo rocoso (velocidad de la onda "P", etc).

**7.4.7 Número de transductores:** El número de transductores a ser usados depende de la cantidad de información requerida. Si el interés principal es confirmar la detonación de cada uno de los taladros, o un grupo de taladros en cada retardo, o por ejemplo la medición de la dispersión de los retardos. Entonces, en este caso se requiere solo la de un solo transductor y su ubicación no será muy difícil. Por otro lado, si se desea examinar la contribución de cada taladro de la voladura, o por ejemplo si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, la fuente generadora de cada una de las vibraciones debe ser conocida. Esto requerirá una ubicación muy cuidadosa del número de transductores a usarse, para un adecuado análisis de la detonación de diferentes cargas explosivas espaciadas en las tres coordenadas X, Y, Z; junto a la velocidad de propagación; para lo cual serán necesarios un mínimo de 5 transductores. Se debe tener en cuenta que en la práctica, el número de transductores se incrementara según la complejidad del diseño y la cantidad de información que se necesita. Por ejemplo, cuando se utiliza un gran número de cargas explosivas espaciadas por cada taladro, en el registro de vibraciones a cada una de estas cargas explosivas espaciadas se le debe asociar una determinada señal de vibraciones, para lo cual se deben instalar geófonos a diferentes

profundidades. El uso de arreglos triaxiales a diferentes profundidades cercanamente posterior de la voladura, se utiliza particularmente en voladuras de operaciones mineras subterráneas, la dirección del movimiento de la bobina móvil al paso de cada vibración determina si el primer arribo de la señal es positivo o negativo; y de acuerdo a esto la dirección del viaje de las ondas y la localización relativa de la fuente emisor será determinada. Por otro lado, un arreglo triaxial permite calcular el vector suma resultante de las vibraciones, lo cual representa el efecto de las vibraciones en las tres direcciones.



Figura N° 7.3: Muestra la colocación de los equipos para medir las vibraciones.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONTROL, MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA.**

#### **8.4 Introducción**

Teniendo en cuenta las opiniones de varios investigadores especialistas en voladura de rocas, quienes recomiendan que para: Controlar, mitigar y reducir las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, se debe proceder de dos maneras; las cuales son las siguientes:

#### **8.5 Reducir el peso de carga explosiva por retardo**

También, se debe proceder como sigue:

- Utilizar disparos secuenciales
- Usar cargas explosivas espaciadas

- Estos espaciamientos pueden efectuarse con:
  - Material inerte
  - Con cámaras de aire
- Usar retardos en ms
- Usar taladros de menor diámetro
- Dividir el banco, etc.

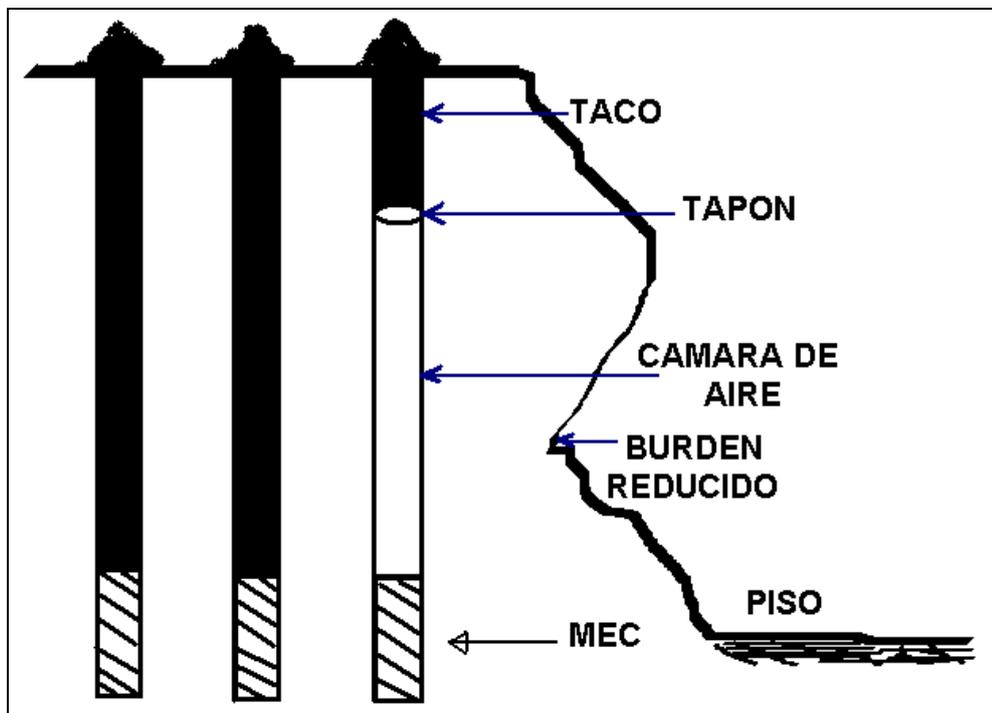


Figura N° 8.1: Muestra el diseño de carga para mitigar las vibraciones.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

## 8.6 Proveer alivio

Entre los cuales se tendrá lo siguiente:

- Medir la cara libre del banco para determinar el burden (B) verdadero y altura del banco.

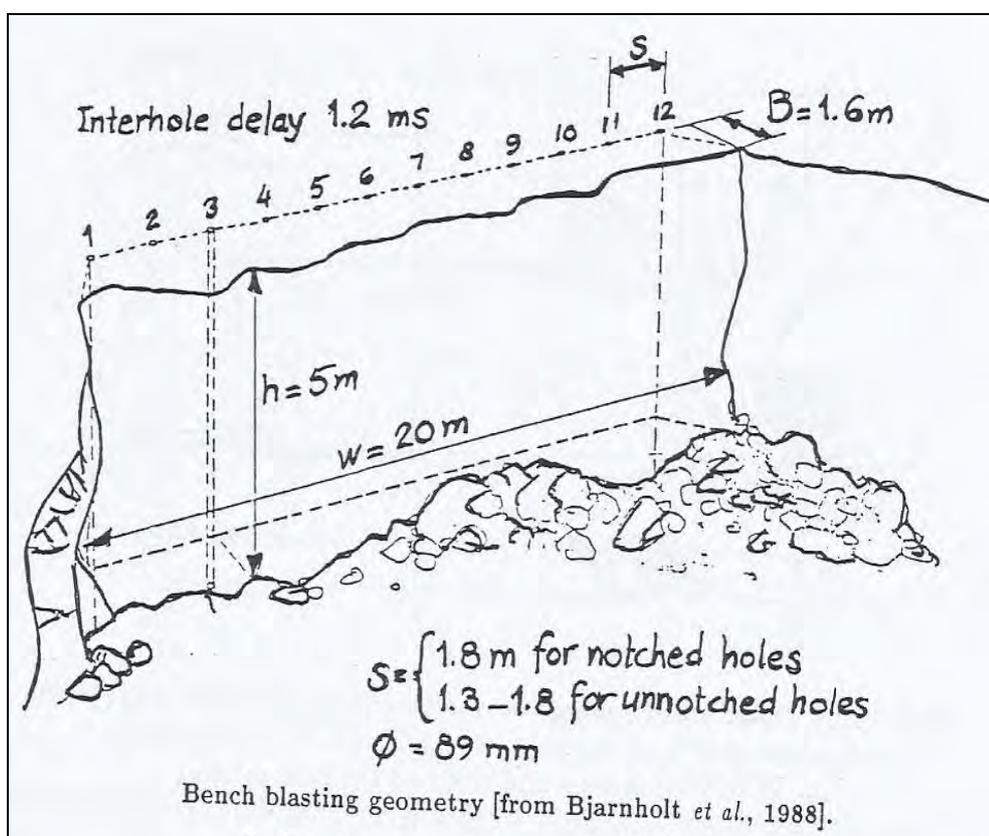


Figura N° 8.2: Muestra el diseño de un banco.

Fuente: Persson, Holmberg & Lee.

- Remover cualquier material rocoso que se encuentre en el piso de los bancos
- Perforar correctamente la sobre perforación (S/D)
- Usar mayor energía entregada por la detonación del explosivo en el fondo del taladro
- Usar iniciación en el fondo de los taladros con el primer ubicado justamente por debajo del nivel del piso.
- Incrementar el tiempo de salida para las últimas filas.
- Incrementar el factor de carga
- En el caso de usar explosivos que generen energía al detonar se debe reducir el burden (B) y el espaciamiento (S):
- Disminuir el diámetro de los taladros ( $\phi$ )

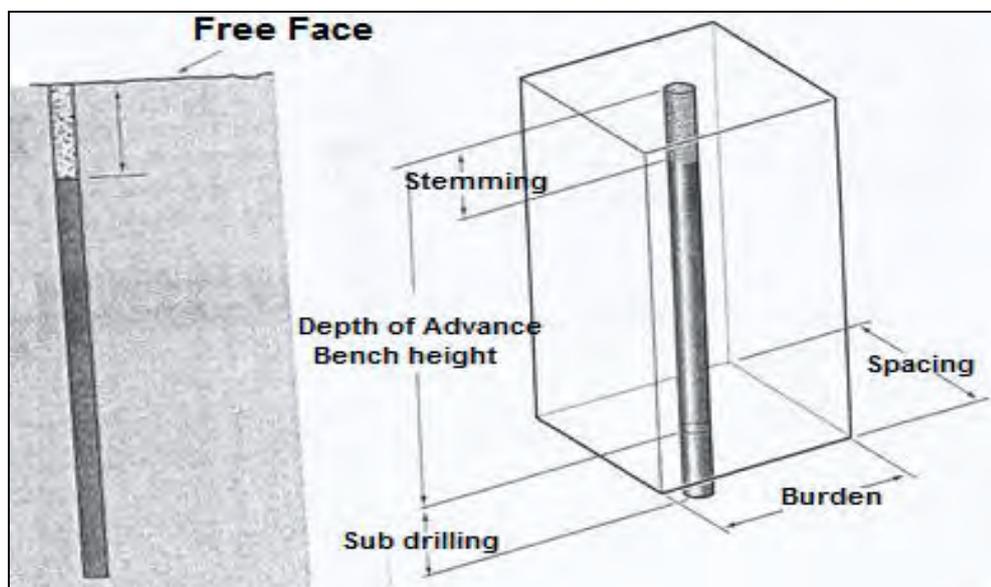


Figura 8.3: Muestra el diseño de carga utilizados en taladros de producción.

Fuente: ISEE

- Usar retardos adecuados para la malla de perforación y voladura diseñada
- Evitar la superposición de ondas
- Usar detonadores y retardos en los cuales la dispersión sea mínima, es decir tengan buena precisión.

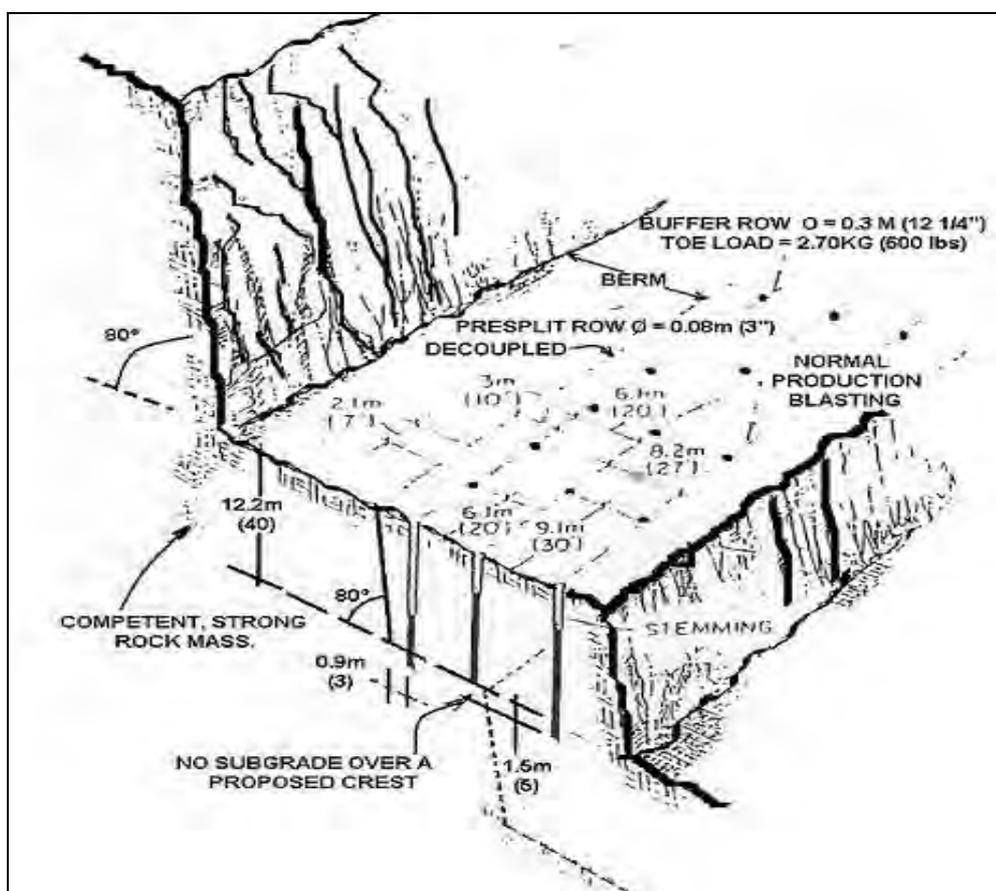


Figura 8.4: Muestra el diseño de un banco.

Fuente: ISEE

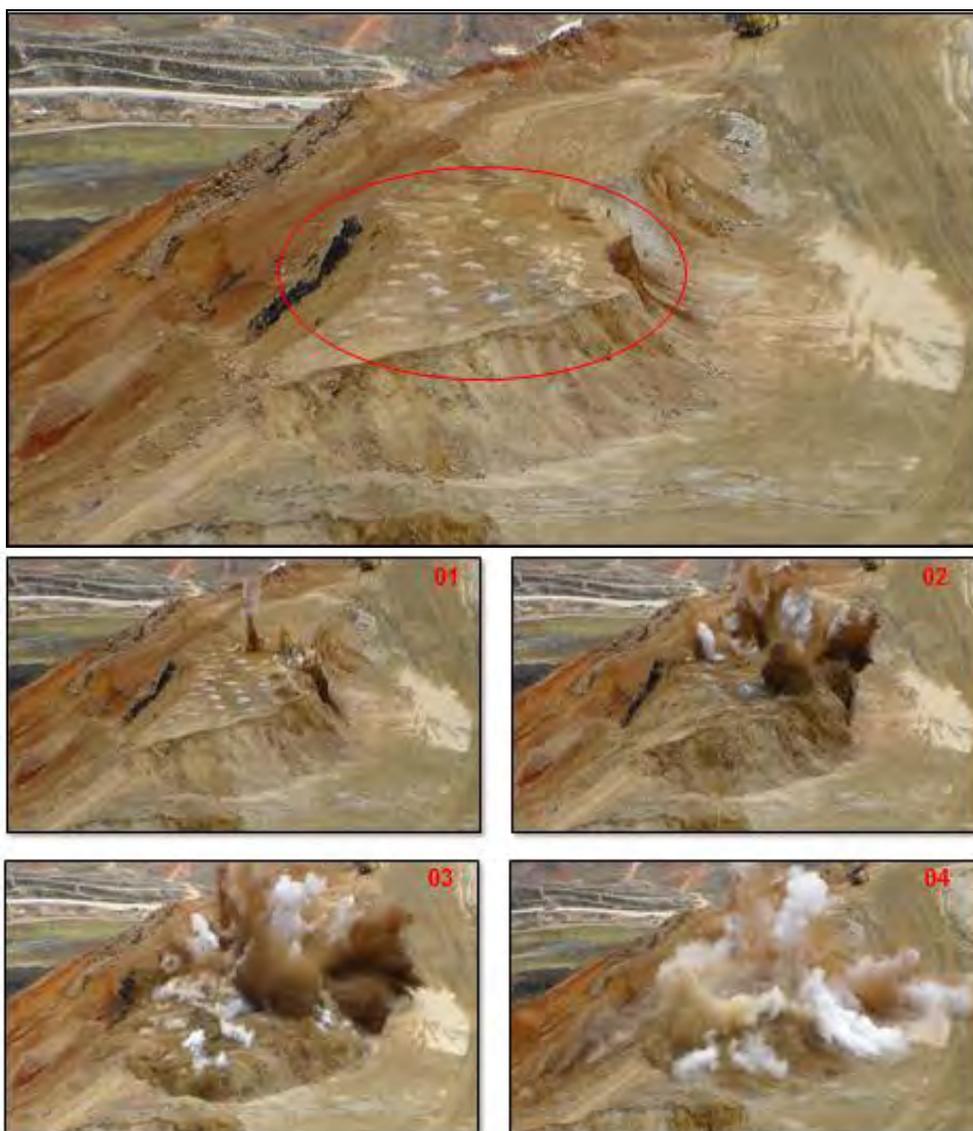


Figura 8.5: Muestra la secuencia de la voladura de rocas de un banco.

