



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES POR EFECTOS DE LA VOLADURA SUPERFICIAL USANDO CÁMARAS DE AIRE EN LA COLUMNA EXPLOSIVA, EN MINERA CORPORACIÓN DEL CENTRO, LA LIBERTAD, 2016”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Cesar Ernesto Pérez Quispe

Asesor:

Ing. José Alfredo Siveroni Morales

Cajamarca – Perú

2016

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller Cesar Ernesto Pérez Quispe, denominada:

**“REDUCCION DE LAS VIBRACIONES POR EFECTOS DE LA VOLADURA
SUPERFICIAL USANDO CÁMARAS DE AIRE EN LA COLUMNA EXPLOSIVA,
MINERA CORPORACIÓN DEL CENTRO, LA LIBERTAD 2016”**

Mg. Ing. José Siveroni Morales.
ASESOR

Ing. Víctor Álvarez León
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Roberto Gonzales Yana
JURADO

Ing. Wilder Chuquiruna Chavez
JURADO

DEDICATORIA

Gracias Señor por todas las bendiciones en mi vida, por la familia, por los amigos, por la salud, por los buenos momentos y también por los difíciles. Por los sueños que se vuelven realidad.

Gracias por todas las personas que has puesto en mi camino por que todas ellas me han dado alguna lección de vida.

AGRADECIMIENTO

A mi madre por su amor incondicional, su perseverancia, su ejemplo de amar lo que se hace y enseñanzas que han sembrado las virtudes que se requieren para vivir con anhelo y felicidad.

A Sonia Doris por su apoyo de siempre en todo lo que emprendí, que han permitido seguir adelante para cumplir mis sueños. El apoyo de la persona que amas es una gran bendición. Gracias por ser parte de esa fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A Anne Marie, José Luis, Doris Elizabeth y Angie Michelle, por ser motores de mi vida, ser la fuente de energía o la luz que han iluminado mi camino y comprenderme los largos periodos de ausencia por las jornadas atípicas del trabajo de un minero.

A la Universidad Privada del Norte, por acogerme en sus aulas y por convertirme en un profesional en minería, carrera que tanto me apasiona.

A los maestros de la Escuela de Ingeniería de Minas por sus experiencias y enseñanzas que cada uno hizo parte de este proceso integral de formación.

A mis amigos y compañeros de trabajo en la minería, a quienes considero parte de mi familia, con quienes pasamos más días que en casa.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Realidad problemática	14
1.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. <i>Justificación teórica</i>	14
1.3.2. <i>Justificación aplicativa o práctica</i>	14
1.3.3. <i>Justificación valorativa</i>	15
1.3.4. <i>Justificación académica</i>	15
1.4. Limitaciones	15
1.5. Objetivos	15
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	15
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Antecedentes	16
2.2. Bases Teóricas	17
2.2.1. <i>Teoría de la Voladura</i>	17
2.2.2. <i>Vibraciones generadas por la voladura</i>	26
2.2.3. <i>Medidas de las vibraciones producidas por la voladura</i>	28
2.2.4. <i>Equipos de medida de las vibraciones generas por voladura</i>	28
2.2.5. <i>Uso de cámaras de aire en columnas explosivas</i>	32
2.2.6. <i>Aplicación industrial Taponex</i>	42
2.3. Definición de términos básicos.	45
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS.....	47
3.1. Formulación de la hipótesis	47
3.2. Variables.	47
3.3. Operacionalización de variables	47
CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS	48
4.1. Tipo de investigación.	48
4.2. Material.	48
4.2.1. <i>Unidad de estudio</i>	48

