

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE  
APURÍMAC**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE  
MINAS**



**MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACIÓN DURANTE LA  
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO MINERO LAS  
BAMBAS**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS**

**ISMAEL HECTOR VILLAVICENCIO PANUERA**

Abancay, Febrero del 2016

PERU



UNAMBA BC SIGB	
CODIGO SK 01	S 5 T 0 0 1 0 3
FECHA	22 ENE. 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC	
CÓDIGO	MFN
TIMI V 2016 E-2	BIBLIOTECA CENTRAL
FECHA DE INGRESO:	31 MAYO-2016
Nº DE INGRESO:	00448



**MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACIÓN DURANTE LA  
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO MINERO LAS  
BAMBAS**



Jurado evaluador de la tesis intitulado: **“MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACIÓN DURANTE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO MINERO LAS BAMBAS”**.

7-15

Ing. Rodolfo Andrés Matos Ojeda

Presidente



Ing. José Adolfo Cárdenas Catalán

Primer Miembro

UNIVERSIDAD NACIONAL  
MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC  
E. A. P. INGENIERIA DE MINAS

Ing. P. Rubén Zuloaga Candía  
DOCENTE

Pablo Rubén Zuloaga Candía

Segundo Miembro



## **DEDICATORIA**

A mi madre Lucia Panuera Saavedra por haber tenido la responsabilidad de educarme, a mis hermanos Kevin y Laura por motivarme a seguir adelante, a mi novia Geovana por su apoyo constante en mi vida personal y Profesional.

A mis docentes y compañeros de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la “Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac - UNAMBA”.



## AGRADECIMIENTO

A la Empresa FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. a cargo del residente, Ing. Jaime Mego Cabrera, Ing. Franco Emanuel de Vela por darme la oportunidad de desenvolvimiento y desarrollo, durante la Construcción de los Caminos Pioneros en el Proyecto Minero LAS BAMBAS, en el área de Voladura de Rocas.

A los Ingenieros Supervisores de Voladura de la minera, de quienes tuve la oportunidad de recibir sus enseñanzas, apoyo y ejemplo profesional.

A los compañeros de trabajo de la Empresa FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. por compartir sus experiencias y conocimientos adquiridos, dentro del rubro de Voladura.

## CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
RESUMEN .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xiii

### CAPITULO I

#### PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema .....	1
1.1.1 Descripción del Problema.....	1
1.1.2 Formulación del Problema.....	2
1.2 Justificación. ....	2
1.3 Objetivos de la Investigación.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivo Específico. ....	3
1.4 Hipótesis de la Investigación.....	4
1.4.1 Hipótesis General. ....	4
1.4.2 Hipótesis Específicos.....	4
1.5 Sistema de Variables.....	5
1.6 Diseño Metodológico.....	6
1.6.1 Tipo de Investigación.....	6
1.6.2 Nivel de investigación. ....	6
1.6.3 Método de Investigación.....	7



1.6.4	Diseño de Investigación.....	7
1.6.5	Población y Muestra. ....	7
1.6.6	Técnicas e Instrumento de Recolección de Datos.....	8
1.6.7	Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.....	8

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1	ANTECEDENTES. ....	9
2.2	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PROYECTO. ....	11
2.2.1	Ubicación.....	11
2.2.2	Vías de acceso. ....	11
2.2.3	Geología Regional. ....	13
2.2.4	Geomorfología.....	13
2.2.5	Litología de la Zona.....	14
2.2.6	Geología Estructural. ....	14
2.2.7	Geología Local. ....	15

## CAPITULO III

### LA VIBRACIÓN

3.1	FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN. ....	18
3.1.1	Definición de las Ondas de Vibraciones. ....	18
3.1.2	Propiedades Básicas de las Ondas. ....	19
3.1.3	Tipos de Ondas de Vibración. ....	21
3.1.4	La Onda que llega Primero.....	28



3.2	MECÁNICA DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA. ....	29
3.2.1	Proceso de Fragmentación de la Roca. ....	31
3.2.2	Etapas del proceso de Fracturamiento de Rocas. ....	31
3.3	VELOCIDAD PICO PARTÍCULA.....	35
3.3.1	Vibración en Voladura.....	35
3.3.2	Ecuación de la Velocidad Pico Partícula.....	39
3.3.3	Modelo de campo lejano y campo cercano. ....	40
3.3.4	Velocidad a partir de los Factores Geomecánicos.....	45
3.4	NORMATIVA DE VIBRACION INTERNACIONAL Y NACIONAL. ....	48
3.4.1	Normativa de la Comunidad Europea. ....	50
3.4.2	Normativa de la Comunidad Americana. ....	58
3.4.3	Normativa Nacional de Vibración.....	61
3.5	MEDIDAS DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS. ....	63
3.5.1	Medición.....	64
3.5.2	Instrumentación. ....	67
3.6	CONTROLES DE VIBRACIONES.....	76
3.6.1	Vector suma de la Velocidad Pico Partícula PPV.....	78
3.6.2	Calculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica PPVc. ....	79
3.7	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	82

#### CAPITULO IV

#### ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y CREACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO

4.1	ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA.....	90
-----	--	----



4.1.1	Escalador. ....	90
4.1.2	Creación de la Ecuación o Modelo de Vibración. ....	93
4.2	ANÁLISIS DE LA DISTANCIA MÍNIMA DE SEGURIDAD. ....	96
4.2.1	Análisis de la Vibración sobre algunas Normas Internacionales. ....	102
4.2.2	Creación y aplicación de la distancia de seguridad según la norma Alemana DIN 4150. ....	108
4.3	ANÁLISIS DEL CRITERIO DE DAÑO DEL MACIZO ROCOSO. ....	112
4.3.1	Análisis de la velocidad pico partícula crítica. ....	113
4.3.2	Determinación del radio Criterio de Daño del Taladro. ....	117

## CAPITULO V

### RESULTADO

CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIÓN.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	123
ANEXOS.....	125



## ÍNDICE DE TABLA

Tabla N° 1. Definición operativa de las variables e indicadores.....	5
Tabla N° 2. Coordenadas UTM del Tajo Ferrobamba - Las Bambas. ....	11
Tabla N° 3. Buzamiento y Rumbo de los Estratos y Fracturas. ....	15
Tabla N° 4. Diferentes Criterios de la Distancia Escalar. ....	42
Tabla N° 5. Normas Internacionales de Vibración.....	49
Tabla N° 6. Norma Española UNE 22. 381. 93.....	51
Tabla N° 7. Norma Suiza SN 640.312 <sup>a</sup> . ....	54
Tabla N° 8. Norma Portugal NP 2074.....	55
Tabla N° 9. Norma Francesa RT 23.7.1986. ....	56
Tabla N° 10. Norma Alemana DIN 4150 (1999). ....	57
Tabla N° 11. Norma Norteamericana USBM RI8507.....	59
Tabla N° 12. Norma Norteamericana OSM 817.67. ....	61
Tabla N° 13. Norma Nacional Peruana. ....	62
Tabla N° 14. Límite de Vibración para varios tipos de Estructuras. ....	63
Tabla N° 15. Rango de los Parámetros de Vibración.....	66
Tabla N° 16. Criterio de Daño de Holmberg & Persson 1979. ....	80
Tabla N° 17. Criterio de Daño de Hoek & Bray. ....	81
Tabla N° 18. Criterio de Daño de Oriard. ....	81
Tabla N° 19. Criterio de Daño de Bauer & Calder 1971.....	81
Tabla N° 20. Velocidad de cada Componente y PPV. ....	85
Tabla N° 21. Frecuencia asociada a cada Componente y Frecuencia Dominante. ....	87
Tabla N° 22. Distancia, Carga, PPV y Frecuencia Dominante. ....	89
Tabla N° 23. Escalador según el Modelo del Investigador DEVINE. ....	92



Tabla N° 24. Histograma de la Frecuencia de la Partícula.....	96
Tabla N° 25. Histograma de la Velocidad de la Partícula.....	98
Tabla N° 26. Histograma de la Distancia.....	100
Tabla N° 27. Histograma de la Carga.....	101
Tabla N° 28. Propiedades Geomecánicas de la Roca Caliza.....	112
Tabla N° 29. Velocidad Pico Partícula Crítica según el Criterio de Daño.....	114
Tabla N° 30. Relación Distancias & Cargas Operantes.....	115
Tabla N° 31. Radio de Daño por Taladros Individuales.....	117
Tabla N° 32. Radio de Daño por Carga Operante por Voladura.....	117



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Vías de Acceso hacia el Proyecto Fuerabamba. ....	12
Figura N° 2. Vista en planta de la Geología del Tramo 01B.....	16
Figura N° 3. Geología del Proyecto Minero Las Bambas. ....	17
Figura N° 4. Distribución de la Energía no útil de Trabajo en la Voladura. ....	18
Figura N° 5. Compresión y Tensión no Simétrica de una Roca.....	19
Figura N° 6. Esquema de los principales Tipo de Ondas Sísmicas.....	21
Figura N° 7. Onda Longitudinal o Primaria (P). ....	23
Figura N° 8. Ondas Transversal o Secundaria (S).....	24
Figura N° 9. Onda Love (L). ....	25
Figura N° 10. Ondas Rayleigh (R). ....	26
Figura N° 11. Registro de la Onda Interna y Superficial detonacion porTaladro. ....	27
Figura N° 12. Velocidad de onda Interna y Superficial. ....	28
Figura N° 13. Mecanismo de Fragmentación del Macizo Rocoso.....	29
Figura N° 14. Etapas del proceso del Fragmentación de la Rocas.....	31
Figura N° 15. Primera Fase Fracturas Radiales.....	32
Figura N° 16. Segunda Fase Empuje hacia Adelante.....	33
Figura N° 17. Tercera Fase Fragmentación de la Roca.....	35
Figura N° 18. Análisis de la PPV según la Distancia y la Geometría de la Onda Sísmica. .....	39
Figura N° 19. Modelo de Campo Cercano. ....	45
Figura N° 20. Relación de la Tensión de Deformación.....	47
Figura N° 21. Velocidad de Partícula y velocidad de Propagación. ....	48
Figura N° 22. Acelerómetro. ....	70

Figura N° 23. Geófono. ....	72
Figura N° 24. Los 3 componentes del sensor del Sismógrafo.....	75
Figura N° 25. Dirección de arribo al Sensor de la Vibración.....	76
Figura N° 26. Análisis de la Velocidad Pico Partícula Crítica PPVc.....	78
Figura N° 27. Ejemplo del espectro de la Frecuencia para cada Componente.....	88
Figura N° 28. Regresión Lineal de la PPV en función del Escalador. ....	94
Figura N° 29. Potencia convertida por medio Logarítmicos a una Regresión Lineal. ...	94
Figura N° 30. Regresión no Lineal Potencia de la PPV en función del Escalador. ....	95
Figura N° 31. Histograma de Frecuencia para Frecuencia Dominante. ....	98
Figura N° 32. Histograma de Frecuencia para la PPV. ....	99
Figura N° 33. Histograma de Frecuencia para la Distancia. ....	100
Figura N° 34. Histograma de Frecuencia para la Carga Operante. ....	102
Figura N° 35. Valores de PPV y Frecuencia Dominante según norma DIN 4150.....	104
Figura N° 36. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Portuguesa NP 2074. ....	104
Figura N° 37. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Francesa 23.7.1986. ....	105
Figura N° 38. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Española 22 381 93.....	106
Figura N° 39. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Suiza SN 640 3 12. ....	106
Figura N° 40. Intersección de la $F_{Me}$ con los límites de la Norma Alemana DIN 4150. .....	109
Figura N° 41. Relación Distancia vs PPV en la curva de Potencia. ....	111
Figura N° 42. Simulación del Criterio de Daño de la Vibración por Taladro.....	116
Figura N° 43. Simulación de Daño por vibración para diferentes Cargas Operantes. .	118



## RESUMEN

La voladura representa una de las operaciones unitarias de mayor relevancia en toda operación de extracción de mineral. La necesidad es fragmentar la roca de tal modo que haga mínimo el costo combinado de las operaciones de perforación, voladura, transporte y chancado primario de la roca. Producto de esta actividad se produce un daño en el macizo rocoso adyacente al área de la ejecución de la voladura, este material que es fragmentado tuvo como roca predominante a la caliza.

El problema se plantea en la necesidad de presentar el valor más preciso de la ecuación de vibración haciendo referencia a la velocidad pico partícula. Las variables de la ecuación de la velocidad pico partícula se hallaran por medios estadísticos con la ayuda de herramientas como: software, hojas de cálculos, datos geomecánicos y registro sísmico por el sismógrafo. Mediante un ajuste de regresión no lineal (cuadrático) se podrá hallar las incógnitas de una ecuación base de vibración (“k” y “b”) usadas para la predicción de las velocidades pico partícula (VPP), las cuales dependerán de un terreno y circunstancias específicas.

El resultado es reducir las ondas sísmicas mediante el análisis de nuevos diseños de cargas explosivas para no dañar las viviendas colindantes y taludes de los bancos finales de la mina. Para concluir, el hallar los parámetros como el factor de decaimiento y el factor de amplitud de la ecuación de vibración mediante un modelo predictivo de vibración nos permitirá llegar a determinar la distancia mínima de seguridad según normativas de vibración internacionales y la distancia hasta la cual se creara la nueva fractura según el criterio de daño.

## SUMMARY

Repre blasting unit operations claw higher relevance All mineral extraction operation. Necessity is fragmenting the rock so that minimum Make Cost combined drilling, blasting, transport and primary crushing rock. Product of UN activity esta damage occurring in the rock mass adjacent to the area of the execution of the bombing, the this material is fragmented had as predominant limestone rock.

The problem were planted in the need to present the most accurate value of the equation Vibration Referring to peak particle speed. The variables of the equation of the peak speed particle will be found by statistical means with the help of tools such as software, spreadsheets, geomechanical data and seismic recording by the seismograph. By UN fit nonlinear regression (quadratic) it could Finding the unknowns of an equation base Vibration ( "k", "b" and) used for the prediction of the peak SPEEDS particle (VPP), which will depend on the UN ground and circumstances.

The result is m Reduce seismic waves Analysis By New Designs explosive charges not to damage the adjacent houses and embankments of banks finales of the mine. Concluding paragraph, the Find Parameters As the decay factor and factor the amplitude of the vibration equation By Vibration UN predictive model allow us to reach determine S. The minimum safety distance According to International Standards vibration and distance to which the New fracture created according to the criterion of damage.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las Empresas Mineras de Perú y del mundo tienen en su mayoría sus operaciones en la cercanía a las ciudades o poblados, la mayoría de empresas mineras poseen en sus perímetros algún poblado o casa la cual es afectada por las vibraciones del macizo rocoso debido de la actividad minera cercana.

El Proyecto se ubica a una altitud que varía entre los 3800 y 4600 msnm, en dos cuencas hidrográficas (Ferrobamba y Pamputa) que drenan hacia el Río Santo Tomás y Río Vilcabamba, ambos desembocan en el Río Apurímac. El Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A) fue aprobado por Resolución Directoral N° 073-2011 el 7 de marzo del 2010. El Proyecto contempla la explotación de cobre a tajo abierto.

El Proyecto Minero Las Bambas está conformado por seis componentes principales, tal como se indica a continuación: instalaciones de mina, instalaciones de procesamiento (incluye el manejo de relaves), instalaciones de manejo de aguas, instalación de campamentos, línea de transmisión eléctrica, instalaciones portuarias instalaciones que serán operadas por tercero.

Al realizar la voladura para arrancar el macizo rocoso in situ, esta técnica es la más barata a la vez la que le genera mayor producción de material arrancado, superior a otras formas de arranque mecánico del macizo rocoso como lo son: picotón, excavadoras hidráulicas, tractor, rozadoras TBM.



Como consecuencia del uso de la mezcla explosiva para arrancar el macizo rocoso por esta técnica, además de generar otros problemas como: polvo, ruido, proyección de rocas, ondas aéreas y vibración, esto se agrava con vida humana o animales alrededores del proyecto de voladura.

La energía producida por la voladura genera vibraciones del macizo rocoso en el medio circundante donde se realiza la voladura. Estas vibraciones transmiten las ondas a la partícula del macizo rocoso produciendo desplazamiento, velocidad y aceleraciones que pueden registrarse en los aparatos destinados para este fin. Los registros tienen tres características primordiales: amplitud, contenido de la frecuencia y la duración. La dirección de las ondas de vibración es alterada ya sea por fisuras, diaclasas, fallas, otros tipos de estratos de rocas, etc.

Existen varios personajes que estudiaron estos temas y llegaron a formular las ecuaciones que son utilizados para predecir la posible velocidad pico partícula producto de la vibración por la voladura, teniendo como parámetro límites máximos permisibles para las estructuras las Normas de Vibración Internacionales como Nacionales.

El trabajo especial de grado que aquí se desarrolla explica el objetivo de crear un modelo predictivo de Velocidad Pico Partícula PPV, durante la construcción de los caminos pioneros durante el año 2013 hasta abril del 2014. La mina en mención se encuentra en la Etapa de Construcción.

Diseñar un modelo predictivo de vibración, permitiría determinar con mejor precisión la PPV (Peak Particle Velocity) en el proyecto mineros las bambas. Dado que cada



modelo difiere de cualquier otro debido a las características del macizo rocoso y de la eficiencia tipo y condiciones del explosivo. A partir de la determinación de la PPV se puede llegar con el análisis estadístico de los parámetros de la ecuación general de vibración, determinar el rango de distancia en el cual influiría con mayor determinación la vibración afectando está a las viviendas colindantes dentro del área y determinar el rango de daño del macizo rocoso producto de la voladura.

Al final se complementará con las conclusiones, recomendaciones, referencia bibliográfica según el estilo APA y los respectivos anexos del presente trabajo de investigación.



## CAPITULO I

### EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Planteamiento del Problema.

##### 1.1.1 Descripción del Problema.

El crecimiento en la actualidad por la demanda en la producción de los concentrados de los minerales, crea como escenarios el realizar grandes movimientos de volúmenes de roca (Desbroce) para la extracción del mineral. Esta finalidad de la fragmentación del macizo rocoso, conlleva al aumento del uso de materiales explosivos.

El problema se plantea en la necesidad de presentar el valor más preciso de la ecuación de la velocidad pico partícula o también llamada Ley de Transmisividad. Las voladuras generan ondas de vibración mecánica las que se transmiten por el macizo rocoso produciendo molestias a las personas y daños a las estructuras (casas, edificios, industrias puentes, etc.)

La ejecución de la construcción de los caminos pioneros del tramo 01 la cual era para comunicar el Tajo Ferrobamba hacia la el botadero para la construcción del dique de este. Durante su construcción se generaron las vibraciones las cuales se tendría en cuenta debido a no dañar las estructuras de las viviendas colindantes ya que se encontraban dentro de los 300 m de radio de influencia, esto obligaba a tomar en las consideraciones en el diseño de carga del protocolo de voladura.

Las variables del presente trabajo de investigación de la velocidad pico partícula nos permitirá llegar predecir el posible daño de las diferentes diseños de cargas explosivas,

de esta manera satisfacer los límites establecidos por las normas de vibraciones durante la construcción de los caminos pioneros en el proyecto minero Las Bambas.

## **1.1.2 Formulación del Problema.**

### **1.1.2.1 Problema General.**

- ❖ ¿De qué manera influye la vibración producto de la voladura en el modelo predictivo durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera minero Las Bambas?

### **1.1.2.2 Problemas Específicos.**

- ¿Cuál es el valor del factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?
- ¿Cuál es la distancia mínima que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más riguroso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?
- ¿Cuál es la distancia hasta la cual se creara la nueva fractura en el macizo rocoso según la velocidad pico partícula crítica para los diferentes diseños de carguío ejecutados durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?

## **1.2 Justificación.**

La exposición de las estructuras de las viviendas a la vibración en mina es muy común ya que la actividad de la voladura es cotidiana por la necesidad de la fragmentación del macizo rocoso.

Quiero determinar los parámetros de la ecuación de la velocidad pico partícula como es el factor de atenuación y el factor de amplitud, la distancia mínima a la que debería encontrarse la viviendas para no ser afectadas por la vibración mecánica la cual se transporta por el macizo para no producir daños (viviendas, edificaciones, industria, etc.).

Los resultados de la velocidad pico partícula nos dará un mayor grado de confiabilidad en el resultado de la velocidad pico partícula del modelo predictivo de vibración o llamado también ley de transitividad.

El modelo predictivo de vibración podrá ser utilizado por la empresa para realiza la evaluación o prevenir los daños ya sea de los taludes o las estructuras de las viviendas ya que se encuentran colindantes a la ejecución de este proyecto como es los caminos pioneros en el proyecto minero Las Bambas.

### **1.3 Objetivos de la Investigación.**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

- ❖ Analizar la influencia de la vibración producto de la voladura en el modelo predictivo durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera minero Las Bambas.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Determinar los parámetros como el factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.

- Encontrar la distancia mínima a la que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más riguroso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.
- Calcular la distancia hasta la cual se creara la nueva fractura en el macizo rocoso según la velocidad pico partícula crítica para los diferentes diseños de carguío ejecutados durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.

#### **1.4 Hipótesis de la Investigación.**

##### **1.4.1 Hipótesis General.**

- Si la vibración tiene influencia en el modelo predictivo entonces se tendrá una mejor evaluación de los daños en el macizo rocoso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros en el tramo 01 del proyecto minero Las Bambas.

##### **1.4.2 Hipótesis Específicos.**

- Si obtenemos los parámetros como el factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula entonces el valor será más preciso para una determinada zona del macizo rocoso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.
- Si encontramos la distancia mínima a la que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más rigurosa entonces podremos dar un límite de distancia para tomar las precauciones y no generar daños a la estructura colindantes al área de voladura durante la etapa de

construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas. Si hallamos la distancia hasta la cual se creara la nueva fractura según el criterio de daño de la velocidad pico partícula crítica entonces este servirá para tomar la decisión del diseño de carguío ejecutados tomando en cuenta los daños al talud y a las estructuras de las viviendas durante la construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.

### 1.5 Sistema de Variables.

#### a. Variable Dependiente.

Y: Modelo Predictivo

#### b. Variable Independiente.

X: Vibración durante la etapa de construcción del proyecto minero Las Bambas.

Tabla N° 1. Definición operativa de las variables e indicadores.

Variables	Conceptual	Operacional	Indicadores
<b>Dependiente</b>			
- Modelo Predictivo.	El Modelo Predictivo es una técnica para determinar los parámetros de la ecuación que influyen en el resultado de la Ley Transmisividad.	Esta referido a la aplicación de la ecuación de la Ley de Transmisividad de las ondas sísmicas.	-Velocidad pico partícula -Factor de amplitud y Decaimiento. -Distancia mínima de seguridad. -Distancia hasta la cual creara la nueva fractura.



<b>Independiente</b>			
- Vibración durante la etapa de construcción del proyecto minero Las Bambas.	La vibración es la transmisión de la energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio.	Esta referido a la ejecución de movimientos cíclicos de tensión y compresión con con referencia a un punto central	-Carga Operante. -Dist. del sismógrafo. -Frecuencia. -Resist. a la Tracción. -Velocidad Sónica del Macizo Rocoso. -Módulo de Young.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Se elabora la matriz de consistencia de la investigación según el formato de Bruno Enrique Bravo Chipa como se muestra en el (anexo n° 01).

## **1.6 Diseño Metodológico.**

### **1.6.1 Tipo de Investigación.**

Según Rivera Crisostomo (2009) afirma que “la investigación se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren” (p.57). Para nuestro caso este será de Investigación aplicada.

### **1.6.2 Nivel de investigación.**

Según Humberto Alfaro (2012) menciona que “el investigador conoce y da a conocer las causas o factores que han dado origen o han condicionado la existencia y naturaleza del hecho o fenómeno en estudio” (p.16). El nivel para esta investigación es el Explicativo.

### **1.6.3 Método de Investigación.**

Según Francisco Cari I. (2010) señala que “el estudio se realiza mediante la observación, registro y análisis de las variables intervinientes en la investigación sobre modelos y ambientes artificialmente creados para facilitar la manipulación de la misma” (p.39).

El método es el Experimental de contexto experimentos de campo.

### **1.6.4 Diseño de Investigación.**

Este tipo de diseño “se basan e informaciones o datos primarios obtenidos directamente de la realidad” (Rivera Crisostomo, 2009, p.65). Diseño de campo (experimental).

### **1.6.5 Población y Muestra.**

#### **a. Población.**

Se define que “Una población es un conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones” (Selltiz et al., 1980).

En el caso de nuestra investigación, la población estará conformada por las vibraciones generadas por las voladuras durante la etapa de construcción del proyecto minero Las Bambas.

#### **b. Muestra.**

La muestra es un subgrupo de la población. Digamos que “un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definidos en su características al que llamamos población” (Hernandez Sampiere, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2010. p.175).



La vibración generada por la detonación durante la etapa de construcción de los caminos pioneros del Tramo 01 en el proyecto minero Las Bambas generó 34 registros.

#### **1.6.6 Técnicas e Instrumento de Recolección de Datos.**

##### **a. Técnica.**

Según Hernández R. & et. al. (2010) aplica que “la principal técnica empleada en la investigación fue la del análisis documental” (p.433).

##### **b. Instrumentos de Recolección.**

- Se utilizó el Geófono para la recolección de los datos.

#### **1.6.7 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.**

##### **a. Procesamiento.**

- ✓ Ejecución del programar en computador: Blastware
- ✓ Elaboración del programa de análisis: Excel

##### **b. Tipo de análisis de datos.**

Estadística descriptiva

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES.

Por las pesquisas bibliográficas existentes, internet eventos realizados en congresos y otros a nivel nacional e internacional. Se puede mencionar los siguientes autores que tiene correlación en el estudio de la vibración por efecto de las voladuras como son:

Segarra C., Pablo. (2004). *Análisis experimental de la fragmentación, vibración y movimiento de la roca en Voladura a Cielo Abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, ESPAÑA. Se determinó la velocidad pico partícula de la ecuación llamado ley de atenuación. Mediante el criterio de la frecuencia dominante producto de la ejecución de las voladuras.

Piñas E., Yuri A. (2007). *Aplicación del principio de la Velocidad Pico Partícula para minimizar el daño al macizo rocoso, utilizando Tecnología Electrónica*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, PERÚ. Su objetivo era minimizar los costos en las operaciones unitarias de perforación y voladura de rocas se llegó a la conclusión de encontrar los algoritmos de la velocidad pico partícula máxima de acuerdo al criterio de Devine.

Orihuela C., Stefanie M. (2009). *Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de Vibraciones en una mina Modelo*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, PERÚ. La cual tenía como objetivo desarrollar un modelo predictivo que pueda ser

usado como guía para futuras voladura en la mina modelo y la conclusión que se llegó fue de la de encontrar los parámetros de la ecuación de vibración como son la constante y exponente de la variable independiente.

Contreras P., Willy J. (2009). *Selección del Explosivo adecuado y Carga máxima por retardo usando el Monitoreo, Modelamiento y Análisis de Vibración*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, PERÚ. Tenía como objetivo investigar el campo de las vibraciones causadas por el trabajo de explotación de minerales mediante el acopio y análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial este autor llegó a la conclusión que las técnicas constituyen una herramienta para el diagnóstico, ya que el grado de interacción entre las variables de una voladura es en definitiva el rendimiento general del diseño.

Giraldo I., Fernando (2010). *Control de Vibraciones para casas de Tierra en el Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, PERÚ. Su objetivo era la de analizar las vibraciones causadas por la voladura mediante el análisis e interpretación de los datos, llegando a la conclusión que el potencial de efectos perjudiciales de una voladura depende de diversas características de las vibraciones como la amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencia.

Nuestro plan de tesis intitulado “Modelamiento Predictivo de Vibración durante la Etapa de Construcción del Proyecto Minero Las Bambas” tiene como objetivo principal determinar un modelo predictivo producto de la vibración.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PROYECTO.

### 2.2.1 Ubicación.

El proyecto se ubica en el departamento de Apurímac, provincia de Cotabambas, distrito de Challhuahuacho, entre las comunidades Ferrobamba, Comerccaca y Jahuapaylla, se encuentra a una altitud entre los 3700 y 4600 msnm.

La construcción de los caminos pioneros se realizaron para llegar al tajo de Ferrobamba. Las voladuras se realizaron en los tramos 01, 02, 03, 04 y 05 iniciándose el Pre Minado a la fecha para nuestro estudio usaron los registros del tramo 01.

Tabla N° 2. Coordenadas UTM del Tajo Ferrobamba - Las Bambas.

No.	Salida: Coordenadas Geográficas						Entrada: Coordenadas UTM			
	Longitudes			Latitudes			Coordenada X	Coordenada Y	Zona	Hemisferio
1	-72°	-18'	-51.242"	-14°	-6'	-18.1261"	790,000.00	8,439,000.00	18	S
2	-72°	-18'	-52.003"	-14°	-5'	-13.0962"	790,000.00	8,441,000.00	18	S
3	-72°	-16'	-55.413"	-14°	-5'	-11.7891"	793,500.00	8,441,000.00	18	S
4	-72°	-16'	-54.642"	-14°	-6'	-16.8173"	793,500.00	8,439,000.00	18	S

Fuente. D & E Desarrollo y Ecología S.A.C.

### 2.2.2 Vías de acceso.

Desde Lima a Cusco por avión para continuar por carretera asfaltada de Cusco –Anta – Chinchaypuccllu (Cotabambas) - Cotabambas - Tambobamba - Challhuahuacho la distancia aproximada con referencia a Cusco hasta la zona de estudio es de 220 Km y el tiempo de recorrido en vehículo se estima en 6 horas.

Otra vía para acceder a la zona es usando la carretera asfaltada Lima-Nazca-Puquio-Abancay, debiéndose tomar un desvío de carretera afirmada antes de llegar a Abancay, para pasar por la provincia de Grau. Con referencia a Abancay se puede ir por Lambrama - Chuquibambilla (provincia de Grau) - Vilcambamba - Progreso (Provincia de Cotabambas) - Challhuahuacho. Todo este recorrido en un tiempo de Aprox. 6 horas y de una distancia de 220 km.

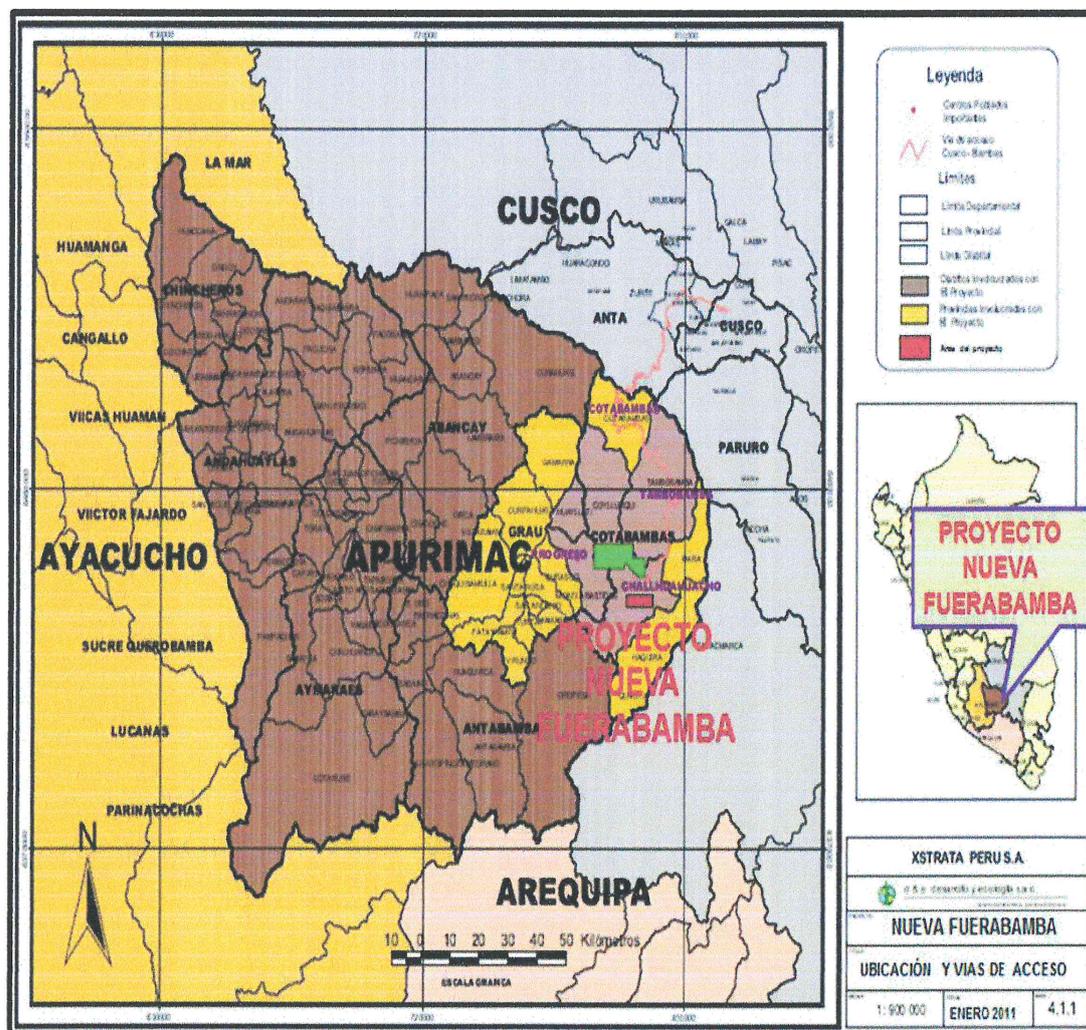


Figura N° 1. Vías de Acceso hacia el Proyecto Fuerabamba.

Fuente: D & E Desarrollo y Ecología S.A.C.

### 2.2.3 Geología Regional.

El terreno se ubica entre en la cordillera occidental el altiplano de las regiones de Ayacucho, Apurímac, Cusco y Puno. Está relacionada con Granitoides Dioríticos a Granodioríticos del batolito de Andahuaylas-Yauri del eoceno-oligoceno, emplazados en las condiciones transpersonales (Carlotto 1999, Perello et al 2003) controlados, por los sistemas de fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas-Totos-Chincheros-Lipaca y Abancay-Condoroma-Caylloma. Los intrusivos intermedios a ácidos están relacionados con la mineralización Cu-Mo (Au) y en contacto con secuencias carbonadas del Albiano-Turoniano desarrollan cuerpos de Skarn de Cu-Zn. Los intrusivos básicos están relacionados con la mineralización es de Cu-Fe-Au que se presenta a manera de cuerpos, el contacto con secuencias carbonatadas del Albiano-Turoniano y vetas principales de Au-Cu en los intrusivos.

Las edades de la mineralización están entre 42 a 30 Ma., los el terreno está enmarcado entre afloramientos rocosos de tipo volcánico y afloramientos de rocas sedimentarias de tipo arenisca cuarzosa pertenecientes al terciario, que están en contacto con el intrusivo y con depósitos de material coluvial y glacial de tipo morrena pertenecientes al cuaternario reciente, en los extremos Norte y Sur del área se tiene pequeños afloramientos de tobas volcánicas y depósitos de material aluvial según (INGEMMET, 2009).

### 2.2.4 Geomorfología.

El terreno está formado por algunas colinas rocosas de suave pendiente (30° y 40°) y unas terrazas aluviales contiguas a las quebradas y cursos de agua cuyo drenaje va de

sur a norte. Suave pendiente (6 a 15° bajando en dirección Este) al pie de una ladera rocosa, topografía ondulada, con pendientes suaves (menores a 15°), en el extremo Norte. Los diferentes procesos de erosión glacial han dado como resultado los tipos de valles en “U”.