Fuente: Yeison Peña Vizarreta

## **CAPÍTULO IX**

### **NORMATIVAS INTERNACIONALES.**

#### **9.8 Introducción.**

Cuando se habla de la industria extractiva minera, se dice que es un ente multiplicador por ser la industria madre de todas las industrias, por su complejidad y fuente de trabajo directo e indirecto, que donde se desarrolla un proyecto minero trae consigo beneficios directos para las comunidades aledañas (colegios, pistas, postas médicas, luz, agua, etc.). Sin embargo, esta industria extractiva si no se trabaja con ciencia y tecnología moderna también trae consigo los impactos ambientales. Hace muchas décadas atrás no existía el fondo de fideicomiso para el cierre de mina o algo parecido para la remediación ambiental, pero en la actualidad se puede afirmar que la industria minera legalmente constituida y con todas las formalidades es

sostenible, limpia y responsable con los pasivos ambientales. Es por lo cual, que causa mucha extrañeza que el Perú siendo un país inminentemente mineralizado, hasta la fecha las instituciones responsables no hayan formado un comité especializado para normalizar estos impactos negativos, tal como lo tienen los países desarrollados y otros como por ejemplo el único país Latinoamericano Brasil. De manera, que el Perú siempre recurrirá a las normas internacionales para tomar como referencias los límites permisibles en cuanto a vibraciones, es así que existen muchas demandas judicializadas por este tópico, porque la voladura de rocas, produce vibraciones y otros impactos ambientales. Sin voladura de rocas no se podría extraer eficientemente los minerales ubicados dentro de la corteza terrestre.

Tabla N° 9.1: Muestra la normatividad internacional.

NORMATIVIDAD INTERNACIONAL		
Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania <sup>a</sup>	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM RI8507	1980
EEUU - Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Sueca	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

<sup>a</sup> La norma alemana tiene además tres actualizaciones en los años 1999 y 2001.

A continuación se mencionan las principales normas internacionales:

### 9.9 Alemania: DIN 4150 – Deutsches Institut für Normung.

El Instituto de Normalización Alemana o DIN ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibraciones, el primero en 1975, el cual fue desglosado en 3 partes y actualizado en 1999 y 2001.

Tabla N° 9.2: Muestra el resumen de la norma DIN 4150

<i>Resumen de los valores indicativos de la norma DIN 4150</i>	
<b>Campo de aplicación</b> ....	Vibraciones producidas por cualquier fuente.
<b>Variables medidas</b> .....	Velocidad vertical pico [mm/s] y velocidad de partícula pico o resultante [mm/s].
<b>Valores indicativos</b> .....	Ver tablas A.2.

La Norma DIN 4150 (1986) fue adoptada como norma patrón, y ha sido actualizada desde entonces. Ella establece los valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de estructura civil y el intervalo de frecuencia en Hz, en los cuales demuestran estar fuera de riesgo de daños los edificios. Las tres clases de edificios definidas por la norma son:

- Edificios estructurales o industriales
- Edificios residenciales

- Edificios históricos y construcciones sensibles (madera, barro, etc.)

Las frecuencias son analizadas en tres intervalos, o sea, valores menores de 10Hz, valores entre 10-50Hz y valores entre 50-100Hz. La norma prevé que para frecuencias encima de 100Hz, la estructura soporta niveles altos de vibración.

Los valores de velocidad de vibración de partícula definidos varían de 3mm/s, en el caso de monumentos y construcciones delicadas con frecuencia inferior a 10Hz, hasta 50mm/s en el caso de estructuras industriales con frecuencia entre 50-100Hz. En la evaluación de daños estructurales causados por las vibraciones del terreno, los valores límites de  $V_p$  admitidos para diversos tipos de construcciones, en función de la frecuencia, son presentados en la tabla siguiente.

Tabla N° 9.3: Muestra el resumen de la velocidad de partícula de la norma DIN 4150.

<b>Guía de valores máximos para velocidad de partícula DIN 4150 (1999)</b>				
Clase de construcción	Frecuencia fundamental			NS <sup>a</sup>
	1 a 10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	TF <sup>b</sup>
1 Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos	20 <sup>c</sup>	20 – 40	40 – 50	40
2 Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	5 – 15	15 – 20	15
3 Otras edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases	3	3 – 8	8 – 10	8

Adaptado de DIN (2001a).  
<sup>a</sup> Nivel Superior componente horizontal.  
<sup>b</sup> Todas las frecuencias.  
<sup>c</sup> Velocidades de partícula en mm/s.

Tabla N° 9.4: Muestra el resumen de la norma DIN 4150.

Velocidades pico recomendadas por la DIN 4150 (1979)			
Clase de Edificación	Valores Indicativos		
	VPP <sup>a</sup> (mm/s)	VVP <sup>b</sup> (mm/s)	
I Residencias, oficinas y otras similares construidas de forma tradicional y en condiciones normales	8	4.8 – 8	
II Edificaciones estables en condiciones normales	30	18 – 30	
III Otras edificaciones y monumentos históricos	4	2.4 – 44	

Tomado de Persson et al. (1994).  
<sup>a</sup> Velocidad de Partícula Pico.  
<sup>b</sup> Velocidad Vertical Pico.

### 9.10 Escocia: PAN 50 Planning Advice Notes.

La presente norma se basa en los estándares BSI (British Standard Institute), las guías NPPG (National Planning Policy Guidelines) y las PAN. El anexo D de la PAN 50 (control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial), provee sugerencias para las autoridades encargadas de la planificación, así como a la industria minera de los efectos de las voladuras y de los límites aceptables en este tipo de trabajos. Los impactos que enfatiza esta norma son:

- a. Vibración del suelo
- b. Presión acústica
- c. Ruido

- d. Polvo
- e. Eyección de fragmentos de rocas.

Esta norma trata los ítems de las vibraciones producidas por la voladura de rocas:

- a. Lugar donde se deben realizar las mediciones
- b. Los niveles de amplificación en estructuras, se definen en un rango de frecuencias entre 5 y 40 Hz, donde las estructuras pueden amplificar los movimientos del suelo, y es probable que se presenten daños.
- c. Los umbrales y tipos de daños en las viviendas producidas por vibraciones
- d. Los efectos de la geología en las vibraciones inducidas por voladuras.

Tabla N° 9.5: Muestra el resumen de la norma PAN 50.

<i>Resumen de los valores indicativos de la PAN50</i>				
<b>Campo de aplicación</b> ....	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras, pero también presión acústica, ruido, polvo y eyección de rocas.			
<b>VARIABLES MEDIDAS</b> .....	Velocidad pico en cada componente [mm/s] y velocidad de partícula –resultante– pico [mm/s].			
<b>Valores indicativos</b> .....	de 6 a 10 mm/s en el 95 % de las voladuras en un periodo de 6 meses, para voladuras individuales no debe ser superior a 12 mm/s. Adicionalmente valores en los que se pueden producir daños			
<b>Sensores utilizados</b> .....	Sensores de tres componentes que registren velocidad.			
<b>Sitio de medición</b> .....	Sobre el suelo, cerca de la fachada mas cercana al sitio de voladura, cuando hay quejas también se realizan mediciones dentro de la estructura.			
<b>Particularidad</b> .....	Define velocidades mínimas.			

<i>Valores de velocidad de partícula pico asociados con diferentes tipos de daños en la norma PAN50 Anexo D - Escocia</i>				
Tipo de daño	Características	Valores Indicativos (mm/s)		
		< 4 Hz	4 – 15 Hz	> 15 Hz
Cosmético	Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero.	15	20	50
Menor	Formación de grietas largas, pérdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloques de concreto y ladrillo.	30	40	100
Estructural	Daño en elementos estructurales.	60	80	200

Tomado de Scottish Executive (2000).

### 9.11 EE. UU: OSM 817.67

OSMRE (Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement). Esta norma se desarrolló para la minería de carbón. Establece procedimientos para determinar los límites de velocidades de vibraciones, dependiendo del nivel de monitoreo.

A continuación se presentan las características fundamentales de esta norma.

Tabla N° 9.6: Muestra el resumen de la norma OSM 817.67

<i>Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67</i>	
<b>Campo de aplicación</b> ....	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras en minas de carbón.
<b>Variables medidas</b> .....	Velocidad de partícula pico [mm/s] en cada componente o velocidad resultante pico [mm/s] del arreglo tridimensional de sensores.
<b>Valores indicativos</b> .....	25.4 mm/s a distancias entre 100 y 1500 m y 19.0 mm/s para distancias superiores
<b>Sensores utilizados</b> .....	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
<b>Debilidades</b> .....	No es autosuficiente, necesita de la USBM RI8507 cuando se necesite utilizar la frecuencia en el análisis.

### 9.12 EE. UU: USBM RI 8507

Las características fundamentales de la BI8507 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 9.7: Muestra el resumen de la norma USBM RI8507

Resumen de la USBM RI8507	
<b>Campo de aplicación</b> ....	vibraciones producidas por voladuras
<b>Variables medidas</b> .....	Velocidad de partícula pico [mm/s], frecuencia asociada a la máxima velocidad pico [Hz]
<b>Valores indicativos</b> .....	ver línea punteada figura 1
<b>Sensores utilizados</b> .....	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
<b>Debilidades</b> .....	Valores debajo de los 4 Hz no fueron comprobados. Las mediciones se realizaron con una distancia escalada <sup>†</sup> aparentemente constante. Son únicamente aplicables a viviendas

<sup>†</sup> Relaciona la carga y la distancia de la voladura con la velocidad de partícula, es de la forma  $v = K/(R/\sqrt{W})^\alpha$ , donde  $R$  es la distancia entre la voladura y el sitio de medición,  $W$  es el peso de la carga por metro-retardo,  $v$  es la velocidad de partícula  $K$  y  $\alpha$  son constantes que dependen del sitio.

### 9.13 España: UNE 22-381-93.

La Norma Española para el control de vibraciones (UNE 22-381-93) es creada en 1993 con el fin de establecer un procedimiento de estudio y control sobre vibraciones producidas por voladuras de rocas con mezclas explosivas comerciales. Dicha norma es aplicable a diferentes tipos de trabajos donde se realice voladura de rocas, ya sea para minería, canteras, obras civiles y demoliciones, etc.

Dentro de la norma se clasifican tres tipos de estructuras que son las siguientes:

- Grupo I: Edificios y naves industriales (Estructuras de hormigón armado o metálicas).

- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreación.
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico.

Al igual que en la normal alemana DIN 4150 y la mayoría de las normas europeas, la norma española analiza la frecuencia entre intervalos: Entre 2 y 15 Hertz, entre 15 y 75 Hertz y mayores a 75 Hertz. Para la velocidad de la partícula producida por la vibración, existen varios márgenes en la UNE 22-381-93 en donde varían de los 4mm/s como velocidad más baja, relacionada con las estructuras arqueológicas asociadas a frecuencias entre 2 y 15 Hertz; y velocidades hasta los 100mm/s correspondiente a edificios industriales asociadas a frecuencias mayores a 75Hz.

Tabla N° 9.8: Muestra el resumen de la norma UNE 22-381-93

<i>Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93</i>				
Tipo de estructura	Frecuencia principal (Hz)			
	2 – 15 Vel. <sup>b</sup>	15 – 75 <sup>a</sup> Desp. <sup>c</sup>	>75 Vel.	
I Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0.212	100	
II Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones	9	0.095	45	
III Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener	4	0.042	20	

**Leyenda de la tabla:**

- a) En el rango de frecuencia 15 y 75 Hz, en los que el nivel esta dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación que se muestra líneas abajo.
- b) Velocidad máxima (mm/s)
- c) Desplazamiento máximo (mm)

Es de notar en la anterior (Tabla 9.8) los tramos de frecuencias comprendidas entre 15Hz a 75Hz, los niveles están dados a partir del factor desplazamiento para cada una de las estructuras. Se podrá entonces

calcular la velocidad correspondiente conociendo la frecuencia principal (natural) a través de la siguiente ecuación:

$$V = 2 \pi f d$$

Dónde:

V = velocidad equivalente en mm/s.

$\pi = 3,1416$ .

f = frecuencia principal en Hz.

d = desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.

Tabla N° 9.9: Muestra el resumen de la norma UNE 22-381-93

<i>Resumen de la norma UNE 22-381-93 (España)</i>	
<b>Campo de aplicación</b> ....	Vibraciones producidas por voladuras.
<b>VARIABLES MEDIDAS</b> .....	máxima velocidad pico en las componentes ortogonales en [mm/s] y frecuencia en Hz.
<b>Valores indicativos</b> .....	véase Tabla <b>siguiente</b>
<b>Sensores utilizados</b> .....	Sensores de tres componentes que registre velocidad (preferiblemente), desplazamiento o aceleración; respuesta lineal del equipo en el rango 2 a 200 Hz, capacidad de detección de niveles pico de al menos 1 a 100 mm/s.
<b>Ubicación sensores</b> .....	Sobre el suelo cercano a la(s) estructuras que van a estar sometidas a las vibraciones.
<b>Fuerte</b> .....	— Cubre gran cantidad de tipos estructurales; — por medio de un procedimiento sencillo se puede determinar el tipo de estudio de vibraciones requerido por el proyecto.

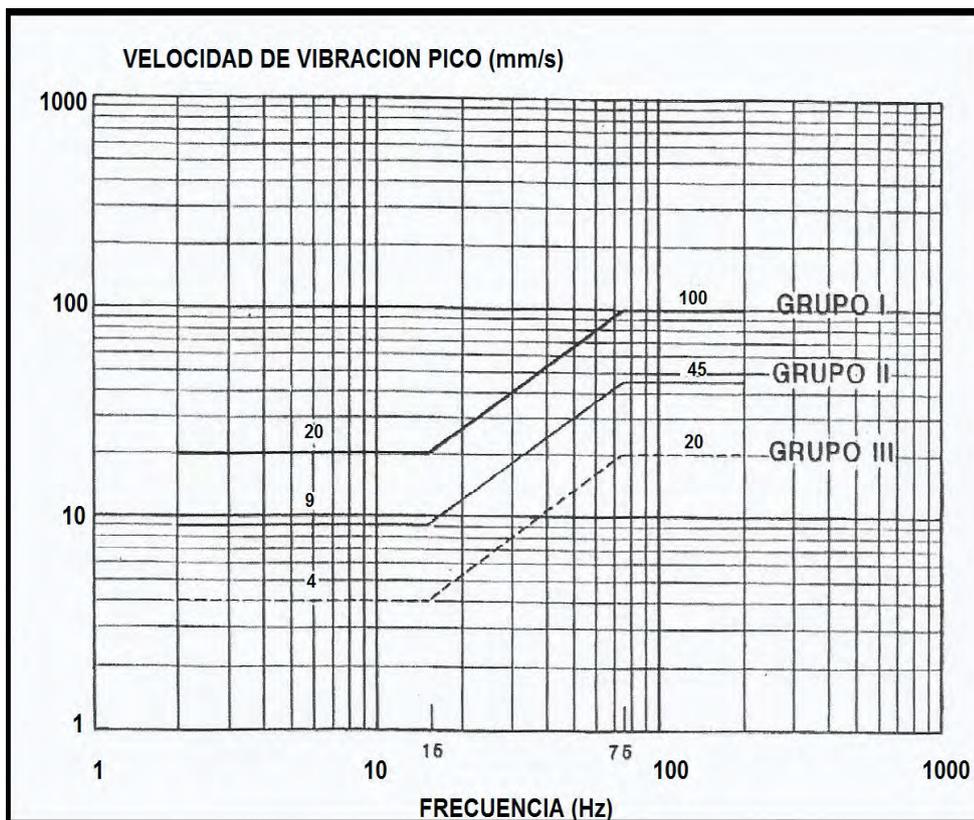


Figura N° 9.1: muestra la gráfica de frecuencia Vs. Velocidad pico de la norma Española, con sus respectivos límites para tres grupos de estructura.