4.2.2.	<i>Población</i>	48
4.2.3.	<i>Muestra</i>	48
4.3.	<i>Métodos</i>	48
4.3.1.	<i>Técnicas e Instrumentos de recolección de datos</i>	48
4.3.2.	<i>Técnicas de procesamiento y análisis de datos</i>	49
4.3.3.	<i>Procedimiento experimental</i>	49
CAPÍTULO 5.	DESARROLLO	50
5.1.	<i>Ubicación</i>	50
5.1.1.	<i>Concesiones mineras de Corporación del centro</i>	50
5.1.2.	<i>Vías de acceso a la empresa minera Corporación del centro</i>	51
5.1.3.	<i>Comunidades del área de influencia a la unidad minera</i>	53
5.2.	<i>Información meteorológica</i>	53
5.2.1.	<i>Temperatura</i>	53
5.3.	<i>Geomorfología</i>	55
5.4.	<i>Geología de la zona</i>	57
5.4.1.	<i>Geología regional</i>	57
5.4.2.	<i>Geología local</i>	59
5.5.	<i>Detalle de pruebas en campo</i>	64
5.5.1.	<i>Requerimiento de botellas plásticas</i>	64
5.5.2.	<i>Parámetros de diseño estándar para la voladura con cámara de aire</i>	64
5.5.3.	<i>Instalación de equipos de medición de vibraciones</i>	65
5.5.4.	<i>Definición de zona de prueba para la aplicación de cámaras de aire</i>	66
5.5.5.	<i>Prueba de campo N° 01: Proyecto TORO 440-V1</i>	66
5.5.6.	<i>Prueba de campo N° 02: Proyecto TORO 450-V2</i>	69
5.5.7.	<i>Prueba de campo N° 03: Proyecto TORO 460-V3</i>	72
5.5.8.	<i>Prueba de campo N° 04: Proyecto TORO 470-V4</i>	77
5.5.9.	<i>Prueba de campo N° 05: Proyecto TORO 480-V5</i>	81
CAPÍTULO 6.	RESULTADOS	84
6.1.	<i>Análisis de vibraciones y otras variables post-voladura</i>	84
6.1.1.	<i>Resultados de la prueba de campo N° 1: Proyecto TORO 440-V1</i>	84
6.1.2.	<i>Resultados de la prueba de campo N° 2: Proyecto TORO 450-V2</i>	89
6.1.3.	<i>Resultados de la prueba de campo N° 3: Proyecto TORO 460-V3</i>	94
6.1.4.	<i>Resultados de la prueba de campo N° 4: Proyecto TORO 470-V4</i>	99
6.1.5.	<i>Resultados de la prueba de campo N° 4: Proyecto TORO 480-V5</i>	103
CAPÍTULO 7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
7.1.	<i>Efectos de cámaras de aire en la columna explosiva sobre las vibraciones</i>	107
7.2.	<i>Efectos en los costos y tamaño de partícula</i>	109
	CONCLUSIONES	110
	RECOMENDACIONES	111
	REFERENCIAS	112