### 2.2.5 Litología de la Zona.

En el lugar se aprecian los siguientes tipos de suelo y roca:

- **Depósitos Aluviales:** Son redondeados a subredondeados, los cuales nos indica un cierto grado de transporte y se ubican en las terrazas aluviales.
- **Depósitos Glaciares:** Se les ubica en la parte central de la zona. Se caracterizan por presentar materiales sub angulares y heterogéneos.
- **Depósitos Coluviales:** Se les ubica en las partes bajas de las colinas y están formados por fragmentos sub angulares y heterogéneos.
- **Areniscas Cuarzosas:** Son rocas sedimentarias formadas en su mayoría por granos de cuarzo y se les ubica fuera del área de explotación, hacia las parte Este y parte del Oeste.
- **Toba Rioltica:** consiste de un material volcánico muy poroso y se le ubican fuera del área de explotación en los extremos Norte y Sur de la zona.
- **Cuarcita:** son rocas metamórficas formada en su mayoría por el cuarzo, la que le da, la propiedad de ser muy abrasiva.

### 2.2.6 Geología Estructural.

Los Estratos fracturas y fallas encontradas tienen las siguientes características:



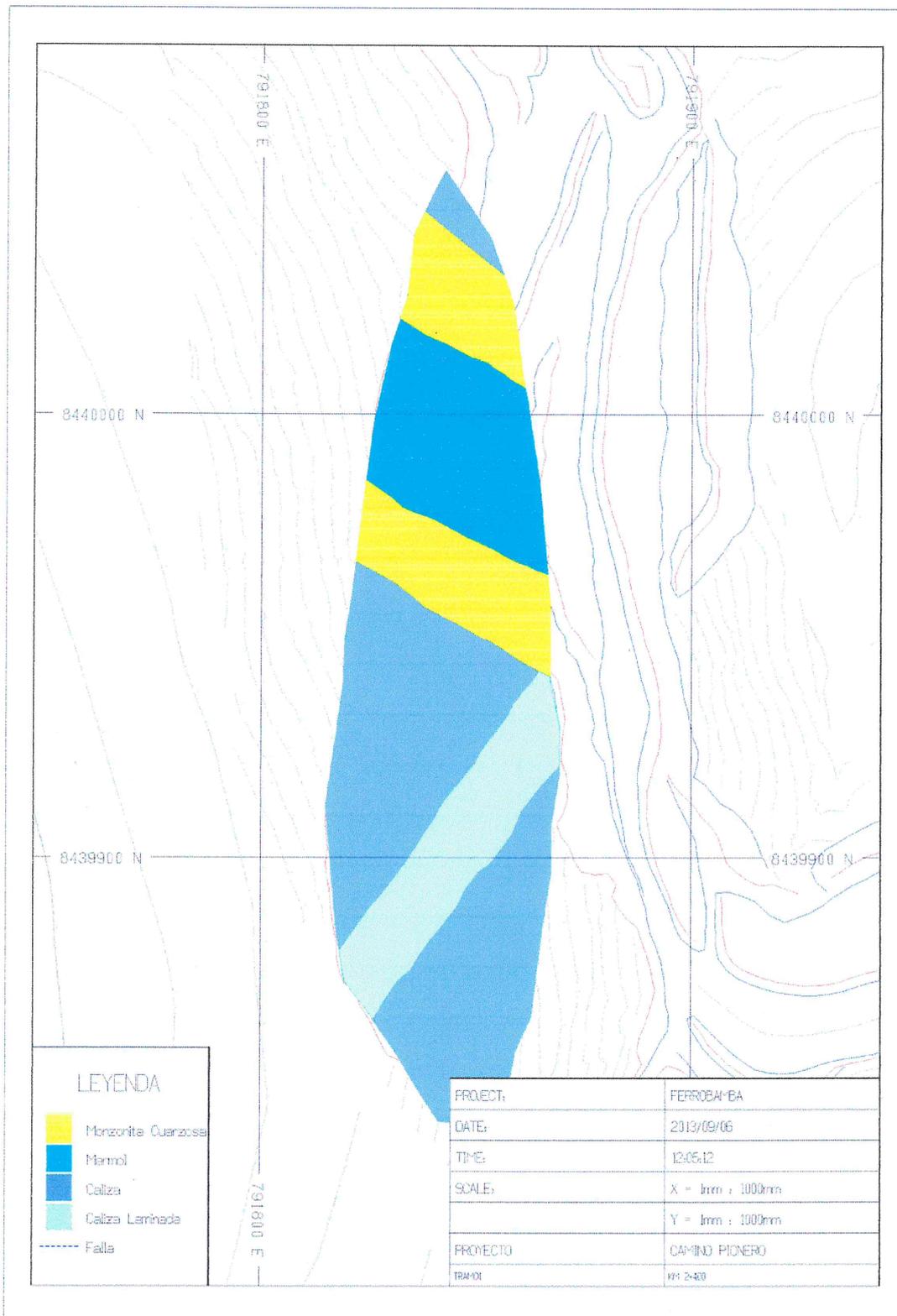
**Tabla N° 3.** Buzamiento y Rumbo de los Estratos y Fracturas.

Ubicación	Estructura	Rumbo	Buzamiento
cuarcita	Estratos	N 30° E	75° SE
		N 44° E	78° SE
	Fracturas	S 48° E	46° SO
		EO	60° N

**Fuente:** Elaboración Propia.

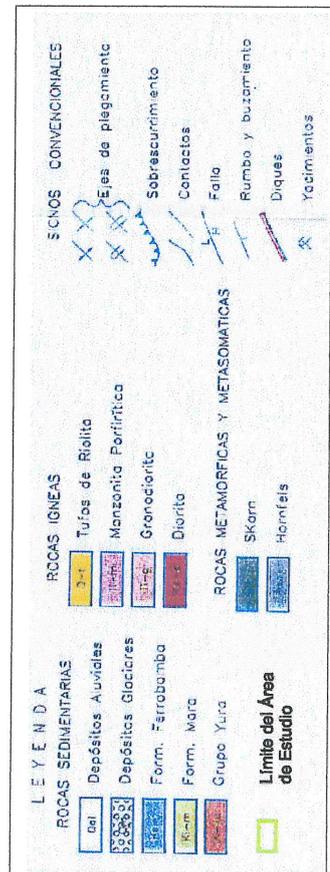
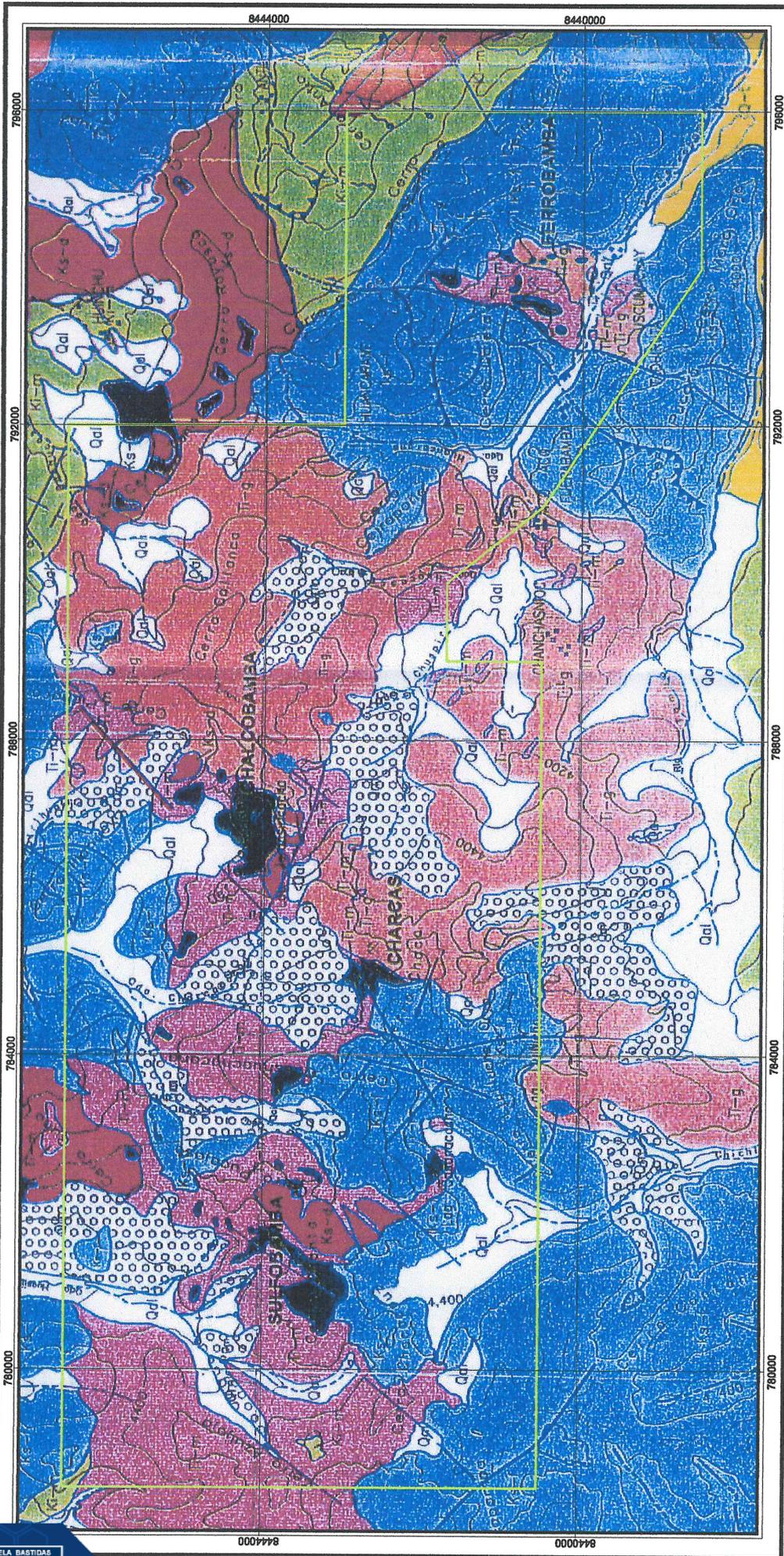
### 2.2.7 Geología Local.

La roca predominante durante la ejecución del camino pionero tramo 01 en el proyecto minero Las Bambas es la Caliza además de la existencia de otro tipo de rocas como la monzonita y el mármol en menor proporción, se muestra en la [figura n° 02](#). La velocidad de propagación de la caliza es de 4000 a 6000 m/s y de la dolomita esta entre 5000 a 6000 m/s según lo mencionado en el Tratado de Geofísica Aplicada (C. Figueroa, s.f.) Unidad estratigráfica del *grupo pucara* esencialmente calcáreo con intercalaciones de evaporitas, además las calizas se intercalan con capas de lutitas oscuras laminadas y generalmente endurecidas. Las evaporitas se presentan intercaladas a depósitos de halitas y calizas dolomíticas. La *formación Ferrobamba* está constituida por calizas fosilíferas asociadas con dolomitas. En todos los niveles abundan cherts negros o marrón es paralelo y estratificado.



**Figura N° 2.** Vista en planta de la Geología del Tramo 01.

**Fuente:** Área de P&V del Proyecto Minero Las Bambas.



<b>XSTRATA PERU S.A.</b>	
d & e de desarrollo y ecología s.a.ó.	
CONSEJORES AMBIENTALES	
PROYECTO:	
<b>LAS BAMBAS</b>	
TITULO:	
<b>GEOLOGIA</b>	
ESCALA:	FECHA:
1: 50 000	Noviembre 2004
MAPA:	4.2.1

Fig. N° 03



## CAPITULO III

### LA VIBRACIÓN

#### 3.1 FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN.

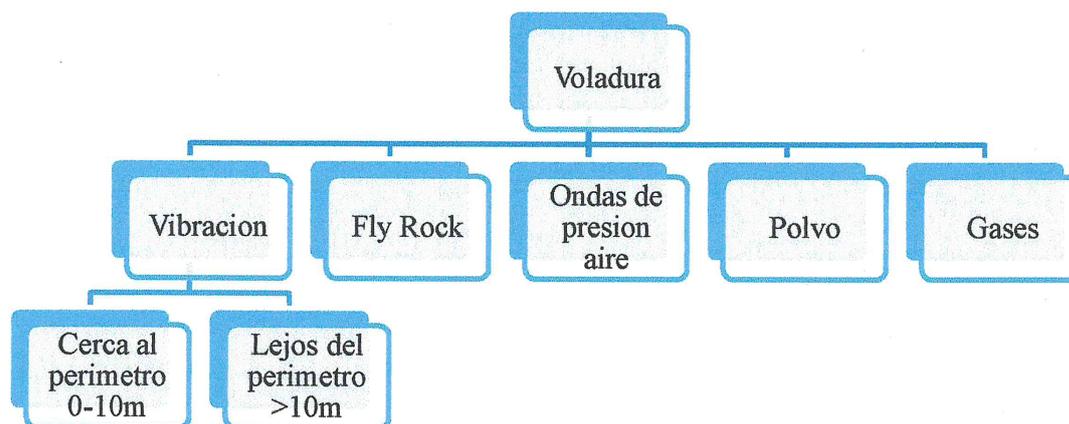


Figura N° 4. Distribución de la Energía no útil de Trabajo en la Voladura.

Fuente: Voladura Controlada teoría y aplicaciones (Carlos Agreda U., 2001, p.15).

##### 3.1.1 Definición de las Ondas de Vibraciones.

La definición mencionada es que “las vibraciones generadas por la voladura son movimientos cíclicos que ocurren dentro del macizo rocoso, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión” (DynoConsult, 2009, p.01). La detonación de un explosivo contenido en un taladro localizado de un macizo rocoso genera en forma casi instantánea del tiempo una gran cantidad de volúmenes de gases a alta temperaturas y elevadas presiones.

La aplicación brusca de estas presiones tan elevadas sobre las paredes del taladro simula un choque o impacto brusco, provocando en cada punto del macizo deformaciones axiales y tangenciales en diferentes direcciones. “La intensidad de esta onda vibratoria

disminuye con la distancia, ya que la energía transmitida a la roca se debe distribuir en una superficie cada vez mayor” (Sanchidrian & Muñiz, 2000).

Como es de esperarse el explosivo trabaja con una determinada eficiencia, nos muestra que no toda la energía es utilizada para causar rotura sino un porcentaje de esta es liberada al ambiente propagándose a través del macizo rocoso, napa freática y aire; desplazándose a diferentes velocidades (Anexo n° 02).

### 3.1.2 Propiedades Básicas de las Ondas.

Según DynoConsult (2009) menciona que “las propiedades de una onda de vibración se refieren a las características del movimiento del suelo y los principales parámetros son: desplazamiento, velocidad y aceleración” (p.10).

$$Y = A * \text{sen}(wt + \phi) = A * (2\pi f) \quad 3.1.1$$

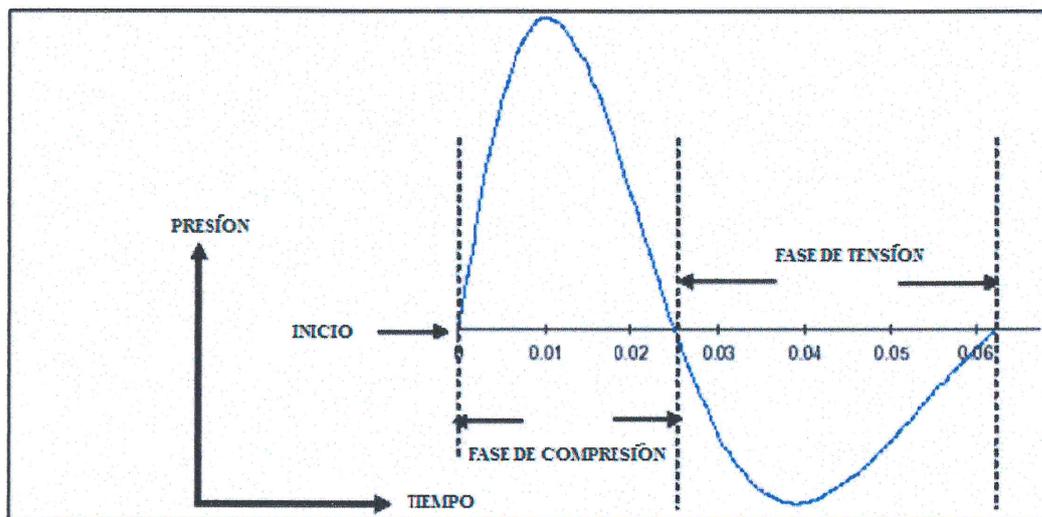


Figura N° 5. Compresión y Tensión no Simétrica de una Roca.

Fuente: Centro de Innovación Tecnológico de Explosivos de Enaex (CINTEX).

Los Elementos fundamentales de una onda de vibración pueden definirse como sigue:

- *Desplazamiento.*- es la distancia que las partículas de roca se mueven o se desplazan de una posición y es medida en (pulg o mm).
- *Velocidad.*- la velocidad a la cual las partículas de roca se mueven a partir de su posición y es medida frecuentemente en (pulg/s o mm/s).
- *Aceleración.*- es el coeficiente de velocidad con el cual la partícula cambia su movimiento. La fuerza de la vibración de la partícula es proporcional a su aceleración y es medido en término de gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

El movimiento de una onda armónica simple, el periodo y la frecuencia son recíprocos.

La amplitud de este movimiento ondulatorio disminuye a medida que nos alejamos del punto principal de detonación según.

La velocidad instantánea (v) y la aceleración (a) son respectivamente la primera y segunda derivada de la ecuación 3.1.

$$V = \frac{dy}{dt} = A * w * \cos(wt) \quad 3.1.2$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A * w^2 * \text{sen}(wt) \quad 3.1.3$$

$$w = 2\pi * f = 2\pi * \left(\frac{1}{T}\right) \quad 3.1.4$$

$$\lambda = Vc * T = Vc * \left(\frac{1}{f}\right) \quad 3.1.5$$

Dónde:

Y: desplazamiento o longitud de onda en (mm).

V: velocidad de partícula (mm/s).



a: aceleración ( $\text{mm/s}^2$ ).

w: es la frecuencia angular del movimiento ( $2\pi f$ ).

t: es el tiempo, en (s).

$\phi$ : es la fase inicial e indica es estado de oscilación o vibración (o fases) en (rad/s)

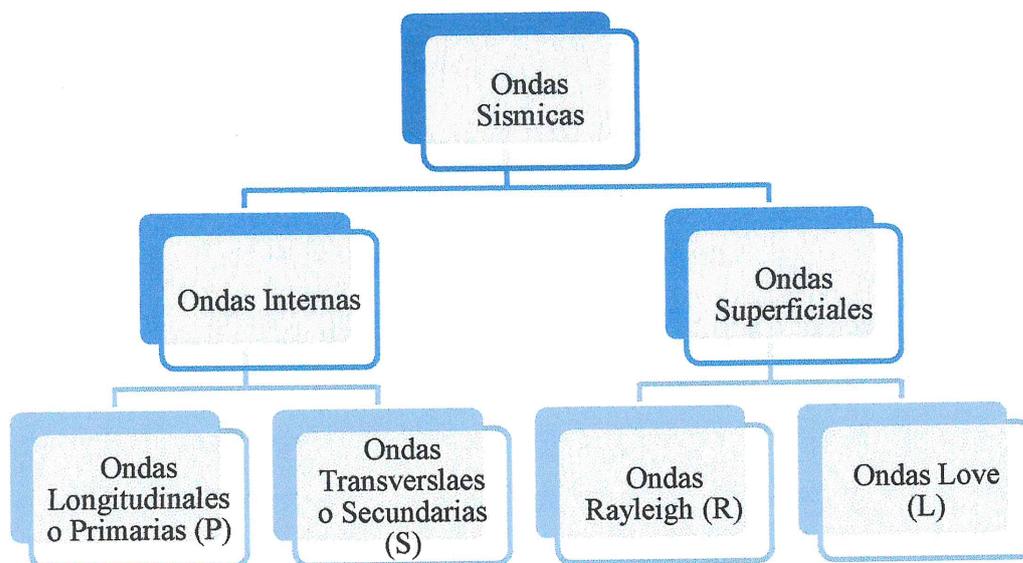
A: amplitud máximo, máximo valor que alcanza la oscilación.

T: periodo de tiempo para oscilación completa (s).

f: frecuencia oscilaciones que ocurren en un segundo (Hz.)

### 3.1.3 Tipos de Ondas de Vibración.

El fenómeno de la vibración por efecto de una voladura busca ser descrito por algunas ecuaciones clásicas de ondas elásticas sin embargo, aunque hasta la fecha es el modelo simplificado que mejor se adecúa para el análisis de este fenómeno. Estos cálculos no son totalmente confiables debido a ciertos efectos como atenuación, dispersión, superposición y cambio de longitud de onda.



**Figura N° 6.** Esquema de los principales Tipo de Ondas Sísmicas.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Básicamente podemos separar en dos grupos los tipos de ondas elásticas como son: Las ondas internas o de volumen y las ondas de superficie.

Se puede considerar, a efecto de las vibraciones en voladura, solo nos interesa la propagación de la onda en la zona exterior o elástica en torno al barreno, y dentro de ellas las únicas ondas significativas que transmiten resultan ser las ondas elásticas de baja energía (Agreda Uriarte, 2013, p.27).

#### **A. Ondas Internas.**

Son también llamadas ondas de cuerpo u onda de volumen las cuales se propagan por el interior del macizo rocoso. Dentro de este grupo encontramos a: las ondas Longitudinal y las ondas Transversales.

##### **a. Ondas primarias (P).**

Son también llamada onda longitudinal, son ondas de compresión y dilatación en la dirección de la propagación de la onda. Su velocidad es mayor que los demás tipos de onda y pueden transmitirse por material sólido, líquido y gaseoso.

La velocidad de propagación las ondas "P" en un medio isotrópico y homogéneo es: válida para coeficiente de Poisson ( $u$ ):

$$u = 0.25$$

$$V_p = 1.732 * V_s \quad 3.1.6$$



Si el Coeficiente de Poisson es diferente al indicado anteriormente.

$$V_p = \sqrt{\left(\frac{K+4\mu/3}{\rho}\right)} \quad 3.1.7$$

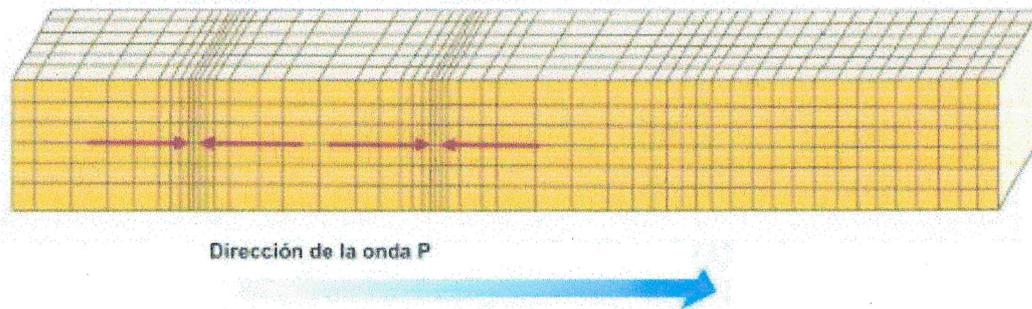
Dónde:

$V_p$ : velocidad de onda longitudinal.

$K$ : es el módulo de incompresibilidad.

$G$ : módulo de corte rigidez.

$\rho$ : densidad de roca o medio el cual se propaga.



**Figura N° 7.** Onda Longitudinal o Primaria (P).

**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (Carazo, Nicolas, 2012).

<http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

#### **b. las ondas Secundarias (S).**

Llamadas también ondas de cizalladura o transversales, caracterizadas por provocar la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección de la propagación de la onda. Estas ondas son las que producen mayor parte de los daños durante los movimientos sísmicos. Su velocidad es menor y no se transmite por el medio solo

sólidos puesto que su existencia depende de módulos de corte o de la habilidad del material transmisor para resistir cambio de forma.

Su velocidad de propagación de las ondas S en medio isotrópicos y homogéneo es:

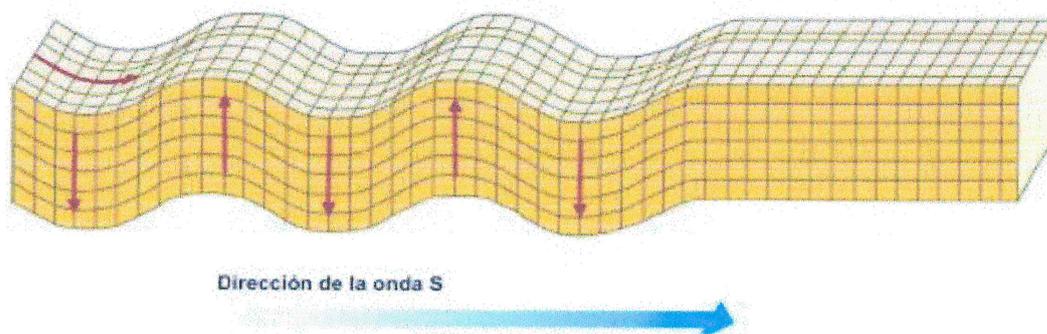
$$V_s = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} \quad 3.1.8$$

Dónde:

$V_s$ : velocidad de onda transversal.

$G$ : módulo de corte rigidez.

$\rho$ : densidad de roca o medio el cual se propaga.



**Figura N° 8.** Ondas Transversal o Secundaria (S).

**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (Carazo, Nicolas, 2012).

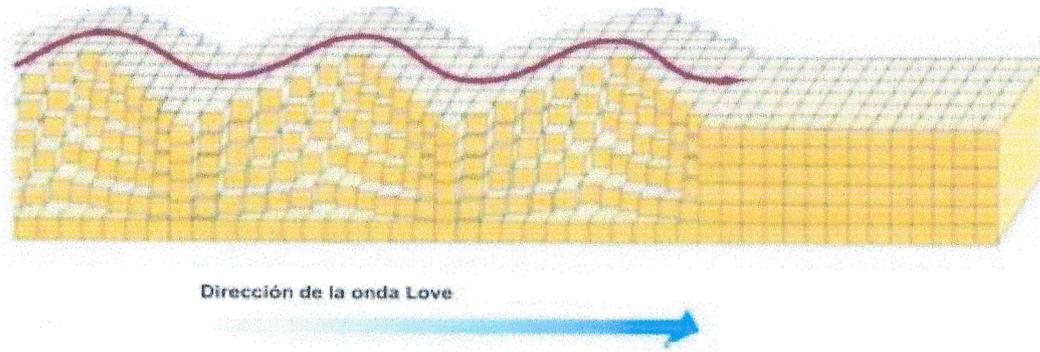
<http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

### **B. Ondas de Superficie.**

Las cuales se transmite únicamente por la superficie del macizo. Dentro de este grupo tenemos: ondas Love y ondas Rayleigh.

**a. Ondas Love (L).**

Son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie, se denomina en honor así al matemático neozelandés A.E.H. la velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad S y ligeramente superior la velocidad de las ondas R.



**Figura N° 9.** Onda Love (L).

**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (Carazo, Nicolas, 2012).

<http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

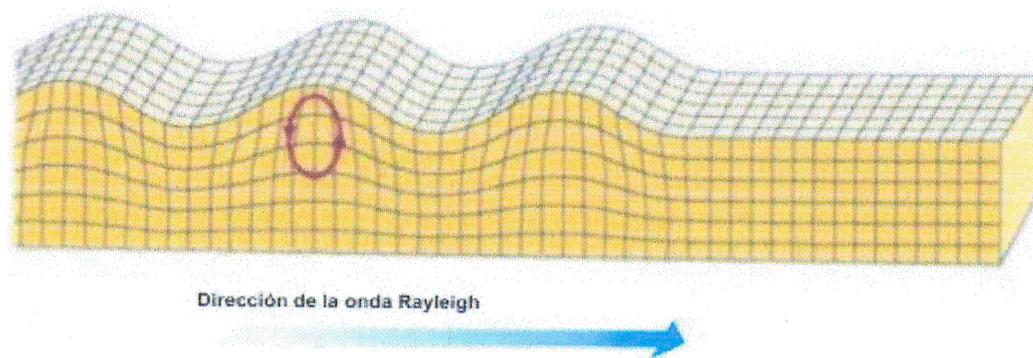
**b. Ondas Rayleigh (R).**

Estas ondas fueron predichas por Lord Rayleigh Son ondas de superficie que producen un movimiento elíptico retrógrado en el suelo y tienen como efecto la compresión, dilatación y cizalla. La existencia de estas ondas fue predicha por Lord Rayleigh en 1985. Son ondas más lentas que las ondas del cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de onda S.

Se puede afirmar que la velocidad de la onda Rayleigh es para un coeficiente de Poisson de:

$$u = 0.25$$

$$Vr = 0.9 * Vs \qquad 3.1.9$$



**Figura N° 10.** Ondas Rayleigh (R).

**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (Carazo, Nicolas, 2012).

<http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

Una característica principal de las ondas de superficie es que poseen frecuencias más bajas que las de volumen, siendo la onda R la más común y con mayor energía transportada, por lo que representa un mayor peligro para las estructuras.

Los diversos estudios realizados han demostrado que la energía sísmica de alta frecuencia es absorbida más rápidamente que la de baja frecuencia, de modo que la energía contenida en las ondas sísmicas estará más concentrada en intervalos correspondientes a bajas frecuencia a medida que nos alejamos del foco generador. A pesar de todo lo dicho, hay que tener presente que en los análisis de vibraciones no suele llegarse a distinguir entre si los diferentes tipos de onda que llegan al geófono (Pascual de Blas, 2000).

La velocidad de la onda varía desde unos 1500 hasta algo más de 6000 m/s para la mayoría de las rocas; si la roca está meteorizada o muy fisurada esta puede ser menor; en los suelos la velocidad está entre 150 y unos 1300 m/s (Sanchidrian & Muñiz, 2000).

La velocidad de la onda interna y superficiales están relacionadas de la siguiente manera:

$$V_{Primaria} > V_{Secundaria} > V_{love} > V_{rayleigh}$$

Mientras que en la amplitud (A) de las ondas, en muchos casos corresponde el orden inverso:

$$A_{rayleigh} > A_{love} > A_S > A_P$$

En el grafico siguiente podemos observar en donde se muestran las ondas tanto la primarias, secundaria y las superficiales. Mediante este grafico podemos analizar los registros obtenidos de la voladura del modelo y de las pruebas elementales de onda.

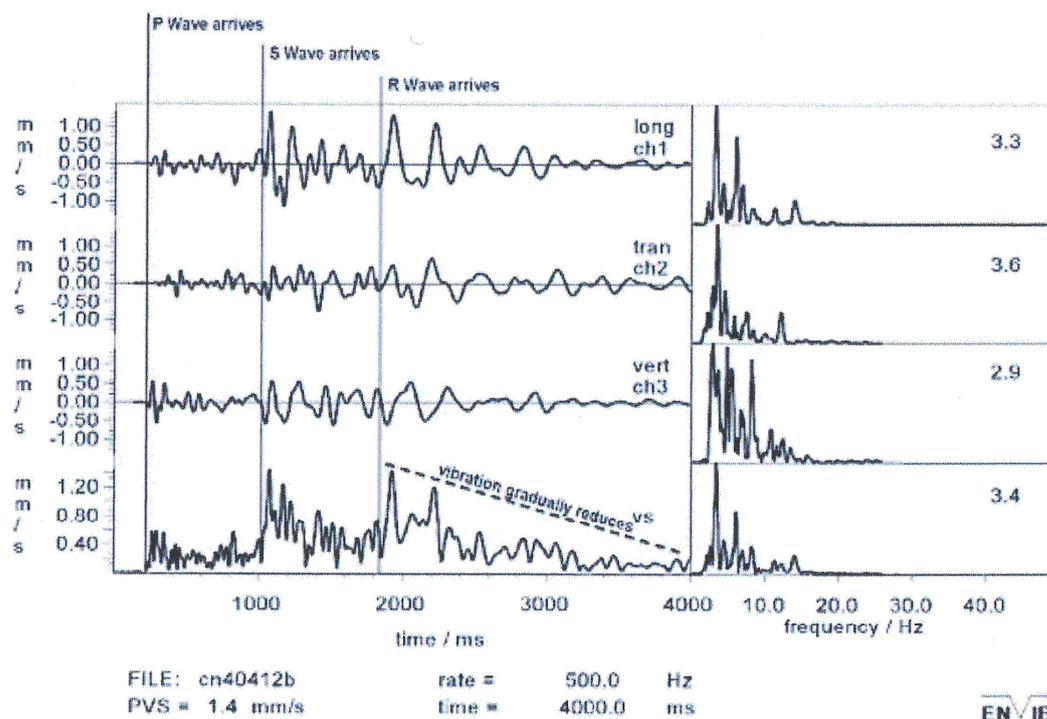


Figura N° 11. Registro de la Onda Interna y Superficial detonacion por Taladro.

Fuentes: Richards & Moore, (2005).

### 3.1.4 La Onda que llega Primero.

La primera onda que llega al geófono será siempre la onda (P), ya que esta de todo los tipo de onda es la que viaja más rápido (30 a 50% que las ondas S), sin embargo esta puede no ser la onda con mayor amplitud, de tal manera que no siempre es fácil de identificar. La siguiente figura presenta dos ondas la primera indica una arribo destacado de la onda siendo su tiempo de llegada y amplitud fácil de determinar (Agreda Uriarte, 2013, p.29).

La segunda muestra una diminuta llegada de la primera onda, donde se dificulta determinar el tiempo de arribo y su amplitud. Hay que tener presente cuando la onda (P) pasa por un material altamente fracturado su amplitud puede ser muy pequeña y otra onda que realiza un recorrido más largo a través de una roca más competente llegara con pequeños atrasos y con la amplitud mucho mayor.

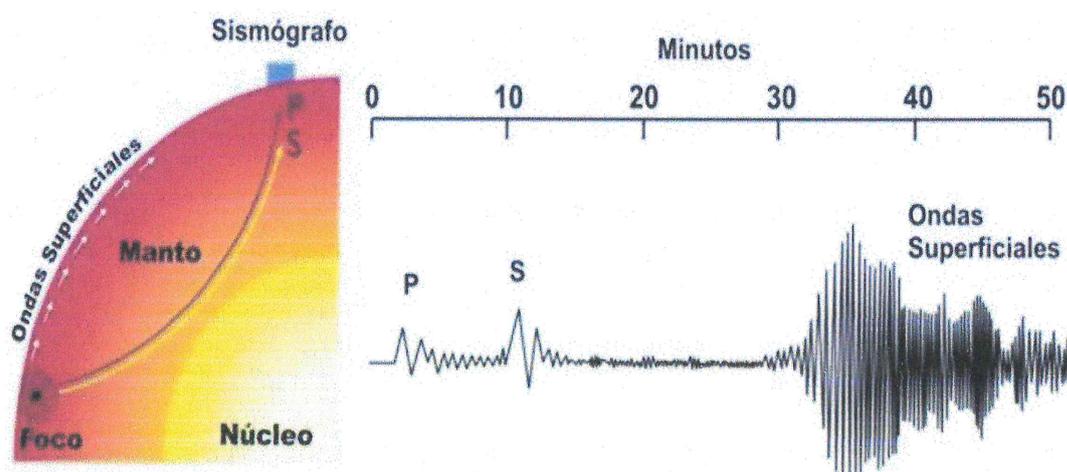


Figura N° 12. Velocidad de onda Interna y Superficial.