#### 9.14 Suiza: SN 640 315.

Antes de 1992, Suiza adoptaba una norma referente a los valores para salvaguardar la infraestructura de los edificios, esta se refería a la componente vertical de la velocidad, medida en la fundación de los edificios. Los límites de intensidad de velocidad de vibración de partícula variaban de 25mm/s para museos hasta 100mm/s para construcciones en concreto armado. Esta norma contempla frecuencias desde 8 hasta los 150 Hz, y establece que por encima de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas.

A continuación se presenta los aspectos más resaltantes de esta norma Suiza.

Tabla 9.10: Muestra el resumen de la norma SN 640 315

<b>Aspectos importantes en la reglamentación Suiza SN 650 315a (1992)</b>	
<b>Campo de aplicación</b> ....	Vibraciones por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.
<b>Variables medidas</b> .....	Velocidad resultante –de partícula– pico [mm/s], frecuencia de la vibración [Hz] relacionada con la componente de máxima velocidad, adicionalmente la cantidad de sacudidas
<b>Valores indicativos</b> .....	ver tabla c
<b>Sensores utilizados</b> .....	Tres componentes ortogonales de sensores que registren velocidad en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz
<b>Ubicación sensores</b> .....	Sobre la estructura
<b>Fortalezas</b> .....	Brinda criterios para definir daño no estructural –fisuras en mampostería –. Define una frecuencia de las sollicitaciones

## **CAPÍTULO X**

### **CASOS-ESTUDIO MONITOREADOS APLICANDO LOS MODELOS MATEMÁTICOS ANALIZADOS Y REVISADOS EN ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

#### **10.1 Introducción.**

Como se sabe, para llevar a cabo un proyecto minero cualquiera, en primer lugar se debe efectuar todos los estudios y análisis de los impactos ambientales que trae consigo la industria minero-metalúrgica, entre ellos los que deben tener cuidado especial son los impactos inducidos por la operación minera unitaria de voladura de rocas.

Mediante el presente trabajo de investigación se está demostrando a una comunidad aledaña al yacimiento mineralizado, el cual se ubica en el centro del Perú, que la explotación de dicho cuerpo mineralizado traerá consigo oportunidades laborales, así como también servicios básicos para el bienestar de las comunidades, y que los impactos ambientales serán en su magnitud minimizados, controlados, mitigados y muchos evitados. En este caso las vibraciones no serán percibidas por el hombre. Es por esta razón de tranquilizar a algunos pobladores escépticos, se está demostrando in situ, que la voladura no producirá vibraciones que afecten sus viviendas y no serán percibidas por las comunidades aledañas. Se han realizado varias detonaciones de mezclas explosivas comerciales con dirección a las comunidades aledañas y hacia la carretera, obteniéndose resultados favorables, tal como se muestran en los casos-estudio que a continuación se describen.



Figura N° 10.1: Muestra la ubicación de la zona de trabajo con respecto a la carretera y ciudad.

Fuente: Yeison Peña Vizarrata.

## 10.2 Caso-estudio N° 01.

### **Monitoreo de las vibraciones para la ciudad cercana al tajo abierto de la mina.**

Para el presente trabajo de investigación se realizaron siete disparos primarios, como se sabe, estas voladuras de rocas producen vibraciones; las cuales se monitorearon de la siguiente manera:

- Tres monitoreos fueron realizados en la ciudad cercana a la mina.
- Cuatro monitoreos fueron realizados en el tajo en dirección de la ciudad.

Para este caso las voladuras primarias han tenido en promedio 150 taladros, distribuidos en 10 filas de 15 taladros cada fila. La mezcla explosiva comercial que se usó es el AN/FO, la cantidad por taladro de AN/FO varía desde 330 Kg. hasta 650 Kg. (esta variación está en función a la dureza del macizo rocoso). Los tiempos de retardos para esta voladura se describen a continuación:

- Los tiempos de retardo entre taladros utilizados fueron de 17 ms y 25 ms.
- Los tiempos de retardo entre filas utilizados fueron de 107 ms y 130 ms.
- Las distancias de las voladuras primarias hacia los puntos de monitoreo varían desde 80.0 metros hasta 1550.0 metros.

El equipo para el monitoreo de vibraciones que se utilizó fue un sismógrafo (Minimate Plus) con un geófono triaxial de superficie, dicho geófono es el encargado de captar las vibraciones, a su vez las registra en la memoria, para finalmente transmitir toda la data a una computadora. Los datos resultantes son proporcionados en términos de velocidad y frecuencia.

Las velocidades pico de partícula son representadas en tres componentes las cuales están en dirección vertical, longitudinal y transversal. La velocidad resultante se calcula en cada intervalo de tiempo de acuerdo a las

normas técnicas, de tal manera que se puede obtener una velocidad resultante máxima.

Tabla 10.1: Muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Iniciación de voladura	Tipo de explosivo	Taladros disparados	Carga por retardo equivalente en Kg ANFO	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)				Frecuencia dominante (hz)			Time/bole (ms)	Time/row (ms)	Monitoreo en:
						TRANS.	VERT.	LONG.	PPV (suma)	TRANS.	VERT.	LONG.			
Pirrotécnica	HA 28	323	330.1	125.0	6.9	5.8	3.6	5.3	6.5	3.8	9.8	6.2	25	130	Dirección de la ciudad
Pirrotécnica	HA 37	169	641.1	150.0	5.9	13.5	12.0	15.7	17.5	6.8	9.1	4.9	17	107	Dirección de la ciudad
Pirrotécnica	HA 28	123	599.1	480.0	19.6	3.5	2.3	3.3	4.3	3.0	3.1	7.6	17	107	Dirección de la ciudad
Pirrotécnica	HA 28	120	599.1	80.0	3.3	40.8	65.8	43.9	67.7	5.4	9.9	9.6	17	107	Dirección de la ciudad
Pirrotécnica	HA 28	119	599.1	1550.0	63.3	0.7	0.4	0.8	0.8	6.3	7.0	7.2	17	107	Ciudad
Pirrotécnica	HA 19	132	436.2	1150.0	55.1	1.2	0.7	1.4	1.8	3.5	5.1	3.0	25	130	Ciudad
Pirrotécnica	HA 37	148	641.1	1325.0	52.3	0.9	0.6	1.0	1.0	4.8	8.8	3.1	17	107	Ciudad

Con los datos obtenidos y mostrados en la tabla N° 10.1, se empieza a crear el modelo predictivo de campo lejano para la ciudad, para el caso se seleccionó y uso el modelo matemático de Devine; el cual relaciona las variables de PPV suma (mm/segundo), distancia al punto de monitoreo (metros) y la carga de la mezcla explosiva por retardo (Kilogramos), cuyos resultados se muestra en el gráfico siguiente.

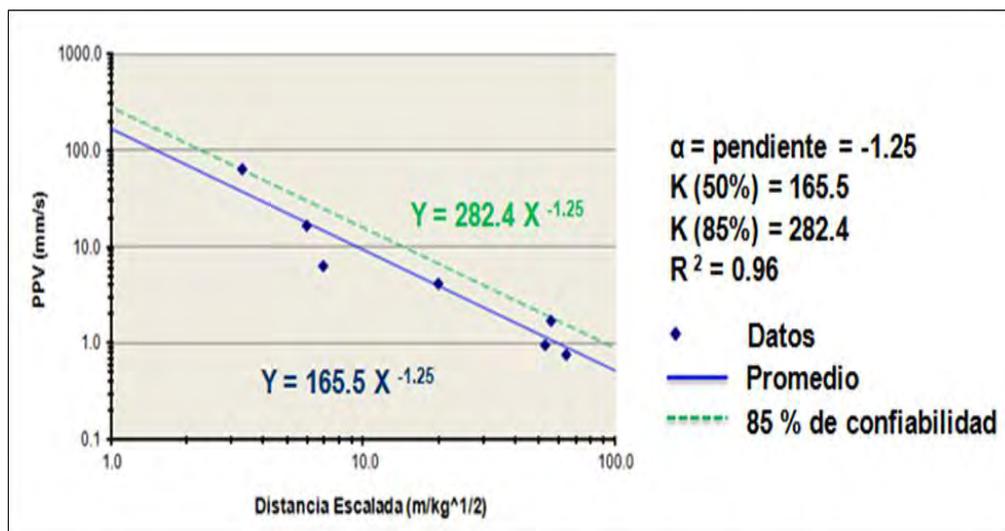


Figura N° 10.2: Muestra la relación Velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La Distancia Escalada (m/Kg<sup>1/2</sup>).

Con el modelo matemático de Devine, ecuación de modelo predictivo de campo lejano obtenida al 85% de confiabilidad, se puede construir la gráfica de PPV vs Distancia, con la cual se puede calcular la distancia segura a la que se puede realizar una voladura primaria (según los Kilogramos de carga por retardo a utilizar), de tal manera de no sobrepasar el valor límite de 50.0 mm/segundo. Dicho límite ha sido tomado del criterio de daño USBM, que es la norma mas conservadora postulada a la fecha.

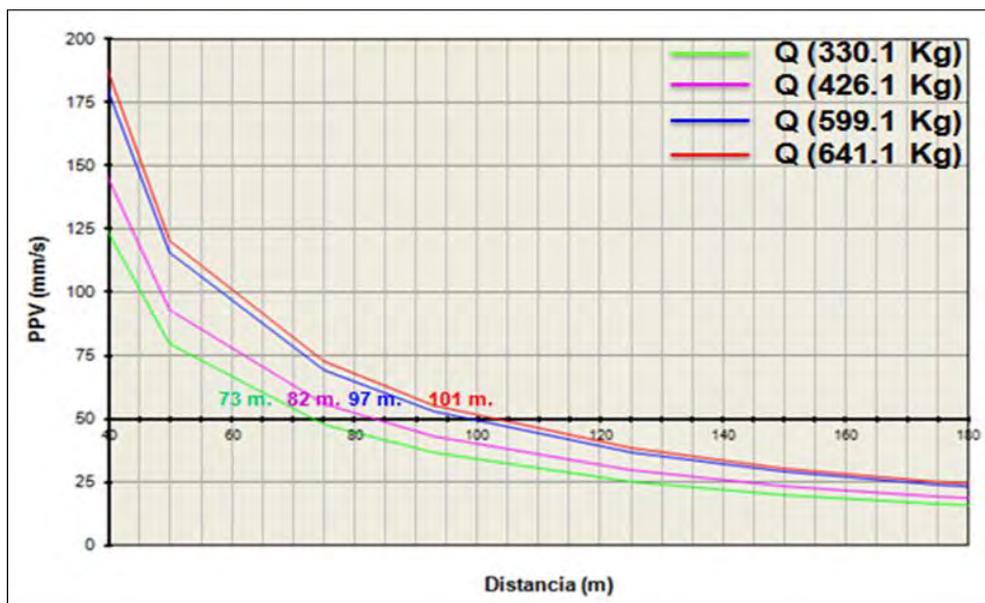


Figura N° 10.3: Muestra la relación de la velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La distancia (m).

Por otro lado, con la ecuación del modelo predictivo de campo lejano obtenida (85% de confiabilidad), se puede construir el gráfico siguiente, donde se muestra la carga por retardo vs Distancia. Enfatizando se debe tener presente siempre como referencia el valor límite de 50.0 mm/segundo; es decir, con este valor como referencia se puede calcular la distancia segura a la que se puede realizar una voladura primaria, según los Kilogramos de carga por retardo que se van a utilizar.

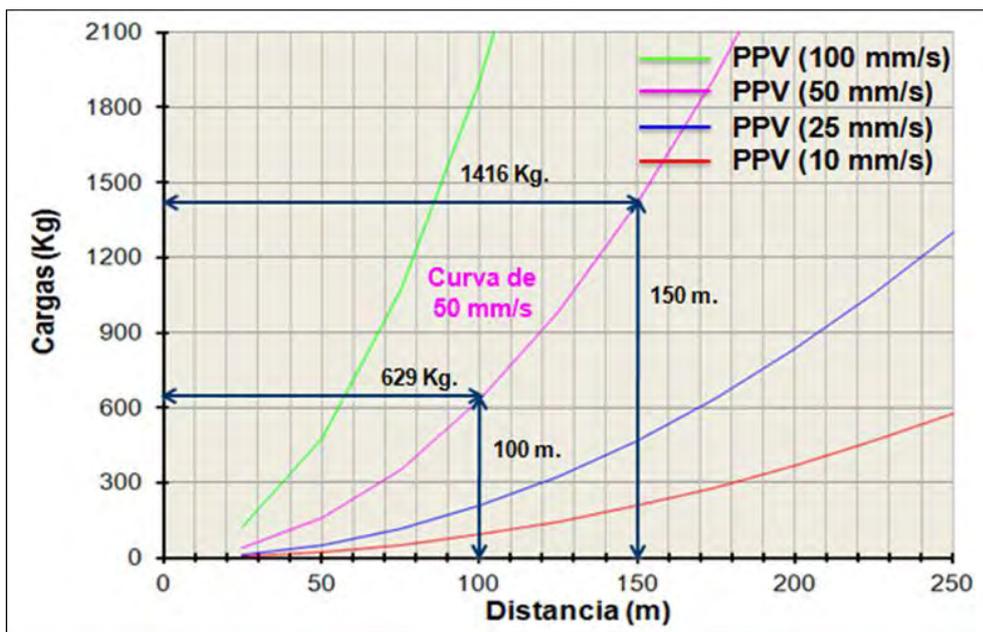


Figura N° 10.4: Muestra la relación de carga de mezcla explosiva comercial (kg) Vs. La distancia (m).

Por otro lado, los resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad han sido relacionados con la norma internacional de percepción humana “USBM – Goldman”.

A continuación se presenta el cuadro resumen de resultados de monitoreo y gráfico de los resultados relacionados a la norma internacional.

Tabla N° 10.2: Muestra el resumen de resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad.