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Dimensiones del taponex (EXSA-2015).....	44
Tabla 3.1 Operacionalización de variables	47
Tabla 5.10 Parámetros de diseño del proyecto TORO 450-V2.	76
Tabla 5.11 Parámetros de diseño del proyecto TORO 470-V4.	80
Tabla 5.12 Parámetros de diseño del proyecto TORO 480-V5.	83
Tabla 6.1 Costos del proyecto TORO 440-V1.	84
Tabla 6.2 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto TORO 440-V1.....	85
Tabla 6.3 Fragmentación (Área de Perforación y Voladura-CDC)	87
Tabla 6.4 Costos Proyecto TORO 450-V2.....	89
Tabla 6.5 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto TORO 450-V1.....	90
Tabla 6.6 Cuadro de Fragmentación (Área de Perforación y Voladura-CDC)	92
Tabla 6.7 Costos Proyecto TORO 460-V3.....	94
Tabla 6.8 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 460-V3	95
Tabla 6.9 Cuadro de fragmentación (área de perforación y voladura-CDC)	97
Tabla 6.10 Costos proyecto 470-V4.....	99
Tabla 6.11 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 470-V4.	100
Tabla 6.12 Costos Proyecto 480-V5	103
Tabla 6.13 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 470-V4	104
Tabla 7.1 Diferencia entre la voladura convencional y cámaras de aire.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Ondas vibracionales internas y superficiales (EXSA 2010).....	26
Figura 2.2 Tipos de ondas sísmicas (P/V de rocas Madrid 2013)	27
Figura 2.3 Sismógrafo con sus accesorios (Bernaola, Castilla 2013).	29
Figura 2.4 Geófono electrodinámico (Bernaola, Castilla 2013).	30
Figura 2.5 Geófono electrodinámico (Bernaola, Castilla 2013).	31
Figura 2.6 Ubicación de sensores enterrados en el terreno o fijados al mismo.	32
Figura 2.7 Ubicación de cámaras de aire en la columna explosiva Salas (2011).	33
Figura 2.8 Presión de la cámara de aire tiene mayor duración, Salas (2011).	34
Figura 2.9 Perfil de diferentes geometrías y cargas, Salas (2011).	34
Figura 2.10 Primera etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).	36
Figura 2.11 Perfil de diferentes geometrías y cargas Chiappetta (2004).	36
Figura 2.12 Tercera etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).	37
Figura 2.13 Cuarta etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).	37
Figura 2.14 Esquema pruebas con cámaras de aire Chiappetta (2004).	38
Figura 2.15 Esquema para medir VOD en cámara inferior Chiappetta (2004).	38
Figura 2.16 Pruebas voladura completa Chiappetta (2004).	39
Figura 2.17 VOD en cámara de aire Chiappetta (2004).	40
Figura 2.18 Aumento de Presión en cámara de aire	40
Figura 5.1 Plano de ubicación del proyecto (Fuente INGEMET).	50
Figura 5.2 Estaciones meteorológicas más cercanas (Fuente: Elaborado por ACOMISA).	54
Figura 5.3 Parámetros diseño de la cámara de aire.	64
Figura 5.4 Instalación del equipo de medición.	65
Figura 5.5 Detalle de instalación del equipo de medición.	65
Figura 5.7 Plano geo mecánico proyecto 440-V1 (Área de Geología).	66
Figura 5.8 Simulación de secuencia de salida (Software de voladura I-blast 5.0).	67
Figura 5.9 Plano geo mecánico del proyecto 450-V2 (Área de Geología).	69
Figura 5.10 Parámetros de diseño Air deck proyecto 450-V2. (I-blast 5.0)	70
Figura 5.11 Plano geo mecánico proyecto 460-V3 (Área de Geología).	73
Figura 5.12 Simulación de secuencia de salida (Software JK Simblast 2.0)	74
Figura 5.13 Plano geo mecánico proyecto 470-V4 (Área de Geología).	78
Figura 5.14 Simulación de secuencia de salida (Software JK Simblast 2.0)	79
Figura 5.15 Plano geo mecánico proyecto 480-V5 (Área de Geología).	81
Figura 5.16 Simulación de secuencia de salida (Software de voladura JK Simblast 2.0)	82
Figura 6.1 Simulación de Vibraciones (Software de voladura JK Simblast 2.0).	85
Figura 6.2 Reporte de vibraciones Sismógrafo InstanTel. (FAMESA SAC).	86
Figura 6.3 Comparación de Vibraciones simulada y real.	87
Figura 6.4 Medición de Fragmentación con Wipfrag - proyecto 440-V1.....	88
Figura 6.5 Fotografía delimitación de fragmentos(Software Wipfrag 2.3)	88
Figura 6.6 Distribución granulométrica proy-440-V1 (Software Wipfrag 2.3)	88
Figura 6.7 Simulación de Vibraciones (Software de voladura JK Simblast 2.0)	90
Figura 6.8 Reporte de vibraciones Sismógrafo InstanTel (FAMESA SAC).	91
Figura 6.9 Comparación de vibraciones simulada y real.	92
Figura 6.10 Medición Fragmentación con Wipfrag - proyecto 450-V2.....	93
Figura 6.11 Fotografía delimitación de fragmentos (Software Wipfrag 2.3.)	93
Figura 6.12 Distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3)	93
Figura 6.13 Simulación de vibraciones (Software JK Simblast 2.0)	95
Figura 6.14 Reporte de vibraciones Sismógrafo InstanTel (FAMESA SAC).	96
Figura 6.15 Comparación de Vibraciones simulada y real.	97
Figura 6.16 Medición de Fragmentación con Wipfrag - proyecto 460-V3	98
Figura 6.17 Fotografía de la delimitación de fragmentos (Software Wipfrag)	98
Figura 6.18 Distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3)	98
Figura 6.19 Simulación de Vibraciones (Software JK Simblast 2.0).....	100
Figura 6.20 Reporte de vibraciones Sismógrafo InstanTel. (FAMESA SAC)	101
Figura 6.21 Comparación de Vibraciones simulada y real.	102