Fuente: Intervención Técnicas en Catástrofes (Carazo, Nicolas, 2012).

<http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

### 3.2 MECÁNICA DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA.

La fragmentación de las rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y la consecuente respuesta de la masa de la roca circundante involucrando factores de tiempo energía termodinámica onda de presión mecánica de rocas y otros en un rápido y complejo mecanismo de interacción (EXSA, s.f., p.17).

Una explicación sencilla, comúnmente aceptada, que resume varios de los conceptos considerados en estas teorías, estima que el proceso ocurre en varias etapas o fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, de pocos milisegundos, durante el cual ocurre la completa detonación de una carga confinada, comprendiendo desde la fragmentación hasta el total desplazamiento del material volado. Estas etapas son:

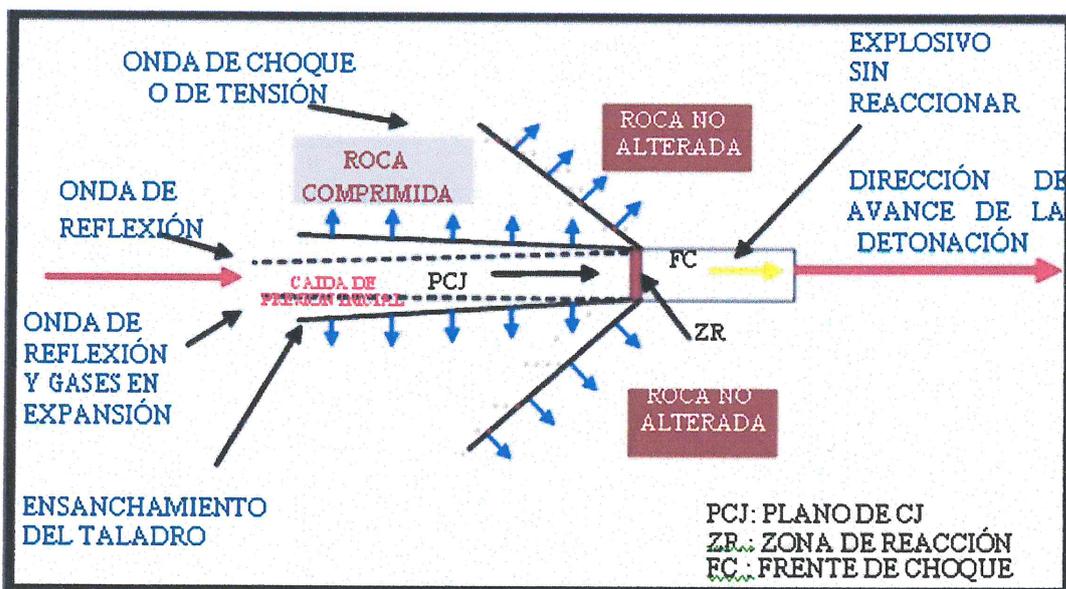


Figura N° 13. Mecanismo de Fragmentación del Macizo Rcoso.

Fuente: Manual Práctico de Voladura (EXSA, s.f., p.17).

Detonación del explosivo y generación de las ondas de choque, transferencia de la onda de choque a la masa de la roca iniciando su agrietamiento, generación y expansión de gases a altas presión y temperatura, la fracturación y movimiento de la roca, desplazamiento de la masa de roca triturada para formar la pila de escombros o detritos.

*Formación de Grietas Radiales* Una carga explosiva puntual (relación longitudinal /diámetro máximo: (6/1). Es decir no mayor a 6 veces el equivalente del diámetro del taladro produce generalmente una excavación en forma de copa o de cráter de limitada profundidad, mientras que un taladro convencional (largo mayor de 6 diámetros) tiene expansión cilíndrica radial en toda su longitud. (EXSA, s.f., p.18).

Este mecanismo aún no está plenamente definido, existiendo varias teorías que tratan de explicarlo entre las que se pueden mencionar, son las siguientes:

- ✓ Teoría de reflexión (ondas de tensión reflejadas en una cara libre).
- ✓ Teoría de expansión de gases.
- ✓ Teoría de ruptura flexural (por expansión de gases).
- ✓ Teoría de torque (torsión) o de cizallamiento.
- ✓ Teoría de craterización.
- ✓ Teoría de energía de los frentes de onda de compresión y tensión.
- ✓ Teoría de liberación súbita de cargas.
- ✓ Teoría de nucleación de fracturas en fallas y discontinuidades.



### 3.2.1 Proceso de Fragmentación de la Roca.

Para poder obtener una buena fragmentación, como resultado de las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura, el proceso de fragmentación de rocas se debe ser bien entendido.

Existen también muchas teorías que tratan de explicar el proceso de los diversos mecanismos que toman lugar cuando se lleva a cabo la fragmentación de la masa rocosa por efecto de la energía producida por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial. Se debe mencionar al respecto que existen varias opiniones y que muchas de estas dividen al proceso de fragmentación de rocas en 3, 5 hasta 8 etapas estando todavía muchas de estas opiniones en pleno proceso de validación (**Anexo n° 03**).

### 3.2.2 Etapas del proceso de Fracturamiento de Rocas.

La mayoría de los investigadores están de acuerdo en que 3 son las etapas o fases principales que toman lugar en el proceso de fragmentación de la roca durante la fragmentación del macizo rocoso por la acción de una mezcla explosiva que se comercial en nuestra minería según el curso de modelamiento matemático de la voladura de rocas (Agreda Uriarte Carlos, 1993, p.15).



**Figura N° 14.** Etapas del proceso del Fragmentación de la Rocas.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.2.3.1 Primera Fase Fracturas Radiales (Brisance).

Cuando cualquier mezcla explosiva comercial que se encuentra cargada dentro de un taladro es detonada, se producen ondas compresivas o de choque. La forma y magnitud de estas ondas compresivas que viajan a altas velocidades cuyo rango esta entre 3,000 – 5,000 m/seg., dependerá del tipo de mezcla explosiva comercial, del tipo de roca, del número y posición de los Boosters, altura de carga, diámetro del taladro y la relación de la velocidad de detonación con la velocidad de propagación de las ondas a través del macizo rocoso.

Se debe mencionar que estas primeras fracturas radiales se producen en las zonas adyacentes a los taladros y el tiempo necesario para esto, esta entre 1 a 2 ms.

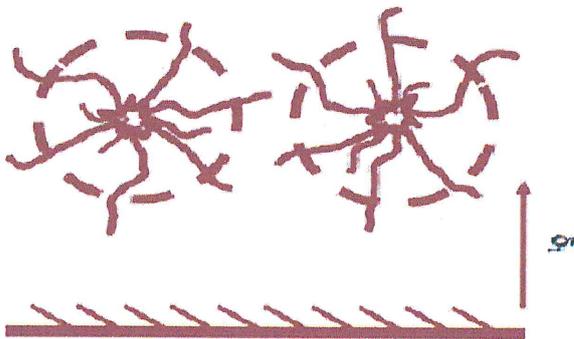


Figura N° 15. Primera Fase Fracturas Radiales.

Fuente: Curso de Modelamiento matemático de la voladura de rocas (C. Agreda, 1993).

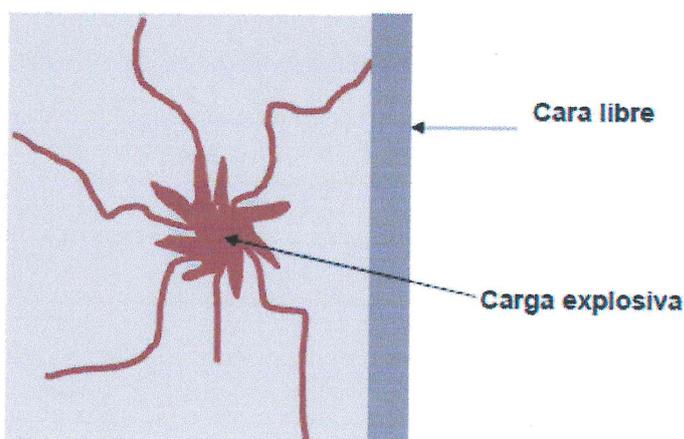
### 3.2.3.2 Segunda Fase Empuje hacia Adelante (Heave).

Las altas presiones de los gases, hacen que estos produzcan las ondas compresivas las cuales serán refractadas y reflejadas. Las ondas compresivas reflejadas cambiarán de signo (negativo) y se convertirán en ondas tensionales. Esta transformación ocurrirá

cuando las ondas compresivas arriben a una cara libre, cuando la masa rocosa cambie de densidad o cuando ellas encuentran fallas geológicas, planos estructurales, etc.

La fragmentación de la roca comenzara en la cara libre o en cualquier discontinuidad donde las ondas compresivas son reflejadas. Cuando las ondas compresivas cambian de signo y se convierten en ondas tensionales; ellas regresan de la cara libre o cualquier discontinuidad estructural, hacia el punto de origen de la detonación fracturando el macizo rocoso; porque este falla más fácilmente por efecto de las ondas tensionales que por el de las ondas compresivas.

En general, es muy conocido que la resistencia tensional dinámica de cualquier tipo de roca es menor que su resistencia compresiva dinámica. Las ondas tensionales producirán el empuje hacia delante (HEAVE) del macizo rocoso en la zona más cercana a la cara libre (Burden). El empuje hacia delante (HEAVE) entre otros factores dependerá de lo siguiente: Tipo de roca, cantidad y calidad de la mezcla explosiva comercial, las mallas de perforación y voladura a ser usadas en el disparo primario, etc.



**Figura N° 16.** Segunda Fase Empuje hacia Adelante.

**Fuente:** Curso de modelamiento matemático de la voladura de rocas (C. Agreda, 1993).

### 3.2.3.3 Tercera fase Fragmentación.

En esta etapa se produce la fragmentación total de la roca Johansson ha dicho que “Bajo la influencia de las altas presiones de los gases producidos por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial; las primeras fracturas radiales son extendidas, la cara libre falla y esta es movida hacia el frente” (Agreda Uriarte, Carlos, 1993, p.19).

Como en el caso del empuje hacia adelante (HEAVE); la primera parte del macizo rocoso es movida hacia adelante y la nueva cara libre reflejara lo restante de las ondas de choque producidas por las ondas compresivas.

Luego, las ondas tensionales son suficientes para fracturar el macizo rocoso en estudio. Este proceso continuara hasta que las ondas tensionales requeridas para fracturar al macizo rocoso; y por fin todo el proceso de fragmentación de la roca habrán terminado.

Muchos investigadores han dicho que la fragmentación es la más importante y única variable que debe ser tomada en cuenta para evaluar los resultados de un disparo desde un punto de vista técnico-económico-ecológico. Es debido a que la fragmentación es la única variable que Inter.-relaciona a todas las operaciones minero - metalúrgicas que conforman el ciclo total de la extracción del mineral (pre-minado, minado propiamente dicho procesamiento de minerales y venta de los productos minerales).

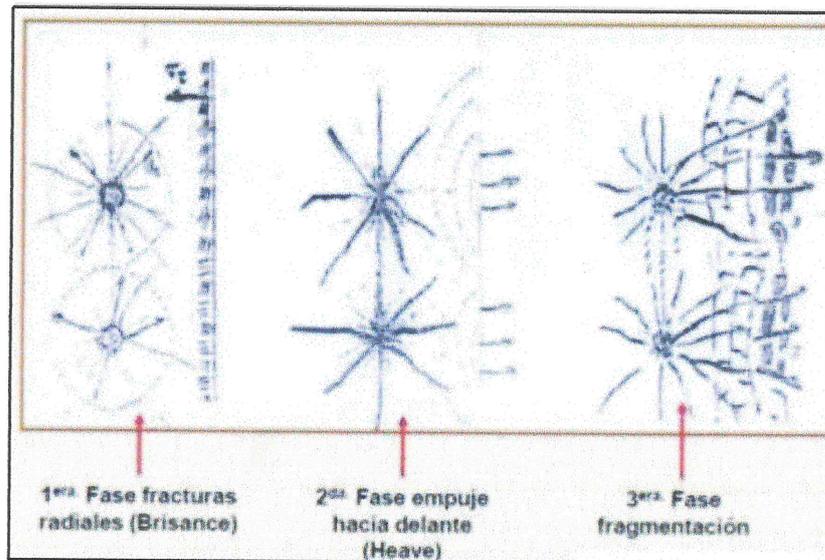


Figura N° 17. Tercera Fase Fragmentación de la Roca.

Fuente: Curso de modelamiento matemático de la voladura de rocas (C. Agreda, 1993).

### 3.3 VELOCIDAD PICO PARTÍCULA.

Un modelo importante en el proceso de evaluación y optimización de la operación de voladura, es poder predecir a través de un modelo las consecuencias y beneficios al introducir distintos cambios en los parámetros más relevantes, sin que ellos deban necesariamente tener que realizar a escala real. Se pueden distinguir distintos enfoques asociados al modelamiento de vibraciones, los cuales tiene como objetivo final predecir en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura (Anexo n°04).

#### 3.3.1 Vibración en Voladura.

##### 3.3.1.1 Análisis y Control de Vibración en Voladura de Rocas.

Las consecuencias producto de la detonación de la mezcla explosiva, incluyen lo siguiente:

- Lanzamiento de fragmentos de rocas.
- Incremento en la temperatura.

- Presión de aire y formación de vibraciones sísmicas.

En general los efectos negativos de las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Efecto de campo cercano.
2. Efecto de campo lejano.

Los efectos de campo cercano son el resultado de la energía de vibración que fractura y malogra la pared del banco cercano al disparo, tendiendo a producir condiciones inestables de las paredes del banco. Para controlar de alguna manera este tipo de daño se pueden usar métodos de voladura controlada tales como:

- Taladros de Precorte.
- Taladro amortiguado, etc.

Los efectos de campo lejano son los resultados de la onda de vibración que se registran para un radio de distancias mayor a 50 m y para campo cercano distancia menores a los 50 m.

### **3.3.1.2 Descripción del Fenómeno de Vibración.**

Cuando una onda sísmica producida por la detonación de una mezcla explosiva dentro de un taladro se propaga a través del macizo rocoso, su amplitud decrece como resultado de la combinación de 2 factores que son los siguientes:

- La propagación y el desplazamiento geométrico.
- La pérdida de fricción de la amplitud de dicha onda.



*La propagación y el desplazamiento geométrico* no producen pérdida de la energía de vibración, pero meramente describe la dispersión geométrica de la expansión del frente de onda, la cual podría variar desde la forma plana (campo muy cercano) a forma cilíndrica (campo medio) o forma esférica (campo lejano) para columnas de explosivos tales como las cuales presentan en las operaciones de voladuras de banco.

*La pérdida por fricción de la amplitud* toma en cuenta la pérdida de la energía de vibración a través de la falta de elasticidad dentro del macizo rocoso. Estos son debido a las propiedades de las rocas que también son influenciadas por algunos valores elevados de algunos módulos de rocas.

Así por ejemplo algunas rocas poseen altos índices de competencia tendrán un valor de fricción interna de menor magnitud. “Se puede asumir que dichas rocas tienen un comportamiento elástico cuando el valor de los módulos y la competencia decrecen; la pérdida por fricción se incrementa y una atenuación mucho más rápida de la energía de vibración toma lugar ecuaciones” (Carlos Agreda Uriarte, 2013, p 14-15).

Varias expresiones matemáticas han sido postulados para describir la pérdida en amplitud de una onda de vibración, así se tiene las siguientes:

La ecuación para el caso de la propagación de la onda plana y una frecuencia fija.

$$A = K * e^{\alpha x} \qquad 3.3.1$$



La ecuación que asume un comportamiento elástico del macizo rocoso (no hay pérdida friccional).

$$A = k * x^{\beta} \quad 3.3.2$$

A la fórmula se debe incorporar los mecanismos geométricos y pérdida friccional, también se debe asumir una frecuencia producida por las vibraciones fijas no implantando ninguna dispersión de los impactos con el incremento de la distancia de propagación de dichas vibraciones.

$$A = K * e^{\alpha x} * x^{-\beta} \quad 3.3.3$$

Dónde:

K,  $\alpha$  y  $\beta$ : constante del macizo rocoso.

X: termino llamado distancia escalada.

Según Kavetsky et al. (1999) menciona que “El modelo más comprensivo para describir las vibraciones de la amplitud producida por las vibraciones y la frecuencia, tal como la onda de vibración se propaga a través del macizo rocoso”.

Finalmente el fenómeno vibratorio puede definirse como un fenómeno de transmisión de energía por la propagación de un movimiento ondulatorio a través del macizo rocoso.

### 3.3.2 Ecuación de la Velocidad Pico Partícula.

Según Agreda Uriarte, C. (2013) menciona que “varios modelos experimentales que representan la velocidad partícula en función del explosivo detonante y la distancia a la que se registra dicha detonación”. Entre los más conocidos se encuentran el, p.100-103):

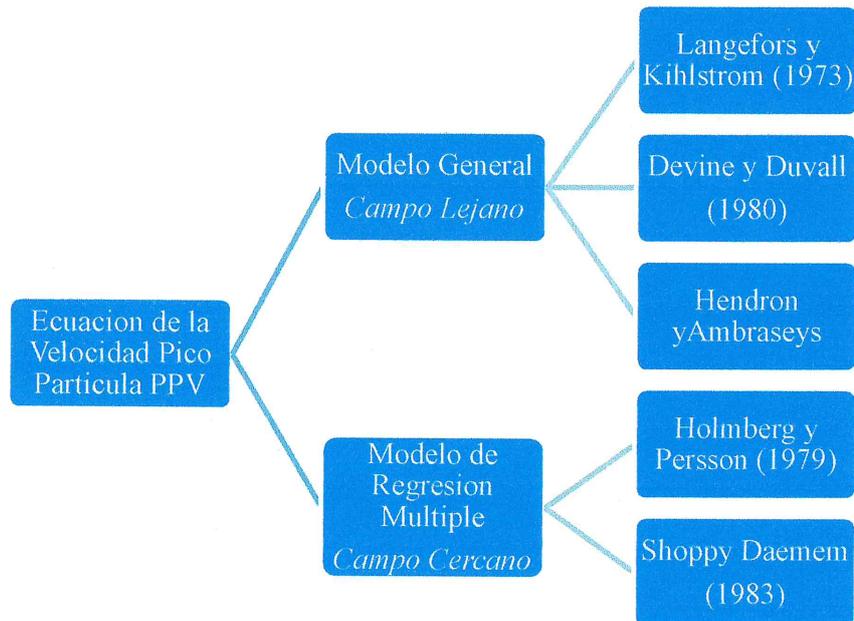


Figura N° 18. Análisis de la PPV según la Distancia y la Geometría de la Onda Sísmica.

Fuente: Elaboración Propia.

#### 3.3.2.1. Modelo general.

$$PPV = K * (Ds)^{\alpha} \quad 3.3.4$$

Dónde:

PPV: Velocidad pico partícula (mm/s).

Ds: Distancia escalar.

K: Constante representativa de las características geológicas del lugar.

$\alpha$ : Factor de atenuación o decaimiento.

El término “Ds” o distancia escalar, da cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de explosivos detonados en forma instantánea en (Kg).

### 3.3.2.2. Modelo de Regresión Múltiple.

Otros autores como Holmberg y Persson (1978), Shoppy Daemem (1993) no consideran la simetría de la carga particular y utilizan la siguiente expresión:

$$PPV = K * d^{\alpha} * W^{\beta} \quad 3.3.5$$

Dónde:

K,  $\alpha$  y  $\beta$ : son constantes referentes a la geología del macizo rocoso, las diferencias entre las cotas de los puntos de disparos, la eficiencia del explosivo utilizado, la geometría de la mezcla explosiva, consumo de energía para la generación de vibraciones, etc.

V: velocidad de vibraciones (mm/s).

Por lo tanto, uno de los objetivos de un estudio de vibraciones es hallar el valor de las constantes K,  $\alpha$  y  $\beta$  a través de un ajuste mínimo-cuadrático, realizado con los valores V, Q y D, tomado en los ensayos.

### 3.3.3 Modelo de campo lejano y campo cercano.

#### 3.3.3.1 Modelo de campo Lejano.

El análisis de los registros de vibración, permiten conocer la velocidad de la partícula que genera cada carga o grupos de cargas en la voladura y posteriormente agrupar estas

por sectores. Fue así como se obtuvieron datos de velocidad de partícula, distancia y carga por retardo en cada una de los sectores, las que se ajustó posteriormente la ecuación del modelo propuesto.

Una vez determinada la ecuación de comportamiento de la vibración, fue ajustada a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable. La corrección en cuestión consistió en desplazar paralelamente el modelo obtenido, de modo de cubrir un número mayor de puntos recogidos en terreno. Este modelo es el denominado en tablas y graficas como el modelo el “Modelo Ajustados”.

Este proceso de ajusta de no significa cambiar los valores de los datos recogidos en terreno, sino darles una interpretación estadística más conservadora y por lo tanto más segura. El modelo propiamente tal, que se genera vía el ajuste estadístico describe la condición media de la población de datos, es decir el 50 % de los datos se ubican por debajo de la curva que representa el modelo y los 50 % restantes se encontraran sobre la curva. Matemáticamente esto está correcto, sin embargo significa que existe una probabilidad del 50 % que una carga explosiva producirá un nivel de vibración que supera a lo predicho prácticos, particularmente para diseño orientados a controlar la vibración máxima, la cual provoca daño. La solución se encuentra en desplazar el modelo hasta que sus predicciones cubran una mayor cantidad de datos de terreno, en rangos que oscilan entre un 80 % y 95 % haciendo más confiables y segura la estimación de vibraciones. Existen diferentes modelos aplicativos para lo que es campo lejano, los cuales mencionamos sus fórmulas a continuación:

**Tabla N° 4.** Diferentes Criterios de la Distancia Escalar.

CRITERIOS	DISTANCIA ESCALAR
Criterio General Exponencial	$Ds = \left(\frac{d}{W^{1/2}}\right) * e^{(d*\beta/\alpha)}$
Criterio General	$Ds = \left(\frac{d}{W^{\beta/\alpha}}\right)$
Langefors y Kihlstrom (1973)	$Ds = \left(\frac{d}{W^{3/2}}\right)$
Ambraseys y Hendron	$Ds = \left(\frac{d}{W^{1/3}}\right)$
Devine y Duvall (1980)	$Ds = \left(\frac{d}{W^{1/2}}\right)$

**Fuente:** Control de Vibraciones para Casas de Tierra en el Perú (Giraldo Iriarte, 2010, p. 21).

El modelo más utilizado en minería superficial es el de raíz cuadrada y por ende también será utilizado en el presente estudio. Teóricamente el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generada por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto, es el de DEVINE puesto que utiliza cargas explosivas con geometría cilíndricas se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga. Según Dowding C.H. (2000) menciona que “la formulación clásica de la distancia escalada (raíz cuadrada) está basada en el análisis estadístico de un gran número de datos”.

Se considera simetría cilíndrica:

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}}\right)^{-\alpha} \quad 3.3.6$$



Se considera simetría esférica:

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/3}} \right)^{-\alpha} \quad 3.3.7$$

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula (mm/s).

W: peso de la carga explosiva (Kg.).

d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando (m).

K: Factor de velocidad.

$\alpha$ : Factor de atenuación o decaimiento.

Según Orihuela Castillo, S. (2009) hace mención que “el criterio de Ceteris Paribus el cual se define como el cambio que experimentaría la variable independiente, manteniendo la otra constante. En términos matemáticos este criterio está definido como la derivada parcial de la PPV respecto a una de las variables independientes Q o D, es decir una razón de cambio. De esta se concluye que la variable de *la distancia D tiene mayor influencia sobre la velocidad pico partícula PPV*, es decir cuando se da un incremento en una unidad infinitesimal de la derivada dQ, el dPPV aumenta en 0.5 unidades, mientras que cuando el incremento se da en la derivada de dD, el dPPV aumenta en una 1.0 unidad infinitesimal (p.62).

### 3.3.3.2 Modelo de Campo Cercano.

El análisis de los registros de vibración permite conocer la velocidad de partícula que genera cada carga o grupo de cargas en la voladura. Fue así como se obtuvieron datos



de velocidad de partícula, distancia y carga por taladros, a la que se ajustó posteriormente la ecuación del modelo propuesto por (Holmberg & Persson, s.f.).

Una forma genérica de expresar la ecuación es la siguiente:

$$PPV = K * Q^{-\alpha} * D^{-\beta} \quad 3.3.8$$

Dónde:

K,  $\alpha$  y  $\beta$ : son constante que engloban la geología del terreno, la geometría de las cargas, las diferencia de cota entre pos puntos de disparo y de medida, el tipo de propagación, el nivel de aprovechamiento de la energía en generar vibraciones, etc.

Por lo tanto, uno de los objetivos del presente estudio de vibraciones es hallar el valor de cada una de estas constantes (K y  $\alpha$ ) a través de:

- ✓ Una regresión lineal por mínimos cuadrados.
- ✓ Una regresión no lineal.

Una vez determinada la ecuación de comportamiento de la vibración, fue ajustada a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable. La corrección en cuestión consistió en desplazar paralelamente el modelo obtenido, de modo que cubriera un mayor número mayor de puntos recogidos en terreno. Este modelo es el denominado “modelo ajustado”.

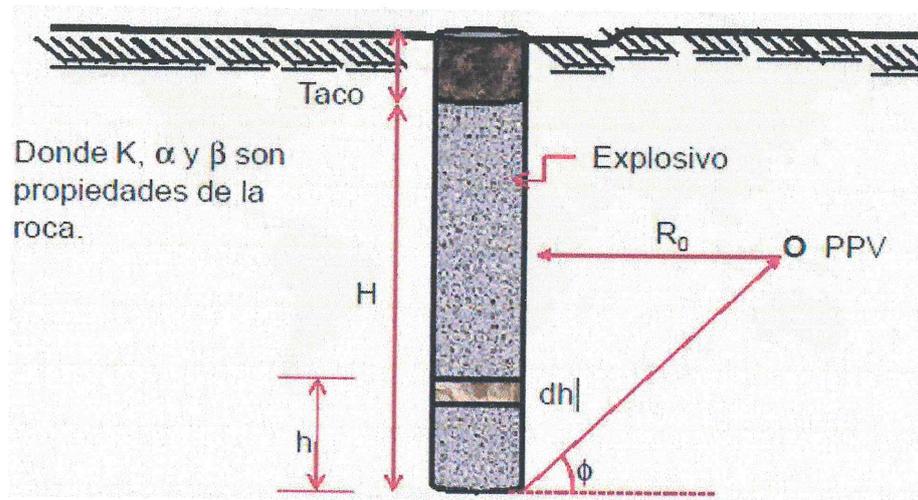


Figura N° 19. Modelo de Campo Cercano.

Fuente: Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.128)

Según Holmberg & Persson (1979) menciona que “se realizaron un estudio en roca competente y obtuvieron los siguientes resultados. Para el valor de  $K$  igual a 700,  $\alpha$  igual que 1.5 y para  $\beta$  igual que 0.7”.

El coeficiente de correlación alcanza su valor máximo 1 cuando los puntos se ajustan perfectamente a la ley y su valor mínimo 0 cuando los puntos se encuentran aleatoriamente repartidos.

La concentración de carga lineal o densidad lineal es controlada por una combinación del diámetro de la perforación, la densidad del explosivo y la potencia en peso del explosivo.

### 3.3.4 Velocidad de Onda a partir de los Factores Geomecánicos.

Es importante conocer la velocidad con la que viajan las ondas producidas por la detonación de una mezcla explosiva a través de los estratos rocosos, porque de esta

manera se podrá incluir este valor en un modelo matemático para tratar de obtener buenos resultados en la fragmentación de una voladura de rocas según lo dicho en el Análisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, , 2013, p.72).

Los parámetros geomecánicos influyen en el resultado de la vibración debido a que este no tiene las mismas características geológicas o tipo de rocas de un lugar a otras zonas (Anexo n° 05).

Velocidad de la onda longitudinal.

$$V_p = \left( \frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho_R} \right)^{1/2} \quad 3.3.9$$

Velocidad de ondas transversales.

$$V_s = \left( \frac{G}{\rho_R} \right)^{1/2} \quad 3.3.10$$

Módulo de Young dinámico  $E_d$ .

$$E_d = \frac{\rho_R * (3V_p^2 - 4V_s^2)}{\left( \frac{V_p^2}{V_s^2} - 1 \right)} \quad 3.3.11$$

Coefficiente de Poisson dinámico.

$$\nu = \frac{\left( \frac{V_p^2}{2V_s^2} - 1 \right)}{\left( \frac{V_p^2}{V_s^2} - 1 \right)} \quad 3.3.12$$

Dónde:

Para rocas ígneas = 0.25

Para rocas sedimentaria = 0.33

Módulo de rigidez dinámico.

$$G_d = \rho_R * V_s^2 = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad 3.3.13$$

Módulo de Bulk dinámico.

$$K = \rho_R * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad 3.3.14$$

Los factores geomecánicos que intervienen en la velocidad de la onda son:

- Planos de estratificación, fallas, diaclasas, contactos, etc.

- RMR Rock Mass Rating (sistema de clasificación geomecánica).
- RQD índice de designación de la calidad de roca.
- Q índice de calidad de la roca.
- Resistencia a la compresión Std.
- Resistencia a la tensión Sc.

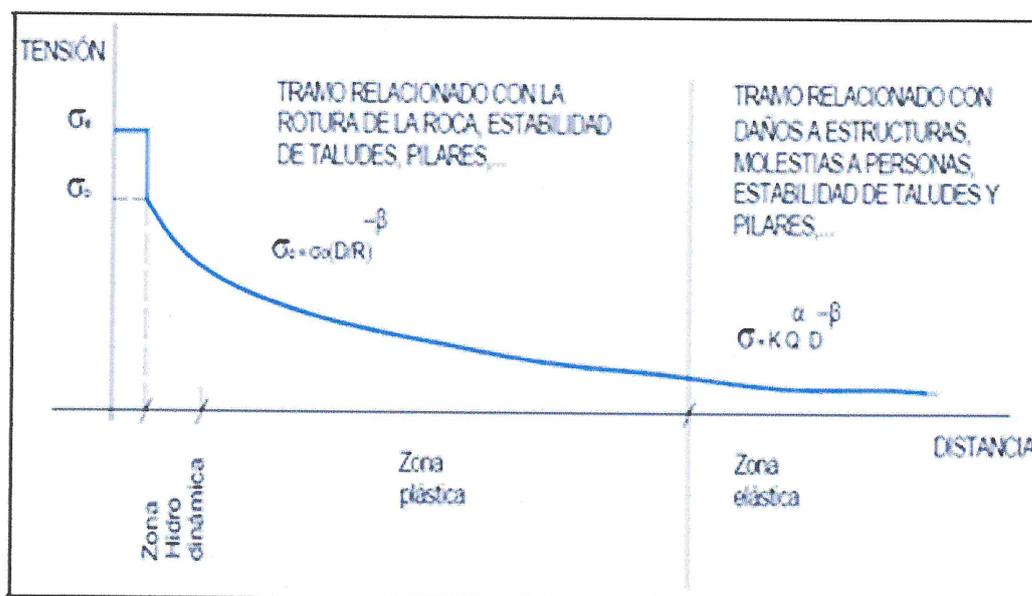
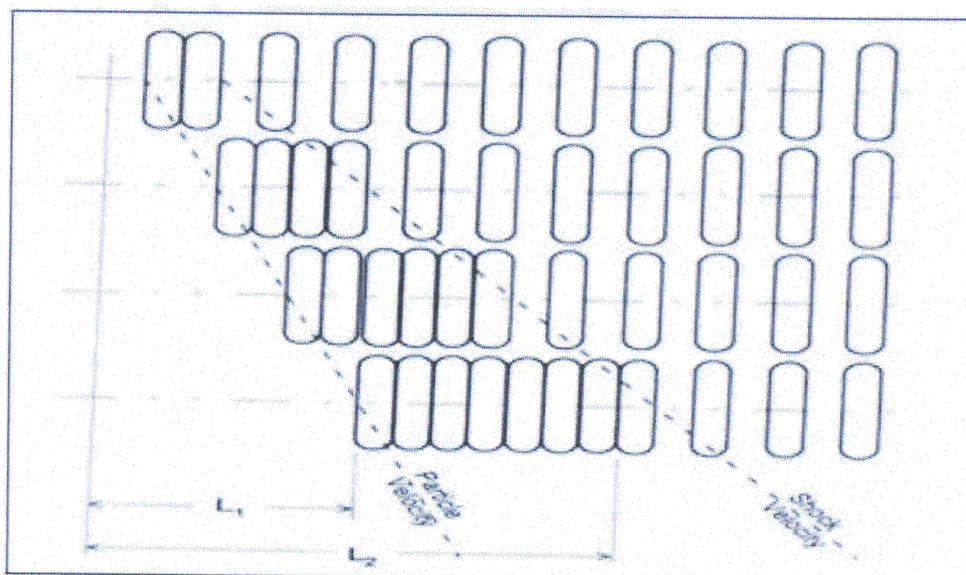


Figura N° 20. Relación de la Tensión de Deformación.

**Fuente:** Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de Vibraciones en una Mina Modelo (Orihuela Castillo, 2009).

Gráficamente en la figura n° 21 se puede apreciar con mayor claridad la diferencia existente entre las definiciones de velocidad de propagación y de partícula, la velocidad de propagación es la onda sísmica que se transmite por el macizo rocoso de un punto de ocurrencia del evento a otro distante y la velocidad de la partícula es el movimiento oscilatorio con respecto a un punto de referencia movimiento oscilante.



**Figura N° 21.** Velocidad de Partícula y velocidad de Propagación.

**Fuente:** Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de Vibraciones en una Mina Modelo (Orihuela Castillo, 2009).

### 3.4 NORMATIVA DE VIBRACIÓN INTERNACIONALES Y NACIONAL.

Como bien se sabe, el desarrollo de un país generalmente se debe a la explotación de yacimientos mineralizados. A medida que se desarrolla un país, también se incrementa la tasa de población en las ciudades y comunidades aledañas, donde se explota cualquier yacimiento mineralizado. Muchos de estos yacimientos se encuentran cerca a ciudades habitadas, tal como se tiene en el Perú: Cerro de Pasco, Arequipa, etc.

Estas operaciones en especial la voladura de rocas, produce vibraciones inducidas por operaciones, así como también las diversas obras civiles donde en algunos casos e requiere de la perforación y voladura de rocas, causando daños materiales y cobrando vidas humanas. Por lo tanto, es importante establecer una normativa de acuerdo a la realidad y condiciones de cada país.

Cabe enfatizar que en el ámbito internacional, las vibraciones producidas por voladura de rocas se han realizado de acuerdo con ciertos niveles de vibraciones máximos, los cuales se han determinado por medios de mediciones, llegando a determinar así el límite máximo permisible de daño. A continuación se analizarán algunas normas internacionales vigentes (Agreda Uriarte, 2013, p.68) (Anexo n° 06).