Iniciación de voladura	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)			Frecuencia dominante (hz)			Monitoreo en:
			TRANS.	VERT.	LONG.	TRANS.	VERT.	LONG.	
Pirotécnica	1550.0	63.3	0.7	0.4	0.8	6.3	7.0	7.2	Ciudad
Pirotécnica	1150.0	55.1	1.2	0.7	1.4	3.5	5.1	3.0	Ciudad
Pirotécnica	1325.0	52.3	0.9	0.6	1.0	4.8	8.8	3.1	Ciudad

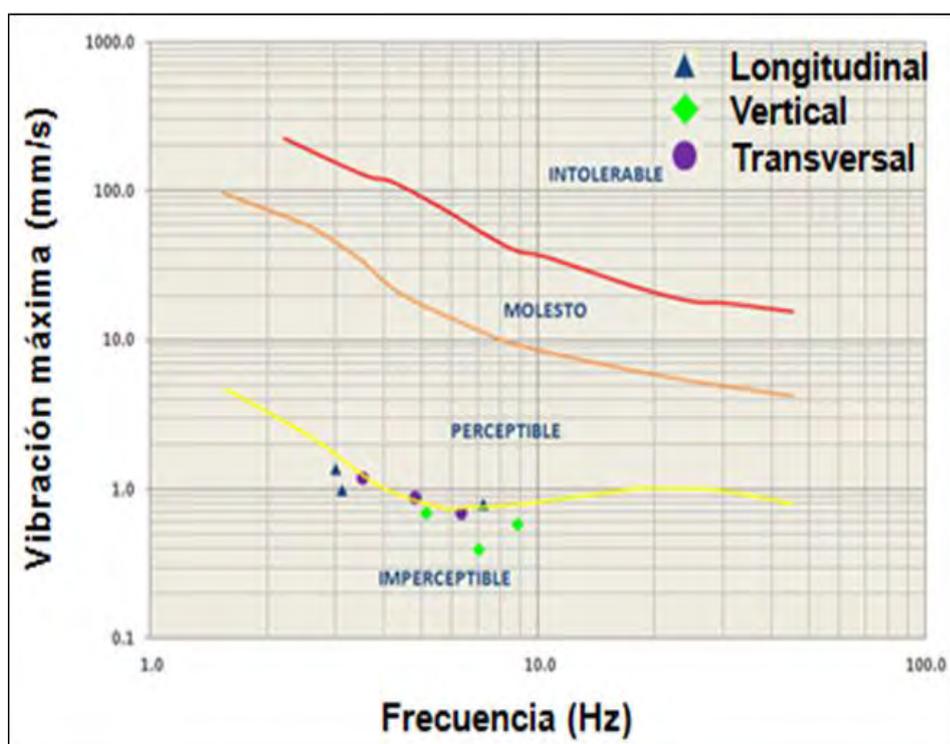


Figura N° 10.5: Muestra la relación vibración máxima (mm/s) Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.5 se observa que el 55.5 % de los datos se encuentran en la zona “Perceptible” por el ser humano y el 44.5 % de los datos se encuentran en la zona “Imperceptible” por el ser humano.

A continuación se presenta otro gráfico N° 10.6, donde muestra los resultados de monitoreo relacionados a la norma internacional de percepción humana según “Steffens”:

Cuya relación matemática, es la siguiente:

$$K = \frac{0.8(V)(F)}{(100 + F^2)^{1/2}}$$

Donde:

V = Vibración máxima (mm/s)

F = Frecuencia (Hz)

Tabla N° 10.3: Muestra los niveles de percepción

<b>VALOR DE K</b>	<b>NIVEL DE PERCEPCIÓN</b>
< 0,1	No se siente
0,1	Comienza a percibirse
0,25	Escazamente perceptible
0,63	Perceptible
1,6	Facilmente perceptible
4,0	Fuertemente detectable
10,0	Muy fuertemente detectable

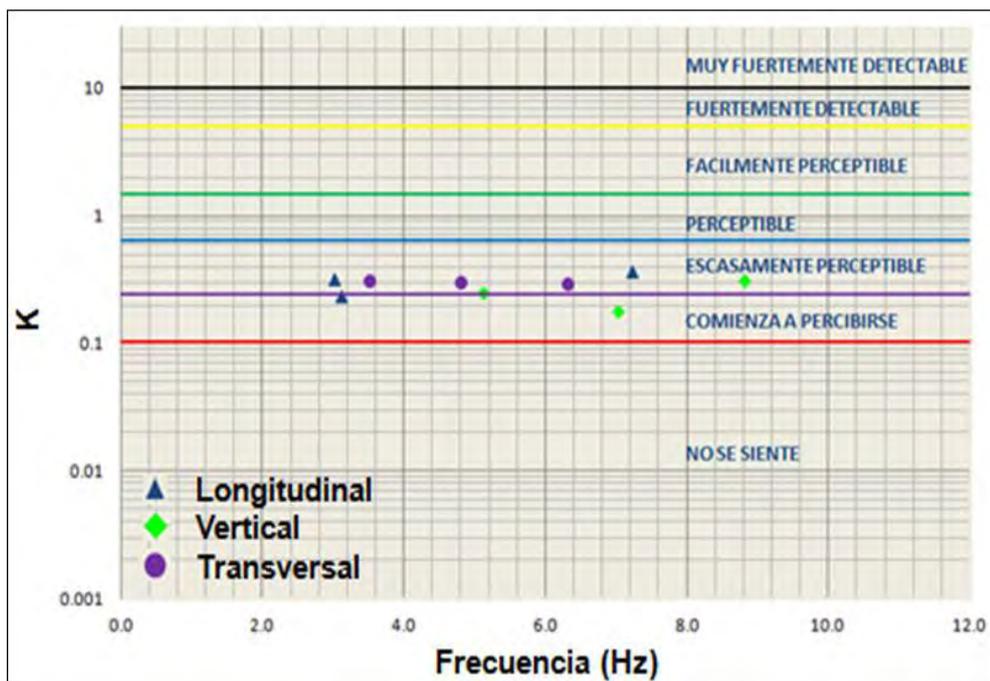


Figura N° 10.6: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.6 se observa que el 66.7 % de los datos se encuentran en la zona “Escasamente Perceptible” por el ser humano, y el 33.3 % de los datos se encuentran en la zona “Comienza a percibirse” por el ser humano.

Para mejorar y reducir la percepción humana por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas se utilizó el método de onda elemental.

Se capturó una onda elemental en dirección de la ciudad y se calculó el tiempo de retardo entre taladros adecuado para reducir las vibraciones producidas por efectos de la voladura, dicho tiempo es de 27 ms., para su mejor comprensión, se muestra en el siguiente gráfico.

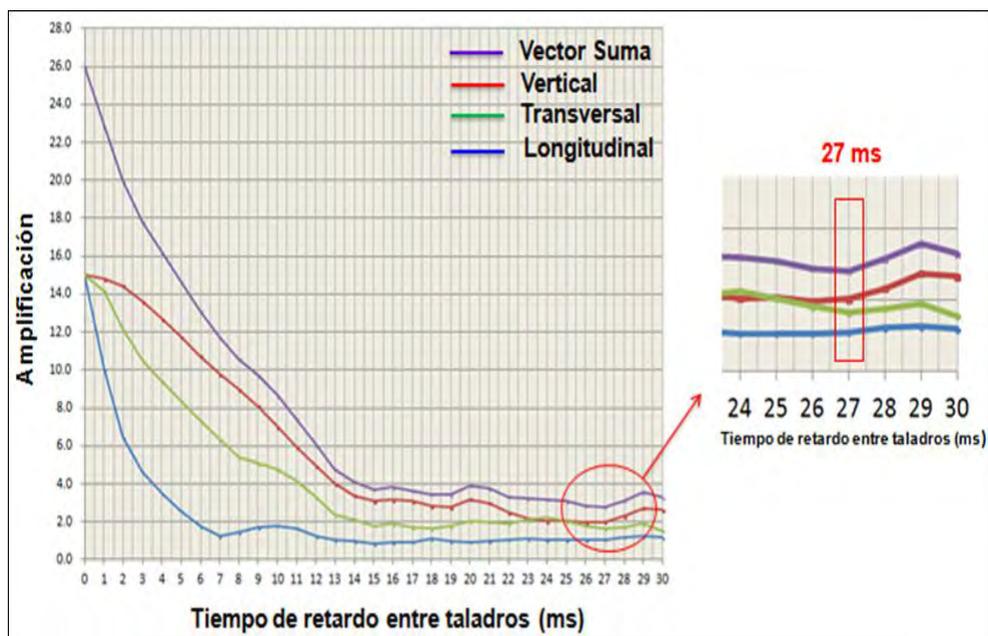


Figura N° 10.7: Muestra la relación de Amplitud Vs. El tiempo de retardo entre taladros (ms).

Una vez obtenido el tiempo de retardo entre taladros, seguidamente se realiza un comparativo de resultados de PPV suma.

### 10.2.1 Voladura primaria N° 01:

Para esta voladura, se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad de taladros = 150 (10 filas, de 15 taladros).
- Tiempo entre taladros = 17 ms
- Tiempo entre filas = 107 ms.
- Distancia de la voladura hacia el sismógrafo "A" = 60 m. (sismógrafo ubicado en dirección de la ciudad).

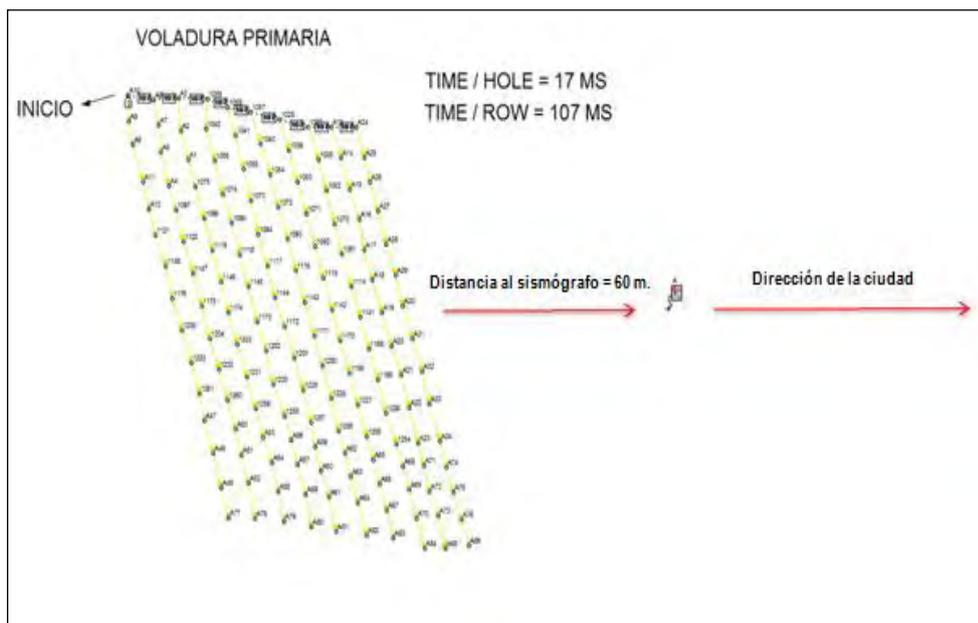


Figura N° 10.8: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.

En el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus" se introduce la onda elemental (vector suma), cantidad de carga por taladro (Kg), constantes halladas en el modelo de Devine ( $K$  y  $\alpha$ ) y la velocidad de la onda "P", con estos datos se obtiene un resultado de PPV suma = 155.3 mm/segundo.

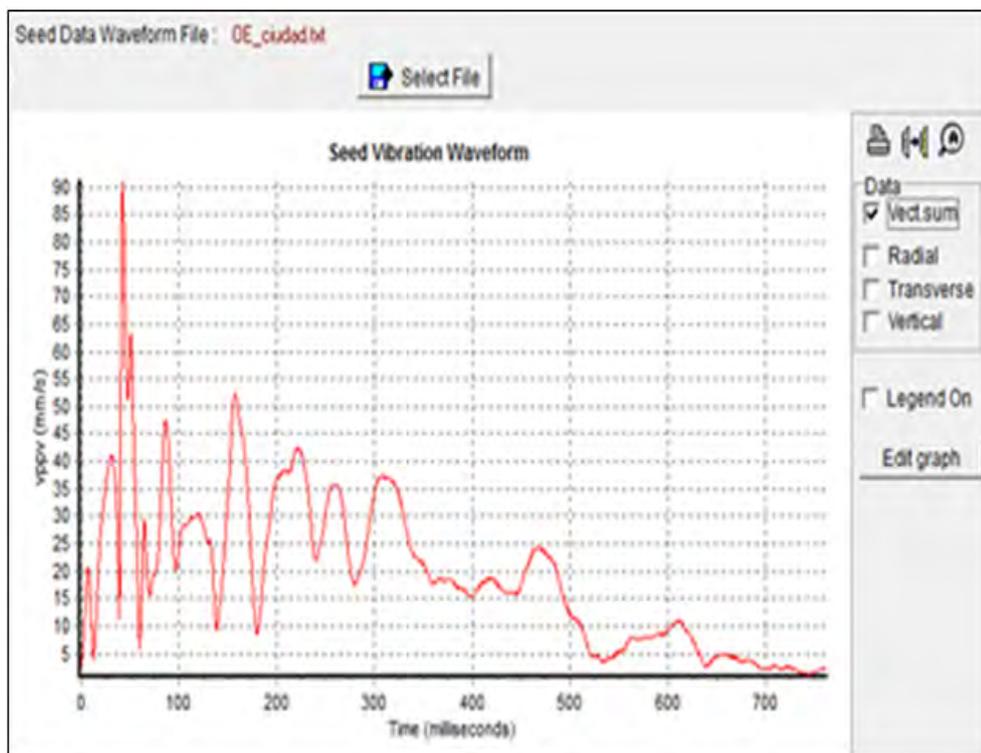


Figura N° 10.9: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la ciudad Vs. El tiempo (ms).



Figura N° 10.10: Muestra el diseño de carga de un taladro.

Monitoring Station :

Num of Simulations :

Charge Wt. Scaling Law A (mm/s):  Design Spacing (m):

Charge Wt. Scaling Law B :

p-Wave Velocity (m/s):

Charge Wt. Coeff. Of Variation :

Auto generate data files  
 Use manually generated data

**PPV result 155.3 mm/s (Std. Dev. 26.5 mm/s)**

Figura N° 10.11: El software muestra el resultado obtenido de PPV (mm/s).

### 10.2.2 Voladura primaria N° 02.

Para esta voladura, se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad de taladros = 150 (10 filas de 15 taladros).
- Tiempo entre taladros = 27 ms. (Cálculo de onda elemental)
- Tiempo entre filas = 170 ms.
- Distancia de la voladura hacia el sismógrafo "A" = 60 m. (sismógrafo ubicado en dirección de la ciudad).

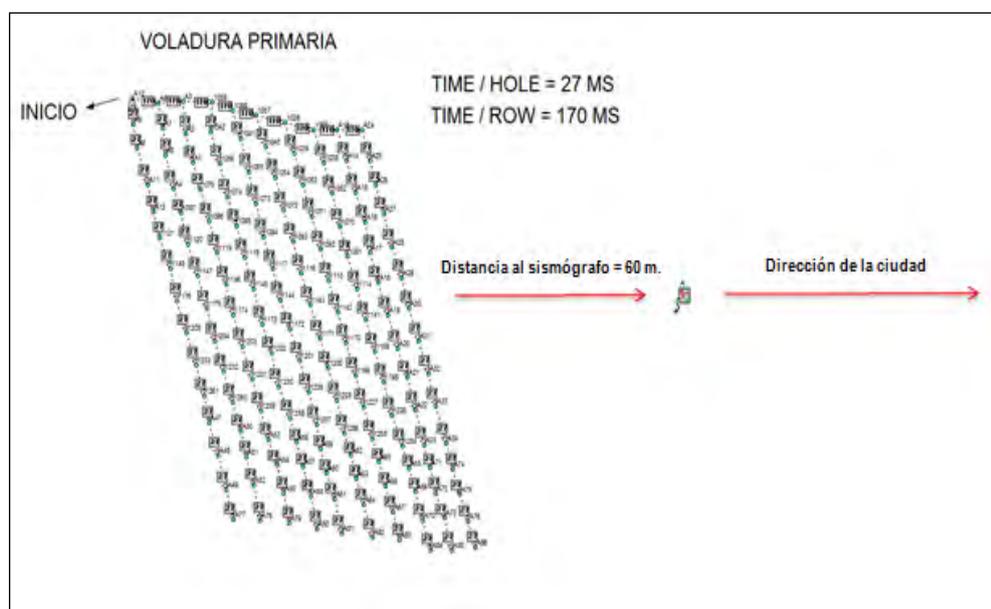


Figura N° 10.12: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.