Figura 6.22 Distribución granulométrica (P/V-CDC)	102
Figura 6.23 Simulación de Vibraciones (Software JK Simblast 2.0).....	104
Figura 6.24 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel (FAMESA SAC).	105
Figura 6.25 Comparación de Vibraciones simulada y real.	106
Figura 6.26 Curva de fragmentación (P/V-CDC)	106
Figura 7.1 Vibraciones teóricas y reales a distancias de 280 y 300 metros.....	107
Figura 7.2 Vibraciones teóricas y reales a distancias entre 130 y 195 metros.....	107
Figura 7.3 Comparación de las vibraciones con y sin cámaras de aire.....	108
Figura 7.4 4 Efectos del uso de las cámaras de aire en el costo de P&V y p80.	109

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo general la reducción de la vibración por efectos de la voladura superficial usando cámaras de aire en la columna explosiva, en la Minera Corporación del Centro, la cual se inició con la revisión bibliográfica de uso de cámaras de aire en voladura y del estudio de la Geología Local del Yacimiento, posteriormente se definió la zona de pruebas para la aplicación de cámaras de aire en función del mapeo geo mecánico y del tipo roca (Roca tipo II con RMR de 61 a 81). Se realizaron cinco experimentos utilizando un diseño de voladura computarizado (JK SimBlast 2.0) y se definió la secuencia de salida para la voladura con cámara de aire de cada proyecto.

Previo a los experimentos de voladura, se realizó la instalación de equipos de medición de vibraciones (Sismógrafo Instantel) para tomar datos durante los experimentos, y posterior a las experiencias, se realizó las evaluaciones de los costos de la voladura y la distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3).

Los experimentos demostraron que el uso de cámaras de aire en la columna explosiva reduce las vibraciones en un 37% frente a la voladura convencional que no utiliza cámaras de aire. Adicionalmente el uso de cámaras de aire presenta efectos positivos en la distribución granulométrica p80, por otro lado los costos unitarios para los procesos de perforación y voladura son menores con uso de cámaras de aire, debido al menor consumo específico por columna explosiva. El promedio esta alrededor de 0.48 US\$/t muy por debajo de costos estándar de otras compañías que bordean los 0.8 US\$/t en yacimientos similares al de las pruebas; otros beneficios son la reducción de los fly rock, incremento de la eficiencia en las etapas posteriores, etc.

ABSTRACT

This research has the overall objective of Vibration Reduction by effects of Surface Blasting Using air chambers explosive column in the Mining Center Corporation that began with a literature review of use of air chambers blasting and review of the study of local geology of the site, then the test area for the application of air chambers depending on the mechanical geo mapping and rock type (type II rock RMR 61-81) was defined. five experiments using a computerized design blasting (JK SimBlast 2.0) and the output stream for blasting air chamber each defined project were made.

Before experiences blasting equipment installation vibration measurement (seismograph Instantel) was conducted to collect data during the experiments, and after experiences assessments of the cost of blowing and the particle size distribution was performed (Software Wipfrag 2.3).

The experiments showed that the use of air chambers in the explosive column reduces vibration by 37% compared to conventional blasting does not use air chambers. Additionally, the use of air chambers has positive effects on the particle size distribution p80; on the other hand the unit costs for the processes of drilling and blasting are smaller with use of air chambers, due to the lower specific consumption by explosive column. The average is around 0.48 US \$ / t well below standard costs of other companies lining the 0.8 US \$ / t in similar testing sites; other benefits include reduction of fly rock, increased efficiency in the later stages, etc.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Las vibraciones que origina la voladura representan uno de los problemas más importantes que enfrentan hoy en día las operaciones mineras que están cerca a poblaciones. Esto debido al impacto que pueden generar dichas vibraciones en las estructuras de las casas cercanas, en la percepción de los habitantes colindantes con la operación, en el prestigio de la empresa, en las relaciones comunitarias, licencia social de la operación, etc.

Se han desarrollado investigaciones modificando los parámetros de la voladura como el burden, espaciamiento, diámetro del taladro, factor de carga, etc.; pero aún no se pueden controlar completamente las vibraciones ni su efecto sobre edificaciones y poblaciones colindantes con las operaciones.

La presente investigación trata del estudio de los efectos de las cámaras de aire en la columna explosiva, para reducir las vibraciones ocasionadas por la voladura en los tajos de la empresa minera aurífera Corporación del Centro.