**Tabla N° 5. Normas Internacionales de Vibración.**

<b>País de Procedencia</b>	<b>Nombre del Reglamento</b>	<b>Fecha de Expedición</b>
Alemania <sup>a</sup>	DIN 4150	1975
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
EE UU federal	USBM RI8507	1980
EE UU federal	OSM 817.67	1983
Portugal	NP 2074	1983
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Suecia	SS 460 48 46	1991
Reino Unido	BSI 6472	1992
Suiza	SN 640 312a	1992
España	UNE 22-381-93	1993
Reino Unido	BSI 7385	1993
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
<sup>a</sup> La Norma Alemana tiene actualizaciones en los años 1999 y 2001.		

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.68).

### **3.4.1 Normativa de la Comunidad Europea.**

#### **3.4.1.1 Norma Española UNE 22-381-93.**

En España la elección del criterio de prevención de daños y por consiguiente la velocidad de vibración límite que se imponga ha de ser fijada de acuerdo con la normativa vigente (ITC 10.3.01 Voladuras Especiales del RGNBSM) por la autoridad competente.

Dicha velocidad de vibración límite varía fundamentalmente con la frecuencia de vibración. Dicha ITC hace referencia a la norma UNE 22-381-93 “Control de Vibraciones producidas por Voladuras” esta norma estructurada en una serie de contenidos que permita describir, limitar y estudiar las vibraciones producidas por la voladura, de tal manera que facilitan tanto el trabajo de la ejecución del proyecto de voladuras como interpretación y evaluación del mismo por parte de la autoridad minera competente.

A continuación distingue tres grupos de estructura de origen antrópico:

- **Grupo I.** Edificio y estructuras industriales (armado de hormigón o metálica).
- **Grupo II** Edificio de viviendas, oficinas, centro comerciales y de recreación.  
Edificio y estructura de valor arqueológico.
- **Grupo III.** Estructura de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenta una especial sensibilidad.



Tabla N° 6. Norma Española UNE 22. 381. 93.

Valores límite de criterio	FRECUENCIA PRINCIPAL (Hz.)		
	2 – 15	15-75 <sup>c</sup>	> 75
	Velocidad <sup>a</sup> (mm/s)	Desplazamiento <sup>b</sup> (mm)	Velocidad (mm/s)
Grupo I	20	0.212	100
Grupo II	9	0.095	45
Grupo III	4	0.042	20

Fuente: Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, ,2013, p.75).

<sup>a</sup> velocidad máxima (mm/s).

<sup>b</sup> desplazamiento máximo (mm).

<sup>c</sup> con el tramo de frecuencias 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:

$$V = 2 * \pi * f * d \quad 3.4.1$$

Al igual que en la normal alemana DIN 4150 y la mayoría de las normas europeas, la norma española analiza la frecuencia en tres intervalos; entre 2 y 15 Hertz, entre 15 y 75 Hertz y mayores a 75 Hertz.

Dónde:

V: velocidad equivalente en (mm/s).

$\pi$ : valor de pi 3.1416.

f: frecuencia principal (Hz.)

d: desplazamiento admisible indicado en la tabla (mm).

En esta norma, la *frecuencia dominante* o principal (Hz.) puede ser determinada por tres métodos:

- Por el Método del análisis de Fourier.
- Con el Espectro de respuesta de la señal o el Pseudoespectro de velocidad.
- Por medio de Análisis de vibración armónicas (en la norma: análisis de semiperiodo) en el tramo de máxima velocidad de la señal.

Si se presentan varios máximos en la señal, la norma establece: pueden darse circunstancia de que registro presente varios picos de velocidad del mismo orden y con diferentes frecuencias, en este caso habría que considerar la menor frecuencia. Esta circunstancia queda cubierta si se realiza un análisis de Fourier o de respuesta.

En la figura se recoge ábaco que representa el criterio de selección del tipo de estudio requerido de la norma. Se observa como la norma distingue tres tipos de rocas:

- Roca blandas cuando la  $V_p < 2000\text{m/s}$ .
- Roca media cuando la  $2000\text{m/s} < V_p < 4000\text{m/s}$ .
- Roca dura cuando la  $V_p > 4000\text{m/s}$ .



Haciendo una lectura inversa de este ábaco es posible obtener una tabla de Carga/Distancia para cada tipo de material (suave, Medio y Duro), según el tipo de estudio que se prevé realizar y en función del límite de vibraciones aplicable.

Por último la norma define el tipo de instrumentación que debe emplearse en medida de vibraciones generadas por voladura y como deben medirse. Los requerimientos básicos son la frecuencia de muestreo, la resolución, la capacidad de almacenamiento y análisis de las vibraciones, la capacidad de medir en las tres componentes del movimiento, etc. Evidentemente estas características están adaptadas a los órdenes de magnitud normales de las voladura: frecuencia de 2 a 20 Hz. Amplitud de 1 a 100mm/s, etc.

#### **3.4.1.2 Norma Suiza SN 640 312a.**

La norma Suiza de 1992, esta norma completa frecuencia desde 8 hasta los 15 Hz adoptaba una norma referente a los valores para salvaguardar la integridad de los edificios, ella 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.

Estudios posteriores introdujeron una frecuencia como parámetro a ser evaluado, resultando en la elaboración de la tabla en la cual el tipo de estructura y el tipo de fuente de vibración son actualmente considerados.



**Tabla N° 7. Norma Suiza SN 640.312<sup>a</sup>.**

<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Frecuencia en (Hz.)</b>		<b>V<sub>p</sub> máxima (mm/s)</b>
I. Edificios de concreto armado	10-60	60-90	30 y 40
II. Construcciones normales de edificios	10-60	60-90	18 y 18-25
III. Habitaciones	10-60		12-18
VI. Edificios delicados	10-60	60-90	8 y 8-12

**Fuente:** Bacci, (2000), adaptado por Borla, (1993).

La norma, introducida en abril de 1992, incluye los efectos en los edificios, acrecentando criterios de evaluación de los daños materiales, manteniendo, sin embargo, los valores de ( $V_p$ ) mostrados en la Tabla anterior.

Esa norma, utilizada más para excavaciones en subterráneo, en periodo diurno, diferencia las clases de edificios, las clases de repetitividad del fenómeno (ocasional, frecuente, permanente) y los campos de frecuencia de velocidad de la partícula. Acrecienta la distinción de los efectos de las vibraciones, en las personas, en el terreno y en los aparatos que se encuentran en los edificios y propone, además, una actualización de la metodología de recolección de datos e de los criterios de determinación y evaluación de los danos materiales.

#### **3.4.1.3 Norma Portugal NP 2074.**

La norma de Portugal fue aprobada en 1983 determinando en particular un criterio de control de parámetros característicos de las vibraciones producidas en minería y sus

efectos en edificaciones. Los valores límites establecidos de acuerdo con las características de las condiciones de fundación, del tipo de construcción y las fuerzas dinámicas.

Esteves, (1994) propone además de consideraciones de las características anteriormente mencionadas, una consideración de frecuencia. El parámetro usado para evaluar el nivel de vibración es la suma vectorial de las tres componentes ortogonales de la velocidad de la partícula, o simplemente se toma el valor máximo de cada eje, el resultado de este estudio e en la tabla siguiente.

**Tabla N° 8.** Norma Portugal NP 2074.

Valores límite de criterio	FRECUENCIA PRINCIPAL (Hz.)		
	Suelo incoherente	Suelo de consistencia compacto	Suelo de alta coherencia
	<15	10-40	> 40
	$V_p < 1000$ m/s	1000-2000 m/s	$V_p > 2000$ m/s
Constr. reforzado	15	30	60
Constr. Normales	5	10	20
Constr. Históricos	3	5	10

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, ,2013, p. 81).

#### 3.4.1.4 Norma Francesa RT 23.7.1986.

Actualmente la norma francesa circular de ministerio de ambiente de 1986 divide las construcciones en tres clases: resistentes, sensibles y muy sensibles, para los cuales, por

lo tanto los límites máximos de velocidad son establecidos en función de tres bandas de frecuencia como se muestra en la tabla.

**Tabla N° 9.** Norma Francesa RT 23.7.1986.

Tipo Daño	Frecuencia Hz.		
	4-8 Hz	8-30 Hz	30-100 Hz
Edif. Resistente	8 mm/s	12 mm/s	15 mm/s
Edif. Sensible	6 mm/s	9 mm/s	12 mm/s
Edif. Muy Sensible	4 mm/s	6 mm/s	9 mm/s

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, , 2013, p.72).

#### 3.4.1.5 Norma Alemana DIN 4150.

La Norma DIN (Deutsches Institut fur Normung), antes de los años 80, regían dos normas distintas en Alemania, hasta entonces dividida. En la Alemania Oriental, la recomendación vigente consideraba dos parámetros: la tipología estructural del edificio sometido a los efectos de la vibración, subdividido en cuatro clases distintas, y la frecuencia característica del fenómeno vibratorio, en cuanto que, en la Alemania Occidental, se admitían diferentes frecuencias en función de la tipología estructural del edificio, tomando como referencia solo la componente vertical de la velocidad de vibración de la partícula ( $V_p$ ).

Con el correr de los años, y después de la unificación de Alemania en 1989, la Norma DIN 4150 fue adoptada como norma patrón, y ha sido actualizada desde entonces.



Para esta normativa, el objetivo es marcar los límites en las vibraciones que no supongan para el edificio perder su uso habitual. La reducción del uso del edificio por efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes o la reducción de la capacidad resistente de los forjados.

Para las estructuras incluidas en los tiempos tipo 2 y tipo 3 su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas o si las particiones o tabiquería se ven afectadas por la pérdida de resistencia de los forjados. Estos tipos de lesiones se consideran menores pero pueden suponer una pérdida de servicio del edificio.

**Tabla N° 10.** Norma Alemana DIN 4150 (1999).

Clase de Construcción	FRECUENCIA FUNDAMENTAL			NS <sup>a</sup>
	1-10 Hz.	10-50 Hz.	50-100 Hz.	TF <sup>b</sup>
1-Edificaciones industriales 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- edificaciones sensibles a vibraciones	3	3-8	8-10	8
Adaptado de DIN (2001a)		b. Todas las frecuencias.		
a. Nivel sup. Componente horizontal.		c. Velocidad de partícula en mm/s.		

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, ,2013, p. 69).

Las actualizaciones de esta norma DIN que se realizaron en el año 2001 son los siguientes:

- Predicción de los parámetros de medición.
- Efectos en las personas dentro de edificaciones.
- Efecto en estructuras.

Valores de frecuencia por encima de 100 Hz pueden ser aceptados en la parte más alta de los edificios. Otros valores, medidos por debajo de los límites especificados anteriormente son considerados como no perjudiciales a la estructura civil.

Para el caso de estudios de los forjados, la norma alemana establece como valor límite, para no producir reducción del servicio o uso de los edificios sometidos a vibraciones de corta duración, una velocidad no superior a los 20 mm/s. en los edificios encuadrados en el tipo 3 será necesario prever valores inferiores para evitar daños.

Esta norma es aceptada en toda la Comunidad Europea como norma patrón. Muchos países europeos desarrollaron sus propias normas, basándolas en la Norma DIN 4150 o relacionándola a ella.

### **3.4.2 Normativa de la Comunidad Americana.**

#### **3.4.2.1 Norma EEUU USBM RI8507.**

El USBM (United States Bureau of Mines), es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen.

Una de las primeras investigaciones relacionadas a las vibraciones producto de voladuras consistió en hacer detonar cierta cantidad de explosivo en un desmante de rocas, para posteriormente, medir los daños causados en las estructuras cercanas. Este fue el inicio de un programa de investigaciones por el USBM en 1930.

El primer trabajo que realizó este equipo fue el de desarrollar un tipo de sismógrafo que se pudiera adaptar a la tarea de captar vibraciones producidas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones originadas por movimientos telúricos, y a varios proyectos, se fabricaron algunos modelos, los cuales fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería.

**Tabla N° 11.** Norma Norteamericana USBM RI8507.

Tipos de Estructura		Baja Frecuencia	Alta Frecuencia
Casa moderna, paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.).		19 mm/s	50 mm/s
Casa antiguas con paredes revocadas		12.5 mm/s	50 mm/s
Baja Frecuencia	<p>&lt; 40 Hz. Todo pico espectral que se produzca por debajo de 40 Hz.  Y dentro de una faja de 6dB (o sea 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) del criterio de baja frecuencia justificada el empleo</p>		
Alta Frecuencia	> 40 Hz.		

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, ,2013, p. 73).

Una nueva síntesis del USBM fue hecha por Fogelson en 1971, en el cual incluía el análisis de nuevos datos pero se mantenía como límite los 50 mm/s (VPP), bajo el cual, la probabilidad de daños era muy pequeña. Sin embargo, fue en el año 1980 donde el USBM revé este valor, el cual era visto bastante alto en otras partes del mundo e incluso para algunos estados norteamericanos y decide introducirle la frecuencia, considerándolo como un parámetro tan importante como la velocidad de partícula. Los valores que se propusieron son mostrados en la tabla siguiente.

Debido a que el daño en las estructuras se encuentra directamente relacionado a las velocidades de la partícula y al nivel de la frecuencia, el USBM creó un gráfico donde se combinan ambos parámetros, para así, establecer los límites donde es posible que ocurra una falla.

#### **3.4.2.2 Norma EEUU OSM 817.67.**

La norma OSM (Office of Surface Mining) esta norma se desarrolló para la minería de carbón. Cuando preparaba sus normas, modifico los criterios propuestos por la USBM basados en contrapropuestas que recibieron y que contenían estándares menos rigurosos, similares al criterio alterno de voladura de la USBM. Reconociendo una dependencia de la frecuencia para la vibración asociada con la distancia, la oficina de minería de superficie presento su norma de la siguiente manera:

La tabla n° 12 combina los efectos de la distancia y de la frecuencia, en distancia cortas, predomina la vibración con alta frecuencia. En distancias más grandes, la vibración de alta frecuencia se ha atenuado o disipado y predomina la vibración de baja frecuencia. Los edificios tienen características de respuesta de baja frecuencia entrara en resonancia



y pueden resultar con daños. Por lo tanto, para distancias escaladas mayor  $D_s = 29.5$ . En las distancias más cortas se permite una velocidad pico partícula más alta de 31.8 mm/s y una distancia escalar menor de 22.7.

**Tabla N° 12.** Norma Norteamericana OSM 817.67.

Distancia al área de voladura (m)	Velocidad máxima de partícula (mm/s)	Distancia reducida que se aconseja cuando se dispone de instrumentos ( $m/Kg^{0.5}$ )
0 - 100 m	32	22.3
100 - 1500 m	25.4	24.5
> 1500 m	19	29.0

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p. 73).

### 3.4.3 Normativa Nacional de Vibración.

El Perú cuenta con la “Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras” elaborado por la Dirección General de Asuntos Ambientales del Sub-Sector Minería (DGAAM) perteneciente al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), donde se establecen las Velocidades de Partícula Pico Máxima Permitida para vibraciones en el suelo y los Flujos de Aire Límite para vibraciones en el aire, producidos por las voladuras.

#### **Guía ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras Sub Sector de minería – DGAAM Set. 1995.**

Además de las normas ya citadas, existen una serie de normativas, casi siempre de tipo local, que regulan la emisión e inmisión de vibraciones, y también de ruido, en núcleos



urbanos. Estas normas son prácticamente todas iguales y más sencillas de predecir; suelen excluir la ejecución de voladuras, ya que se refieren a vibraciones y ruidos continuos, originados por máquinas, tráfico rodado, personas, etc. La *vibración pico partícula máxima* de tierra no deberá exceder los siguientes límites en donde se encuentre cualquier vivienda, edificio público, colegio iglesia o edificio comunal o institucional fuera del área de voladura.

**Tabla N° 13.** Norma Nacional Peruana.

<b>Distancia D desde el área de voladura en pies</b>	<b>PPVmax para vibraciones de tierra en pulg./seg.</b>	<b>Distancia Escalar para usarse en monitoreo sísmicos</b>
0 – 300 pies	1.25	50
301 – 5000 pies	1.00	55
5001 a mas	0.75	65

**Fuente.** Guía Ambiental para Perforación y Voladura – Setiembre 1995.

#### **Limite no regulatorio para vibraciones.**

Las guías de vibraciones en el suelo son establecidas generalmente para sitios de voladuras con el fin de prevenir daños a las instalaciones adyacentes o infraestructuras. Si se excedieran estos límites no implicaría que ocurran daños pero sólo incrementaría el potencial de que ocurriera un daño. Según Siskind y Stagg (1993) sugieren un “límite de PPV de 127 mm/s para tuberías de Clase B o mejores tuberías de acero (o Clase 6 o mejores tuberías de PVC)”. Sin embargo, varias compañías de tuberías en Canadá consideran un límite más conservador de 50 mm/s”.

Los límites de vibraciones en el suelo para materiales más resistentes, como el concreto, se deben establecer en un valor que se encuentre entre 150 mm/s a 200 mm/s, mientras que se requieren de niveles pico de vibraciones en el suelo de 300 mm/s a 600 mm/s para crear micro-grietas o producir aberturas de discontinuidades existentes en el lecho rocoso (Keil et al., 1977).

Richards y Moore (2007) proporcionan una “revisión del potencial de daño debido a vibraciones inducidas por voladuras en minas de carbón a tajo abierto”.

**Tabla N° 14.** Límite de Vibración para varios tipos de Estructuras.

<b>Tipo de Infraestructura</b>	<b>PPV limite (mm/s)</b>	<b>Comentarios</b>
Torres de transmisión de energía*	100	cimentación de concreto
Postes de madera*	240	-
Sub-estaciones eléctricas*	10-30	dependiendo del tipo de switch
Tuberías enterradas**	127	-
Línea de fibra óptica*	100	-
Hormigón < 72hr desde colocación***	10	-
planta mina y edificios industriales*	100	estructura de concreto reforzado

**Fuente:** de\*Richar y Moore (2007) \*\*, Siskind y Stagg (1993)\*\*\* OPSS 120.

### 3.5 MEDIDAS DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS.

Las voladuras de rocas permiten extraer los minerales de la corteza terrestre en minería subterránea como superficial; generando vibraciones durante el proceso. También las vibraciones son comunes en las diversas formas como en las construcciones de obras de

ingeniería civil, así como en demoliciones. El conocimiento de su origen, los fenómenos asociados a su transmisión, medición de sus magnitudes fundamentales y la legislación que las regulan sirven para controlarla, reducirlas y hacerlas imperceptibles, tanto para las personas como para las estructuras cercanas que eventualmente podrían verse afectada por ellas.

En tal sentido existen nuevos modelos de diseño de mallas de perforación y voladura, el diseño de carga de las mezclas explosivas y accesorios para obtener los resultados esperados.

### **3.5.1 Medición.**

Las medidas de vibración tienen por objeto detectar y registrar el movimiento vibratorio que es causado por las fuerzas, que pueden variar en magnitud y dirección. Esto es causado porque parte de la energía de la voladura de roca es transmitida como ondas mecánicas al medio (Agreda Uriarte, 2013, p. 87).

- ✓ Si el macizo rocoso es suave a  $> 0.2$  g.
- ✓ Si el macizo rocoso es competente a  $< 0.2$  g.

Esta información puede ser utilizada para lo siguiente:

- Interpretación sismológica.
- Caracterización y comparación con las normas de control de vibraciones.
- Calculo de dinámicas de estructuras, etc.

El problema básico conectado con la medición de vibraciones es el establecimiento de un punto fijo en el espacio, donde se realizaran las mediciones.

Durante el paso de la energía sísmica, todo el medio está en movimiento al igual que el instrumento de medición; como resultado no se puede realizar una medición absoluta del movimiento, al menos no con los medios convencionales disponibles. Los instrumentos diseñados para medir vibraciones (en general llamados sismógrafos) establecen un punto interno dentro de ellos que permanecen relativamente fijos respecto al macizo rocoso durante el paso de las vibraciones. Entonces las vibraciones son medidas como el cambio en la posición del punto interno del sensor y el macizo rocoso.

#### **3.5.1.1 Variables medidas en vibraciones.**

Estos requieren que se registren tres componentes ortogonales, ya sea del variable desplazamiento, velocidad u aceleración de la partícula, y tienen que estén en función del tiempo continuo o discreto en señal análoga, discreta o serie temporal.

Prácticamente, todas las normas internacionales de manejo de vibraciones han sido desarrolladas a partir del parámetro de velocidad y las mediciones fueron realizadas a partir de instrumentos que miden este parámetro; por ello es deseable medir estas y no otra variables.

- i. Desplazamiento.
- ii. Velocidad.
- iii. Aceleración.

Cada una de estas variables es medida con transductores diferentes. Sin embargo cada señal tiene información de las tres variables en rangos diferentes de frecuencia con diferente nivel de amplificación.

### 3.5.1.2 Rango de magnitud de las variables de vibración por voladura.

El rango de magnitud de las variables medidas en vibraciones generadas por voladura de rocas depende de varios factores, como los siguientes:

- ✓ Distancia de la fuente.
- ✓ Cantidad de mezcla explosiva detonada por intervalo de retardos.

La gran cantidad de combinaciones posibles de los factores antes mencionados hace que el rango de magnitudes sea grande. Downing (2001) sugiere que los rangos generales que se muestran en la siguiente tabla n° 15; mientras tanto Bollinger (1980) presenta valores algo mayores para registros a distancia cortas.

En la tabla n° 15 también se puede observar que estos valores son bastantes grandes: 100 dB para los desplazamientos, 140 dB en las velocidades de partículas y 80 dB en aceleraciones.

**Tabla N° 15.** Rango de los Parámetros de Vibración.

Desplazamiento	0.0001	10 mm
Velocidad de partícula	0.0001	1000 mm/s
Aceleración de partícula	10	100 000 mm/s <sup>2</sup>
Frecuencia	0.5	200 Hz
Longitud de onda	30	1500 m
Duración de pulso	0.1	2 s

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura, (Agreda Uriarte, 2013).

### 3.5.2 Instrumentación.

La instrumentación es el mecanismo que se utiliza para reunir información de algún proceso. Comúnmente al conjunto sensor/transductor se le llama simplemente sensor esto implica que un instrumento está compuesto por varias partes, entre ellas las siguientes:

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

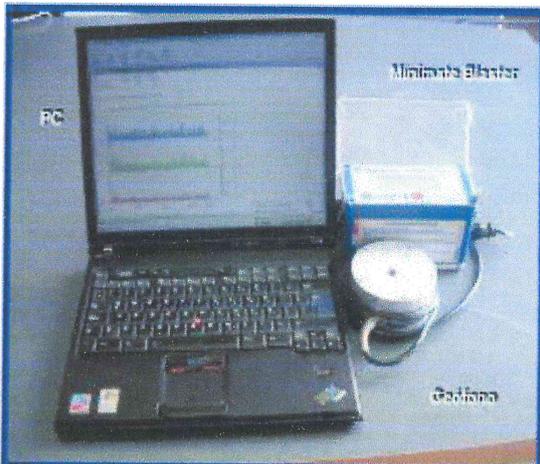


Foto. Componentes para el registro de vibración.



Foto. Sismógrafo White Mini Seis Famesa.

Fuente: Elaboración Propia.

En vibraciones, el sensor es la parte del sistema que responde a una excitación externa, mientras que el transductor es el que se encarga de convertir la respuesta del sistema en una señal eléctrica.

#### **3.5.2.1. Sensibilidad del Sensor.**

La unidad básica de medición de vibraciones en la unidad sísmica (sistema de un grado de libertad con amortiguamiento), se puede describir tres tipos de sensibilidad:

- i. Sensibilidad al desplazamiento.
- ii. Sensibilidad a la velocidad.
- iii. Sensibilidad a la aceleración.

Debido a la relación analítica entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, un instrumento que registra una variable necesariamente registra las otras. La sensibilidad del sismógrafo debe escogerse para producir una señal útil de las vibraciones.

La unidad sísmica, base de muchos instrumentos de vibración es el sismógrafo que puede ser llamado de varias formas tales como lo las siguientes:

- Desplacimetro.
- Velocímetro (geófono en geofísica o genéricamente, sismómetro en sismología e ingeniería).
- Acelerómetro.

#### **3.5.2.2. Tipos de Transductores.**

El tipo de sensor que se utiliza depende de la aplicación particular. En el área de vibraciones de estructuras, dinámica estructural, es usual medir aceleraciones que están

relacionadas directamente con la fuerzas inerciales en las estructuras. Sin embargo, en vibraciones causadas por diversas actividades del hombre, como las siguientes:

- Voladura de rocas en minería subterránea.
- Minería superficial.
- Canteras.
- Obras de ingeniería civil donde intervienen las voladuras de rocas.
- Tráfico vehicular, etc.

Por otro lado, los transductores, que convierten el movimiento en una señal eléctrica dependiendo de la sensibilidad (desplazamiento, velocidad o aceleración) pueden ser los siguientes:

- Transductores de desplazamiento: sistemas capacitivos.
- Transductores de velocidad: sistemas electromagnéticos.
- Transductores de aceleración: sistemas piezoeléctricos y capacitivos.

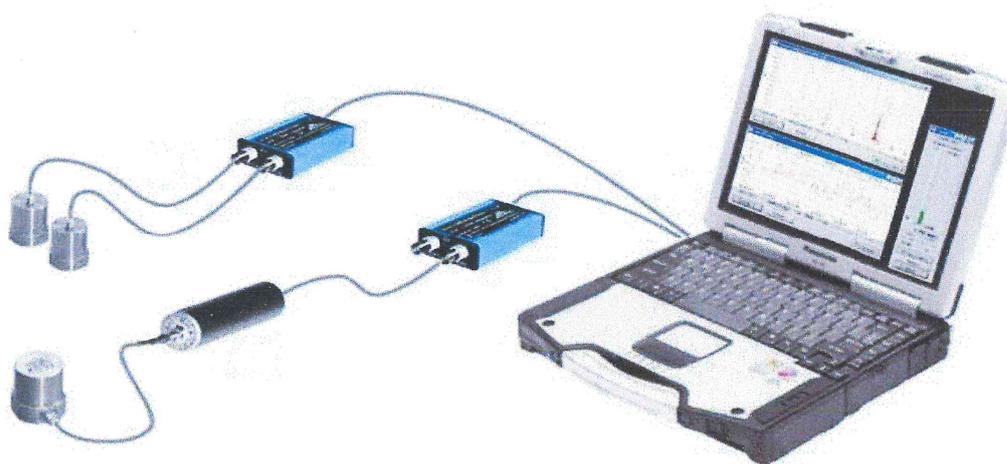
Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son: el geófono y el acelerómetro.

#### **a. Acelerómetros.**

Según Contreras Perez (2009) menciona que “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 debe por lo general ser amplificada previamente a su grabación” ( p.38).

Los acelerómetros reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, robustos, pero caros. Son más complejos de usar, ya que requieren equipamiento auxiliar como fuentes de poder y pre amplificadores, los cuales pueden inducir problemas de ruidos eléctricos significativos

Los acelerómetros pueden ser recomendables cuando los transductores son instalados en superficies, siendo necesario recalcar que se requiere cierta experiencia para la interpretación de los registros de aceleración, en particular a bajas frecuencias.



**Figura N° 22.** Acelerómetro.

**Fuente:** <http://casella-es.com/higiene-industrial-vibraciones/>

Las Características Generales del acelerómetro son:

- Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1Hz a 20.000Hz).
- Su unidad de medida es el g ( $1g=9.8 \text{ m/s}^2$ ), con rangos de 0-250g.
- No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor fiabilidad.
- La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que deben amplificarse con elementos externos.

- Son de pequeño tamaño.
- Alto costo (aprox. US\$ 1.000).

**b. Geófono.**

Según Contreras Perez (2009) menciona que los geófonos entregan una medición directa de la velocidad y consisten por lo general en un sistema de bobina móvil soportada por resorte, y un imán fijo; al contrario del acelerómetro, el geófono opera sobre su frecuencia natural. Cuando se miden frecuencias muy bajas, la salida se ve influenciada por sus características de respuesta (p.39).

La señal resultante en términos del nivel de vibración debe ser corregida adecuadamente; el geófono no es tan robusto como el acelerómetro, por lo cual podría eventualmente dañarse si es mal manipulado. Los geófonos son relativamente baratos y su señal de salida es simple de analizar, no requieren fuente de poder adicional y normalmente no es necesario pre amplificar su señal, antes de su grabación.

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

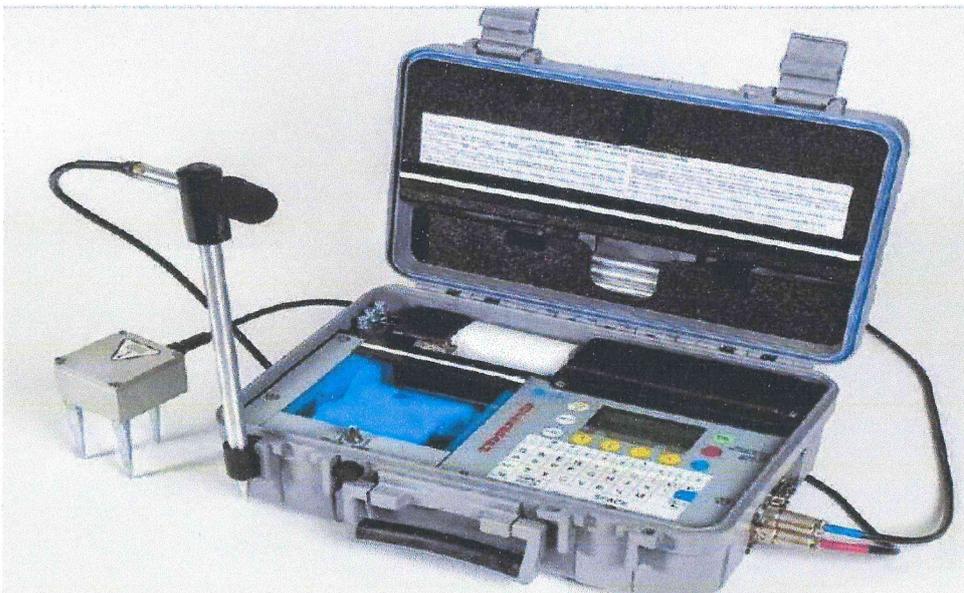
Mediante la comparación entre la señal obtenida por un geófono y la señal registrada por un acelerómetro en el mismo punto, se ha demostrado que los geófonos están inhabilitados para responder a altas frecuencias, lo que sin embargo no es impedimento



en su capacidad para medir velocidad de partícula, según los requerimientos de los datos antes mencionados.

Como regla general se puede establecer que resulta inadecuado usar un transductor de velocidad del tipo bobina móvil, cuando las frecuencias dominantes sean probablemente muy superiores a los 500 Hz.

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



**Figura N° 23.** Geófono.

**Fuente:** <http://www.petroleomundo.com/2015/03/que-es-una-exploracion-sismica.html>

Las características General del geófono son:

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

### **3.5.2.3. Procedimientos para la Instalación del Geófono.**

#### **a. Máximo desplazamiento del Geófono.**

Los geófonos son bobinas que al moverse producen un voltaje inducido, pero este movimiento no puede ser infinito ni mucho menos, 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. Comúnmente los geófonos utilizados tienen un desplazamiento máximo de 2 mm.

#### **b. Numero de Geófonos.**

El número de transductores usados depende de la cantidad de información requerida, por lo tanto existen arreglos de geófonos uniaxiales, los cuales miden la velocidad de partículas en un solo eje, arreglos biaxiales que consisten en dos geófonos orientados en dos ejes y arreglos triaxiales los que permiten registrar la velocidad de partículas en los tres ejes, lo que permite obtener el modulo del vector de velocidad de partículas.

Si se desea examinar la contribución de cada carga de la voladura, o si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, debe ser conocida la fuente generadora de cada vibración. Esto requiere una cuidadosa ubicación y número de transductores a utilizar. Para un adecuado análisis de la detonación de diferentes cargas en coordenadas X, Y, Z, junto a la velocidad de propagación, se necesita un mínimo de 5 transductores.

En la práctica, el número de transductores se incrementa según la complejidad del diseño y cantidad de información necesaria. Cuando se utiliza un gran número de decks por cada tiro, en el registro de vibraciones a cada uno de estos decks se le debe asociar una determinada señal de vibraciones, para lo cual se deben instalar geófonos en diferentes profundidades. El uso de arreglos triaxiales a diferentes profundidades inmediatamente atrás de las voladuras, se utiliza particularmente en voladuras de minas subterráneas. La dirección de movimiento de la bobina móvil al paso de cada vibración determina si el primer arribo de la señal es positivo o negativo, de acuerdo a esto, la dirección de viaje de las ondas y puede ser determinada la localización relativa de la fuente emisora.

### **c. Instalación de los Geófonos.**

Gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con la técnica empleada para instalar y orientar los transductores.

La relación ortogonal entre las 3 componentes de un arreglo Triaxial, se logra ubicando cada una de las tres componentes sobre las caras opuestas de un pequeño trozo de barra en ángulo rígido no conductor. Es necesario mantener una disposición coherente de las tres componentes que asegure, al momento de la instalación, que los primeros arribos de las señales sean de signo positivo o negativo, y esto se mantenga constante.

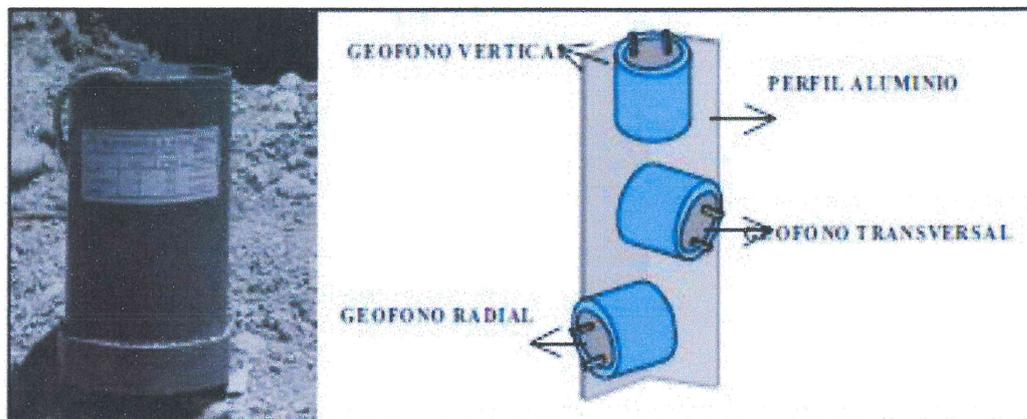


Figura N° 24. Los 3 componentes del sensor del Sismógrafo.

**Fuente:** Monitoreo de los efectos de la Vibración producidas por la Voladura de rocas el Modelo de Vibración de Colque (Anicama Lujan, 2010. p.25).

#### d. Estación de monitoreo de Vibración.

Un sismógrafo también mide el tiempo y la velocidad en 3 direcciones (Longitudinal, Transversal y Vertical), sobre el tiempo; de manera que se puede obtener una información total del disparo.

Para realizar una adecuada interpretación de los datos de vibración, que permitan analizar la secuencia real de iniciación de un determinado número de cargas, en asociación con la posición relativa entre estas y el transductor, es necesario tener absoluto certeza de la orientación real del transductor.