En el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus", se introduce la onda elemental (vector suma), cantidad de carga por taladro (Kg), constantes obtenidas en el modelo matemático de Devine ( $K$  y  $\alpha$ ) y la

velocidad de la onda “P”, con estos datos se obtiene un resultado de PPV suma = 134.9 mm/segundo.

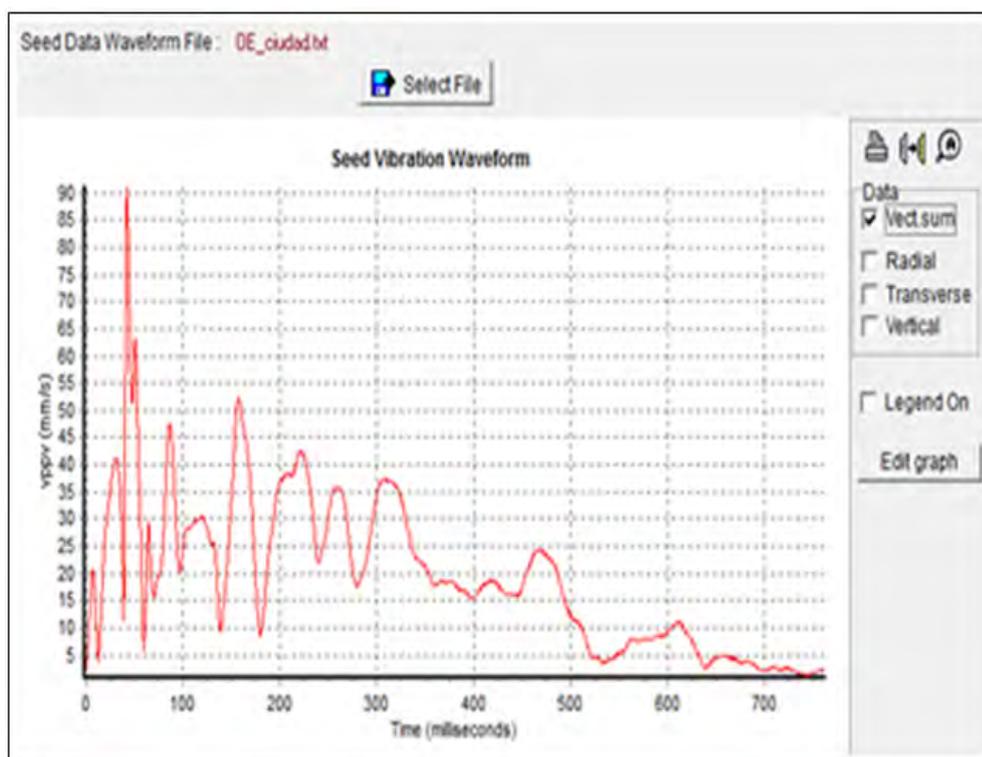


Figura N° 10.13: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la ciudad Vs. El tiempo (ms).

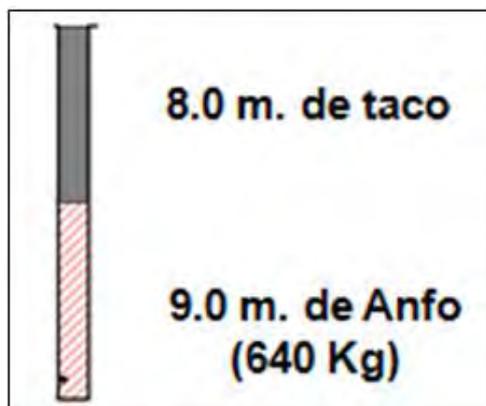


Figura N° 10.14: Muestra el diseño de carga de un taladro.

Monitoring Station : Monitor station: A

Num of Simulations : 100

Charge Wt. Scaling Law A (mm/s): 282.4

Charge Wt. Scaling Law B : 1.25

p-Wave Velocity (m/s): 3870

Charge Wt. Coeff. Of Variation : 0.2

Design Spacing (m): 10

Calc

Auto generate data files

Use manually generated data

**PPV result 134.9 mm/s (Std. Dev. 20.0 mm/s)**

Figura N° 10.15: El software muestra el resultado obtenido de PPV (mm/s).

Por lo tanto, al utilizar el tiempo de retardo entre taladros de 27 ms (cálculo de onda elemental) se reduce las vibraciones en un 13 %.

Utilizando también el tiempo de retardo entre taladros de 27 ms, se realizó las simulaciones para obtener nuevos resultados de PPV y frecuencia en puntos de monitoreos ubicados en la ciudad y se obtuvo la siguiente información que se muestra en la tabla N° 10.4

Tabla N° 10.4: Muestra el resumen de nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad.

Iniciación de voladura	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)			Frecuencia dominante (hz)			Monitoreo en:
			TRANS.	VERT.	LONG.	TRANS.	VERT.	LONG.	
Pirotécnica	1550.0	63.3	0.4	0.3	0.6	9.1	8.4	9.4	Ciudad
Pirotécnica	1150.0	55.1	0.7	0.5	1.0	5.1	6.6	4.7	Ciudad
Pirotécnica	1325.0	52.3	0.5	0.5	0.7	7.5	10.6	4.4	Ciudad

Los nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la ciudad, han sido relacionados a la norma internacional de percepción humana “USBM – Goldman”, a continuación se presenta el gráfico de los resultados relacionados a la norma internacional.

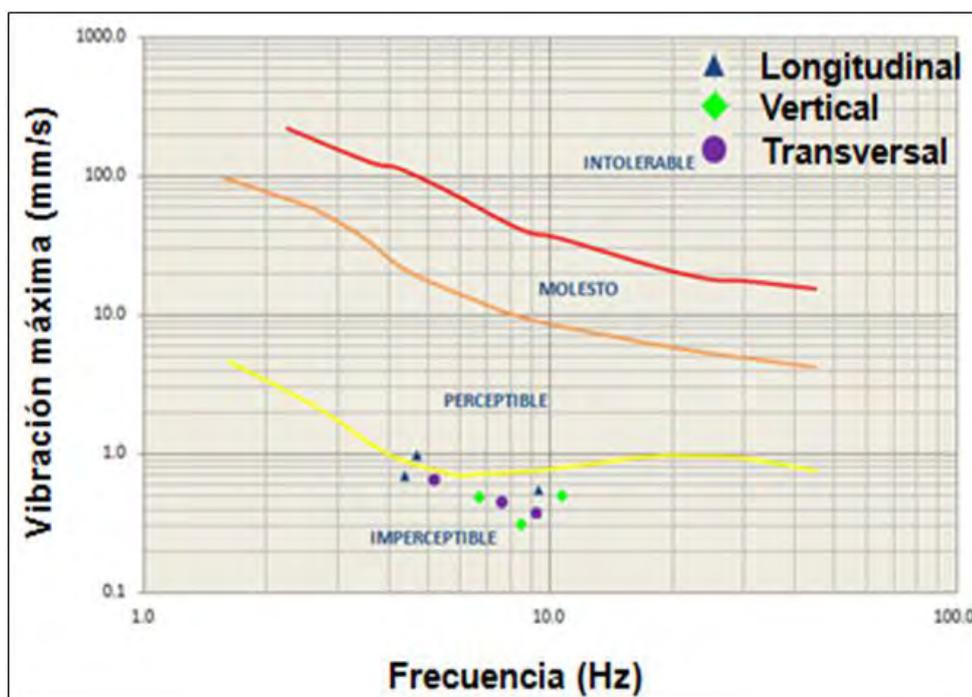


Figura N° 10.16: Muestra la relación vibración máxima (mm/s) Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.16 se observa que el 11.1 % de los datos se encuentran en la zona “Perceptible” por el ser humano, y el 88.9 % de los datos se encuentran en la zona “Imperceptible” por el ser humano.

A continuación se presenta otro gráfico de resultados de monitoreo de vibraciones relacionados a la norma internacional de percepción humana según “Steffens”.

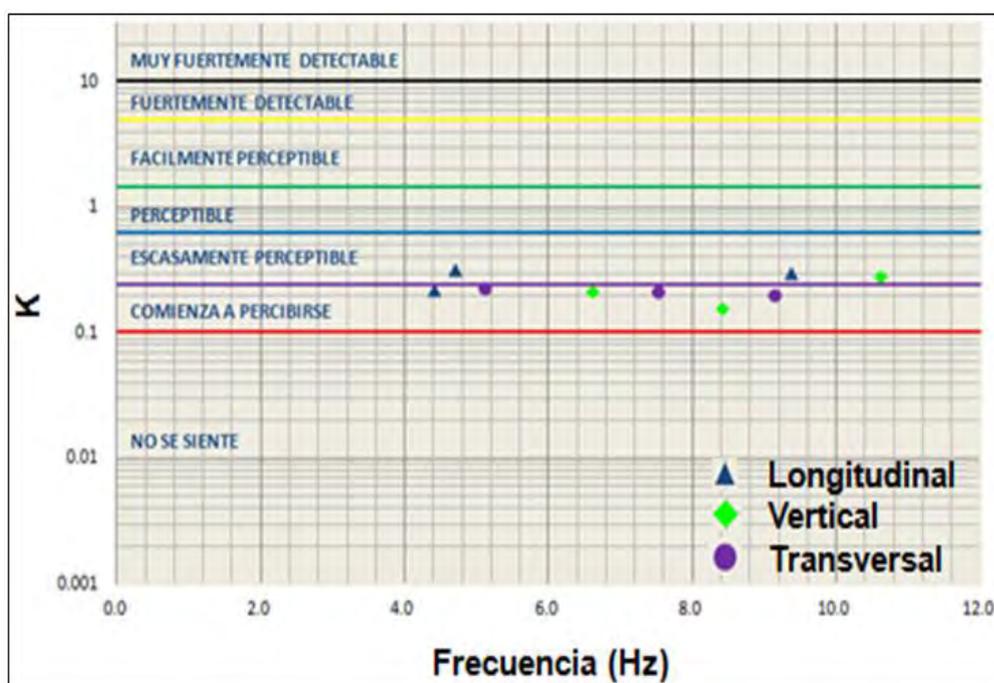


Figura N° 10.17: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.17 se observa que el 33.3 % de los datos se encuentran en la zona “Escasamente Perceptible” por el ser humano y el 66.7 % de los datos se encuentran en la zona “Comienza a percibirse” por el ser humano.

### **10.3 Caso-estudio N° 02.**

#### **Monitoreo de vibraciones para la carretera cercana al tajo abierto de la mina.**

Para este caso se consideró siete voladuras primarias. El monitoreo de las vibraciones se realizó de la siguiente manera:

- Tres monitoreos fueron realizados en la carretera.
- Cuatro monitoreos fueron realizados en el tajo en dirección de la carretera.

La voladura primaria tuvo en promedio 150 taladros (distribuidas en 10 filas de 15 taladros cada una). Para llevar a cabo esta operación minera unitaria de voladura de rocas se usó la mezcla explosiva comercial AN/FO, cuya cantidad por taladro varía desde 330 Kg. hasta 650 Kg. (esta variación está en función directa de la dureza del macizo rocoso). Usándose los siguientes tiempos de retardo:

- Los tiempos de retardo entre taladros utilizados fueron de 17 ms y 25 ms.
- Los tiempos de retardo entre filas utilizados fueron de 107 ms y 130 ms.

- Las distancias de las voladuras primarias hacia los puntos de monitoreo varían desde 70.0 metros hasta 1490.0 metros.
- El equipo para el monitoreo de vibraciones se utilizó un sismógrafo (Minimate Plus) con un geófono triaxial de superficie.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla N° 10.5

Tabla N° 10.5: Muestra el resumen de los resultados obtenidos

Iniciación de voladura	Tipo de explosivo	Talaños disparados	Carga por retardo equivalente en Kg ANFO	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)				Frecuencia dominante (hz)			Time/hole (ms)	Time/row (ms)	Monitoreo en:
						TRANS.	VERT.	LONG.	PPV (suma)	TRANS.	VERT.	LONG.			
Pirrotécnica	HA 28	130	599.1	1170.0	47.8	2.0	1.5	2.7	2.8	3.6	3.1	3.0	25	130	Carretera
Electrónico	ANFO	143	426.1	100.0	4.8	68.9	3.8	50.0	72.5	3.6	3.6	3.5	8	100	Dirección de la carretera
Pirrotécnica	ANFO	106	426.1	137.0	6.6	21.1	15.0	18.8	23.3	4.5	6.8	4.4	17	130	Dirección de la carretera
Pirrotécnica	HA 28	117	599.1	95.0	3.9	27.7	22.7	33.6	37.4	3.3	9.8	3.6	17	130	Dirección de la carretera
Electrónico	HA 28	179	599.1	70.0	2.9	49.4	53.2	77.7	88.1	7.6	4.4	5.9	6	130	Dirección de la carretera
Pirrotécnica	HA 28	276	599.1	1372.0	56.1	1.1	0.7	1.8	1.8	6.5	7.4	4.2	17	130	Carretera
Pirrotécnica	HA 37	136	641.1	1490.0	58.8	0.9	0.5	1.2	1.3	3.4	6.3	5.7	25	130	Carretera

Con los datos de la tabla N° 10.5, se empieza a crear el modelo predictivo de campo lejano para la carretera, para ello se utiliza el modelo matemático de Devine, el cual relaciona las variables de PPV suma (mm/segundo), distancia al punto de monitoreo (metros) y la carga explosiva por retardo (Kilogramos).

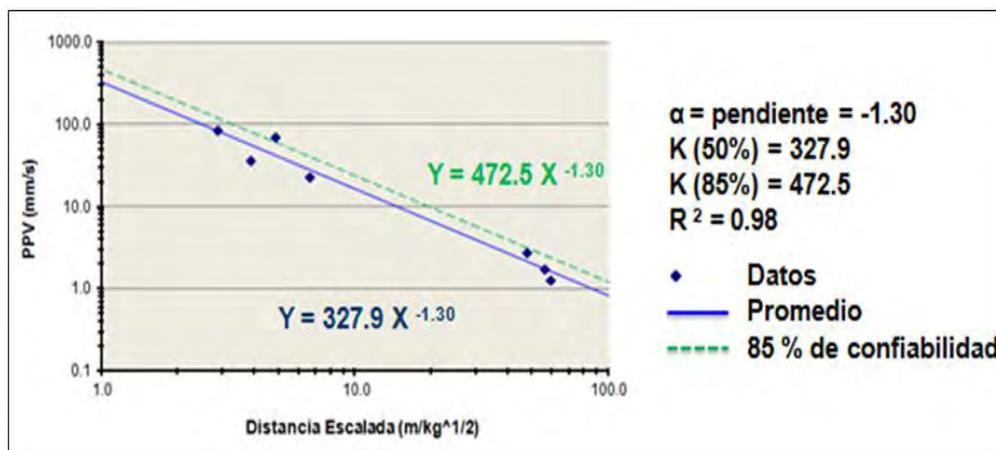


Figura N° 10.18: Muestra la relación Velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La Distancia Escalada (m/Kg<sup>1/2</sup>).

Con la ecuación del modelo predictivo de campo lejano obtenida al 85% de confiabilidad, se puede construir la gráfica de PPV vs Distancia, con la cual se puede calcular la distancia segura a la que se puede realizar una voladura primaria (según los Kilogramos de carga por retardo a utilizar), de tal manera de no sobrepasar el valor límite de 50.0 mm/segundo, límite máximo que no genera daños al macizo rocoso según la USBM.