1.2. Formulación del problema

¿Será posible reducir los niveles de vibración producidas por las voladuras en tajo abierto con el uso de cámaras de aire en la columna explosiva?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

Los resultados de las pruebas contribuirán con datos prácticos útiles para comprobar y/o generar nuevos métodos referentes al uso de cámaras de aire en operaciones de voladura superficial.

1.3.2. Justificación aplicativa o práctica

Las vibraciones producto de la voladura superficial son un problema latente para muchas compañías mineras que trabajan cerca a comunidades. Nuevas métodos para el control o mitigación de las mismas serán de aplicadas en la unidad minera.

1.3.3. Justificación valorativa

Con el uso de las cámaras de aire en los taladros se plantea reducir las vibraciones causadas por las voladuras en minas a tajo abierto, adicionalmente se puede conseguir los siguientes beneficios: Reducción de la eyección de tacos, no utilizar gravilla, mejorar la fragmentación y reducción de costos.

1.3.4. Justificación académica

Nuestra investigación aportará en nuevos métodos de voladura utilizando cámaras de aire.

1.4. Limitaciones

Las principales limitaciones que se han podido detectar en la elaboración de este trabajo fueron las siguientes:

- El estudio técnico y la evaluación integral del proceso de voladura como el monitoreo de vibración, análisis de la granulometría, velocidad de detonación, entre otros, se realizó con la empresa proveedora de explosivos (FAMESA), la cual tiene disponibilidad limitada de equipos y personal.
- El estudio se realizó solo en bancos de 8 metros.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Reducir el nivel de vibraciones por efecto de las voladuras en tajo abierto al utilizar cámaras de aire en la columna explosiva.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar los efectos del uso de cámaras de aire en la columna explosiva para reducir los niveles de vibración.
- Comparar los resultados de los análisis de vibraciones obtenidos, usando el método tradicional y con las cámaras de aire.
- Evaluar los efectos en los costos y el tamaño de partícula (p80).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Chiappetta (2004), explico el funcionamiento de cámaras de aire: La cámara de aire inferior transforma la voladura tradicional compresiva en una nueva técnica de voladura tensional. Los principales resultados son: 1) Aumento de la presión del taladro con la zona de la cámara (2 a 7 veces). 2) Se transforma la energía potencial de aire en energía cinética. 3) Se reduce el factor de carga. 4) Se disminuye las vibraciones (30% menor). 5) Se reduce fly rock. 6) Se disminuye la onda aérea. 7) La fragmentación resultante es más homogénea y de menor granulometría.

Pérez (2010), “El Taponex es un accesorio de Polietileno con un diseño particular que permite crear cámaras de aire en un pozo de voladura, su exclusivo diseño permite ser instalado sin la necesidad de aire comprimido, su forma es auto soportante” (p.85).

Cebrián (2010) se refirió a las cámaras de aire empleadas en voladura de rocas, diciendo: Las bolsas auto inflables Llamadas también Baifs son una herramienta que puede ayudar a reducir la creación de finos alrededor de los taladros y limitando el empuje del explosivo. Al crear cámaras de aire dentro de los taladros, sin ocupar este espacio por retacado inerte, desacoplamos el explosivo de las paredes del taladro, evitando la acción de la onda de choque por detonación sobre la roca, pero permitimos la acción de los gases de voladura. (p.78)

Araya (2007), respecto a uso de camas de aire: La utilización de cámaras de aire en el fondo del tiro es una técnica muy usada en la actualidad en tronaduras de bancos. Su objetivo es reducir o eliminar la pasadura y reemplazar por una cámara de aire al menos un metro de carga del fondo del tiro. (p.1).

Salas (2011): Las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de la onda de choque sobre el medio circundante, esto debido a una serie de pulsos causados por las reflexiones de las ondas de presión originadas inmediatamente después de la detonación de un taladro.

Cruces J. (2009): La cámara de aire tiene la finalidad elevar la carga explosiva y mejorar la distribución de energía en las rocas con presencia de preformados y alto

RQD (Toba cristal, latita porfiritica potásica, brechas de Latita porfiritica) difíciles de fragmentar en la zona alta del taladro.