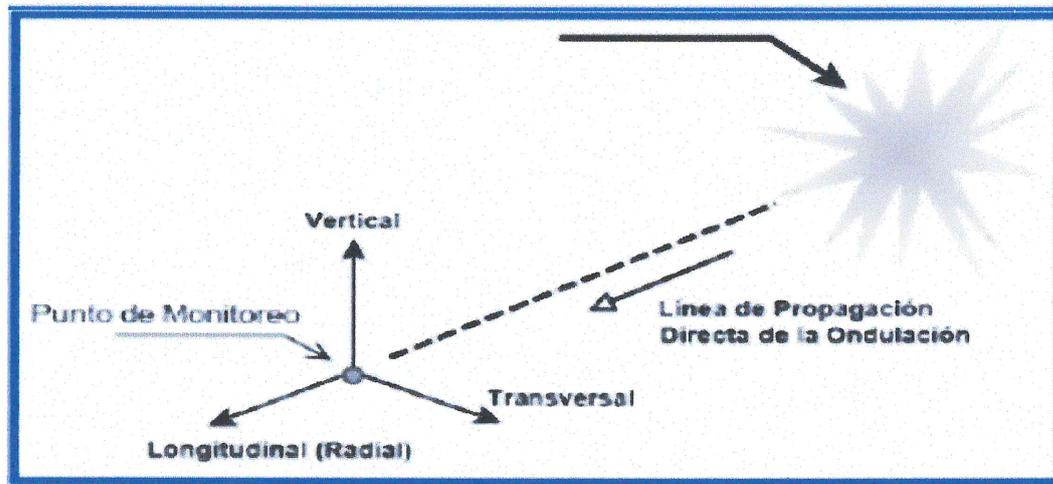


Figura N° 25. Dirección de arribo al Sensor de la Vibración.

Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics.

### 3.6 CONTROLES DE VIBRACIONES.

Según lo indicado por Agreda Uriarte, (2013) menciona que “los controles de vibración inducida por la voladura de rocas son de suma importancia por los efectos negativos que dichas vibraciones pueden ocasionar a: Persona, macizo rocoso, equipo minero, estructuras, plantas, oficinas, animales” (p.107).

Por otro lado, se deben mencionar que los controles de vibración inducidas por la voladura de rocas se lleva a cabo monitoreando dichas vibraciones con los instrumentos requerido y adecuado, usando modelo matemáticos y la metodología postulada por varios investigadores que a continuación se mencionan.

La mayoría de los modelos matemáticos aplicados para el control de las vibraciones inducidas por la voladura de rocas trata de relacionar las siguientes variables:

- Velocidad pico partícula (PPV).
- Amplitud (A).
- Frecuencia (F).
- Distancia escalar (SD).
- Peso de la carga por retardo (W/retardo)  $1/2$ .

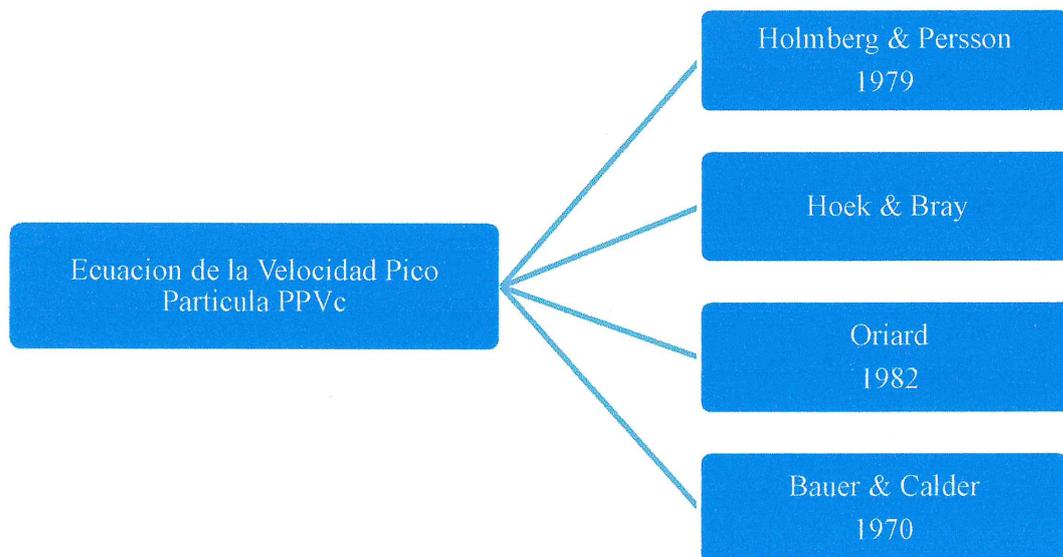
Por otro lado para monitorear las vibraciones inducidas por la voladura de rocas se utiliza lo siguiente:

- Sismógrafo.
- Geófono.

Como define según Agreda Uriarte (2013), *los modelos matemáticos para determinar las Vibraciones inducidas por la Voladura* se sabe las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura son binomiales.

También se sabe que el ataque al macizo rocoso usando la energía físico químico producidos por la detonación de una mezcla explosiva cargada dentro de los taladros es la forma más eficiente y económica para obtener una fragmentación adecuada y uniforme, la misma que tiene una influencia determinante en las demás operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado.

Los niveles de daño límites sugeridos por los siguientes investigador inmersos en estas investigaciones son los siguientes:



**Figura N° 26.** Análisis de la Velocidad Pico Partícula Crítica PPVc.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Para el caso, se tratara los siguientes modelos matemáticos para determinar las vibraciones inducidas por la voladura según lo mencionado en el "Análisis y Control de Vibraciones en Voladura" del (Agreda Uriarte, 2013, p. 115).

### 3.6.1 Vector suma de la Velocidad Pico Partícula PPV.

$$PPV = (V_l^2 + V_t^2 + V_v^2)^{1/2} \quad 3.6.1$$

Dónde:

$V_l$ : velocidad pico partícula longitudinal (mm/s).

$V_t$ : velocidad pico partícula transversal (mm/s).

$V_v$ : velocidad pico partícula vertical (mm/s).

### 3.6.2 Calcular la Velocidad Pico Partícula Crítica PPVc.

Los altos niveles de vibración producidos por voladuras pueden dañar el macizo rocoso, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. Las vibraciones en este contexto pueden ser consideradas como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

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

La velocidad de vibración de las partículas, frecuentemente es relacionada con su habilidad para inducir nuevo fragmentos, a través de la relación entre la velocidad de partícula y deformación de partícula, valido esto para condición de roca confinada en la vecindad inmediata a las cargas explosivas, en donde el impacto de la voladura es más intenso y los niveles de esfuerzo inducidos son similares a los esfuerzos necesarios para la fragmentación de la roca. Dada esta relación con deformación es que el análisis de velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un buen método para estimar el grado de fragmentación inducido por voladura. Esto tendría la forma de:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} \quad 3.6.2$$



De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico, la velocidad de partícula máxima PPVc, que puede ser soportado por la roca antes de que ocurra la falla por tensión, es estimada conociendo la resistencia a la tracción ( $\sigma_t$ ), el módulo de Young dinámico (E) y la velocidad de propagación del a onda P ( $V_p$ ) usando la ecuación:

$$PPV = \left( \frac{\sigma_t * V_p}{E} \right) \quad 3.6.3$$

Dónde:

E: módulo de elasticidad de Young (Gpa).

$\sigma_t$ : resistencia a la tracción de la roca (Mpa).

$V_p$ : velocidad sónica de la roca (m/s).

Según lo indicado para el *criterio de daño* al macizo rocoso producido por las voladuras según PPVc se tiene las siguientes tablas. El *criterio de daños* ha sido estudiado e investigado por varios investigadores, estos son los siguientes:

**Tabla N° 16.** Criterio de Daño de Holmberg & Persson 1979.

Intenso fracturamiento	PPV > 4 PPVc
Creación de nuevas fracturas	PPV > 1 PPVc
Extensión de fracturas existentes	PPV > 1/4 PPVc
Sobre quiebre	PPV > 8 PPVc

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.115).



**Tabla N° 17. Criterio de Daño de Hoek & Bray.**

Quiebre de roca	2500 mm/s
Inicio de quiebre	650 mm/s
Caída de roca en galería no revestida	300 mm/s
Daño menor agrietamiento de yeso o estocado.	130 mm/s

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.115).

**Tabla N° 18. Criterio de Daño de Oriard.**

Caída ocasional de roca suelta	5 – 10 mm/s
Caída de secciones de roca parcialmente suelta	130 – 380 mm/s
Daño de rocas poco componentes	>600 mm/s
Daño significativo de rocas competentes	>2500 mm/s

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.115).

**Tabla N° 19. Criterio de Daño de Bauer & Calder 1971.**

No hay peligro en roca sana	<250 mm/s
Puede aparecer desconstramiento en lajas por rotura de tracción	250 – 650 mm/s
Grandes roturas por tracción o algunas grietas radiales	650 – 2500 mm/s
Agrietamiento total del macizo rocoso	>2500 mm/s

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (Agreda Uriarte, 2013, p.115).

Bajos estas premisas se va a hallar la distancia mínima hasta la cual se creara las nuevas fracturas en el macizo rocoso (**Anexo n° 07**).



### 3.7 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.

- **Aceleración:** razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo.
- **Amplitud.** Es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.
- **Análisis Espectral:** Es la interpretación que se hace a un espectro para determinar el significado físico de los que pasa en una máquina.
- **Frecuencia:** Es el recíproco del periodo y significa número de oscilaciones completas por unidad de tiempo.
- **Frecuencia Natural:** es la frecuencia que presenta cada componente por su propia naturaleza y característica. Esta frecuencia oscilará si es excitada por agente externo que opere a una frecuencia muy cercana.
- **Periodo.** Es el tiempo necesario para que ocurra una oscilación o complete un ciclo. Generalmente está dada en minutos y segundos.
- **Resonancia:** se presenta cuando la frecuencia natural de un componente es excitada por un agente externo. La amplitud de vibración de la máquina se incrementará enormemente, causando perjuicios a todos sus componentes.
- **Sensor:** es un dispositivo de medición que transforma una variable física en una señal eléctrica. En nuestro caso pasa de una a señales físicas de vibración y la convierte en una señal eléctrica.
- **Voladura:** Acción por la cual la presión de gases originadas de compuestos químicos fragmentan la roca.
- **Roca:** agregado natural de partículas de uno o más minerales, con fuerte unión cohesiva permanente, que constituyen masas geológicamente independientes y cartografiables.
- **Macizo rocoso:** conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter v heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo,

consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánicos e hidrológico.

- **Geomecánica:** Estudia el comportamiento del macizo rocoso.
- **Explosivos:** son materiales que pueden ser iniciados por fulminante, los cuales son colocados en taladros para su detonación, que permite romper rocas o mineral, mediante la producción de gases, que dan lugar a una presión que es capaz de romper la roca, por el aumento de volumen del explosivo al convertirse en gas.
- **Carga lineal:** la concentración de explosivo, medida en kg/m a lo largo de un pozo de tronadura. El término puede ser independiente de diámetro del pozo (por explosivos desacoplados), o dependiente del diámetro (explosivo acoplados).
- **Burden (B):** el burden de un pozo se refiere a la dimensión lineal entre el pozo y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de pozos que constituyen una fila.
- **Espaciamiento (E):** el espaciamiento para un pozo de tronadura se refiere a las dimensiones lineales entre pozos de tronadura adyacentes que forma una fila y se mide usualmente paralelo a la cara libre.
- **Transformada rápida de Fourier (FFT):** es una técnica para calcular por medio de una computadora la frecuencia de las series que conforman la onda en el dominio del tiempo.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y CREACIÓN DEL MODELO

#### PREDICTIVO

Como se expresó al principio el objetivo de la presente investigación es determinar un modelo predictivo de vibración, para eso se utilizara los datos registrados por el geófono, las cuales nos dieron la velocidad pico partícula de sus 3 ejes como la resultante de esta, de igual modo la frecuencia de los 3 ejes del vector. Este tipo de trabajo se realizó en un tipo de roca sedimentaria como la Caliza (**Anexo n° 08**).

La capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la Velocidad Pico la Partícula y la Frecuencia con que la onda se traslada por el medio del macizo rocoso.

La velocidad de la partícula es representada por un vector de tres componentes: la dirección vertical compuesta por el eje Z, la dirección longitudinal compuesta por el eje X (que une con una línea imaginaria el centro de masa de la detonación con el punto de medición) y la dirección transversal compuesta por el eje Y (forma 90° con la longitudinal en el mismo plano horizontal).

Es importante destacar por otra parte para sismógrafos que no posee el programa de integración para el cálculo de la velocidad pico partícula resultante, se permite la *suma vectorial de los máximos* identificados en cada una de las componentes aunque se produzcan en tiempos diferentes. Estas aseveraciones realizada por Charpot (1981), muestra que ese método para el cálculo de la velocidad pico partícula trabaja a favor de

la seguridad, ya que en la peor de las hipótesis la velocidad resultante estimada será igual a la velocidad resultante real.

**Tabla N° 20.** Velocidad de cada Componente y PPV.

Ítem	R	T	V	Vector PPV	Ítem	R	T	V	Vector PPV
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s		mm/s	mm/s	mm/s	mm/s
1	2.794	2.794	4.064	4.317	18	7.858	8.675	8.567	11.654
2	5.334	5.334	3.048	6.223	19	2.841	2.565	2.454	1.156
3	3.556	2.286	3.81	4.318	20	2.47	3.844	3.704	3.812
4	7.62	5.334	5.08	7.747	21	1.216	1.154	1.112	1.859
5	7.112	6.858	6.858	8.636	22	4.158	3.441	3.245	5.531
6	3.048	5.334	4.572	5.588	23	10.428	10.353	11.768	16.979
7	1.778	1.016	0.762	2.032	24	4.164	5.234	6.123	5.645
8	2.794	3.556	2.032	4.191	25	10.881	9.466	9.355	13.53
9	4.064	4.318	5.842	6.477	26	6.669	6.853	6.355	10.821
10	7.366	11.938	9.398	13.462	27	2.5	2.435	2.434	2.978
11	12.192	10.992	11.938	16.637	28	1.809	2.215	1.923	1.626
12	1.778	2.54	1.524	2.794	29	6.095	6.244	7.345	10.054
13	2.54	2.286	3.048	3.302	30	7.287	11.351	8.912	14.254
14	4.572	3.81	4.826	5.842	31	2.883	2.355	2.653	3.198
15	2.929	2.933	2.267	3.373	32	3.683	2.244	3.64	2.792
16	5.659	4.856	5.669	7.454	33	3.191	2.245	2.577	1.285
17	1.646	1.977	1.286	1.503	34	5.36	4.987	5.132	6.871

**Fuente:** Elaboración Propia.



La tabla n° 20 muestra los valores para cada componente del vector velocidad pico partícula PPV, donde se registró 34 eventos de medición durante la ejecución de la voladuras por el sismógrafo, para nuestro caso analizaremos los 34 eventos de voladura ejecutada durante la construcción de los caminos pioneros tramo 01 Las Bambas.

Realizando un análisis estadístico mediante el uso del programa Excel obtendremos los valores mínimo de velocidad 1.156 m/s y como máximo 16.979 m/s, su medida de tendencia central ser de la media de 6.41 mm/s y la mediana de 5.56 mm/s.

La tabla n° 21 muestra los valores del vector frecuencia de las tres componentes derivadas de los espectros de frecuencia obtenidos a partir de la *Transformada rápida de Fourier* (FFT) de los valores de amplitud provenientes de la velocidad registrada de la voladura en el punto de medición. Para cada componente de velocidad de las variables x,y,z pertenece igual manera una frecuencia en cada uno de los ejes, para el análisis corresponde determinar cuál de esas tres frecuencias recae la frecuencia dominante.

Además se muestra en esta tabla el eje de la variable correspondiente a la frecuencia dominante seguidamente el valor, dicha frecuencia está asociada al valor máximo de la velocidad de cada componente registrado en cada evento de la ejecución de la voladura..

Tabla N° 21. Frecuencia asociada a cada Componente y Frecuencia Dominante.

Ítem	R	T	V	Var. Dom.	Frec. Dom.	Ítem	R	T	V	Var. Dom.	Frec. Dom.
	Hz.	Hz.	Hz.		Hz.		Hz.	Hz.	Hz.		Hz.
1	22.2	11.6	25.6	V	25.6	18	21.4	22.5	29.4	T	22.5
2	34.1	30.1	25.6	T	30.1	19	55.9	44.3	34.4	R	55.9
3	8.8	10	34.1	V	34.1	20	23.7	37.2	25.8	T	37.2
4	14.6	12.4	12.1	R	14.6	21	50.3	48.4	42.1	R	50.3
5	24.2	16	16.5	R	24.2	22	30.1	23.9	25.2	R	26.7
6	8	25.8	8.1	T	25.8	23	15	19.8	16.4	V	16.4
7	34.6	24.3	21.3	R	34.6	24	23.7	22.9	27.3	V	27.3
8	18.2	32	16.5	T	32	25	17.1	18.1	19.2	R	17.1
9	12.1	21.3	26.9	V	26.9	26	17	20.9	19.2	T	20.9
10	13.4	17	18.9	T	17	27	37.4	32.8	30.1	R	37.4
11	18.9	23.2	21.3	R	18.9	28	53.3	49	48.8	T	53.3
12	39.3	42.6	47.3	T	42.6	29	22.7	25.9	18.3	V	18.3
13	30.1	23.2	32	V	32	30	23.2	15.6	35.1	T	15.6
14	20.4	26.9	22.2	V	22.2	31	39.8	35.9	34	R	39.8
15	33.8	37.5	23.6	T	33.7	32	44.8	38.7	33.3	R	44.8
16	22	24.5	29	V	29	33	52.1	44.3	41.5	R	52.1
17	41.2	49.7	39.5	T	49.7	34	22.5	19.2	18.6	R	22.5

Fuente: Elaboración Propia.

De la frecuencia dominante se tiene como mínimo 14.60 Hz y como máximo 55.60 Hz, la medida de posición central media aritmética de 30.91 y la mediana de 28.15. Estos rangos se encuentran dentro del permitido para el equipo que registran estos datos.

La figura n° 27 ejemplifica los valores de frecuencia obtenidos para cada componente, ubicando el valor de frecuencia máxima correspondiente dentro del espectro de frecuencia. Para cada vector velocidad conformado por cada componente X, Y, Z pertenece de igual manera una frecuencia en cada uno de los ejes, para el análisis corresponde determinar cuál de esas tres frecuencias recae la frecuencia dominante.

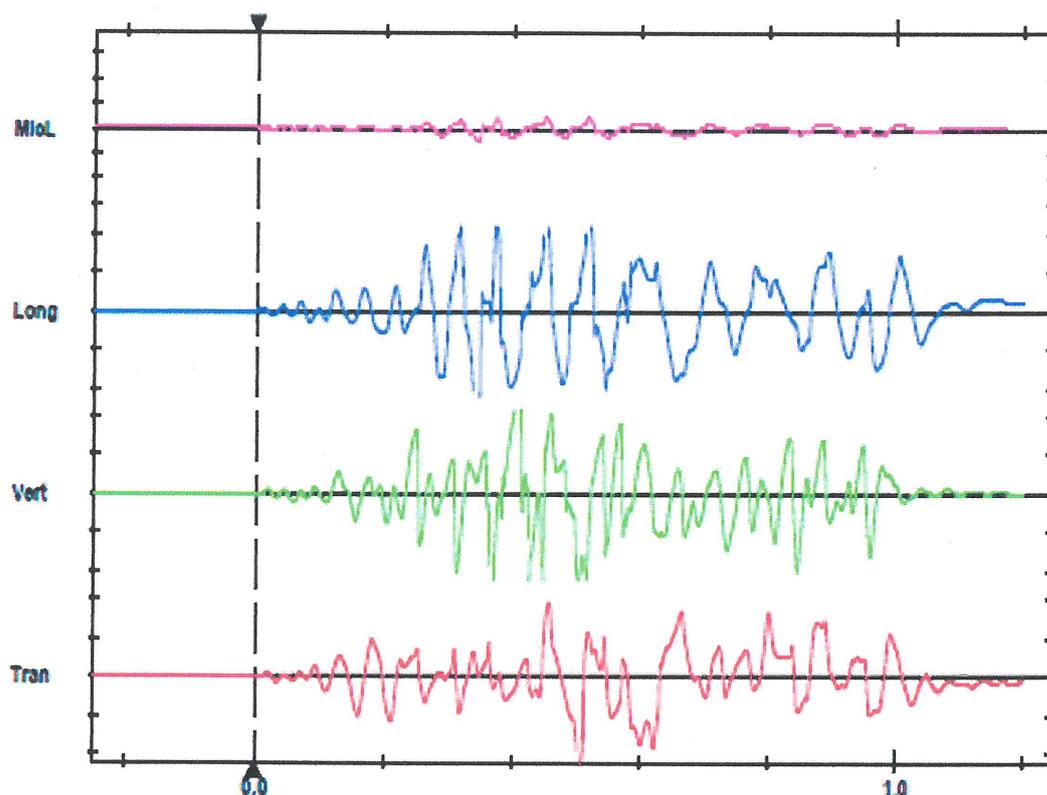


Figura N° 27. Ejemplo del espectro de la Frecuencia para cada Componente.

Fuente: Famesa Explosivos P&V Las Bambas.

**Tabla N° 22.** Distancia, Carga, PPV y Frecuencia Dominante.

Item	Distance	Charge	PPV vector	Frec. Dom.	Item	Distance	Charge	PPV vector	Frec. Dom.
	m	Kg.	mm/s	Hz.		m	Kg.	mm/s	Hz.
1	111	240	4.317	25.6	18	103	525	11.654	22.5
2	111	240	6.223	30.1	19	307	480	1.156	55.9
3	112	400	4.318	34.1	20	222	900	3.812	37.2
4	112	375	7.747	14.6	21	240	480	1.859	50.3
5	70	320	8.636	24.2	22	170	600	5.531	26.7
6	152	525	5.588	25.8	23	92	675	16.979	16.4
7	175	200	2.032	34.6	24	160	825	5.645	27.3
8	174	450	4.191	32	25	88	600	13.53	17.1
9	132	390	6.477	26.9	26	120	600	10.821	20.9
10	67	400	13.462	17	27	192	600	2.978	37.4
11	80	600	16.637	18.9	28	245	320	1.626	53.3
12	240	675	2.794	42.6	29	115	675	10.054	18.3
13	150	480	3.302	32	30	97	850	14.254	15.6
14	160	750	5.842	22.2	31	187	375	3.198	39.8
15	180	750	3.373	33.7	32	200	750	2.792	44.8
16	139	900	7.454	29	33	254	240	1.285	52.1
17	252	480	1.503	49.7	34	140	450	6.871	22.5

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla n° 22 se muestra los valores de las variables como la distancia del punto de ubicación del sismógrafo con respecto al área del proyecto de voladura, la carga operante máxima en un tiempo instantáneo durante el proceso de voladura, velocidad pico partícula resultante y frecuencia dominante resultante datos que fueron registrados por el sismógrafo, estos fueron 34 eventos. Los parámetros del diseño de carga se ejecuta previa consulta con el área de P&V del Proyecto minero Las Bambas, esta será plasmado en el llamado protocolo de voladura el cual hace referencia entre otras cosas el radio de influencia de la voladura, el diseño de carguío con material explosivo, el diseño de la simulación mediante la aplicación con el software JK Simblast, etc. (**Anexo n° 09**).

La distancia entre la voladura y el punto de medición varían según la topografía o la necesidad de toma de dato de algún lugar donde se ubicó infraestructuras para tomar las precauciones del caso. La distancia mínima es de 67 m y su máximo es de 307 m la medida de tendencia central como la media es de 157.32 m y la mediana es de 151 m. Con respecto a la carga operante se tomó criterio 8 taladros detonados simultáneamente para los diferentes diseños de carguío de voladura las cuales fueron de 15 kg, 30 kg, 45 kg, 60 kg 75 kg y 90 kg por taladro. Se obtuvo como mínimo de 200 kg/voladura y un máximo de 900 kg/voladura y la medida de tendencia central como la media es de 532.94 kg/voladura y de la mediana es de 502.50 kg/voladura.

#### **4.1 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA.**

##### **4.1.1 Escalador.**

Los parámetros como son velocidad pico partícula, distancia y carga explosiva toma una relevancia muy importante en la ecuación, obviamente la variable independiente es la

Distancia (D) y Carga Operante (Q), mientras la Velocidad Pico Partícula (PPV) es la variable dependiente. De estas 2 variables mencionadas anteriormente al trabajar con las 2 variables independientes se nos complicaría hallar un modelo predictivo para ello se utiliza una herramienta muy importante como es el Escalador.

La importancia de generar el Escalador es para evaluar la ecuación de la velocidad pico partícula en función de una variable la cual la llamaremos Escalador de la vibración, esta dependerá de 2 variables como son la distancia (D) y la carga operante explosiva máxima por tiempo de retardo en (Q).

Existen diversos investigadores del *Escalador*, pero utilizaremos lo mencionado por el investigador DEVINE (1962), este se reemplazara en la ecuación de la velocidad pico partícula llamada también ley de atenuación. Se tendrá la siguiente forma de la ecuación:

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

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula máxima (mm/s).

K: factor de amplitud, son constantes que dependen de las características propias del lugar en estudio como es la geología, suelos, topografía, etc.

D: distancia desde el punto de detonación hasta un punto de referencia (m).

Q: carga máxima de la mezcla explosiva detonada por tiempo de retardo (Kg).

b: factor de decaimiento o factor de atenuación, valor comprendido entre 0.5 y 2.



**Tabla N° 23.** Escalador según el Modelo del Investigador DEVINE.

Item	N° Blasting	PPV vector	Esc. SD	Item	N° Blasting	PPV vector	Esc. SD
		mm/s	m/kg <sup>0.5</sup>			mm/s	m/kg <sup>0.5</sup>
1	3	4.317	7.17	18	30	11.654	4.5
2	4	6.223	7.17	19	32	1.156	14.01
3	6	4.318	5.6	20	33	3.812	7.4
4	8	7.747	5.78	21	34	1.859	10.95
5	9	8.636	3.91	22	35	5.531	6.94
6	10	5.588	6.63	23	36	16.979	3.54
7	11	2.032	12.37	24	37	5.645	5.57
8	12	4.191	8.2	25	38	13.53	3.59
9	14	6.477	6.68	26	39	10.821	4.9
10	15	13.462	3.35	27	40	2.978	7.84
11	16	16.637	3.27	28	41	1.626	13.7
12	17	2.794	9.24	29	42	10.054	4.43
13	23	3.302	6.85	30	43	14.254	3.33
14	26	5.842	5.84	31	44	3.198	9.66
15	27	3.373	6.57	32	45	2.792	7.3
16	28	7.454	4.63	33	46	1.285	16.4
17	29	1.503	11.5	34	47	6.871	6.6

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los valores del *Escalador* se muestra en la tabla n° 23 Para ello reemplazaremos los valores de carga máxima de la mezcla explosiva detonada durante un intervalo de tiempo y la distancia desde la detonación del explosivo en el taladro al punto de referencia de ubicación del sismógrafo.

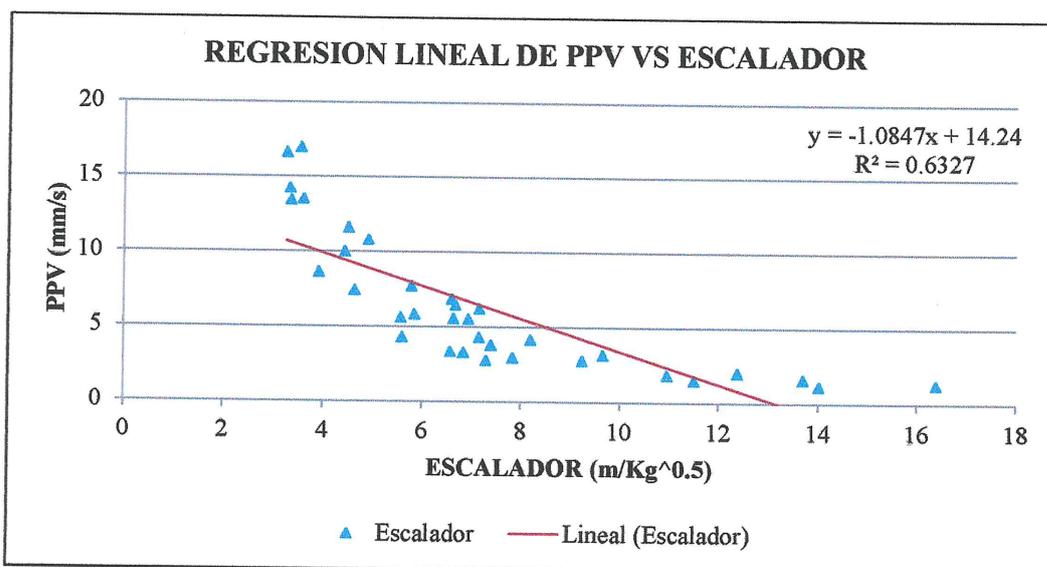
#### 4.1.2 Creación de la Ecuación o Modelo de Vibración.

Determinado el *Escalador* se procederá a determinar el factor de amplitud y el factor de decaimiento de la ecuación de la velocidad pico partícula PPV. Dicho esto se procede luego a generar el modelo predictivo de vibración durante la etapa de Construcción de los caminos Pioneros tramo 01 en la proyecto minera Las Bambas (Anexo n° 10).

Como se detalló anteriormente el modelo predictivo donde sus parámetros como factor de amplitud “K” y el factor de decaimiento “b” serán determinado al hacer un análisis de regresión lineal para poder ver si nuestros puntos de dispersión de la velocidad pico partícula se ajustan a una ecuación o línea de tendencia.

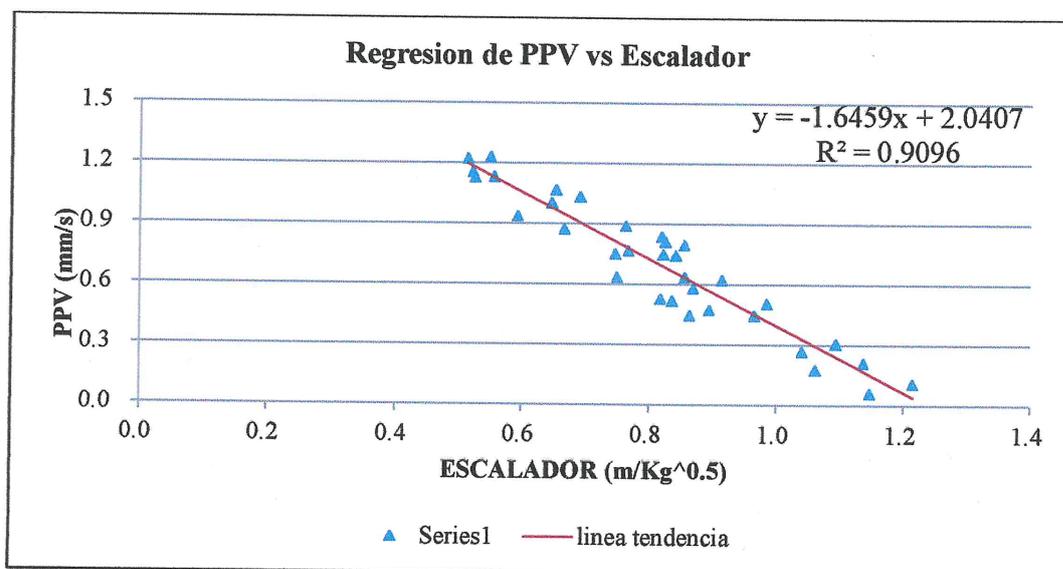
A continuación en la figura n° 28 se representa, en el eje de la abscisa el *Escalador* y en el eje de la Ordenada la velocidad pico partícula. Cuando aplicamos la regresión lineal con la ayuda del software Excel nos da como resultado un coeficiente de determinación de 0.6327 el cual nos indica con nuestro puntos de dispersión en el plano cartesiano no se ajusta a la ecuación de la recta siendo esta ecuación no muy confiable.





**Figura N° 28.** Regresión Lineal de la PPV en función del Escalador.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura N° 29.** Potencia convertida por medio Logarítmicos a una Regresión Lineal.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Por consecuente procederemos a aplicar con la ayuda del programa Excel el logaritmo tanto a la variable dependiente (PPV) como a la variable independiente el Escalador (SD) como se ve en la figura n° 29. Una vez aplicado la función logaritmo este se

ajustaría a una regresión no lineal, recordemos que la ecuación de la vibración es potencia, por esta razón lo más adecuado sería una regresión de potencia.

Entonces el resultado de la ecuación lineal de la figura n° 29 la transformaremos a la ecuación de potencia la cual es su forma general de la ecuación de vibración, su ajuste de los puntos de dispersión de la regresión no lineal se podría hallar los valores que se busca en esta investigación como es el factor de decaimiento y el factor de amplitud para el tramo 01 de los caminos pioneros.

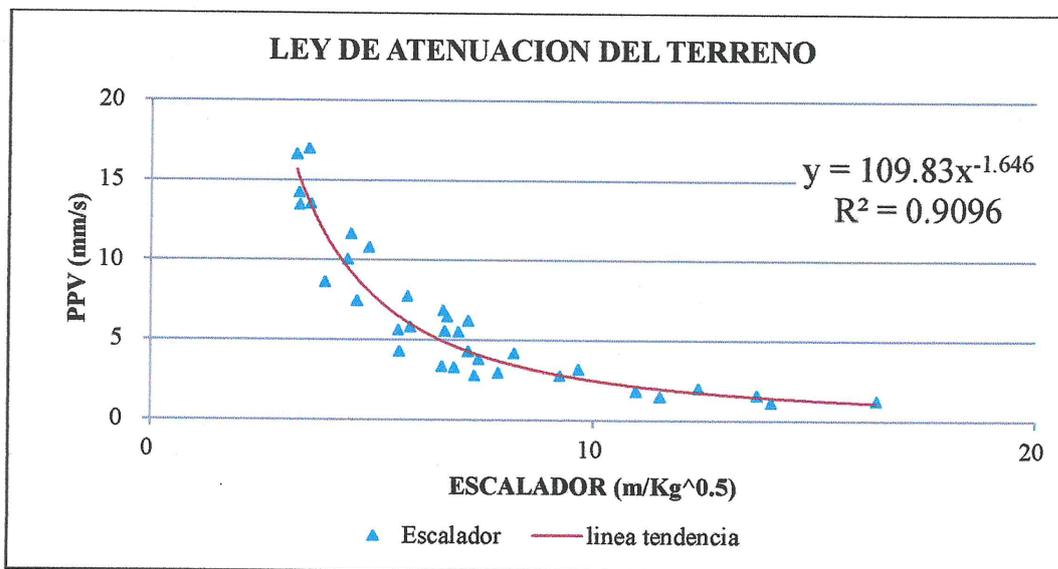


Figura N° 30. Regresión no Lineal Potencia de la PPV en función del Escalador.

Fuente: Elaboración Propia.

La figura n° 30 se puede apreciar que la ecuación de regresión no lineal (potencia) se ajusta mejor a los puntos que se encuentran en el plano cartesiano donde se ubicó el escalador vs velocidad pico partícula, Su coeficiente de determinación es de 0.9096 lo cual nos indica que los puntos de dispersión se ajustan más a la ecuación de la recta estos datos tiene un mayor grado de confiabilidad para indicar la ecuación como el

modelo predictivo de vibración, este resultado será tomado en cuenta para resolver los otros problemas de nuestra investigación.

#### 4.2 ANÁLISIS DE LA DISTANCIA MÍNIMA DE SEGURIDAD.

La *Estadística Descriptiva* nos permite determinar los valores para hallar nuestros histogramas y las medidas de dispersión o variación como los son el rango, desviación media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación. (Anexo n° 11).