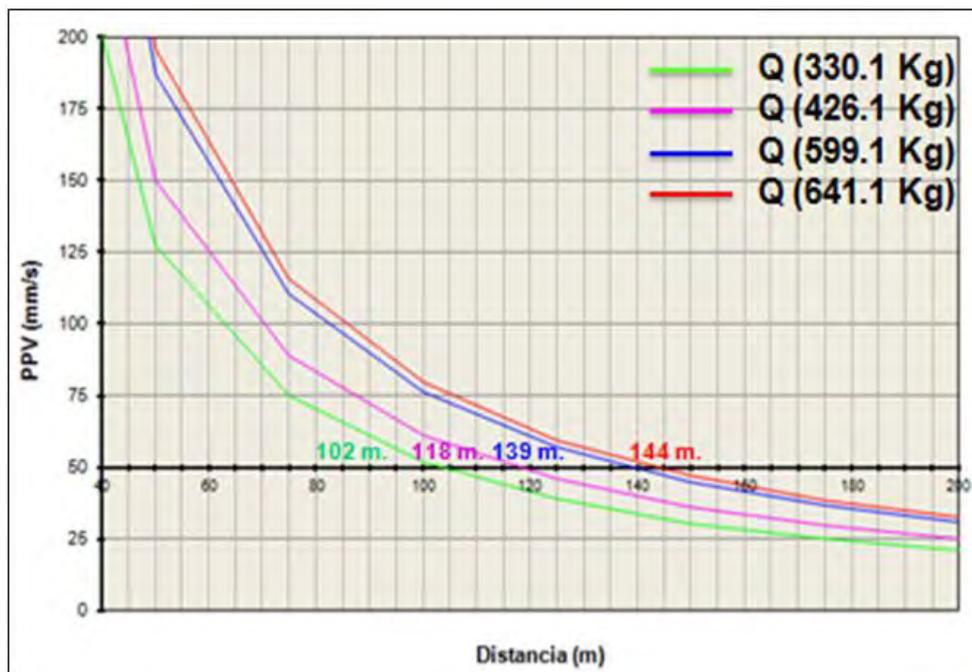


Figura N° 10.19: Muestra la relación de la velocidad pico de partícula (mm/s) Vs. La distancia (m).

También con la ecuación del modelo predictivo de campo lejano obtenida (85% de confiabilidad), se puede construir la gráfica de Carga por retardo vs Distancia, con la cual teniendo como referencia el valor límite de 50.0 mm/segundo, se puede calcular la distancia segura a la que se puede realizar una voladura primaria según los Kilogramos de carga por retardo que se van a utilizar.

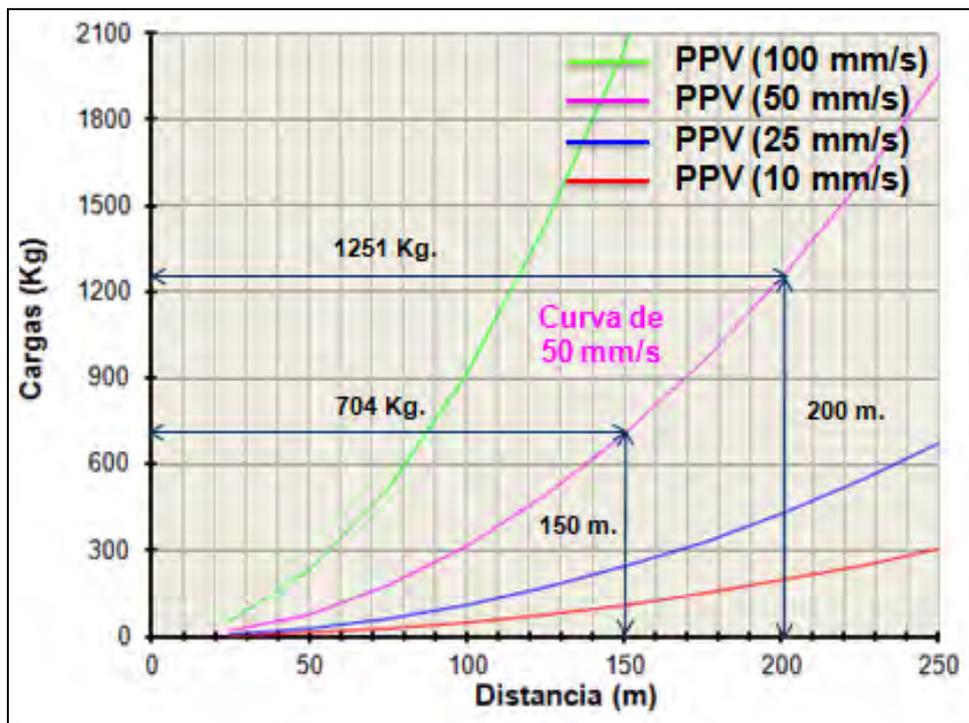


Figura N° 10.20: Muestra la relación de carga de mezcla explosiva comercial (kg) Vs. La distancia (m).

Por otro lado, los resultados de monitoreo de las vibraciones en la carretera han sido relacionados a la norma internacional de percepción humana "USBM – Goldman", a continuación se presenta el cuadro resumen de resultados de monitoreo y gráfico de los resultados relacionados a la norma internacional. Los resultados se muestran en la tabla N° 10.6.

Tabla N° 10.6: Muestra el resumen de resultados de monitoreo de vibraciones en la carretera.

Iniciación de voladura	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)			Frecuencia dominante (hz)			Monitoreo en:
			TRANS.	VERT.	LONG.	TRANS.	VERT.	LONG.	
Pirotécnica	1170.0	47.8	2.0	1.5	2.7	3.6	3.1	3.0	Carretera
Pirotécnica	1372.0	56.1	1.1	0.7	1.8	6.5	7.4	4.2	Carretera
Pirotécnica	1490.0	58.8	0.9	0.5	1.2	3.4	6.3	5.7	Carretera

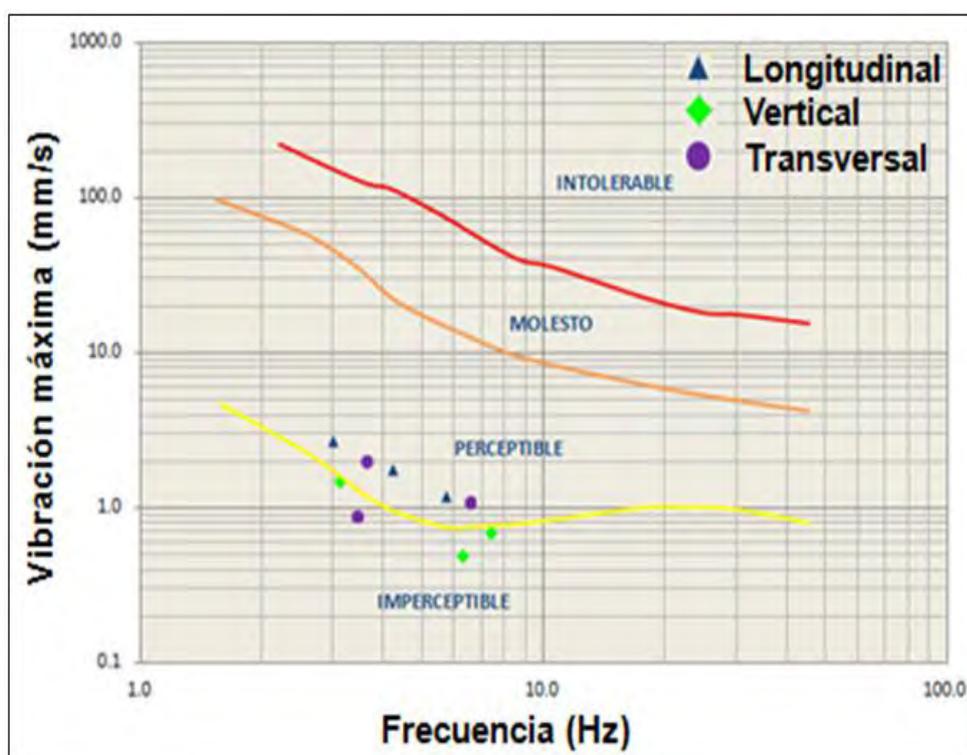


Figura N° 10.21: Muestra la relación vibración máxima (mm/s) Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.21 se observa que el 55.6 % de los datos se encuentran en la zona "Perceptible" por el ser humano, y el 44.4 % de los datos se encuentran en la zona "Imperceptible" por el ser humano.

A continuación se presenta otro gráfico de resultados de monitoreo relacionados a la norma internacional de percepción humana según “Steffens”, cuya relación matemática es como sigue:

$$K = \frac{0.8(V)(F)}{(100 + F^2)^{1/2}}$$

Donde:

V = Vibración máxima (mm/s)

F = Frecuencia (Hz)

Tabla N° 10.7: Muestra los niveles de percepción

<b>VALOR DE K</b>	<b>NIVEL DE PERCEPCIÓN</b>
< 0,1	No se siente
0,1	Comienza a percibirse
0,25	Escazamente perceptible
0,63	Perceptible
1,6	Facilmente perceptible
4,0	Fuertemente detectable
10,0	Muy fuertemente detectable

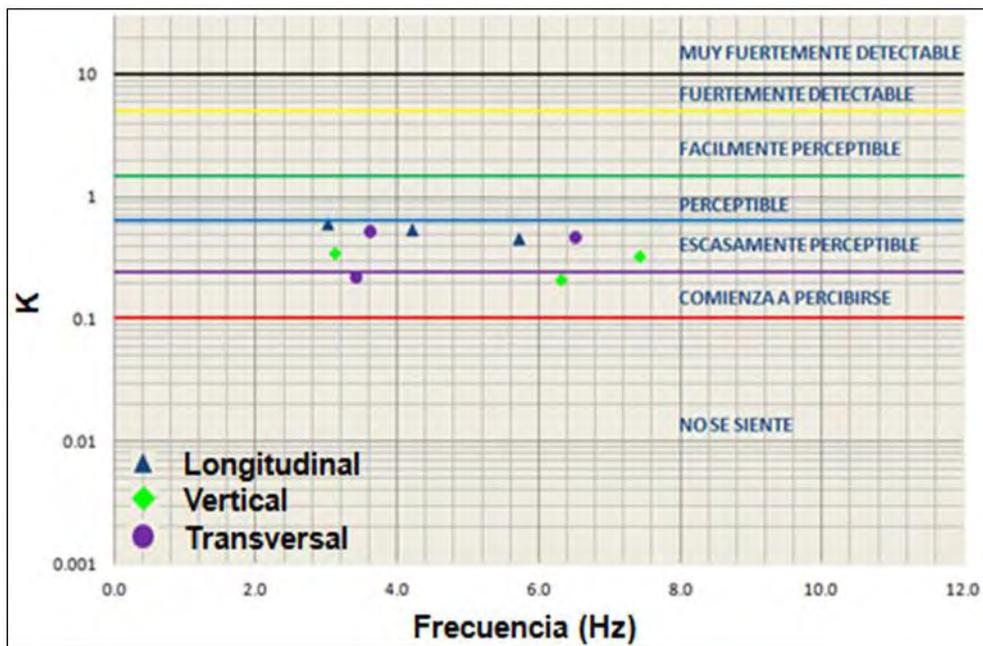


Figura N° 10.22: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.22 se observa que el 77.8 % de los datos se encuentran en la zona “Escasamente Perceptible” por el ser humano y el 22.2 % de los datos se encuentran en la zona “Comienza a percibirse” por el ser humano.

Para mejorar y reducir la percepción humana por las vibraciones inducidas por la voladura de rocas se utilizó el método de onda elemental.

Se capturó una onda elemental en dirección de la carretera y se calculó el tiempo de retardo entre taladros adecuado para reducir las vibraciones producidas por efectos de la voladura, dicho tiempo es de 23 ms.

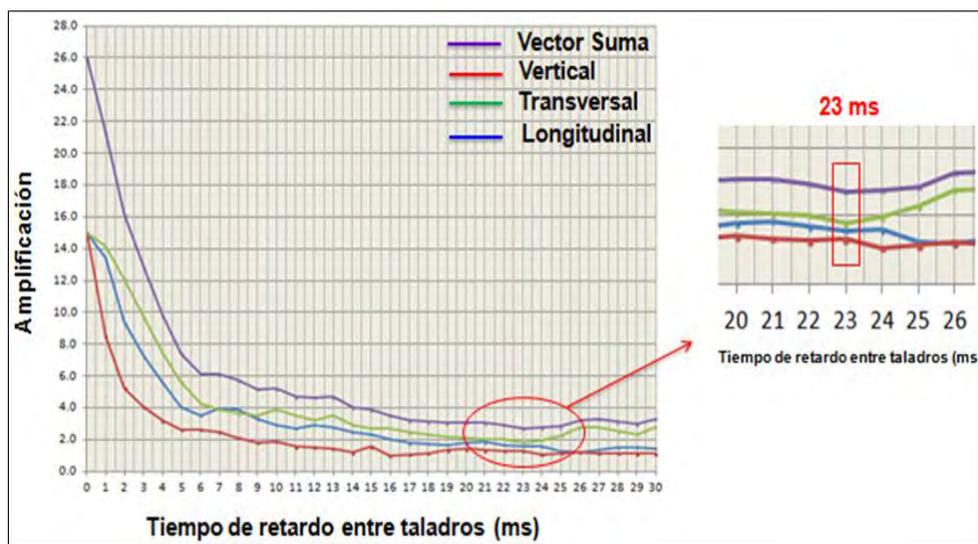


Figura N° 10.23: Muestra la relación de Amplitud Vs. El tiempo de retardo entre taladros (ms).

Una vez obtenido el tiempo de retardo entre taladros, se realiza un comparativo de resultados de PPV suma:

### 10.3.1 Voladura primaria N° 01

Para esta voladura, se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad de taladros = 150 (10 filas de 15 taladros por cada fila).
- Tiempo entre taladros = 17 ms.
- Tiempo entre filas = 130 ms.
- Distancia de la voladura hacia el sismógrafo "A" = 60 m. (sismógrafo ubicado en dirección de la carretera).

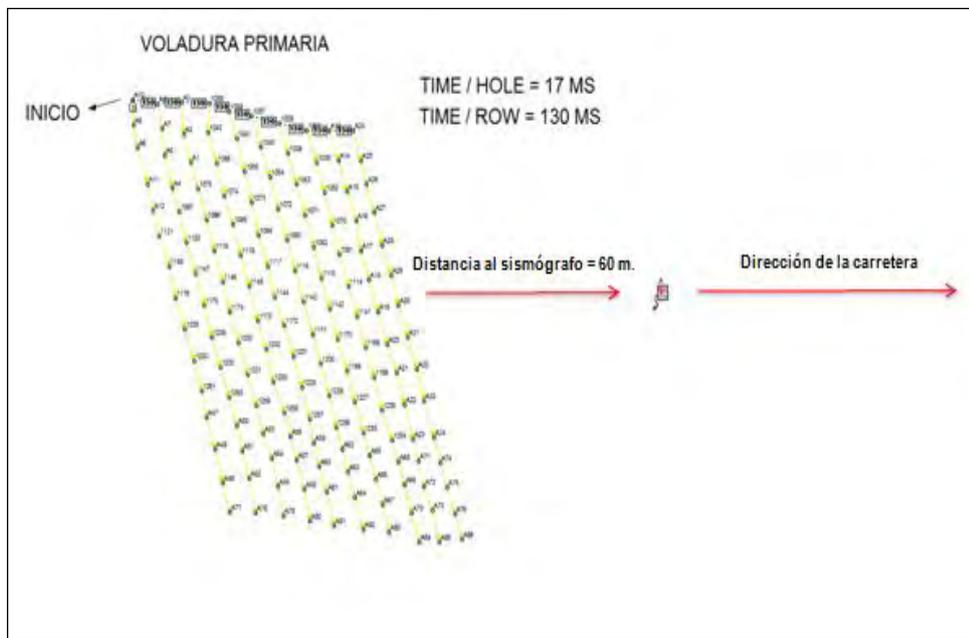


Figura N° 10.24: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.