Cebrián (2010) con referencia al uso de cámaras de aire en voladura de rocas, manifestó: Al crear cámaras de aire dentro de los taladros, sin ocupar este espacio por retacado inerte, desacoplamos el explosivo de las paredes del taladro, evitando la acción de la onda de choque por detonación de la roca, pero permitimos la acción de los gases de voladura. Esto es equivalente a la acción de un explosivo de baja calidad. (pp. 20-22)

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Teoría de la Voladura.

2.2.1.1. Cálculo del burden.

El burden, como se ha indicado, es la variable geométrica más crítica en el diseño de la voladura. Para su determinación, desde hace varias décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones y se han desarrollados diferentes metodologías de cálculo.

ANDRESEN(1952)

$$B = K * \sqrt{D * L} \quad \text{Ec. 2.1}$$

B= Burden (pies)

D= Diámetro (pies)

L= Longitud del taladro (pies)

K= constante empírica (normalmente igual a 1)

HINO (1959)

$$B = \frac{D}{4} \left(\frac{PD}{RT} \right)^{1n} \quad \text{Ec. 2.2}$$

B= Burden (m)

n= Coeficiente característico que depende del binomio explosivo-roca

PD= Presión de detonación del explosivo (Kg/cm²)

RT= Resistencia a la tracción de la roca (Kg/cm²)

D= Diámetro del taladro (mm)

ALLSMAN (1960)

$$B = \sqrt{\frac{PD * D * \Delta t * g}{\rho_r * \mu}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

B= Burden (m)

PD= Presión de detonación del explosivo (Kg/cm²)

D= Diámetro del taladro (mm)

Δt = Duración de la presión de detonación (s)

ρ_r = Peso específico de la roca (N/m²)

μ = Velocidad mínima que debe impartirse a la roca

g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

KONYA (1972)

$$B = 3,15 * d * \left[\frac{\rho_e}{\rho_r}\right]^{0,33} \quad \text{Ec. 2.4}$$

B= Burden (m)

D= Diámetro de la carga (mm)

ρ_e = Densidad del explosivo

ρ_r = Densidad de la roca

KONYA

$$B = 0.012 \left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) * D_e \quad \text{Ec. 2.5}$$

B= Burden (m)

De= Diámetro de la carga (mm)

SGe= Gravedad específica o Densidad del explosivo (g/cm³)

SGr= Gravedad específica o Densidad de la Roca (g/cm³).

2.2.1.2. Distancia del taco.

La distancia del taco se refiere a la porción superior del taladro que normalmente se llena con material inerte para confinar los gases de la explosión. Para que una carga de alto explosivo funcione adecuadamente y libere el máximo de energía, la carga debe encontrarse confinada dentro del taladro. El confinamiento adecuado también es necesario para controlar la sobrepresión de aire y la fly rock.

KONYA

$$T = 0,7 * B \quad \text{Ec. 2.6}$$

T= Taco (m)

B= Burden (m)

TECNICA SUECA

$$T = B \quad \text{Ec. 2.7}$$

B= Burden

2.2.1.3. Material del taco.

El material más común utilizado para el taco son el detritus de la perforación, sin embargo este material no es recomendado puesto que el polvo de la perforación es muy fino y no se mantendrá en el taladro durante la detonación.

$$m = \frac{De}{20} \quad \text{Ec. 2.8}$$

De= Diámetro del explosivo (mm)

2.2.1.4. Diámetro de taladro (\emptyset)

La selección del diámetro de taladro es crítica considerando que afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo, también al burden, espaciado distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general a la eficiencia y economía de toda la operación.

Para determinar el diámetro óptimo en la práctica, se consideran tres aspectos:

- a. La disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo proyectado.
- b. La altura de banco proyectada y la amplitud o envergadura de las voladuras a realizar.
- c. La distancia límite de avance proyectado para el banco.

$$L = (2 \times \emptyset)$$

L : la mínima longitud del taladro, en pies.

\emptyset : Es el diámetro del taladro, en pulgadas.

2.2.1.5. Longitud o profundidad de taladro (L)

La longitud de taladro tiene marcada influencia en el diseño total de la voladura y es factor determinante en el diámetro, burden y espaciado.

Es la suma de altura de banco más la sobreperforación necesaria por debajo del nivel o razante del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos (toes), que afectan al trabajo del equipo de limpieza y deben ser eliminados por rotura secundaria.

Esta sobreperforación debe ser por lo menos de 0,3 veces el valor del burden, por tanto:

$$L = (0,3 \times B) \quad \text{Ec. 2.9}$$

L: longitud de taladro

B: burden.