El histograma es una manera muy común de presentar gráficamente datos cuantitativos, a diferencia del gráfico de barras un histograma no tiene separaciones entre rectángulo de clases adyacentes. El procesamiento se agrupa en intervalos las muestras o datos según su magnitud representando su frecuencia de aparición.

En la tabla n° 24 se muestra el histograma para la frecuencia de la partícula según lo hallado por medio de la estadística descriptiva.

**Tabla N° 24.** Histograma de la Frecuencia de la Partícula.

Ki	Li	Ls	Ii	fi	Fi	hi	Hi	hi (%)	Hi (%)
1	14.60	21.48	[14.6-21.483)	8	8	0.235	0.235	23.53	23.53
2	21.48	28.37	[21.483-28.366)	9	17	0.265	0.500	26.47	50.00
3	28.37	35.25	[28.366-35.249)	7	24	0.206	0.706	20.59	70.59
4	35.25	42.13	[35.249-42.132)	3	27	0.088	0.794	8.82	79.41
5	42.13	49.02	[42.132-49.015)	2	29	0.059	0.853	5.88	85.29
6	49.02	55.90	[49.015-55.898)	5	34	0.147	1.000	14.71	100.00

**Fuente:** Elaboración Propia.

La *frecuencia dominante* es mostrada en la Figura n° 31 a partir de nuestra tabla n°24 donde el análisis estadístico muestra que seis son el número de clase que abarcan el histograma de frecuencia, destacando el rango correspondiente a las frecuencias ubicadas entre los 21.48 Hz y 28.36 Hz debido a que aquí se encuentra la mayor cantidad de población de datos con 9 muestras sobre una población total de 34 datos. La media agrupada obtenida para la distribución de la frecuencia es de 31.20 Hz y una desviación típica de 11.93.

La distribución de la frecuencia no se ajusta a la desviación estándar porque no existe una frecuencia claramente definida, si no por el contrario un gran espectro de frecuencias agrupadas en varias poblaciones, una distribución que se encuentra alrededor promedio de los 25 Hz y otra distribución alrededor de los 52 Hz aproximadamente. Se observa que los valores de frecuencia dominante varían en un rango bastante amplio con un valor mínimo de 14.6 Hz en el punto 04 hasta un valor de frecuencia que alcanzan 55.90 Hz en el punto 19. Todos los valores de frecuencia entran en el rango de frecuencia del equipo de medición.

Los puntos 04 y 30 poseen frecuencias de 14.6 y 15.6 Hertz respectivamente, estos valores de frecuencia al ser bajos adquieren un gran interés sobre este tipo de estudios de control de vibraciones, debido a que el movimiento vibratorio de la frecuencia

principal puede ser de igual a la frecuencia natural de la estructura, caso en el que el movimiento se amplificara generándose el efecto de resonancia. A causa de esto las deformaciones serán más importantes en la edificación, según (Sánchez, 1995).

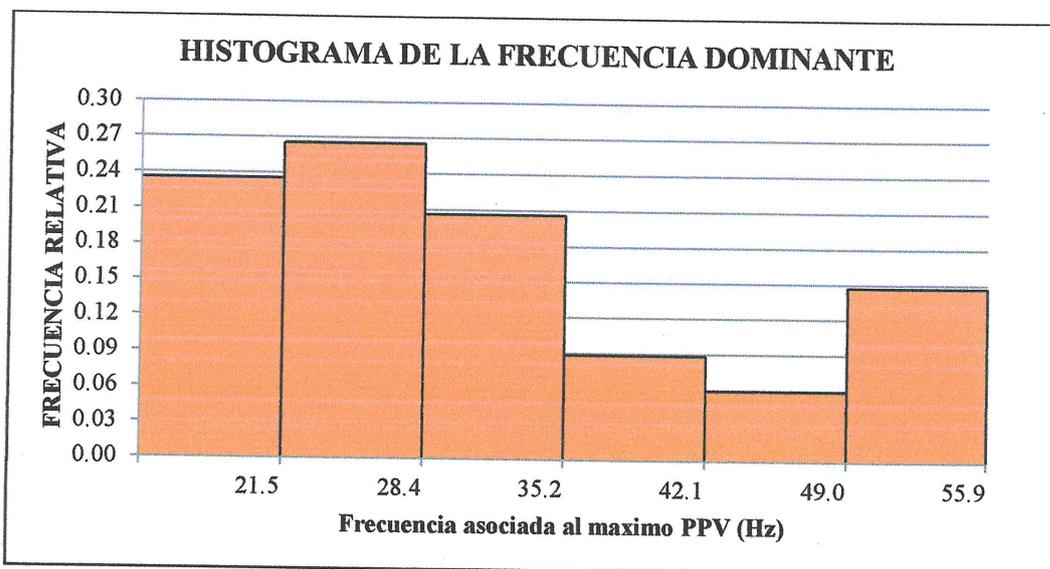


Figura N° 31. Histograma de Frecuencia para Frecuencia Dominante.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 25. Histograma de la Velocidad de la Partícula.

Ki	Li	Ls	Ii	fi	Fi	hi	Hi	hi (%)	Hi (%)
1	1.156	3.793	[1.156-3.7932)	12	12	0.353	0.353	35.29	35.29
2	3.793	6.430	[3.7932-6.4304)	9	21	0.265	0.618	26.47	61.76
3	6.430	9.068	[6.4304-9.0676)	5	26	0.147	0.765	14.71	76.47
4	9.068	11.705	[9.0676-11.7048)	3	29	0.088	0.853	8.82	85.29
5	11.705	14.342	[11.7048-14.342)	3	32	0.088	0.941	8.82	94.12
6	14.342	16.979	[14.342-16.9792)	2	34	0.059	1.000	5.88	100.00

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla n° 25 se muestra el histograma para la velocidad pico partícula según lo hallado por medio de la estadística descriptiva.

La *velocidad pico partícula* se muestra en la figura n° 32 de acuerdo al análisis de la tabla n°25, de la figura se puede destacar que la mayor población de datos se encuentra ubicada entre por 1.15 mm/s y 3.79 mm/s con una cantidad de datos de 12 muestras, resaltando una media agrupada de 6.35 mm/s. Se observa además que tiene un máximo de 16.979 mm/s y un mínimo de 1.156 mm/s; su desviación estándar es de 4.53.

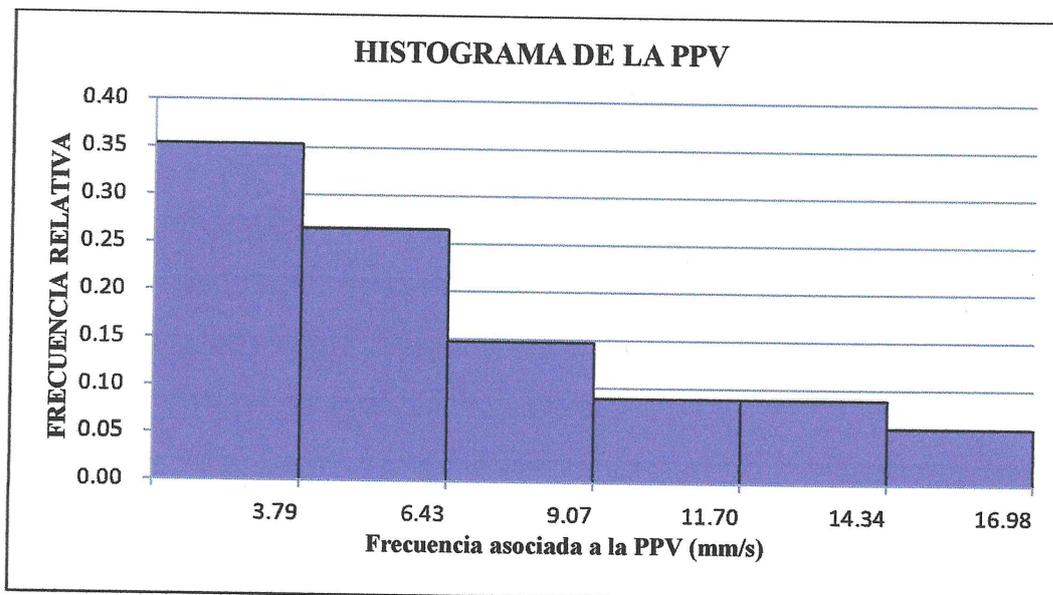


Figura N° 32. Histograma de Frecuencia para la PPV.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla n° 26 se muestra el histograma de la Distancia de la ubicación del geófono con respecto al taladro de la malla de voladura la cual registra la vibración de la según lo hallado por medio de la estadística descriptiva.

Tabla N° 26. Histograma de la Distancia.

Ki	Li	Ls	Ii	fi	Fi	hi	Hi	hi (%)	Hi (%)
1	67.00	107.00	[67-107)	7	7	0.206	0.206	20.59	20.59
2	107.00	147.00	[107-147)	9	16	0.265	0.471	26.47	47.06
3	147.00	187.00	[147-187)	8	24	0.235	0.706	23.53	70.59
4	187.00	227.00	[187-227)	4	28	0.118	0.824	11.76	82.35
5	227.00	267.00	[227-267)	5	33	0.147	0.971	14.71	97.06
6	267.00	307.00	[267-307)	1	34	0.029	1.000	2.94	100.00

Fuente: Elaboración Propia.

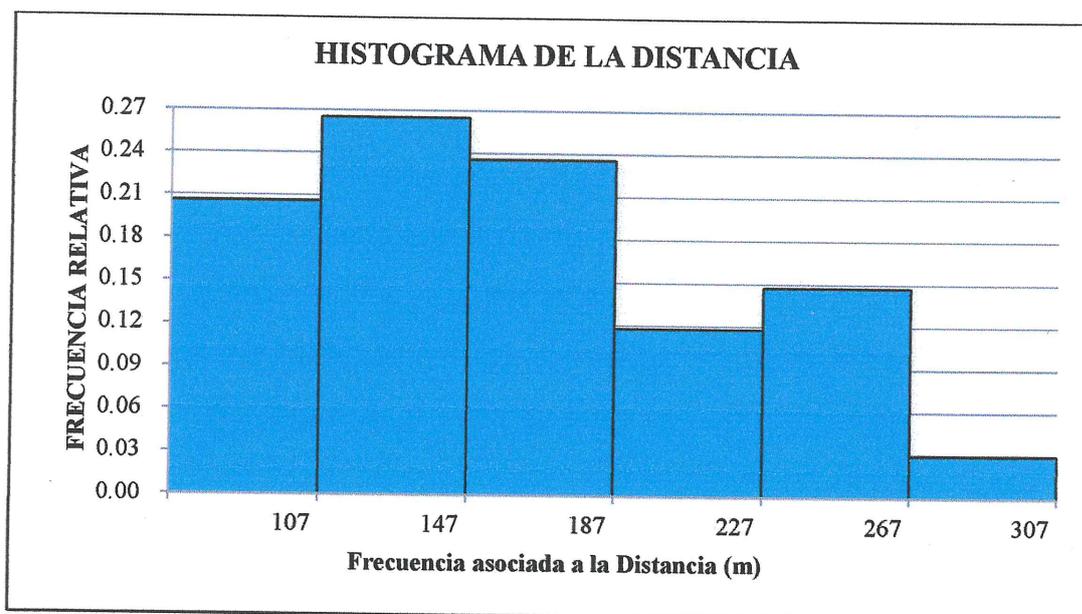


Figura N° 33. Histograma de Frecuencia para la Distancia.

Fuente: Elaboración Propia.

La *distancia* es un parámetro importante de controlar para los estudios sobre control de vibraciones, de forma tal que se requiere hacer un análisis estadístico de los valores obtenidos de distancia. La figura n° 33 se obtuvo de la tabla n° 26 donde se muestra el

histograma de frecuencia para la distancia en donde se puede observar que la media agrupada es 159.94 m, con una desviación estándar de 60.75. La distancia entre la voladura y el punto de medición varían desde 67 m en la posición de 10 hasta los poco más de 307 m en el evento de voladura número 19.

En la tabla n° 27 se muestra el histograma de la Carga operante por tiempo de retardo en la voladura.

**Tabla N° 27.** Histograma de la Carga.

Ki	Li	Ls	li	fi	Fi	hi	Hi	hi (%)	Hi (%)
1	200.00	316.67	[200-316.67)	4	4	0.118	0.118	11.76	11.76
2	316.67	433.34	[316.67-433.34)	7	11	0.206	0.324	20.59	32.35
3	433.34	550.01	[433.34-550.01)	8	19	0.235	0.559	23.53	55.88
4	550.01	666.68	[550.01-666.68)	5	24	0.147	0.706	14.71	70.59
5	666.68	783.35	[666.68-783.35)	6	30	0.176	0.882	17.65	88.24
6	783.35	900.02	[783.35-900.02)	4	34	0.118	1.000	11.76	100.00

**Fuente:** Elaboración Propia.

La *carga explosiva*, el histograma de frecuencia que presenta a dicho parámetro indica una heterogeneidad entre los valores de carga utilizados para las actividades de voladura, debido a que no se advierte un intervalo definido de carga representativa, en la figura n° 34 la cual se obtuvo de la tabla n° 27 se puede analizar que el valor de la media agrupada corresponde a 539.72 Kg, la cual se ubica dentro del intervalo 433.34 Kg a 550.01 Kg con mayor frecuencia relativa como es 8 datos.

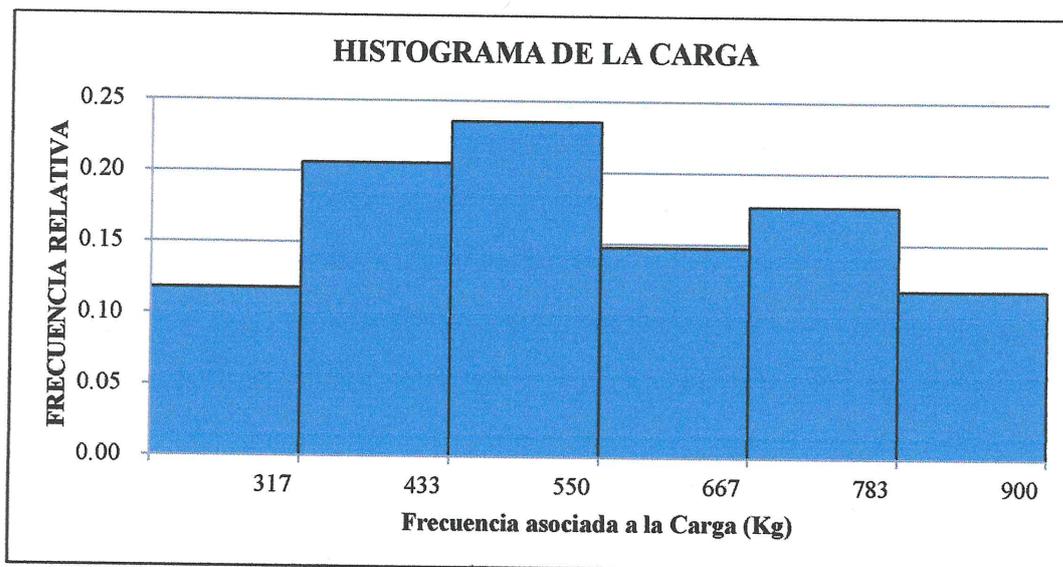


Figura N° 34. Histograma de Frecuencia para la Carga Operante.

Fuente: Elaboración Propia.

La cantidad de carga utilizada por la empresa minera LAS BAMBAS. Para trabajos de voladura en la construcción de los caminos pioneros mineros la Carga Operante vario entre 200 Kg y 900 Kg por tiempo de retardo de explosivo.

#### 4.2.1 Análisis de la Vibración sobre algunas Normas Internacionales.

Las normas internacionales sobre el control de vibración, producida por voladura trabajan evidentemente sobre las vibraciones que se derivan de esa actividad, las cuales son oscilaciones de tipo transitorio y no periódicas que están definidas por dos parámetros característicos de mucha importancia para su observación, estos parámetros son el valor pico de velocidad de producto de la vibración y la frecuencia dominante o principal de vibración. La figura n° 35 muestra una gráfica de los parámetros principales (velocidad pico vs frecuencia dominante), mostrando tres límites que para la Norma Alemana DIN4150 representa el máximo valor que puede existir entre ambos parámetros para la prevención de daños en las estructuras que dichos límites

representan:

1. Un *primer límite* correspondiente a las edificaciones históricas / ultrasensibles.
2. Un *segundo límite* que representa a las edificaciones residenciales.
3. Un *tercer límite* que se relaciona con las edificaciones industriales.

Para los valores de velocidad y frecuencia obtenidos se permite descartar para el estudio de la norma, el límite sobre edificaciones industriales, ya que se puede verificar que el límite trabaja con velocidades superiores a los 20 mm/s para frecuencias bajas y asciende para frecuencias mayores hasta 50 mm/s.

Sabiendo que de los datos obtenidos en campo solo un punto supero la barrera de los 20 mm/s y que en la zona de estudio es un área popular donde solo existen vivienda y comercios, es completamente viable no hacer hincapié sobre él.

Por su parte los márgenes que se ofrecen para las edificaciones históricas y residenciales son de especial importancia, en primer lugar porque el entorno en donde se realizaron las mediciones corresponde en gran medida con los tipos de estructuras colindantes a los trabajos por qué los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros máximos de velocidad y frecuencia donde se establecen ambos límites.

Sobre la figura n° 35 la norma Alemana DIN 4150 se ubicó los 34 eventos de voladura respecto a su velocidad y frecuencia observándose que existe un rango de frecuencias que varían entre los 14.6 Hz y los 55.9 Hz agrupados en su mayoría por debajo de la mediana agrupada de la velocidad pico partícula que es 5.56 mm/s.

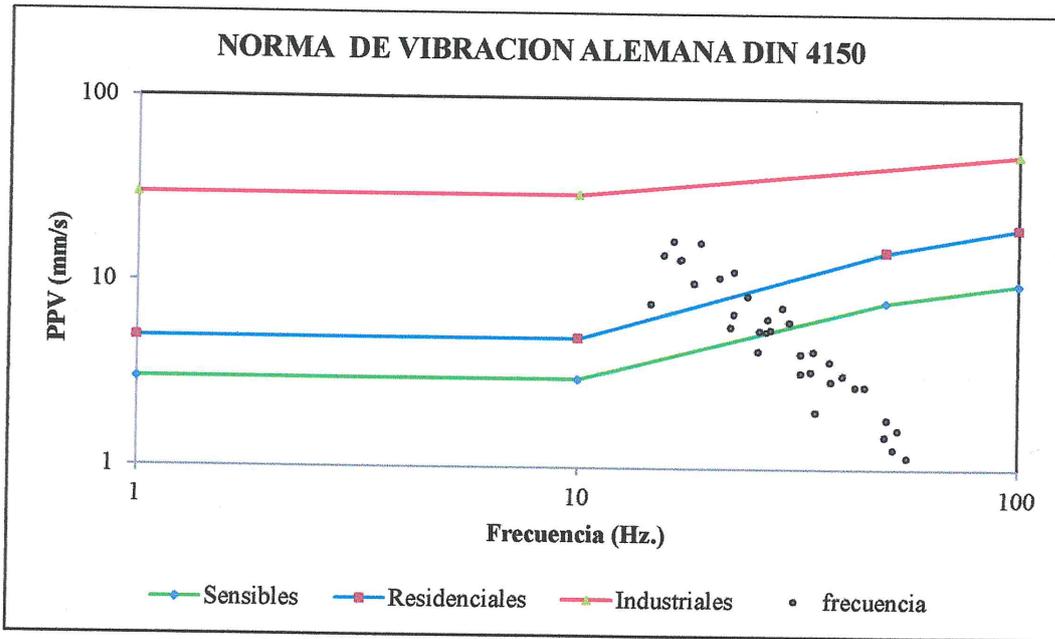


Figura N° 35. Valores de PPV y Frecuencia Dominante según norma DIN 4150.

Fuente: Elaboración Propia.

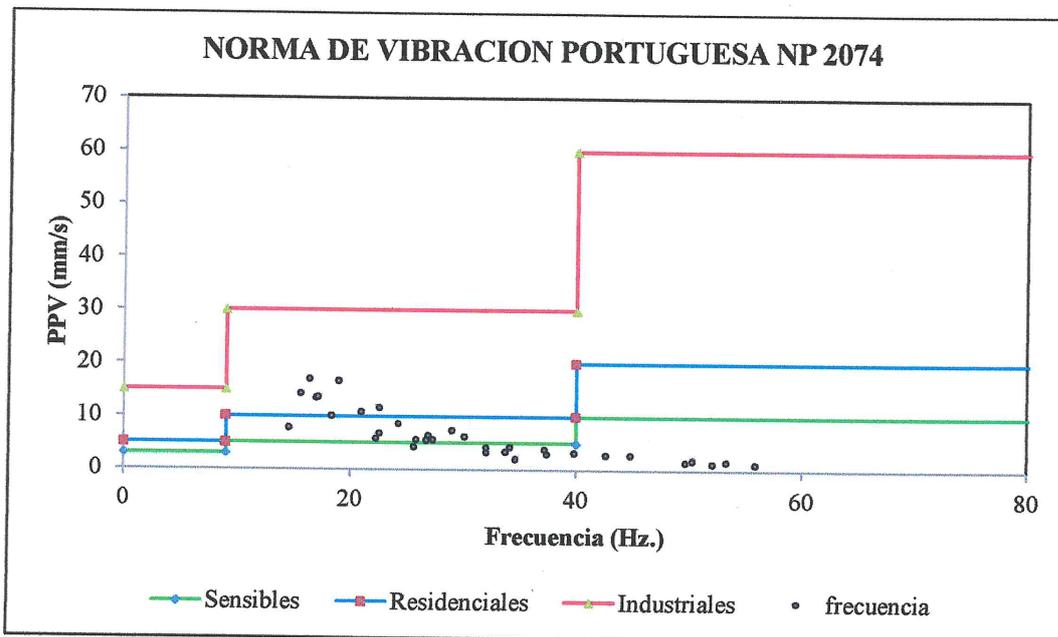


Figura N° 36. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Portuguesa NP 2074.

Fuente: Elaboración Propia.

Sobre la figura n° 35 la norma Alemana DIN 4150 se ubicó los 34 eventos de voladura respecto a su velocidad y frecuencia observándose que existe un rango de frecuencias que varían entre los 14.6 Hz y los 55.9 Hz agrupados en su mayoría por debajo de la mediana agrupada de la velocidad pico partícula que es 5.56 mm/s.

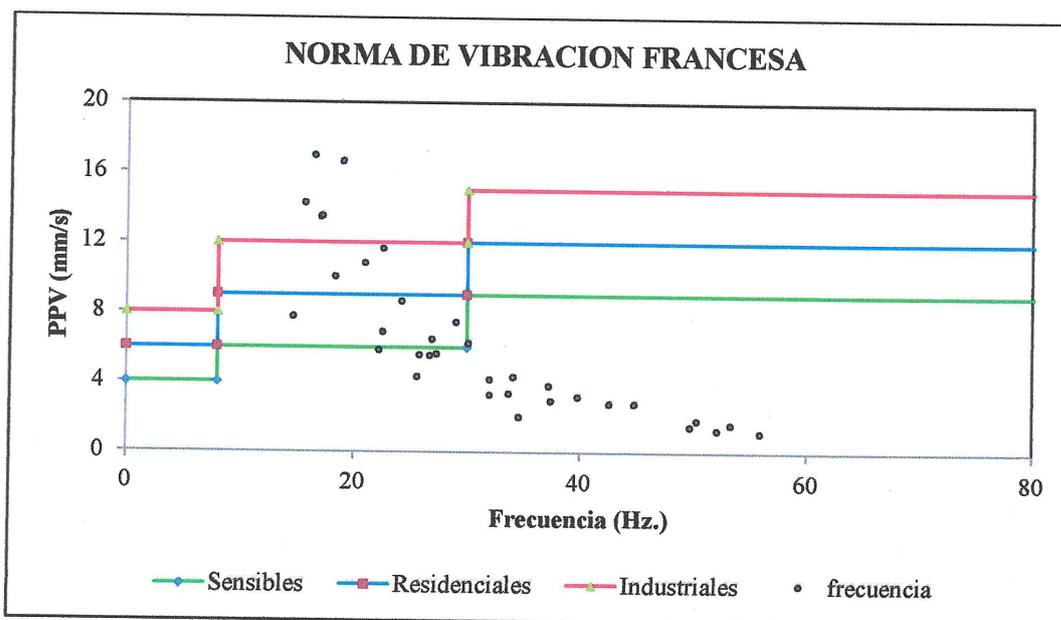


Figura N° 37. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Francesa 23.7.1986.

Fuente: Elaboración Propia.

Observando las normas de Portuguesa, Francesa, Española, Suiza y Alemana podemos indicar que poseen estrictamente 3 límites para para cada tipo de estructura cada una de ellas como indica su respectiva norma ya que al cabo hablan de los mismo tipos de estructura como son estructuras muy sensibles, sensible y resistentes como límites permisibles.

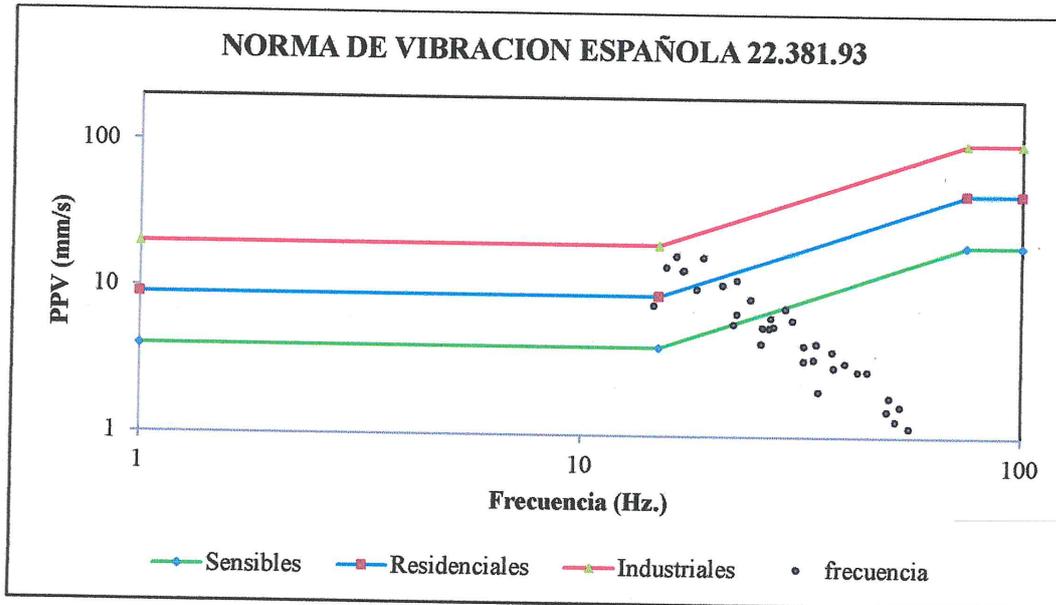


Figura N° 38. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Española 22 381 93.

Fuente: Elaboración Propia.

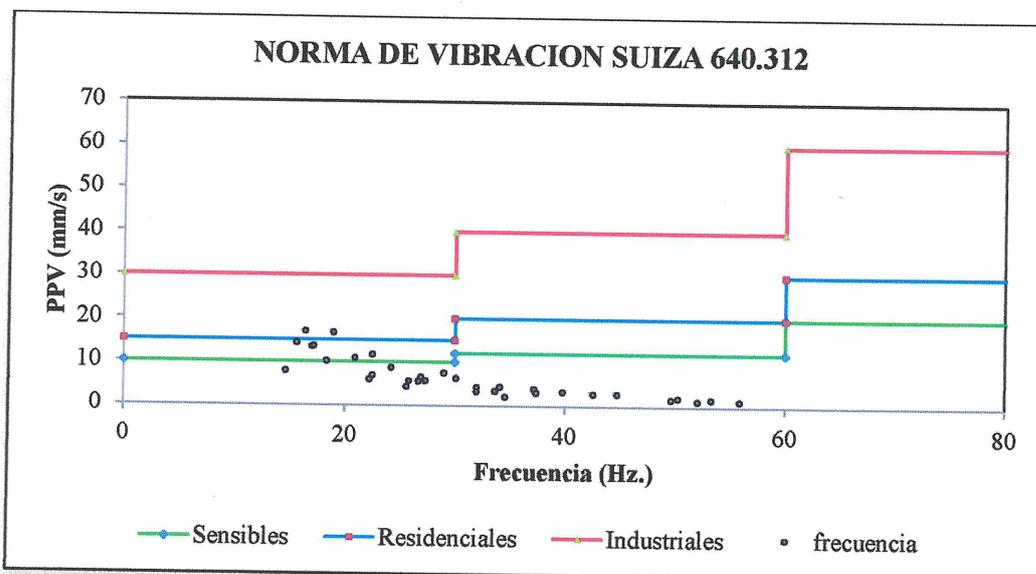


Figura N° 39. Valores de PPV y Frecuencia de la Norma Suiza SN 640 3 12.

Fuente: Elaboración Propia.

Bajo esta premisa de la norma Alemana que posee por debajo del límite para estructura muy sensible 16 eventos, la norma Suiza 27 eventos, de la norma

Española son 17 eventos, de la norma Francesa 22 eventos y de la norma Portuguesa 16 eventos de voladura.

El comportamiento de la norma Suiza, Francesa y Portuguesa tiene un comportamiento lineal. Para la norma Alemana y Española presenta novedades de exposición logarítmicas, de la misma forma que otras normas sobre el control de vibraciones aquí expuesta, presenta límites según velocidad pico y frecuencia para estructura histórica, estructuras residenciales u oficinas y edificaciones industriales.

En este análisis se *tomaron únicamente las cinco normas* presentadas anteriormente debido a que están referidas al control de vibraciones por el uso de explosivos en *áreas urbanas* y no se incorporaran el resto de normas expuesta en el marco referencial ya que plantean los mismos controles pero para actividades de minería ya sea para el cuidado del talud final o el banco, como lo es la U.S. Bureau of Mines y OSM ambas norma del país de Estados Unidos de América.

Es importante destacar que en Perú no existen normas especializada ya que la que poseemos toma como parámetros de límite los de la norma OSM. Para estas aplicaciones sobre el control de vibraciones en zonas urbanas y rurales, es importante hacer una correlación de dichas normas para el estudio particular de la construcción de los caminos pioneros Las Bambas.

La norma seleccionada para realizar dicha correlación es la norma alemana DIN 4150. Lo más importante que la norma alemana resulta ser más juiciosa que las anteriores, debido a que su límite para estructuras muy sensibles tiene por debajo solo 16 eventos



de voladura medidos de lo cual lo hace ser más estricta que las demás normas.

La norma alemana define a las edificaciones históricas como estructuras de características muy sensibles por los materiales utilizados para su construcción, estos pueden presentar problemas estructurales a las vibraciones muy fuertes, y a las edificaciones residenciales como estructuras construidas con materiales más resistentes sobre instituciones. En las zonas populares adyacentes a los trabajos de ejecución de la construcción de los caminos pioneros Las Bambas, las construcciones que allí se observan podrían considerarse una mezcla de ambas construcciones contempladas en la norma alemana, existiendo una gran variedad y tipos estructuras, fabricadas con diversos materiales y algunas con material de gravas con cemento.

Para los efectos de la norma los valores obtenidos en campo sobre las actividades de voladura para la ejecución de los camino pioneros durante la construcción de Las Bambas, se encuentran por debajo de los límites permisibles establecido por las normas de vibración que dicho modelo describe, de los cuales 09 eventos sobrepasan el límite para las edificaciones residenciales y 18 eventos sobrepasan para edificaciones históricas.

#### **4.2.2 Encontrar la distancia de seguridad según la norma Alemana DIN 4150.**

La etapa de monitoreo sobre las vibraciones producidas por las voladuras en los ejecución de la construcción de los caminos pioneros, se obtuvieron 34 eventos ubicadas en diferentes puntos de las áreas colindantes a mencionada obra. De los cuales 18 eventos de voladura sobrepasaron los límites expuestos por la norma DIN 4150 para la prevención de daños por vibraciones en edificaciones históricas (muy sensibles).



Una de las principales razones por la cual el monitoreo en esos puntos supero el límite, es por la poca distancia que existía entre la progresiva donde se realizaba la voladura al punto de medición, por tal razón es adecuado determinar una distancia mínima de seguridad aproximada bajo las condiciones geológicas en las cuales están ubicadas las zonas populares adyacentes a las operaciones del construcción de los caminos pioneros Las Bambas.

Debemos advertir que no en todas las voladuras ejecutadas las casas de tipo estructura histórica o material de adobe se encontraba dentro del área de influencia de la voladura que es de 500 m para personas y 300 para equipos y materiales.

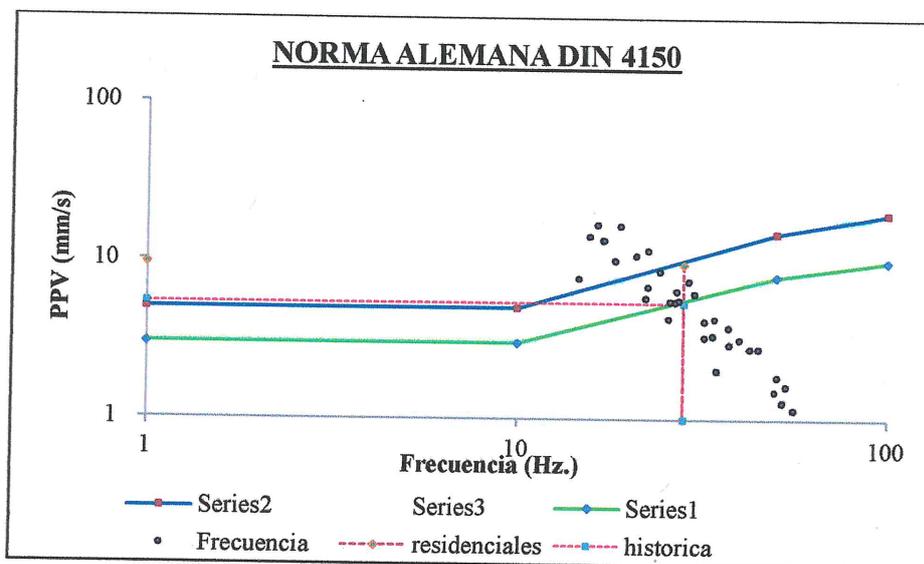


Figura N° 40. Intersección de la  $F_{Me}$  con los límites de la Norma Alemana DIN 4150.

Fuente: Elaboración Propia.