En el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus" se introduce la onda elemental (vector suma), cantidad de carga por taladro (Kg), constantes obtenidas en el modelo de Devine ( $K$  y  $\alpha$ ) y la velocidad de la onda "P", con ello se obtiene un resultado de PPV suma = 217.5 mm/segundo.

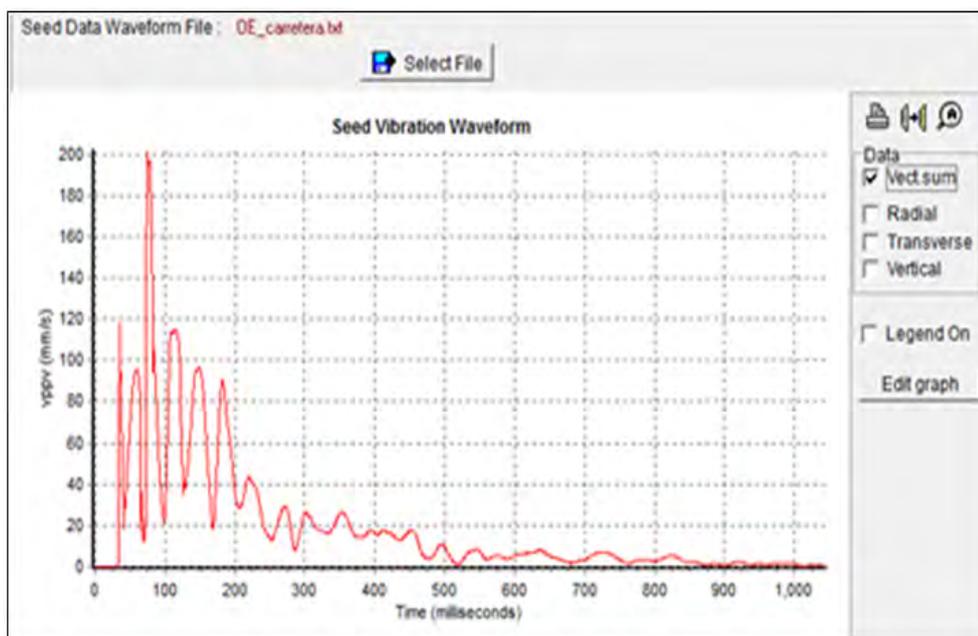


Figura N° 10.25: El software muestra el PPV (mm/s) de la onda elemental en dirección de la carretera Vs. El tiempo (ms).

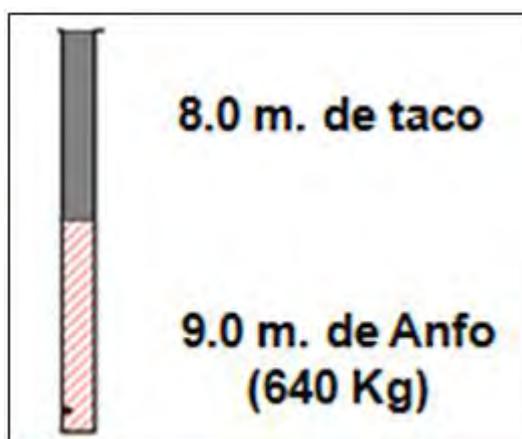


Figura N° 10.26: Muestra el diseño de carga de un taladro.

Monitoring Station : Monitor station: A

Num of Simulations : 100

Charge Wt. Scaling Law A (mm/s): 472.5

Charge Wt. Scaling Law B : 1.3

p-Wave Velocity (m/s): 3870

Charge Wt. Coeff. Of Variation : 0.2

Design Spacing (m): 10

Calc

Auto generate data files

Use manually generated data

**PPV result 217.5 mm/s (Std. Dev. 30.3 mm/s)**

Figura N° 10.27: El software muestra el resultado obtenido de PPV (mm/s).

### 10.3.2 Voladura primaria N° 02:

Para esta voladura, se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad de taladros = 150 (10 filas de 15 taladros por cada fila).
- Tiempo entre taladros = 23 ms. (cálculo de onda elemental).
- Tiempo entre filas = 174 ms.
- Distancia de la voladura hacia el sismógrafo "A" = 60 m. (sismógrafo ubicado en dirección de la carretera).

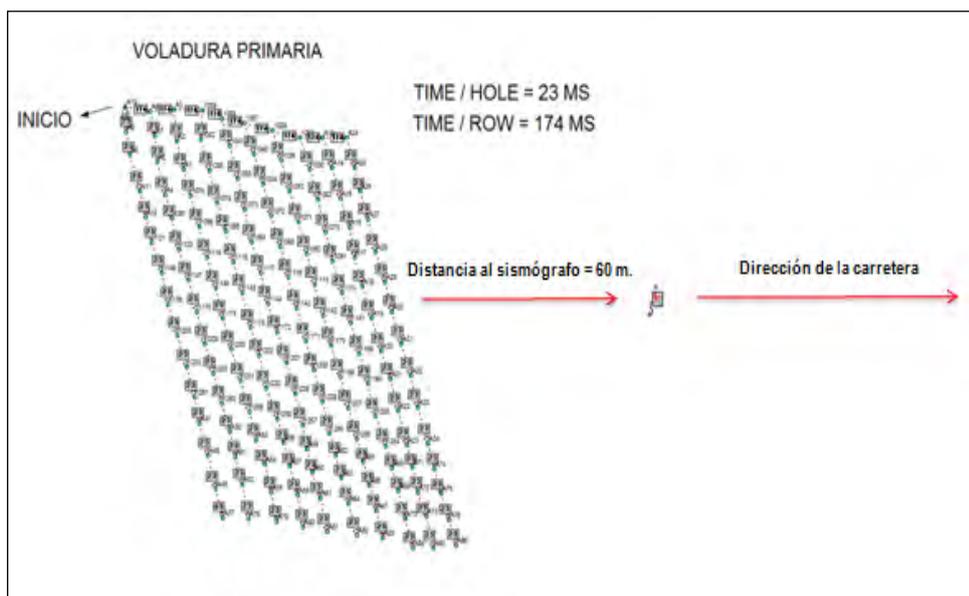


Figura N° 10.28: Muestra la ubicación del sismógrafo con respecto a una voladura primaria.

En el software de simulación de vibraciones denominado “Shotplus” se introduce la onda elemental (vector suma), cantidad de carga por taladro (Kg), constantes obtenidas en el modelo de Devine (K y  $\alpha$ ) y la velocidad de la onda “P”, con estos datos se obtiene un resultado de PPV suma = 195.8 mm/segundo.

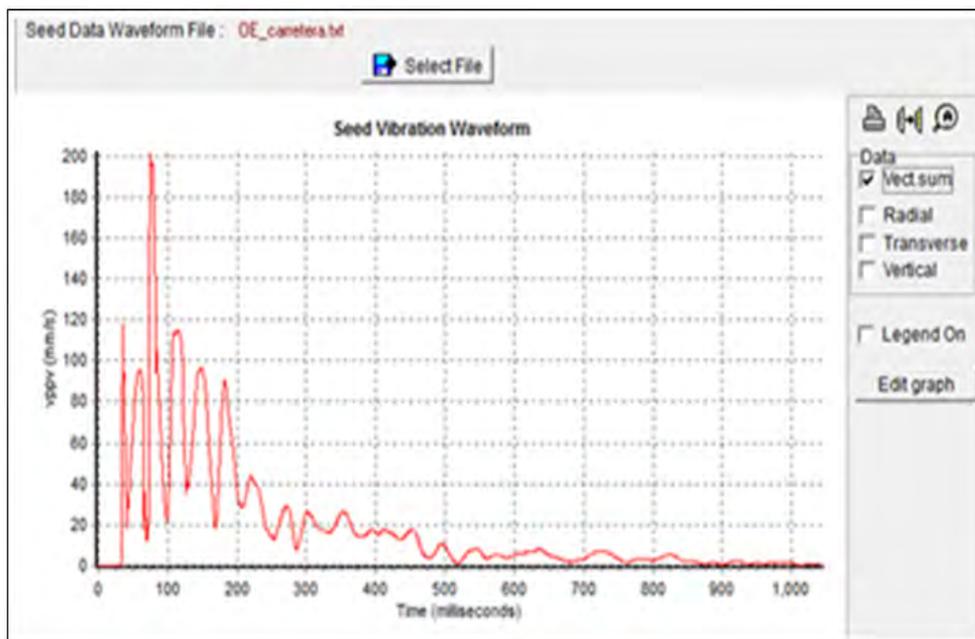


Figura N° 10.29: En software muestra el PPV de la onda elemental de un taladro en dirección de la carretera Vs. El tiempo.

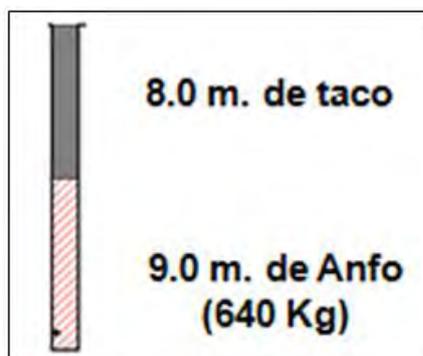


Figura N° 10.30: Muestra el diseño de carga de un taladro.

Monitoring Station : Monitor station: A

Num of Simulations : 100

Charge Wt. Scaling Law A (mm/s): 472.5

Charge Wt. Scaling Law B : 1.3

p-Wave Velocity (m/s): 3870

Charge Wt. Coeff. Of Variation : 0.2

Design Spacing (m): 10

Calc

Auto generate data files

Use manually generated data

**PPV result 195.8 mm/s (Std. Dev. 25.7 mm/s)**

Figura N° 10.31: El software muestra el resultado obtenido de PPV (mm/s).

Por lo tanto utilizando el tiempo de retardo entre taladros de 23 ms (cálculo de onda elemental) se reduce las vibraciones en un 10 %.

Utilizando también el tiempo de retardo entre taladros de 23 ms, se realizó las simulaciones para obtener nuevos resultados de PPV y frecuencia en puntos de monitoreos ubicados en la carretera y se obtuvo la siguiente información que se muestra en la tabla N° 10.8.

Tabla N° 10.8: Muestra el resumen de nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la carretera.

Iniciación de voladura	Distancia al punto de monitoreo (m)	Distancia Escalada	Vibración (mm/s)			Frecuencia dominante (hz)			Monitoreo en:
			TRANS.	VERT.	LONG.	TRANS.	VERT.	LONG.	
Pirotécnica	1170.0	47.8	1.0	0.7	1.4	5.4	4.4	4.5	Carretera
Pirotécnica	1372.0	56.1	0.6	0.4	0.9	9.8	10.7	6.3	Carretera
Pirotécnica	1490.0	58.8	0.5	0.3	0.6	5.1	9.1	8.6	Carretera

Los nuevos resultados de monitoreo de vibraciones en la carretera han sido relacionados con la norma internacional de percepción humana “USBM – Goldman”, a continuación se presenta el gráfico de los resultados relacionados a la norma internacional.

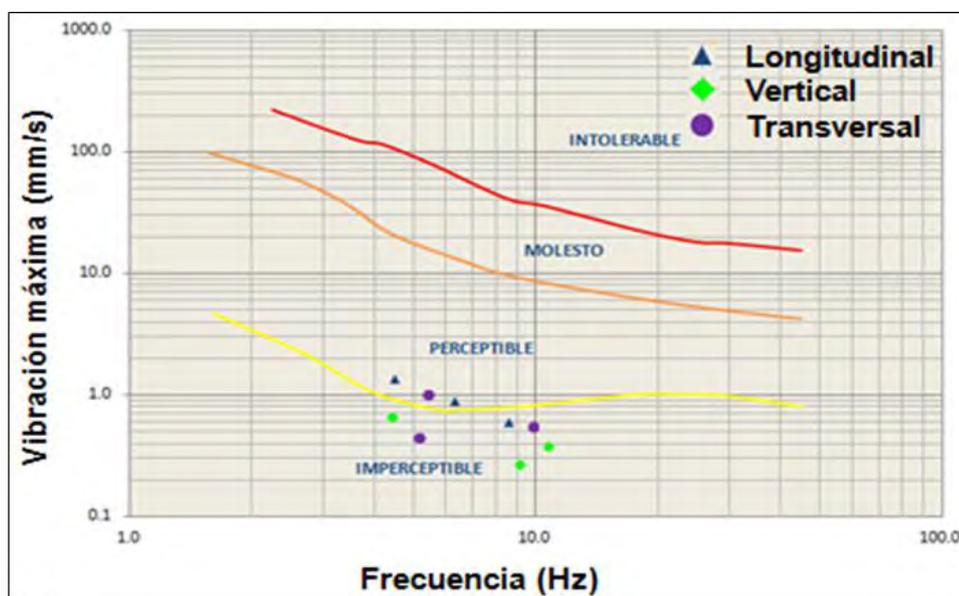


Figura N° 10.32: Muestra la relación vibración máxima (mm/s) Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.32 se observa que el 33.3 % de los datos se encuentran en la zona “Perceptible” por el ser humano, y el 66.7 % de los datos se encuentran en la zona “Imperceptible” por el ser humano.

A continuación se presenta otro gráfico de resultados de monitoreo de vibraciones relacionados a la norma internacional de percepción humana según “Steffens”.

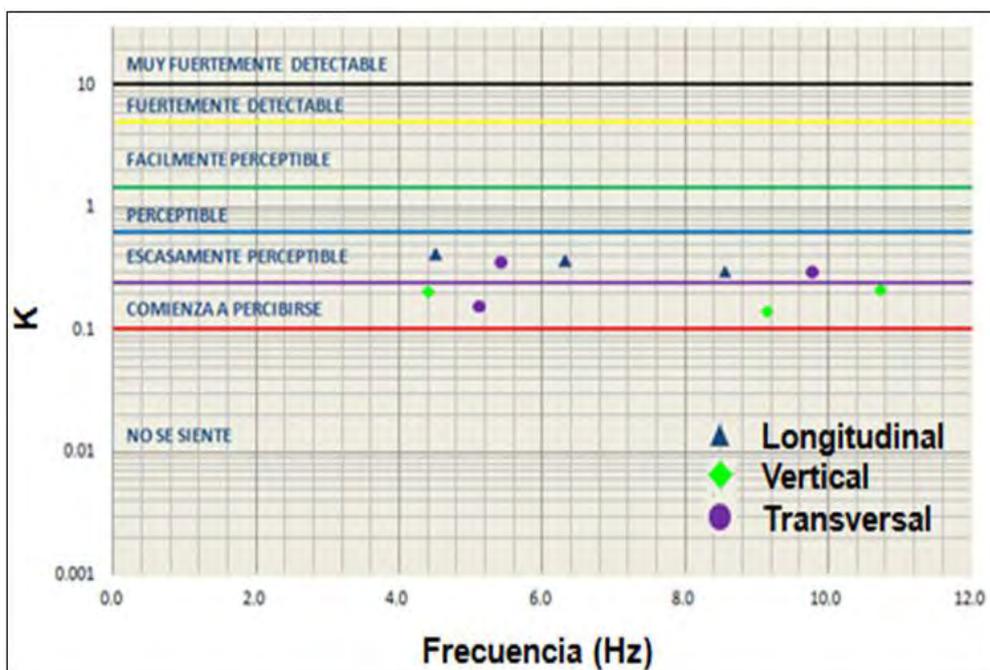


Figura N° 10.33: Muestra la relación de K Vs. Frecuencia (Hz).

De la figura N° 10.33 se observa que el 55.6 % de los datos se encuentran en la zona “Escasamente Perceptible” por el ser humano y el 44.4 % de los datos se encuentran en la zona “Comienza a percibirse” por el ser humano.