Esta relación es procedente para taladros verticales que son los más aplicados en las voladuras de tajo abierto con taladros de gran diámetro, pero en muchas canteras de pequeña envergadura se perforan taladros inclinados, en los cuales la longitud de taladro aumenta con la inclinación pero, por lo contrario, la sobreperforación (SP) disminuye, estimándose por la siguiente relación:

$$L = (H / \cos(\alpha)) + [1 - ((\alpha/100) \times SP)] \quad \text{Ec. 2.10}$$

L: longitud del taladro.

H: altura de banco.

A: ángulo con respecto a la vertical, en grados.

SP: sobreperforación.

La perforación inclinada, paralela a la cara libre del banco, al mantener uniforme el burden a todo lo largo del taladro proporciona mayor fragmentación, esponjamiento y desplazamiento de la pila de escombros, menor craterización en la boca del taladro, menor consumo específico de explosivos y dejan taludes de cara libre más estables.

Por lo contrario, aumenta la longitud de perforación, ocasiona mayor desgaste de brocas, varillaje y estabilizadores, dificulta la carga de explosivos y la desviación de taladros, especialmente los mayores a 20 m.

2.2.1.6. La sobreperforación (SP)

Tal como se indicó anteriormente es importante en los taladros verticales para mantener la razante del piso. Si resulta corta normalmente reproducirán lomos, pero si es excesiva se produciría sobre excavación con incremento de vibraciones y de los costos de perforación. En la práctica, teniendo en cuenta la resistencia de la roca y el diámetro de taladro, se estima los siguientes rangos:

2.2.1.7. Sobre perforación por tipo de roca

Blanda a media : de 10 a 11 Ø

Dura a muy dura : 12 Ø

También es usual la relación: $SP = 0,3 \times B$

2.2.1.8. Altura de banco (H)

Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso). La altura es función del equipo de excavación y carga, del diámetro de perforación, de la resistencia de la roca de la estructura geológica y estabilidad del talud, de la mineralización y de aspectos de seguridad.

En un equipo de carga y acarreo son determinantes la capacidad volumétrica (m³) y la altura máxima de elevación del cucharón, además de su forma de trabajo. Normalmente los cargadores frontales a ruedas se emplean en bancos de 5 a 10 m de altura, con taladros de 65 a 100 mm (2 ½” a 5”) de diámetro, mientras que las excavadoras y grandes palas a oruga, en bancos de 10 a 15 m y más, con taladros de 100 mm (4” a 12”) o de diámetro, pudiéndose estimar la altura de banco con la siguiente fórmula:

$$H = 10 + (0,57 \times (C - 6)) \quad \text{Ec. 2.11}$$

C: es la capacidad del cucharón de la excavadora en m³.

2.2.1.9. Espaciamiento (E)

Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se calcula en relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros. Al igual que con el burden, espaciamientos muy pequeños producen exceso de trituración y craterización en la boca del taladro, lo más

al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. Por otro lado, espaciamientos excesivos producen fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular. En la práctica, normalmente es igual al burden para malla de perforación cuadrada.

$E = B$ y de $E = 1,3$ a $1,5 B$ para malla rectangular o alterna.

Para las cargas de precorte o voladura amortiguada (Smooth blasting) el espaciamiento en la última fila de la voladura generalmente es menor: $E = 0,5$ a $0,8 B$ cuando se pretende disminuir el efecto de impacto hacia atrás.

Si el criterio a emplear para determinarlo es la secuencia de salidas, para una voladura instantánea de una sola fila, el espaciado es normalmente de $E = 1,8 B$, ejemplo para un burden de 1,5 m (5') el espaciado será de 2,9 m (9').

Para voladuras de filas múltiples simultáneas (Igual retardo en las que el radio longitud de taladro a burden (L/B) es menor.

$$E = (B \times L) \quad \text{Ec. 2.12}$$

B: burden, en pies.

L: longitud de taladros, en pies.

En voladura con detonadores de retardo el espaciado promedio es aproximadamente de:

$$E = (1,4 \times B) \quad \text{Ec. 2.13}$$

2.2.1.10. Profundidad de taladro

$$L = (K_e \times B), (K_e \text{ entre } 1,5 \text{ y } 4) \quad \text{Ec. 2.14}$$

2.2.1.11. Espaciamiento

$$E = (K_e \times B) \quad \text{Ec. 2.15}$$

$K_e = 2,0$ para iniciación simultánea de taladros.