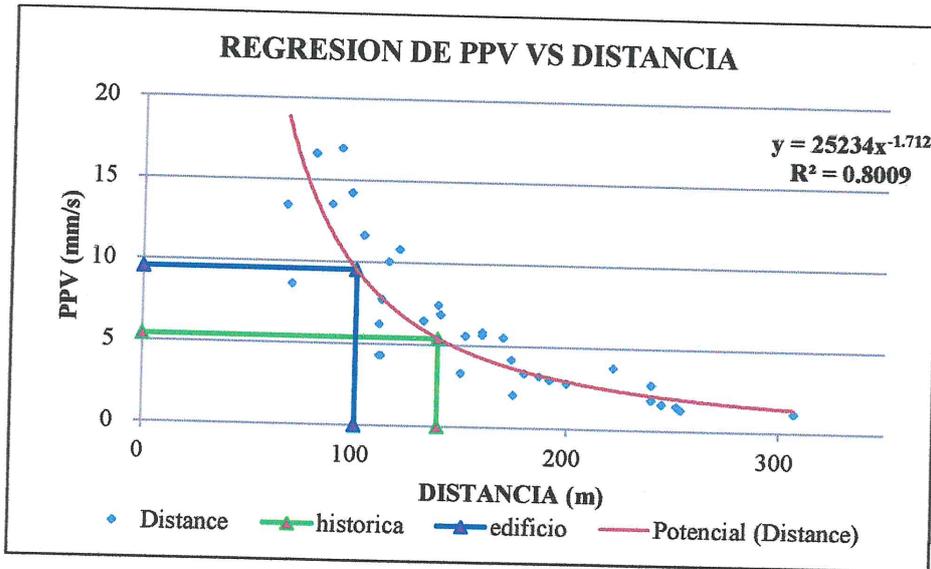
La figura n° 40 presenta los puntos de monitoreo según su relación velocidad pico y frecuencia, y los dos primeros límites para construcciones históricas y residenciales que

contempla la norma DIN 4150. Se advierten los ocho puntos que sobrepasan ambos límites de la norma, notándose que los valores de velocidad que estos puntos representan están por encima de la media agrupada de velocidad calculada la cual es de 6.35mm/s.

La figura n° 41 muestra la PPV vs la distancia en el plano se obtendrá mediante la regresión no lineal (potencia) en valor del coeficiente de correlación el cual nos indicará si esta línea de tendencia tiene un grado adecuado de confiabilidad para nuestro caso se obtuvo una mediana de 151 m, una desviación media de 60.75 y un coeficiente de variación; con el valor de la mediana para la frecuencia dominante la cual es de 28.15 Hz, esta será interceptada con la línea de límite para construcciones históricas y residenciales de la norma alemana DIN 4150, obteniéndose el valor para construcciones históricas de una velocidad pico partícula de 5.41 mm/s y para construcciones residenciales de 9.54 mm/s.

En la figura n° 41 se colocara o interceptara las velocidades obtenidas anteriormente de la figura n° 40 del eje de la ordenada para construcción histórica como para residenciales. Es evidente que a distancias mayores la velocidad pico partícula disminuye, este fenómeno es debido a tres razones principalmente:

- *la primera* se refiere a que la onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja del origen denominándose atenuación geométrica por dispersión de la energía.
- *la segunda* razón por el carácter inelástico de las rocas.
- *la tercera* es por la presencia de agua en espacios vacíos como son las fallas.



**Figura N° 41.** Relación Distancia vs PPV en la curva de Potencia.

**Fuente:** Elaboración Propia.

La línea de tendencia de los puntos puede ser ajustado con la ecuación de la curva potencial de la figura n° 41 de la cual se observa un decaimiento de la velocidad con la distancia dicha curva está representada por la ecuación que se determina. Al interceptar las velocidades correspondientes a la mediana de la frecuencia dominante 28.15 Hz con la norma alemana DIN 4150 de los límites de la estructura históricas como estructuras residenciales cuyos valores cuantitativos son 5.41 mm/s y 9,54 mm/s respectivamente, los valores de la distancia hallados para construcciones históricas o muy sensibles es de 139 m y para construcciones residenciales de 100 m.

Ambos valores pueden ser considerados como la distancia mínima de seguridad que debe existir entre las voladuras y las estructuras de las viviendas aledañas al área de influencia de la voladura durante la construcción de los caminos pionero Las Bambas. La observación es que la ubicación del sismógrafo no necesariamente se ubicó a la casa más cercana por causas de tiempo, clima, camino (pendiente), etc.

Sánchez (1995) expone algunas recomendaciones para minimización de los efectos de las vibraciones que entre las cuales destaca la importancia de la carga, aconsejando detonar las cargas explosivas en diferentes momentos con retardadores, con el fin de sumar los trenes de ondas entre detonaciones. Esta es otra razón por la cual registros de velocidades son bajos para elevados niveles de carga.

#### 4.3 ANÁLISIS DEL CRITERIO DE DAÑO DEL MACIZO ROCOSO.

Para el modelamiento de las vibraciones, los parámetros geomecánicos para determinar la velocidad pico partícula crítica PPVc de las voladuras durante la construcción de los caminos pioneros, el análisis del criterio de daño de algunos tipos de rocas se visualizan (Anexos n° 12).

**Tabla N° 28.** Propiedades Geomecánicas de la Roca Caliza.

Densidad de la caliza	2.62	gr/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión	313.29	kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción	47.57	kg/cm <sup>2</sup>
Martillo schimdt	601	kg/cm <sup>2</sup>
RQD	63.15	%
Corte directo	25	°
Deformación unitaria $\epsilon$	0.022	
Velocidad de Onda P	4041	m/s
Módulo de Young	39.3	Gpa
Resistencia a la Tracción	4.08	Mpa

Fuente: Área de P&V del Proyecto minero Las Bambas.

#### 4.3.1 Análisis de la velocidad pico partícula crítica.

Los altos niveles de la vibración pueden dañar al macizo rocoso produciendo fracturas nuevas, extendiendo y dilatando fracturas existentes. Las vibraciones de contexto, pueden ser consideradas como esfuerzo o deformación del macizo rocoso. A menor distancia las vibraciones son suficientemente altas para extender las fracturas preexistentes, pero insuficientes para inducir nuevo fracturamiento.

Esta ecuación presenta la relación entre la velocidad partícula; PPV, la deformación inducida  $\epsilon$  para una roca con velocidad de la onda de Compresión;  $V_p$  esta ecuación supone una elasticidad lineal de la roca a través de la cual la vibración está propagándose y hace una estimación razonable para la relación entre la roca fracturada y la vibración inducida.

De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico la velocidad pico partícula crítica máxima que puede ser soportada por las roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo los parámetros que se describe en la fórmula que se menciona líneas abajo usando esta ecuación.

$$PPV_c = \frac{\sigma_t * V_s}{E}$$

Dónde:

PPV<sub>c</sub>: velocidad pico partícula crítica (mm/s).

$\sigma_t$ : resistencia a la tracción (Mpa).

$V_s$ : velocidad sónica del macizo rocoso (m/s).

E: módulo de Young (Gpa).

Hallar la velocidad pico partícula crítica en la zona de estudio en nuestra investigación aplicaremos el criterio establecido por Holmberg & Persson (1979). En la tabla n° 29, resume los valores calculado para la roca caliza según el área de geotecnia. En la última columna se muestra el cálculo de PPVc, definido como nivel sobre el cual se generara un daño según los criterios a las rocas (**Anexo n° 13**).

**Tabla N° 29.** Velocidad Pico Partícula Critica según el Criterio de Daño.

CRITERIO DE DAÑO	PPV	PPVc
	>	mm/s
Intenso fracturamiento	4*VVPc	1678.09
Creación de nuevas fracturas	1*VVPc	419.52
Extensión de fracturas existentes	1/4*VVPc	104.88
Sobre quiebre	1/8*VVPc	52.44

**Fuente:** Elaboración Propia.

En el tabla n° 30 utilizaremos la ley de atenuación obtenida, se obtiene el siguiente taba comparativo que relaciona el trio de las variables mediadas (PPVc, Q y D). Este cálculo a partir de la asignación de valores progresivos para la distancia (D) y la carga (Q) obteniéndose las correspondientes velocidades pico partícula (PPVc).

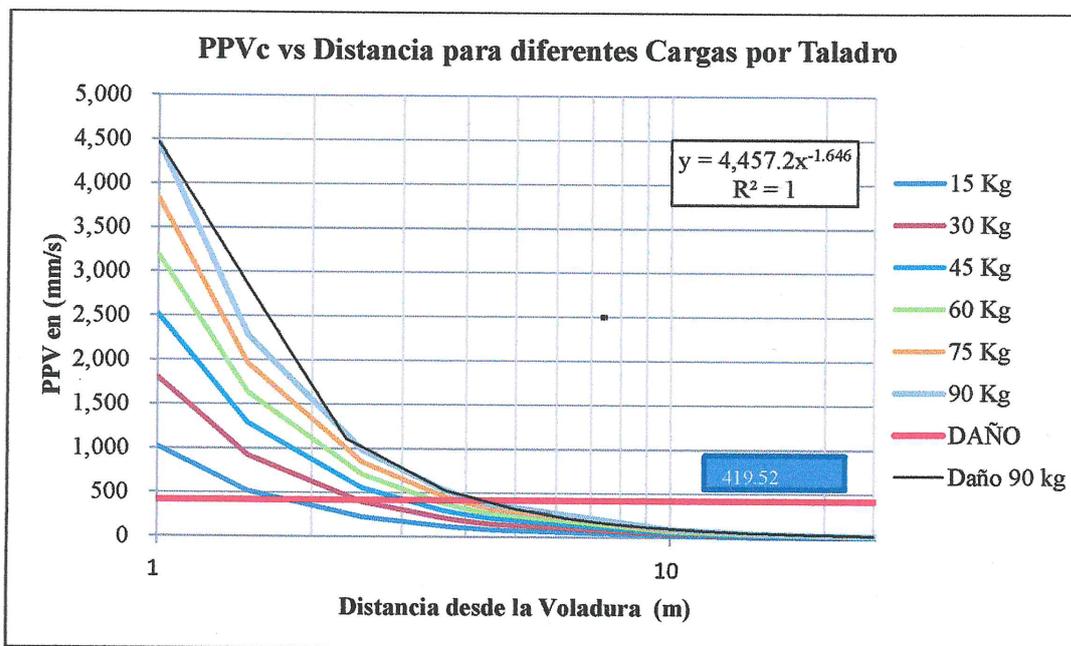
Se analizara para diferentes valores de la distancia hasta un valor de 500 m por ser de criterio por decreto supremo 055-2010-EM, distancia de la cual las personas deben estar encontrarse fuera del radio de influencia de voladura. Además se muestra en esta tabla n° 29 que los cuadros en blanco significarían que no es afectada por el criterio de daño según Holmberg y Persson (1979).

Tabla N° 30. Relación Distancias & Cargas Operantes.

DISTANCIA (m)	PPV (mm/s)						PPVc
	15 Kg.	30 Kg.	45 Kg.	60 Kg.	75 Kg.	90 Kg.	
1.00	1,020.10	1,804.64	2,519.50	3,192.56	3,836.16	4,457.20	419.52
1.50	523.36	925.86	1,292.61	1,637.92	1,968.11	2,286.74	419.52
2.50	225.75	399.38	557.58	706.53	848.96	986.40	419.52
3.60	123.87	219.14	305.94	387.67	465.82	541.24	419.52
3.90	108.58	192.09	268.18	339.82	408.32	474.43	419.52
4.20	96.11	170.03	237.38	300.80	361.43	419.95	419.52
4.50	85.79	151.78	211.90	268.50	322.63	374.86	419.52
10.00	23.05	40.77	56.93	72.13	86.68	100.71	419.52
15.00	11.82	20.92	29.21	37.01	44.47	51.67	419.52
20.00	7.36	13.03	18.19	23.05	27.69	32.18	419.52
30.00	3.78	6.68	9.33	11.82	14.21	16.51	419.52
40.00	2.35	4.16	5.81	7.36	8.85	10.28	419.52
50.00	1.63	2.88	4.03	5.10	6.13	7.12	419.52
75.00	0.84	1.48	2.07	2.62	3.14	3.65	419.52
100.00	0.52	0.92	1.29	1.63	1.96	2.28	419.52
200.00	0.17	0.29	0.41	0.52	0.63	0.73	419.52
300.00	0.09	0.15	0.21	0.27	0.32	0.37	419.52
400.00	0.05	0.09	0.13	0.17	0.20	0.23	419.52
500.00	0.04	0.07	0.09	0.12	0.14	0.16	419.52

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de Velocidad de Partícula Crítica para diferente distancia y cargas, son producto de características físicas de la roca y la precisión en su estimación depende de la calidad y cantidad de los datos de ensayos ocupados en su cálculo, recordándose que sigue siendo una estimación y deben constantemente ajustarse con mediciones en terreno. Esta diferencia refleja la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular los límites de daño, los que están relacionados con sus propiedades geomecánica y por tanto deben ser estimados en forma independiente no solo en cada mina si no en cada dominio geomecánicos que exista en la misma el tajo.



**Figura N° 42.** Simulación del Criterio de Daño de la Vibración por Taladro.

**Fuente:** Elaboración Propia.

La figura n° 42 para taladros individuales de detonación puede ser influencia por el tipo de taladros como taladros de producción, buffer piloto pre corte además del diseño de carguío.

### 4.3.2 Determinación del radio Criterio de Daño del Taladro.

El radio de influencia o distancia hasta la cual se creara la nuevas fracturas según el criterio de Holmberg & Persson, es determinada para los diferentes tipos de diseños de carguío, para taladros individuales como se muestra en la tabla n° 31.

**Tabla N° 31.** Radio de Daño por Taladros Individuales.

Carga en Kg/tal.	15.00	30.00	45.00	60.00	75.00	90.00
Radio de influencia	0.74	1.05	1.28	1.48	1.65	1.81
en m/tal.	1.72	2.43	2.97	3.43	3.84	4.20
	3.98	5.63	6.90	7.97	8.91	9.76

**Fuente:** Elaboración Propia.

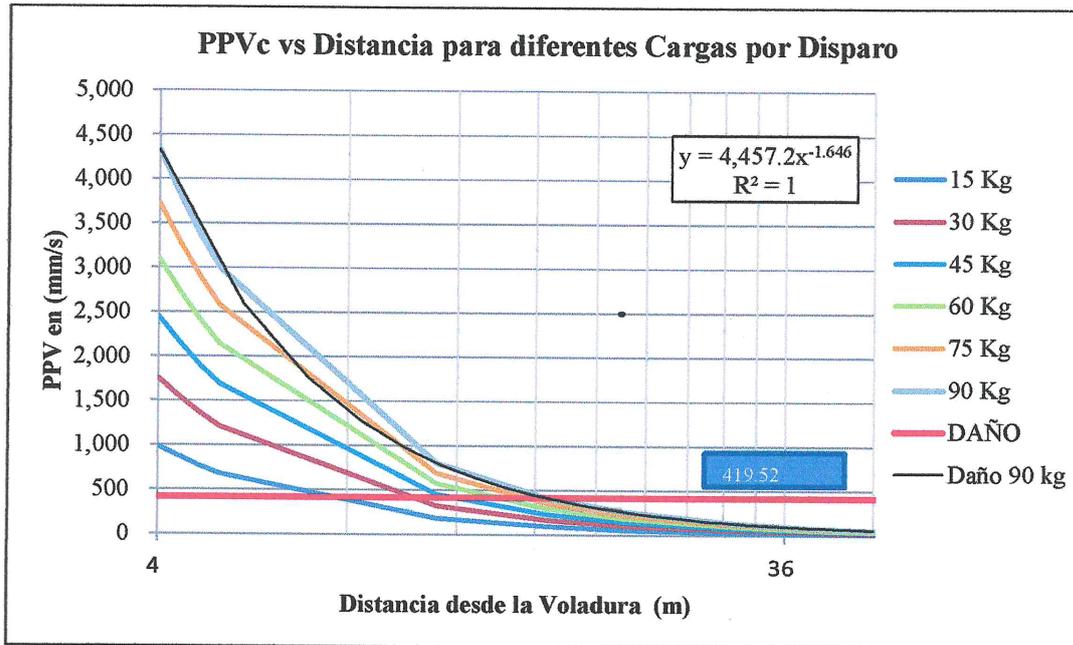
En la tabla n° 32 se detalla PPVc según el criterio daño con un máximo de número de 8 taladros a detonar en un tiempo instantáneo por tiempo de retardo por carga operante es durante el proceso de detonación. En esta misma alineación de cantidad de carga explosiva se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla N° 32.** Radio de Daño por Carga Operante por Voladura.

Carga en Kg/tal.	15.00	30.00	45.00	60.00	75.00	90.00
N° tal/voladura	8	8	8	8	8	8
Radio de influencia	2.09	2.96	3.62	4.18	4.67	5.12
en m/voladura	4.85	6.86	8.41	9.71	10.85	11.89
	11.27	15.93	19.51	22.53	25.19	27.60

**Fuente:** Elaboración Propia.

La figura n° 43 muestra un ábaco según el criterio de daño producto de la vibración durante la ejecución de la construcción de los caminos pioneros, para nuestro gráfico en esta figura se realiza el análisis de la velocidad pico partícula crítica para los taladros individuales por detonación.



**Figura N° 43.** Simulación de Daño por vibración para diferentes Cargas Operantes.

**Fuente:** Elaboración Propia.

De la figura n° 43 tenemos que hacer presente que en la malla de detonación existe un tren de ondas durante el proceso de voladura la cual las ondas de vibración se superpone una de otra aumentando la amplitud onda sísmica, esta dependerá de los diferentes tipos de diseño de carguío con material explosivo en los taladros de la malla de voladura. De esta última figura nosotros veremos qué cantidad de carga necesito como máximo para crear las nuevas fracturas en nuestro perímetro de las mallas de voladura analizando si estas dañarían al talud y/o alguna infraestructura colindante al proyecto de voladura.

## CONCLUSIONES

- ❖ El modelo predictivo depende de la vibración generada durante la ejecución de la voladura, debido a que se da el fenómeno llamado el tren de ondas sísmicas durante la transmisión de este por el macizo rocoso, la principal variable que influye en la vibración es la Carga Operante debido a que se da en un rango de tiempo muy instantáneo durante la detonación de los taladros.
- ❖ Los parámetros de la ecuación de la Velocidad Pico Partícula aplicada, es el formulado por DEVINE, se determinaron aplicando la regresión no lineal (Potencia) arrojando como resultados para el factor de amplitud  $k = 109.83$  y para el factor de decaimiento  $b = 1.646$  para las condiciones y características geológicas de la zona de estudio de esta investigación. Además todas las voladuras realizadas en la mina no generaron vibraciones mayores a 50.8 mm/s.
- ❖ La Norma de vibración más rigurosa según el análisis con respecto a las demás normas de vibración Internacional es la Alemana DIN 4150, por ende es la que nos permite admitir con mayor grado de seguridad la distancia mínima a la cual debería encontrarse las estructuras de las viviendas con referencia a la zona de voladura . La distancia de seguridad mínima para edificaciones históricas es de 139 m y para edificaciones residenciales de 100 m bajo el marco geológico que representa la formación en este sector de investigación.

- ❖ La distancia de creación de las nuevas fracturas según el criterio de daño establecido por Holmberg & Persson, aplicando el grado de acoplamiento de las cargas operantes detonadas en un tiempo instantáneo las cuales fueron como máximo 8 taladros para las diferentes diseños de carguíos ejecutados durante el proceso de voladuras, tenemos entonces para que para un diseño de carguío de 15 kg es de 4.8 m, 30 kg es de 6.8 m, 45 kg es de 8.4 m, 60 kg es de 9.7 m, 75 kg es de 10.8 m y para 90 kg es de 11.89 m.

## RECOMENDACIÓN

Interponer con discontinuidad abierta en el macizo rocoso colindante al perímetro del área de voladura, como por ejemplo con taladros de Precorte, nuevo diseño de los parámetros de perforación, diseño de carguío de la voladura y el amarre de las líneas troncales superficiales para reducir la carga operante.

Para lograr una mayor precisión en el diseño del modelo predictivo es necesario trabajar con equipos más especializados y precisos, ya que al utilizar cintas métricas o GPS portátil o de mano cuyo margen de error tiene  $\pm 2$  m nos dificultaría la toma de dato y más aún cuando la topografía del terreno no es plano y el clima nos es adverso aumentando así el error total de medición.

La componente vertical de la vibración es el vector más importante durante el análisis de la vibración, por consecuente el equipo de medición se recomienda colocarlo sobre roca sana y/o en un punto donde no se desplace el equipo, ya que en rocas no consolidadas puede causar mayor amplitud del movimiento en bajas frecuencias, lo cual origina toma de datos erróneos registro alterado no correspondiente con el entorno de la zona de estudio.

Se recomienda utilizar el límite más sensible, para nuestro estudio es la Norma Alemana DIN 4150, correspondiente a edificaciones históricas según dicha norma esta es la más rigurosa durante el análisis de nuestros datos, con el fin de evaluar las actividades de voladura bajo las máximas condiciones de seguridad para las estructuras.

El diseño de carguío no es fijo debido a la altura de carga explosiva utilizada en la actualidad por la empresa Minera Las Bambas, no es constante en todas las voladuras impidiendo determinar una correlación más acertada del resultado de la ecuación de vibración. Se debe realizar un análisis de los parámetros durante de la etapa de Operación, cuando se ejecute el proceso de perforación con los taladros de 12 1/4 pulg. de diámetro, donde la altura de la carga explosiva es constante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agreda Uriarte, C. (1993). *Curso de Modelamiento Matematico de la Voladura de Rocas*. Lima, PERU.
- Agreda Uriarte, C. (2001). *Voladura Controlada Teorias y Aplicaciones*. Lima, PERU.
- Agreda Uriarte, C. (2013). *Analisis y Control de Vibraciones en Voladura*. Intercade Consultancy & Training, Lima, PERU.
- Anicama Lujan, A. H. (2010). *Monitoreo de los efectos de las Vibraciones producidas por la Voladura de Rocas el Modelo de Colque*. Lima, PERU.
- Carazo, Nicolas;. (2012). *NC Arquitectura*. Obtenido de <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>
- Contreras Perez, W. J. (2009). *Seleccion del Explosivo adecuado y Carga maxima por retardo usando el monitoreo, Modelamiento y Analisis de Vibracion*. Lima, PERU.
- DynoConsult. (Mayo de 2009). *Curso de Vibraciones*. Entrenamiento del Valor Agregado Compania Minera Manto de Oro.
- ENAEEX. (2005). *Manual de Tronadura*. (Vol. 08). Santiago, CHILE.
- EXSA. (2012). *Manual Practico de Voladura*. (5ta ed.). Lima, PERU.
- Fidias G., A. (1999). *El Proyecto de Investigacion*. (03 ed.). Caracas, ESPAÑA: Espisteme.
- Giraldo Iriarte, F. A. (2010). *Control de Vibraciones para casas de Tierra en Peru*. Lima, PERU.
- Hernandez Sampiere, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2010). *Metodologia de la Investigacion*. Mexico D.F., MEXICO.

- Humberto Alfaro, R. (2012). *Metodologia de la Investigacion Cientifica Aplicado a la Ingenieria*. Lima, PERU.
- INGEMMET. (2009). *Mapa Metalogenico del Peru*. Instituto Geologico Minero y Metalurgico INGEMMET, p.06.
- Orihuela Castillo, S. M. (2009). *Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de Vibraciones en una mina Modelo*. Lima, PERU.
- Piñas Esteban, Y. A. (2007). *Aplicacion de principio de la Velocidad Pico Particula para minimizarel Daño al Macizo rocoso utiilizando tecnologia Electronica*. Lima, PERU.
- Rivera Crisostomo, R. (2009). *Metodologia de la Investigacion Cientifica*. Lima, PERU.
- Segarra Catusus, P. (2004). *Analisis expérimental de la Fragmentacion, vibracion y movimiento de la roca en voladura a cielo abierto*. Madrid, ESPAÑA.

## ANEXOS



MATRIZ DE CONSISTENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACION DURANTE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO MINERO LAS BAMBAS.

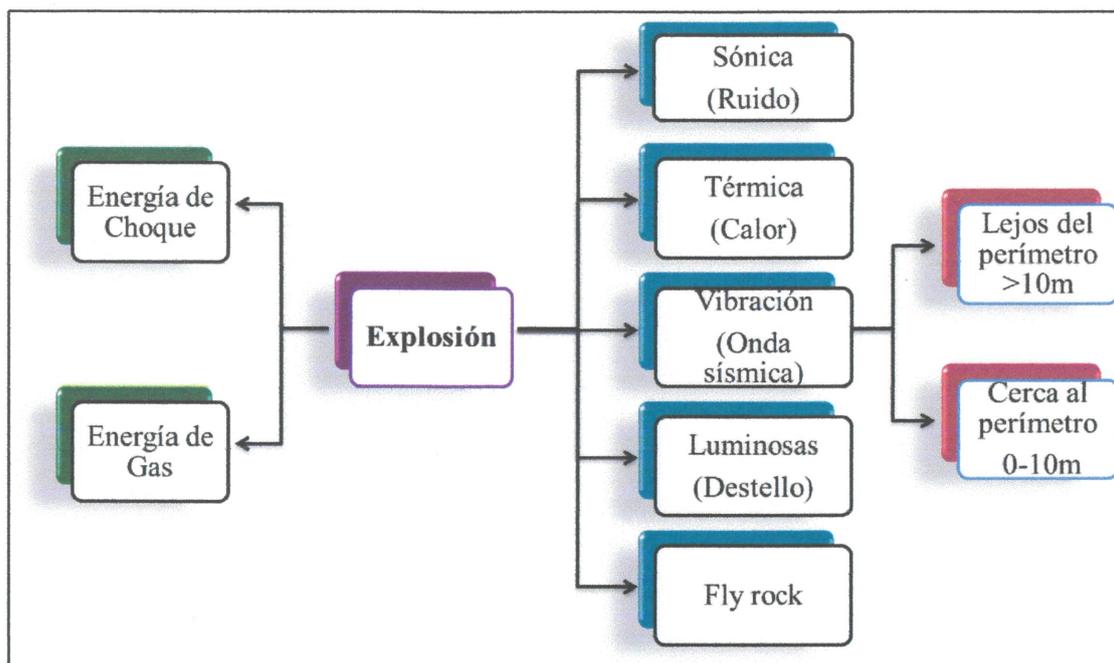
MATRIZ DE CONSISTENCIA  
MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACION DURANTE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO MINERO LAS BAMBAS

PROBLEMAS	OBJETIVOS	JUSTIFICACION	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INDICE	METODOLOGIA
<p><i>General</i> ¿De qué manera influye la vibración producto de la voladura en el modelo predictivo durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?</p> <p><i>Específico</i> ¿Cuál es el valor del factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?</p> <p>¿Cuál es la distancia mínima que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más rigurosa durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?</p> <p>¿Cuál es la distancia hasta la cual se crea la nueva fractura en el macizo rocoso según la velocidad pico partícula crítica para los diferentes diseños de carguo ejecutados durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas?</p> <p><b>Según Formato:</b> Bruno Enrique Bravo Chipa Metodología de la Investigación</p>	<p><i>General</i> Analizar la influencia de la vibración producto de la voladura en el modelo predictivo durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p> <p><i>Específico</i> Determinar los parámetros como el factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p> <p>Encontrar la distancia mínima a la que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más rigurosa durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p> <p>Calcular la distancia hasta la cual se crea la nueva fractura en el macizo rocoso según la velocidad pico partícula crítica para los diferentes diseños de carguo ejecutados durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p>	<p><i>Porque quiero investigar</i> Quiero determinar los parámetros de la ecuación de la PPV como es el factor de amplitud y el factor de decaimiento la distancia mínima y la distancia de creación de las nuevas fracturas.</p> <p><i>para que quiero investigar</i> para dar una mayor grado de confiabilidad en el resultado de la ecuación del modelo de vibración.</p> <p><i>A quienes pudiera beneficiar</i> A la empresa que realiza la evaluación de los daños que pudieran darse como consecuencia de la voladura.</p>	<p><i>General</i> Si la vibración tiene influencia en el modelo predictivo entonces se tendrá una mejor evaluación de los daños en el macizo rocoso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros en el tramo 01 del proyecto minero Las Bambas.</p> <p><i>Específico</i> Si obtenemos los parámetros como el factor de atenuación y el factor de amplitud de la ecuación de la velocidad pico partícula entonces el valor será más preciso para una determinada zona del macizo rocoso durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p> <p>Si encontramos la distancia mínima a la que deben encontrarse las viviendas con respecto al proyecto de voladura según la norma de vibración más rigurosa entonces podremos dar un límite de distancia para tomar las precauciones y no generar daños a la estructura colindantes al área de voladura durante la etapa de construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p> <p>Si hallamos la distancia hasta la cual se crea la nueva fractura según el criterio de daño de la velocidad pico partícula crítica entonces este servirá para tomar la decisión del diseño de carguo ejecutados tomando en cuenta los daños al talud y a las estructuras de las viviendas durante la construcción de los caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera Las Bambas.</p>	<p><i>Dependiente</i> Modelo predictivo.</p> <p><i>Independiente</i> Vibracion.</p>	<p>Velocidad Pico Partícula. Factor de la Amplitud y Decaimiento. Distancia mínima de seguridad. Distancia hasta la cual se creara la nuevas fracturas.</p> <p>Carga operante por tiempo de retardo Distancia del sismógrafo a la voladura. Frecuencia. Resistencia a la Traccion. Velocidad sonica del Macizo Rocoso. Modulo de Young.</p>	<p>mm/s m m Kg. m. Hz. Mpa m/s Gpa</p>	<p><i>Tipo de investigación</i> Investigación aplicada. <i>Nivel de investigación</i> Explicativo. <i>Diseño de investigación</i> Diseño de campo (experimental). <i>Población y muestra</i> población: Vibraciones generadas por las voladuras en el proyecto minero Las Bambas. <i>Muestra:</i> Vibracion generada durante la etapa de construcción de los caminos pioneros del Tramo 01. <i>Técnicas e instrumento de recolección de datos</i> <i>Técnica:</i> La principal técnica empleada en la investigación fue el análisis documental de bibliografías relacionadas al tema. <i>Instrumentos de recolección:</i> Se utilizo el geofono para la recolección de los datos. <i>Técnicas de procesamiento y analisis de datos</i> <i>Procesamiento:</i> Ejecucion del programar en computador: Blastware Elaboracion del programa de analisis: Excel <i>tipo de analisis:</i> Estadística descriptiva.</p>

Fuente: Elaboración Propia.



Anexo N° 02.



**Figura.** Distribución de la Energía durante la ejecución de la detonación.

**Fuente:** Manual practico de voladura de rocas EXSA.

Anexo N° 03.



**Foto.** Fragmentación del macizo rocoso referencia de la granulometría la radio.

**Fuente:** Fotografía tomada por Famesa Explosivos S.A.C. las Bambas.

Anexo N° 04.

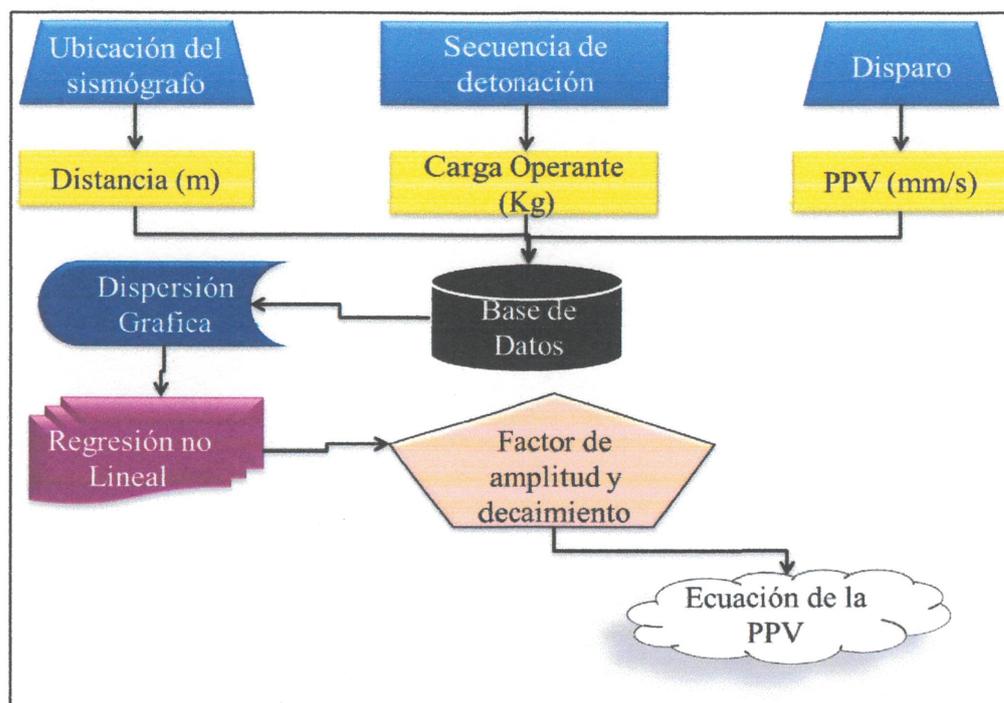


Figura. Algoritmo del modelo predictivo de la ecuación de la velocidad pico partícula.

Fuente: Elaboracion Propia.

Anexo N° 05.

FRECUENCIAS SISMICAS DE ROCAS	
MATERIAL	VELOCIDAD DE PROPAGACION (m/s)
Capa meteorizada	300 a 900
Aluviones modernos	350 a 1 500
Arcillas	1 000 a 2 000
Margas	1 400 a 2 500
Conglomerados	2 500 a 5 000
Calizas	4 000 a 6 000
Dolomitas	5 000 a 6 000
Sal	4 500 a 6 500
Yeso	3 000 a 4 000
Anhidrita	3 000 a 6 000
Gneiss	3 100 a 5 400
Cuarcitas	5 100 a 6 100
Granitos	4 000 a 6 000
Gabros	6 700 a 7 300
Dunitas	7 900 a 8 400
Diabasas	5 800 a 7 100

Fuente: Tratado de geofísica Aplicada (Carlos Figueroa, s.f.)

FRECUENCIAS SISMICAS DE ROCAS	
MATERIAL	ONDAS LONGITUDINALES (m/s)
Agua	1 450
Suelo	100
Arena, morrena suelta	200 a 800
Arcilla, limo, gravas	500 a 1 500
Morrena compacta	1 500 a 2 700
Pizarra arcillosa	870 a 3 840
Arenisca	1 410 a 4 200
Rocas fisuradas meteorizadas	1 900 a 4 000
Granito fresco (sano)	5 500
Granitos y rocas verdes (grauwaka)	4 000 a 5 500
Granito parcialmente descompuesto, con vetas	3 150
Granito muy descompuesto	660
Granito muy descompuesto y friable	450
Gabro	5 500 a 6 800
Caliza normal	4 920 a 6 060
Caliza normal cretácica	2 200
Caliza normal carbonífera	3 050 a 3 600

Figura. Velocidad de propagación de las ondas sísmicas P y S.

Fuente: Tratado de geofísica Aplicada (Carlos Figueroa, s.f.)

Anexo N° 06.