## **CAPÍTULO XI**

### **INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

#### **11.1 Introducción.**

Interpretando y analizando los resultados de los casos estudios del capítulo anterior, se observa que se ha utilizado el modelo matemático de Devine para el modelamiento de vibraciones para campo lejano, ya que es el más adecuado, y por lo tanto se puede afirmar lo siguiente:

#### **11.2 Resultados del Monitoreo de vibraciones para la ciudad cercana al tajo abierto de la mina.**

Para el caso de la ciudad se tiene siete voladuras primarias, con un promedio de 150 taladros distribuidos en 10 filas de 15 taladros por fila, se usó la mezcla explosiva comercial AN/FO en diferentes cantidades dependiendo del tipo de roca, se utilizó el modelo matemático de Devine para vibraciones en campo lejano (ecuación llevada al 85 % de confiabilidad), las distancias desde las voladuras primarias hasta los puntos de monitoreo varían desde 80.0 metros hasta 1550.0 metros; entonces se

puede enfatizar que en todas las voladuras que se realizaron se obtuvo resultados de velocidad pico partícula que están por debajo de los valores mencionados en los criterios de daños al macizo rocoso postulados a la fecha.

Al realizar el comparativo de PPV, teniendo en cuenta iguales parámetros de perforación y voladura a excepción del tiempo de retardo entre taladros y utilizando el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus", se tiene, que usando el tiempo de retardo entre taladros = 17 ms (voladuras actuales), el resultado de PPV es de 155.3 mm/segundo, mientras que usando el tiempo de retardo entre taladros = 27 ms (cálculo de onda elemental), el resultado de PPV es de 134.9 mm/segundo, es decir, al utilizar el tiempo de retardo entre taladros calculado por el método de onda elemental se reduce la vibración en un 13 %. Esta reducción hace que las vibraciones se vuelvan imperceptibles o casi imperceptibles por los pobladores.

Al utilizar el tiempo de retardo entre taladros = 27 ms (cálculo de onda elemental), se reduce en 80 % la percepción del ser humano hacia las voladuras, según la norma internacional de percepción humana "USBM – Goldman".

### **11.3 Resultados del Monitoreo de vibraciones para la carretera cercana al tajo abierto de la mina.**

Para el caso de la carretera se tiene también siete voladuras primarias, con un promedio de 150 taladros distribuidos en 10 filas de 15 taladros por fila, se usó la mezcla explosiva comercial AN/FO en diferentes cantidades dependiendo del tipo de roca, se utilizó el modelo matemático de Devine para vibraciones en campo lejano (ecuación llevada al 85 % de confiabilidad), las distancias de las voladuras primarias hacia los puntos de monitoreo varían desde 70.0 metros hasta 1490.0 metros y cuyos resultados de velocidad pico partícula se encuentran por debajo de los valores mencionados en los criterios de daños al macizo rocoso postulados a la fecha

Al realizar el comparativo de PPV, teniendo en cuenta iguales parámetros de perforación y voladura a excepción del tiempo de retardo entre taladros y utilizando el software de simulación de vibraciones denominado "Shotplus", se tiene, que usando el tiempo de retardo entre taladros = 17 ms (voladuras actuales), el resultado de PPV es de 217.5 mm/segundo, mientras que usando el tiempo de retardo entre taladros = 23 ms (cálculo de onda elemental), el resultado de PPV es de 195.8 mm/segundo, es decir, al utilizar el tiempo de retardo entre taladros calculado por el método de onda elemental se reduce la vibración en un 10 %. Esta reducción hace que las vibraciones se vuelvan imperceptibles o casi imperceptibles por los pobladores.

Al utilizar el tiempo de retardo entre taladros = 23 ms (cálculo de onda elemental), se reduce en 40 % la percepción del ser humano hacia las voladuras, según la norma internacional de percepción humana “USBM – Goldman”.

Por otro lado, para ambos casos-estudio de vibraciones en dirección a la ciudad y a la carretera, se puede aseverar que partiendo de la premisa que cuanto más se conozca las propiedades físico - mecánicas del macizo rocoso, se seleccione una adecuada mezcla explosiva comercial con sus respectivos accesorios de voladura, se use un buen modelo matemático para el diseño de malla de perforación y voladura (B x S) y sobre todo teniendo mucho cuidado en el burden (B); si se puede minimizar los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas, en este caso las vibraciones. Se sabe que como no se tiene normativas en el Perú, los resultados de los monitoreos se deben comparar siempre con las normativas internacionales, entre las cuales se pueden mencionar la OSM (Office Surface Mining) 1980; la cual está basada en la USBM del RI 8507 de 1978.

En general para ambos casos, tanto en dirección a la ciudad y a la carretera las vibraciones no causaran algún tipo de daño al macizo rocoso. Sin embargo, también se debe enfatizar que en la operación minera unitaria de voladura de rocas todo es aleatoria debido a varios factores como las propiedades físico mecánicas del macizo rocoso, el factor humano, etc. Por eso siempre se debe estar alerta, y a medida que se profundice el pit, se deben hacer los respectivos estudios en el laboratorio y monitorear siempre

los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas en especial las vibraciones.

Finalmente se puede afirmar que los resultados obtenidos modelando y monitoreando las vibraciones inducidas por la voladura de rocas han sido bien entendidos, y que dichos resultados tienen un alto grado de confiabilidad (85%), que se ha demostrado en cada uno de los casos-estudio efectuados en el presente trabajo de investigación, y se concluye que usando ciencia y tecnología moderna si se pueden controlar, mitigar y/o evitar todos y cada uno de los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas.

## **CONCLUSIONES.**

Las conclusiones a las que arriban después de realizar el presente trabajo de investigación son las siguientes:

- 1.** A través del modelamiento del comportamiento y deformación dinámica del macizo rocoso influenciado por el esfuerzo representado por las vibraciones, es posible establecer un criterio de daño basado en parámetros geomecánicos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.
- 2.** El presente trabajo de investigación permite determinar el nivel de percepción del ser humano hacia la voladura de rocas, en función de la vibración máxima (mm/s) y frecuencia (Hz), El valor mínimo es de 0.1 cuya interpretación de percepción es “No se siente” y el valor máximo es de 10.0 cuya interpretación de percepción es “Muy fuertemente detectable”.
- 3.** El nuevo enfoque de modelamiento de vibraciones aplicable en el campo lejano de la voladura, permitirá mejorar el control que se tiene sobre

el diseño, evaluando así la disposición de las mezclas explosivas comerciales, la distribución de estas y la secuencia de iniciación de dichas mezclas explosivas comerciales, que tienen una influencia determinante en la forma y amplitud de la señal resultante, y por lo tanto, en el probable daño producido por las vibraciones.

4. También, se debe mencionar que los espectros de frecuencia son muy útiles para efectuar un análisis de ondas en campo lejano, ya que en esos puntos se espera que las señales de vibraciones estén muy atenuadas en amplitud y frecuencias. Por otro lado, si las frecuencias se encuentran en el rango de la frecuencia natural de vibraciones del lugar se producirá un efecto de amplificación, aumentando de esta manera la probabilidad de causar algún tipo de daño.

5. Las vibraciones producidas por la voladura de rocas y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daños al macizo rocoso en el cual se está trabajando. El modelamiento y monitoreo adecuado de las vibraciones inducidas por la voladura es muy ventajoso, ya que permite examinar en detalle el proceso estocástico de la voladura de rocas, constituyéndose en una herramienta muy útil para poder hacer un diagnóstico; ya que mediante una adecuada interpretación del registro de vibraciones permitirá determinar la interacción entre las variables de la voladura. Pudiéndose de esta manera evaluar cargas explosivas detonando en una secuencia de encendido

incorrecta, dispersión en los tiempos de encendido de los retardos, detonaciones inadecuadas de las mezclas explosivas comerciales, detonaciones instantáneas, detonaciones de cargas explosivas adyacentes por simpatía, además de la cuantificación de los niveles de velocidad, frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas de roca.

**6.** Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación y cumpliendo con las regulaciones exigidas por la “Office Surface Mining” (OSM), se ha usado el método de la velocidad pico de partícula (PPV), para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por esta institución. Como se sabe, este método requiere que cada disparo primario debe ser monitoreado usando un sismógrafo que sea capaz de monitorear la velocidad pico de partícula (PPV), teniendo en cuenta que la velocidad de partícula máxima, alcance un valor por debajo de los niveles especificados en la tabla 12.1.

Se debe hacer notar que si la distancia del disparo a la estructura más cercana se incrementa, la velocidad pico de partícula permitida también se incrementa.

Tabla N° 12.1: Muestra las velocidades de partícula máximas permitidas a varias distancias desde el disparo primario.

<b>Distancia desde el disparo (m.)</b>	<b>Máxima velocidad pico de partícula permisible (mm/seg.)</b>
0 – 91.4	31.7
91.5 – 1524	25.4
1525 – a mas	19.1
Fuente: Office Surface Mining – OSM (1980)	

7. En la presente investigación, se modelaron y monitorearon dos casos estudio. Para ambos casos se efectuaron siete disparos primarios con un promedio de 150 taladros cada uno, los cuales fueron cargados con diferentes cantidades de AN/FO, de acuerdo al tipo de roca, todo lo referente a los disparos primarios está bien explicado y descrito en el texto, especialmente los resultados obtenidos, y la discusión de resultados correspondiente. Los resultados de estos monitoreos de vibraciones se muestran en la tabla N° 10.1 y tabla N° 10.5.

8. Se debe mencionar que conociendo las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, se puede diseñar adecuadamente las mallas de perforación y voladura; se puede elegir adecuadamente el explosivo y como consecuencia de lo mencionado anteriormente se puede modelar,

monitorear, controlar, mitigar y/o evitar las excesivas vibraciones inducidas por la voladura de rocas.

**9.** Como se puede apreciar en los resultados de monitoreo de vibraciones tanto en la ciudad como en la carretera, se concluye que ninguno de ellos pasa el umbral de la velocidad pico de partícula para causar daño que es de 50 mm/segundo según la USMB. Por lo tanto, las comunidades aledañas a la labor minera se encuentran seguras ya que no perciben niveles de vibraciones que puedan generar daños al macizo rocoso y tampoco la carretera sufrirá algún tipo de daño.

## **RECOMENDACIONES.**

Después de realizar el presente trabajo de investigación, se pueden escribir las recomendaciones siguientes:

- 1.** Se debe establecer puntos estratégicos de monitoreo para controlar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, para los presentes casos-estudio, es de suma importancia proteger las estructuras de la ciudad y la carretera que pasa cercanamente a las operaciones mineras del tajo abierto.
- 2.** Se debe usar el método de la velocidad pico partícula (PPV), para evaluar y cuantificar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, porque este método ha demostrado dar resultados confiables, para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por varios investigadores.
- 3.** Se debe comunicar a las comunidades aledañas a las operaciones mineras, que deben construir sus viviendas a distancias seguras, de tal manera que al realizar la operación minera unitaria de voladura de rocas, las

vibraciones u otro impacto ambiental no afecte a las estructuras, y principalmente salvaguardar la vida de los seres humanos y animales.

**4.** Se sugiere que todas las entidades inmersas en la industria minero-metalúrgica, tales como: Compañías mineras, colegio e instituto de ingenieros, universidades públicas y privadas y sociedad civil deben crear un comité para normar todos los impactos ambientales producidos por la industria minero-metalúrgica. Esta norma debe tener fundamento haciendo las pruebas de campo respectivas y las de laboratorio; solo así se podrá rebatir a todos los opositores a la industria minero-metalúrgica y principalmente el Perú como país Latinoamericano sería en segundo en la región en contar con sus propias normativas, tanto nacionales como internacionales.

**5.** Las nuevas generaciones de ingenieros de minas de la Universidad Nacional de Ingeniería deben contar con su propio campo de pruebas y Laboratorio de Ingeniería de Explosivos y Voladura de Rocas bien equipado, para que los egresados apliquen lo aprendido en las aulas en las operaciones mineras, de tal manera que sean más competitivos, y puedan estar acorde con el avance de la ciencia y tecnología en voladura de rocas.

**6.** No se debe usar el explosivo más barato, sino el que mejor trabaje de acuerdo a las características físico-mecánicas del macizo rocoso. Se deben tener en cuenta el costo en US\$/Tm explotada.

**7.** El modelamiento y monitoreo de las vibraciones inducidas por la voladura de rocas deben ser realizados por personal entrenado, capacitado y actualizado; para de esta manera poder obtener información confiable, y usando dicha información se pueda tomar decisiones adecuadas y oportunas.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- 1.** Dowding, Charles H: "Micrometer Crack Response to Vibration and Weather"; ISEE Copyrigh 2008.
- 2.** Carlos Scherpenisse O. "Monitoreo y Modelamiento de Vibraciones para el Control y Evaluación del Daño por Voladuras", ASP Blastronics, 2006.
- 3.** Siskind, David E.: "Vibration from Blasting"; ISEE Copyrigh 2005.
- 4.** Dowding, C. y McKenna, L: "Crack response to long term environmental and blast vibration effects", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, 2005.
- 5.** Gad, E., Wilson, A., Moore, A. Y Richards, A: "Effects of mine blasting on residential structures", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 19, 2005.

6. Blair, D.P. & Armstrong L.W.; "The Influence of Burden on Blast Vibration". International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast Vol. 5, 2001.
7. Holmberg Roger: "Explosive & Blasting Technique", A.A. Blakema/Rotterdam/Brookfield, 2000.
8. Blair, D.P; "Statistical Models for Ground Vibration and Airblast". International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast, Vol. 3, 1999.
9. Lewis L. Oriard: "The Effects of Vibrations and Environmental Forces", Published by ISEE, USA, 1999.
10. Fourie, A. B & R. W. Green: "Damage to underground Coal Mines Caused by Surface Mining". Intl. J. Surface Mining and Reclamation, 1993.
11. Persson, P.A., Holmberg, R. & Lee, J: "Rock Blasting and Explosives Engineering". CRC Press, Boca Raton, FL, 1994.
12. Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J. y Dowding, C: "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Blasting", U.S.

Bureau of Mines Report of Investigations 8507 (USBM RI 8507), Washington, D.C, 1980.

**13.** Dowding, C.H.: "Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

**14.** Ferahian, R. H & H. S. Ward: "Vibrations Environmental in Laboratory Buildings" National Research Council of Canada, Division of Building Research, 1970.

**15.** Dowding, Charles H.: "Blast Vibration Monitoring and Control"; ISEE Copyright 1985.

**16.** Crum, S. V., D. E. Siskind, W. E. Pierce and K. S. Radcliffe: "Ground Vibration and Airblasts Monitored in Swedesburg", Pennsylvania, from blasting at the McCoy Quarry. Contract Research Report. By the U.S Bureau of Mines for the Pennsylvania, 1997.

**17.** Oriard, L. L.: "Vibration and Ground Rupture Criteria for Buried Pipelines". Proc. 20<sup>th</sup> Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique Intl. Soc. Of Explosive Engineers, 1994.

- 18.** Oriard, L. L & J. H. Coulson: "TVA Blast Vibration Criteria for mass Concrete". Proc. Conf. of ASCE, Portland, OR, 1980.
- 19.** Andrews, A. B: "Design Criteria for Blasting", proceedings of the Seventh conference on Explosive Technique, ISEE, 1980.
- 20.** Esteves, J. M: "Control of Vibration Caused by Blasting" Laboratorio de Engenharia Civil, Lisbon Portugal, 1978.
- 21.** Fang, H. Y: "Field Studies of Structural Response to Blasting Vibration and Environmental Effects". Lehigh Univ., 1976
- 22.** Duvall, W. I & D.E. Fogelson: "Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations" U. S. Bureau of mines RI 5968, 1962.
- 23.** Devine, J.R: "Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations" Highway Agents, Information Circular 8405, U. S. Bureau of Mines, Washington, D. C., 1968