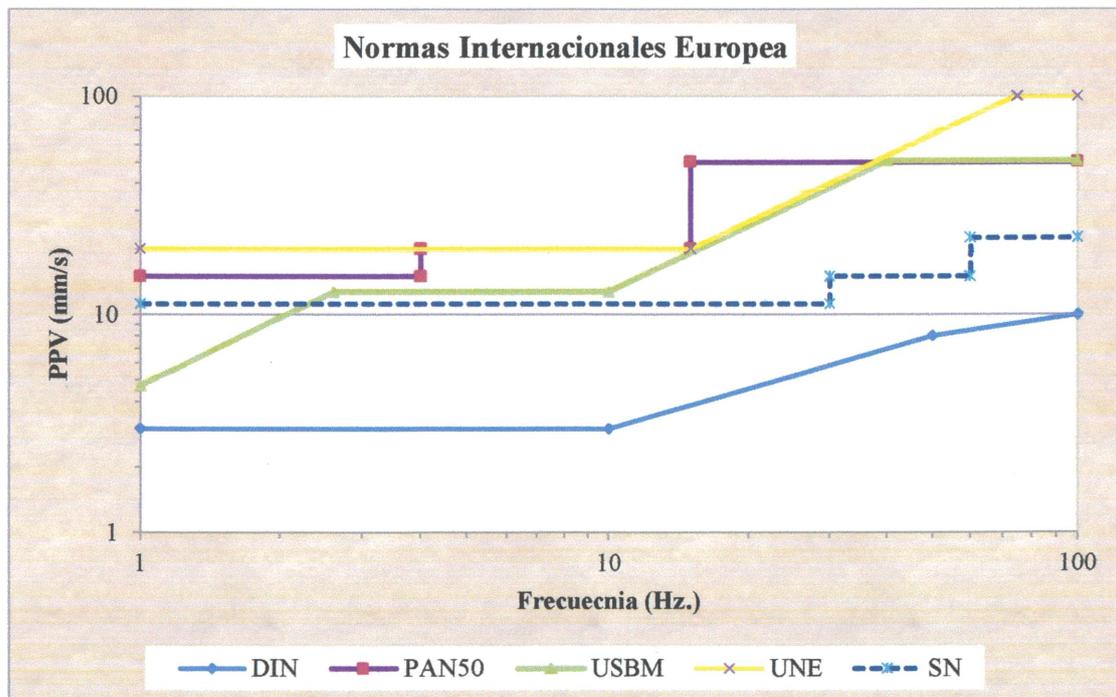


Figura. Resumen de velocidades máximas de las normas internacionales

Fuente: (Contreras Pérez Willy, 2009, p.86)



Anexo N° 07.

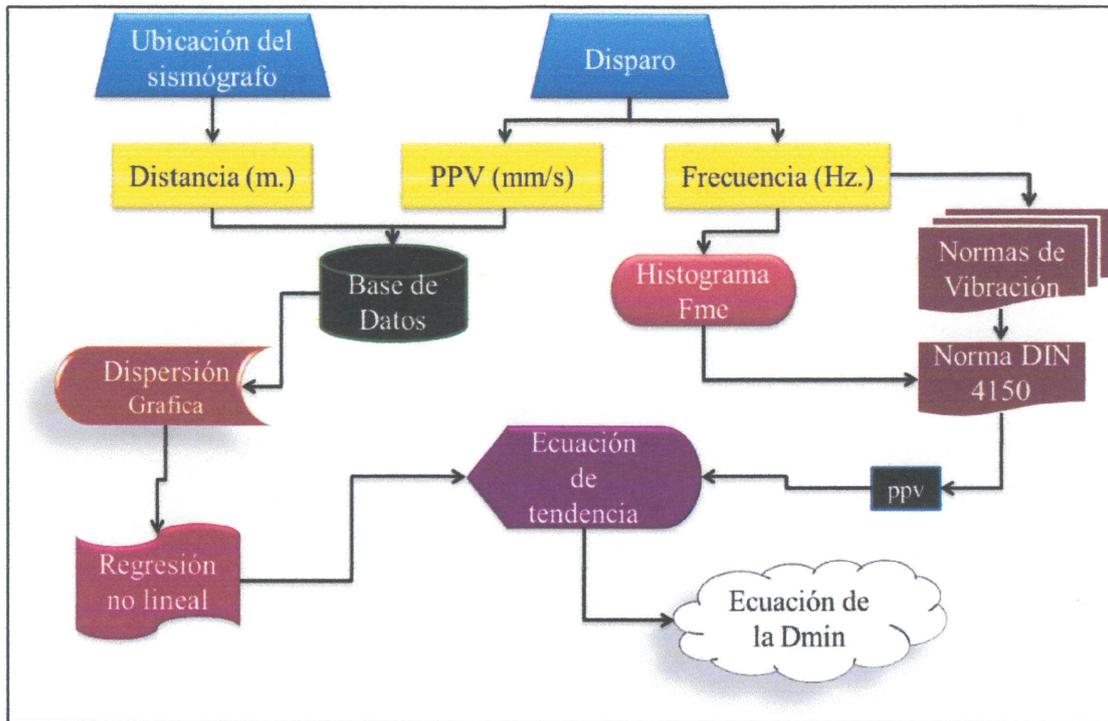


Figura. Algoritmo de la distancia minima con respecto al proyecto de voladura.

Fuente: Elaboracion Propia.

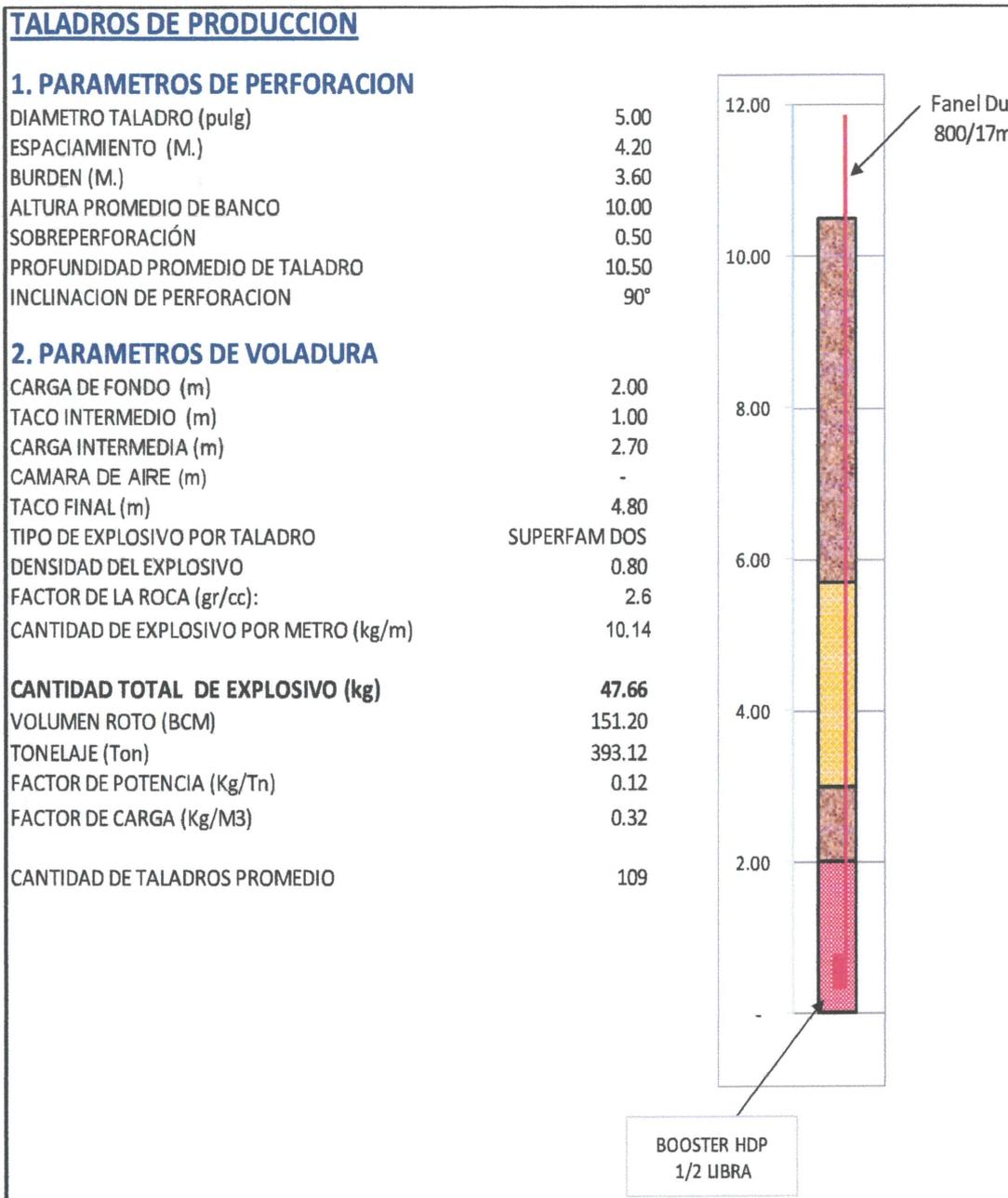
Anexo N° 08.



Foto. Visualización del tramo 01 proyección 2 + 400 m.

Fuente: Fotografía tomada por Famesa Explosivos S.A.C. las Bambas.

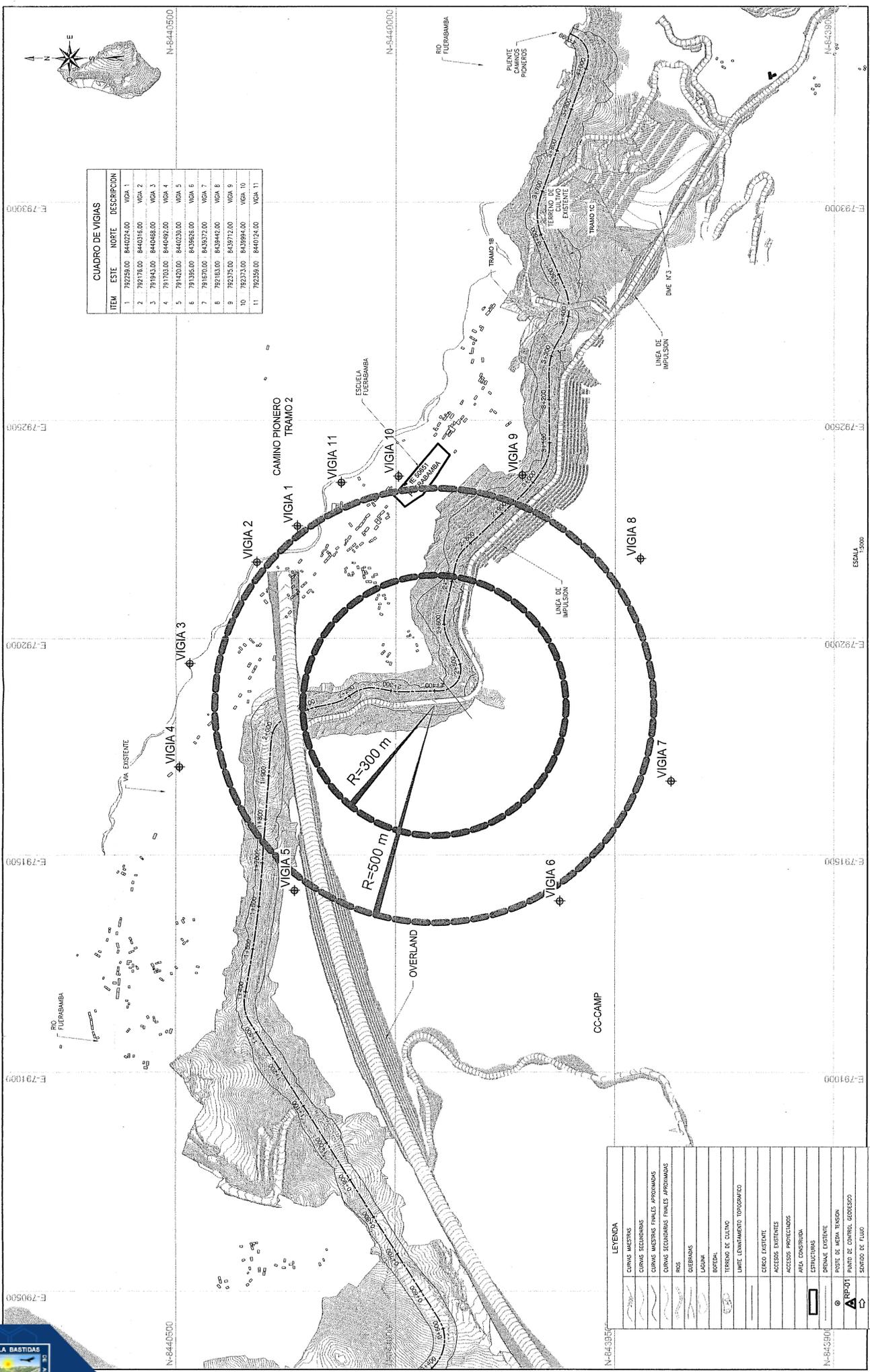
Anexo N° 09.



Gráfica. Parámetros de Carguío para el tramo 01B tramo 01B 2+400 km.

Fuente: Famesa Explosivos S.A.C. Proyecto minero Las Bambas.





CUADRO DE VIGIAS			
ITEM	ESTE	NORTE	DESCRIPCION
1	792259.00	8440274.00	VIGIA 1
2	792176.00	8440316.00	VIGIA 2
3	791943.00	8440468.00	VIGIA 3
4	791703.00	8440620.00	VIGIA 4
5	791420.00	8440730.00	VIGIA 5
6	791195.00	8439826.00	VIGIA 6
7	791670.00	8439372.00	VIGIA 7
8	792163.00	8438940.00	VIGIA 8
9	792225.00	8439712.00	VIGIA 9
10	792233.00	8439964.00	VIGIA 10
11	792259.00	8440124.00	VIGIA 11

LEYENDA	
	CURVAS MAESTRAS
	CURVAS SECUNDARIAS
	CURVAS MAESTRAS FINALES APROXIMADAS
	CURVAS SECUNDARIAS FINALES APROXIMADAS
	RIOS
	QUEBRADAS
	LAGUNA
	SOPENAL
	TERRENO DE CULTIVO
	LIMITE LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO
	CERCO EXISTENTE
	ACCESOS EXISTENTES
	ACCESOS PROPICADOS
	AREA CONSTRUIDA
	ESTRUCTURAS
	DRENAJE EXISTENTE
	POSTE DE MERA TENSION
	PUNTO DE CONTROL GEODESICO
	SENTIDO DE FLUJO
	POLIGONOS ARQUEOLOGICOS

**CAMINO PIONERO TRAMO 01**  
 Universidad Nacional  
 Micaela Bastidas de  
 Apurímac



Realizado por:  
 Villavicencio Panuera Ismael Hector

FOF	
FECHA	
ESCALA	INDICADA
PLANT. N°	01
REV.	

Anexo N° 11.

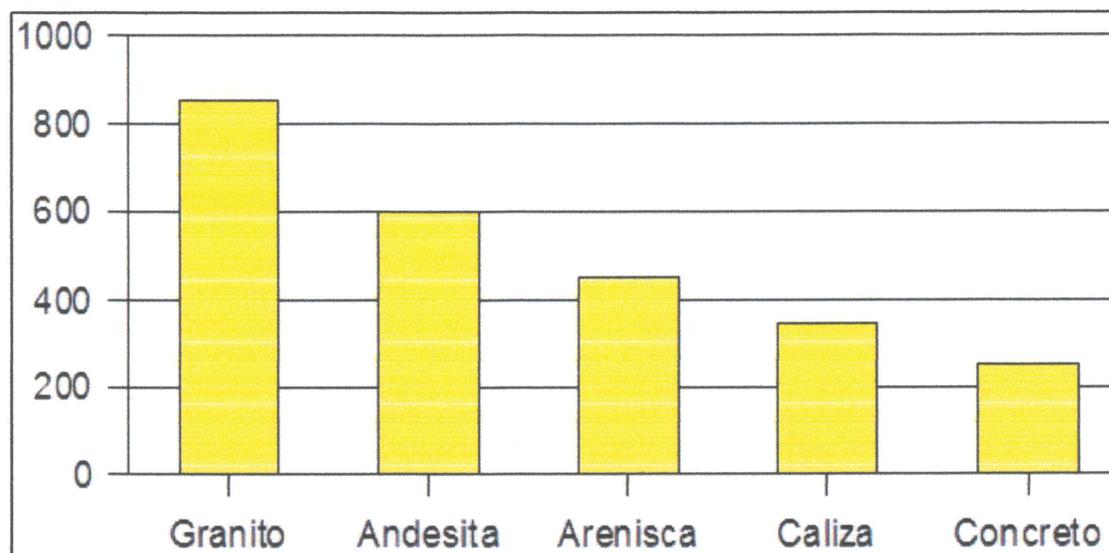
Tabla. Análisis de estadística descriptiva de la PPV, D, Q y Frecuencia.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA			HISTOGRAMA DE PPV		
HISTOGRAMA			HISTOGRAMA		
Maximo	Xmax =	55.90	Maximo	Xmax =	16.979
Minimo	Xmin =	14.60	Minimo	Xmin =	1.156
Numero de datos	N =	34	Numero de datos	N =	34
Numero de clase	K =	6.00	Numero de clase	K =	6.00
Calculo de rango	R =	41.30	Calculo de rango	R =	15.823
Amplitud de intervalo	L =	6.883	Amplitud de intervalo	L =	2.6372
MEDIDA DE POSICION CENTRAL			MEDIDA DE POSICION CENTRAL		
Media aritmetica	$\mu$ =	30.91	Media aritmetica	X =	6.41
Mediana	Me =	28.15	Mediana	Me =	5.56
Media agrupados		31.20	Media agrupados		6.35
MEDIDAS DE DISPERSION			MEDIDAS DE DISPERSION		
Rango	R =	41.30	Rango	R =	15.82
Desviacion Media	DM =	11.93	Desviacion Media	DM =	4.53
Varianza $\sigma^2$	S2 =	142.26	Varianza $\sigma^2$	S2 =	20.52
Desviacion Tipica $\sigma$	S =	11.93	Desviacion Tipica $\sigma$	S =	4.53
Coefficiente de Variacion	CV =	38.58	Coefficiente de Variacion	CV =	70.67

HISTOGRAMA DE DISTANCIA			HISTOGRAMA DE CARGAS		
HISTOGRAMA			HISTOGRAMA		
Maximo	Xmax =	307.00	Maximo	Xmax =	900.00
Minimo	Xmin =	67.00	Minimo	Xmin =	200.00
Numero de datos	N =	34	Numero de datos	N =	34
Numero de clase	K =	6.00	Numero de clase	K =	6.00
Calculo de rango	R =	240.00	Calculo de rango	R =	700.00
Amplitud de intervalo	L =	40.00	Amplitud de intervalo	L =	116.67
MEDIDA DE POSICION CENTRAL			MEDIDA DE POSICION CENTRAL		
Media aritmetica	X =	157.32	Media aritmetica	X =	532.94
Mediana	Me =	151.00	Mediana	Me =	502.50
Media agrupados		159.94	Media agrupados		539.72
MEDIDAS DE DISPERSION			MEDIDAS DE DISPERSION		
Rango	R =	240.00	Rango	R =	700.00
Desviacion Media	DM =	60.75	Desviacion Media	DM =	196.13
Varianza $\sigma^2$	S2 =	3691.13	Desviacion Tipica $\sigma$	S =	196.13
Desviacion Tipica $\sigma$	S =	60.75	Coefficiente de Variacion	CV =	36.80
Coefficiente de Variacion	CV =	38.62			

Fuente: Elaboración Propia.

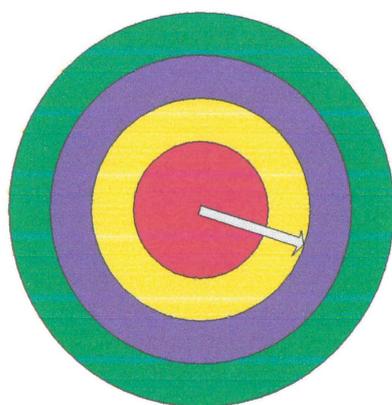
**Anexo N° 12.**



**Gráfica.** Inicio de daño cómo funciona la vibración límite y el tipo de roca.

**Fuente:** (DETNET, s.f.)

**Anexo N° 13.**



CRITERIO DE DAÑO	PPVc
Intenso fracturamiento	Red
Creación de nuevas fracturas	Yellow
Extensión de fracturas existentes	Purple
Sobre quiebre	Green

**Figura.** Criterio de daño de Holmberg y Persson (1979)

**Fuente:** Análisis y control de vibraciones en Voladura (Carlos Agreda Uriarte, 2013).

**PROYECTO DE VOLADURA TRAMO 01 DE SETIEMBRE 2013**

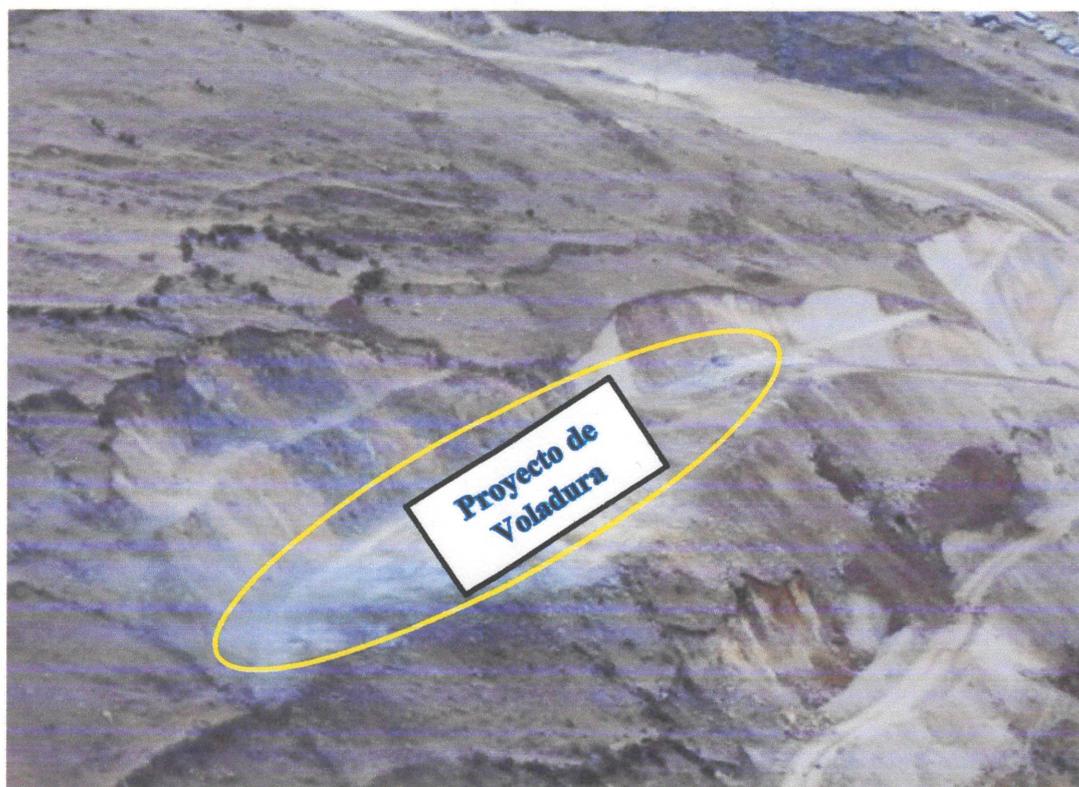


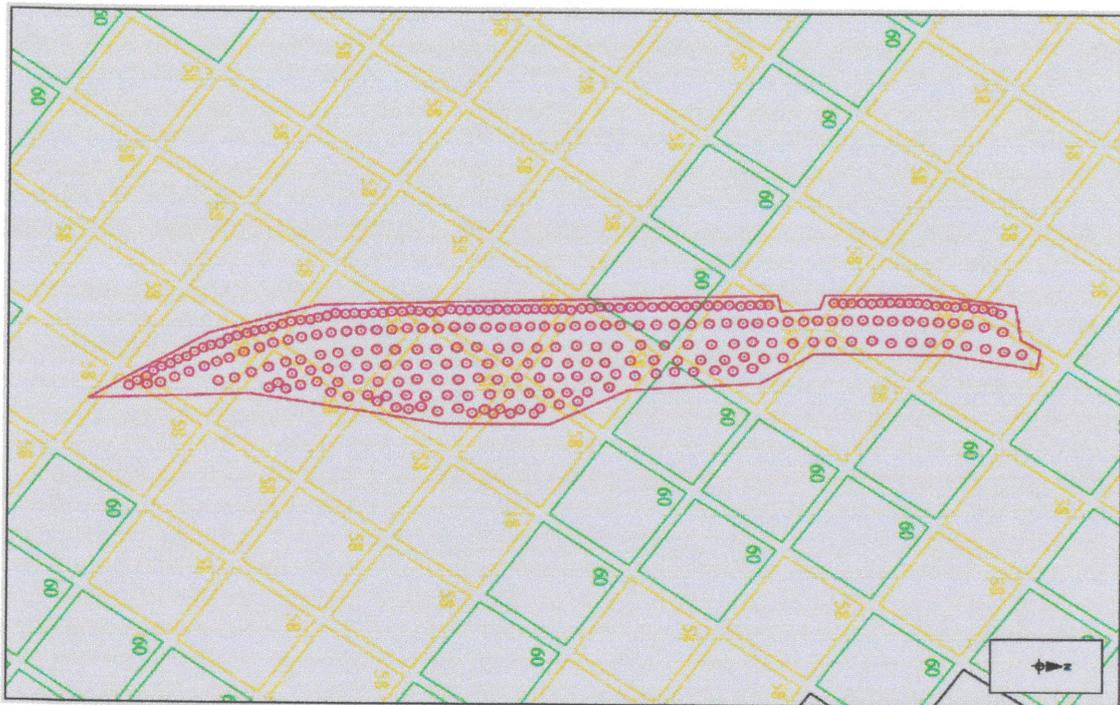
Foto. Proyecto de voladura antes del proceso de Voladura Tramo 01.



Foto. Instalación del geófono Pre Voladura Tramo 01.



Foto. Vista construcción de los camino pionero Las Bambas Tramo 01.



Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

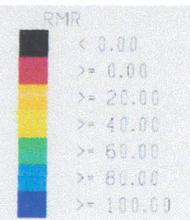
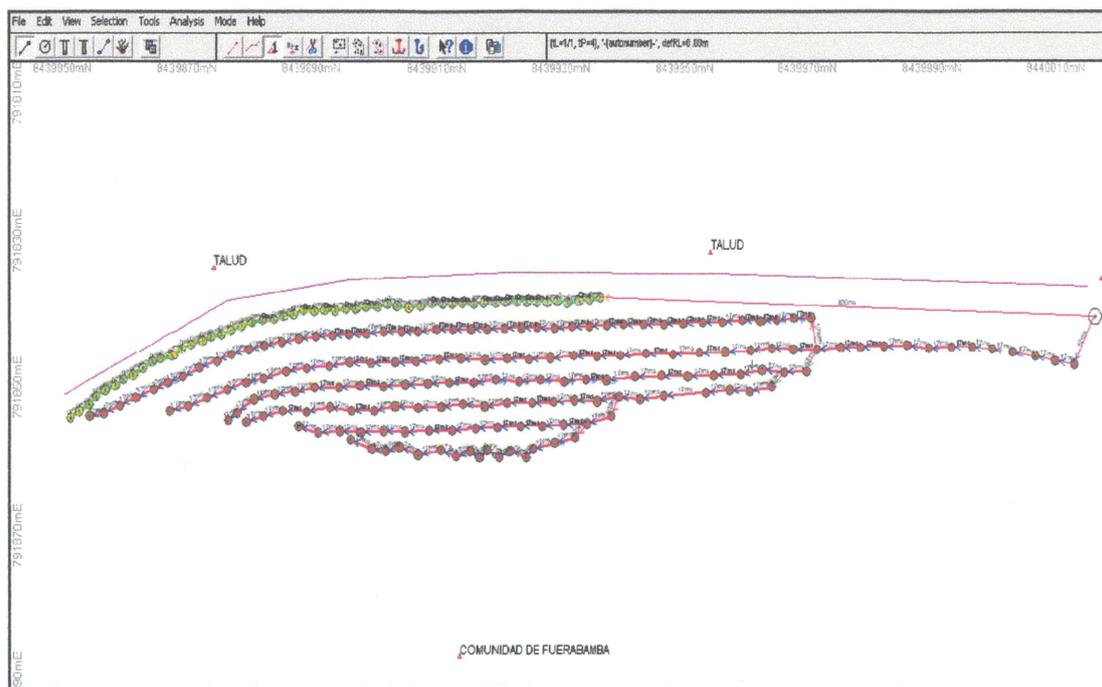


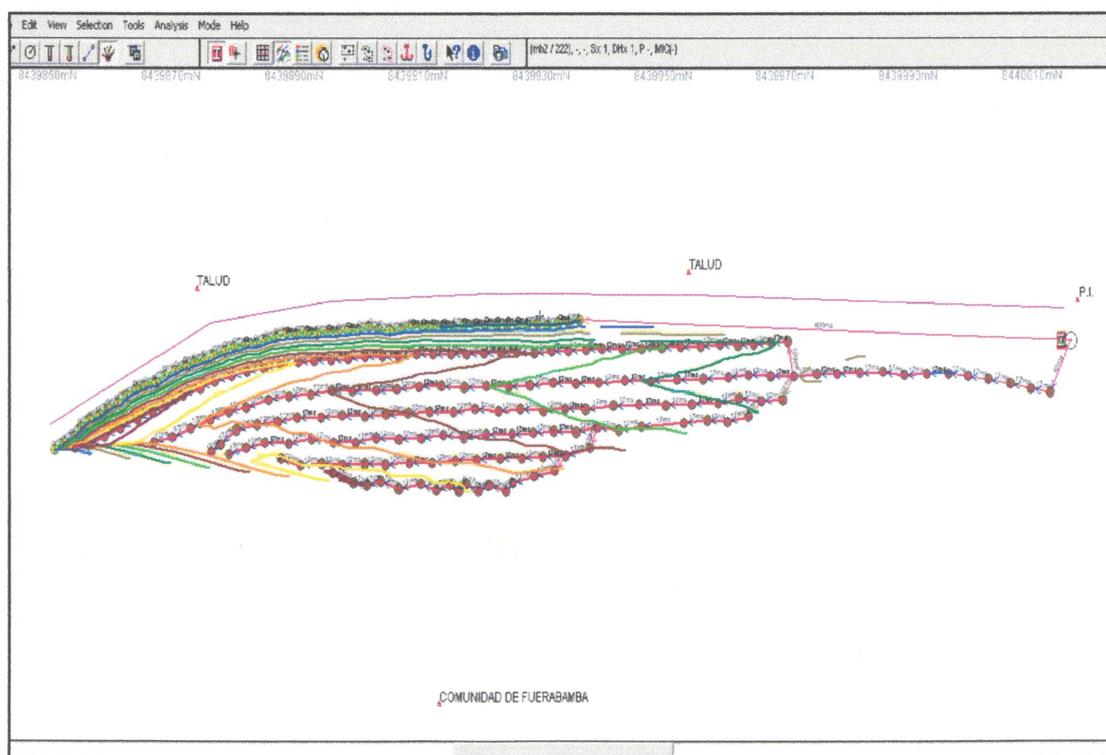
Figura. Clasificación según Bienaski RMR del macizo rocoso.

Fuente: Famesa Explosivos S.A.C. Proyecto minero Las Bambas.



**Gráfica.** Amarre del proyecto en dirección de EW tramo 01.

**Fuente:** Famesa Explosivos S.A.C. Proyecto minero Las Bambas.



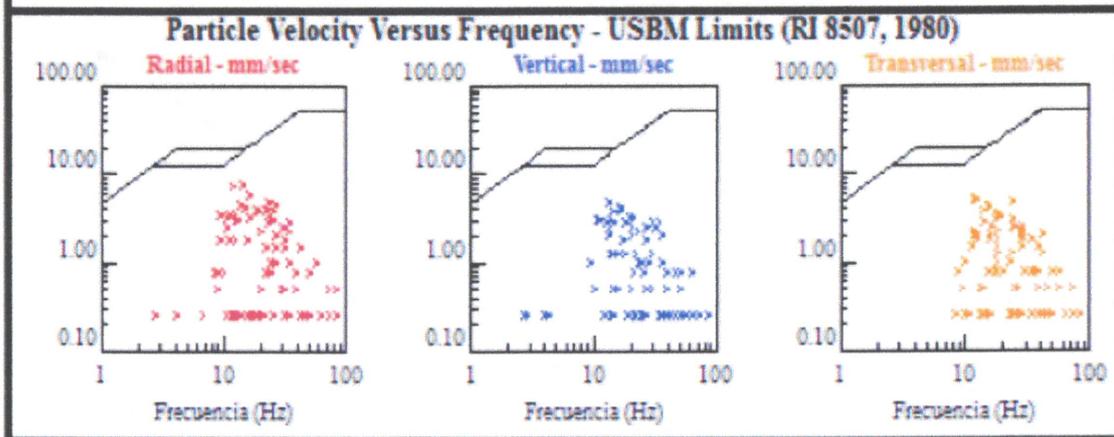
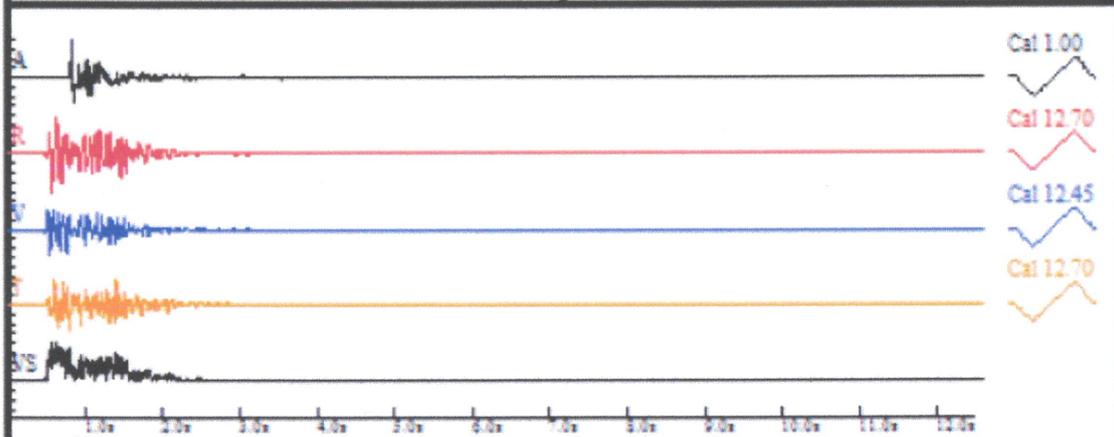
**Gráfica.** Línea de Isotiempo del proyecto en dirección de EW tramo 01.

**Fuente:** Famesa Explosivos S.A.C. Proyecto minero Las Bambas.

Tramo I: 2+320/ 2+480  
 Voladura N° 8  
 Fecha: 09/09/2013  
 Tiempo: 14:40  
 Distancia 112 m

Numero del archivo: 447020130000196.DTB  
 Numero: 196  
 Fecha: 09/09/2013  
 Tiempo: 14:40  
 Numero de sism: 4470  
 Disipador Sismico: 1.016 mm/sec  
 Disipador Acustico: 145 dB  
 Tarifa De la Maquina: 1024  
 Duracion De registro: 12.0 Seconds  
 Pre Disipador: 0.50 Seconds  
 Aumento Del Sensor: 2x  
 Escala: 4.0

Amplitudes and Frequencies	Graph Information
Acústico: 136 dB, 1.24 Mb, 0.0180 psi, 0.1240 kPa	Desde: 0.000 s To: 12.500 s
Radial: 7.620 mm/sec @ 14.6Hz	Escala de Sobreprecion: 136 dB
Vertical: 5.334 mm/sec @ 12.1Hz	Escala de Amplitud Sismica: 7.62 mm/sec (1.905 g)
Transversal: 5.080 mm/sec @ 12.4Hz	Time Line Intervals at: 1.00 s
Suma de Vector (VS): 7.747 mm/sec	
Desplazamiento: 0.103 mm	
Aceleracion: 780 mm/sec/sec	



Gráfica. Reporte de vibración del tramo 01.

Fuente: Famesa Explosivos S.A.C. Proyecto minero Las Bambas.