$K_e = 1,0$ para taladros secuenciados con retardos largos.

$K_e = 1,2$ a $1,8$ para taladros secuenciados con retardos cortos.

2.2.1.12. Sobreperforación

$$SP = (K_s \times B), \text{ (} K_s \text{ entre } 0,2 \text{ y } 1\text{)}. \text{ Ec. 2.17}$$

El burden se mantiene para la primera y demás filas de taladros con salidas paralelas, pero se reduce cuando.

2.2.1.13. Perforación específica

Se define por perforación específica el volumen o la longitud de los taladros perforados por una unidad de volumen de roca. Al igual que sucede con otros parámetros de diseño, la perforación específica es viabilidad de las rocas.

La expresión que sirve para calcular la perforación específica “PS” en ml/m³ es:

$$PS = \frac{\left(\frac{H}{\cos\beta} + J\right)}{\frac{B}{\cos\beta} * S * H} \quad \text{Ec. 2.18}$$

H= Altura de banco (m)

J= sobreperforación (m)

B= Piedra (m)

S= Espaciamiento (m)

β = Angulo de los taladros con respecto a la vertical (grados)

Y si se quiere obtener PS en l/m³ se aplica:

$$Ps = \frac{\left[\frac{H}{\cos\beta} + J\right] * [250 * \pi * D^2]}{\frac{B}{\cos\beta} * S * H} \quad \text{Ec. 2.19}$$

D= Diámetro de perforación (m)

2.2.1.14. Carga específica.

Llamado también consumo específico o factor de carga (Power factor). Es la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 m³ o yd³ de roca. Se expresa en kg/m o lb/yd.

$$CE = \frac{\text{Total de explosivo utilizado (Kg)}}{\text{Total de m}^3\text{ rotos cubicados}} \quad \text{Ec. 2.20}$$

La carga específica es una excelente unidad referencial para el cálculo de la carga total de un disparo, pero no es el mejor parámetro de por sí, ya que la distribución de este explosivo en la masa de la roca mediante los taladros tiene gran influencia en los efectos de fragmentación y desplazamiento, es decir, en el resultado de la voladura. Así, a igualdad de carga específica, una voladura efectuada con taladros de pequeño diámetro muy próximos entre sí resultará con mejor fragmentación que si se utilizan taladros de gran diámetro pero más espaciados.

Usualmente se determina con base en la cantidad de explosivo utilizado por m³ de roca volada en varios disparos, incluso diferenciando varios tipos de roca, considerando valores promedio para el cálculo de los disparos subsiguientes.

Otros valores utilizados para estimar la carga requerida para un disparo son: el factor de energía del explosivo en Kcal/kg conjugado con las características mecánicas de la roca, como su módulo de resistencia elástica (módulo de Young), resistencia a compresión-tensión, densidad, etc. En voladura, la cantidad de explosivo utilizado deberá ser muy próxima a lo mínimo necesario para desprender la roca. Menos carga significa tener una voladura deficiente y, por el contrario, un exceso de carga significa mayor gasto y mayores riesgos de accidentes, debiéndose tenerse en cuenta que el exceso de carga colocado en el taladro origina una proyección cuya energía es proporcional a dicho exceso por m³, estimándose que el centro de gravedad de la masa de la voladura podría desplazarse varios metros hacia adelante por cada 0,1 kg/m³ de exceso de carga, siendo aún mayor el riesgo de proyección de trozos pequeños a distancias imprevisibles (Fly rock).

2.2.2. Vibraciones generadas por la voladura.

Las vibraciones generadas por la voladura se transmiten a través del macizo rocoso como ondas sísmicas, cuyo frente se desplaza en forma radial a partir del punto de detonación, se clasifican en dos grupos: Ondas Internas y Ondas Superficiales. Así dentro de las ondas internas las más importantes son las Longitudinales o Primarias “P” y las Transversales o Secundarias “S”, y dentro de las Superficiales las que se generan más comúnmente son las Ondas Love y las Ondas Rayleigh. En la figura 2.1 podemos ver los tipos de ondas superficiales e internas.

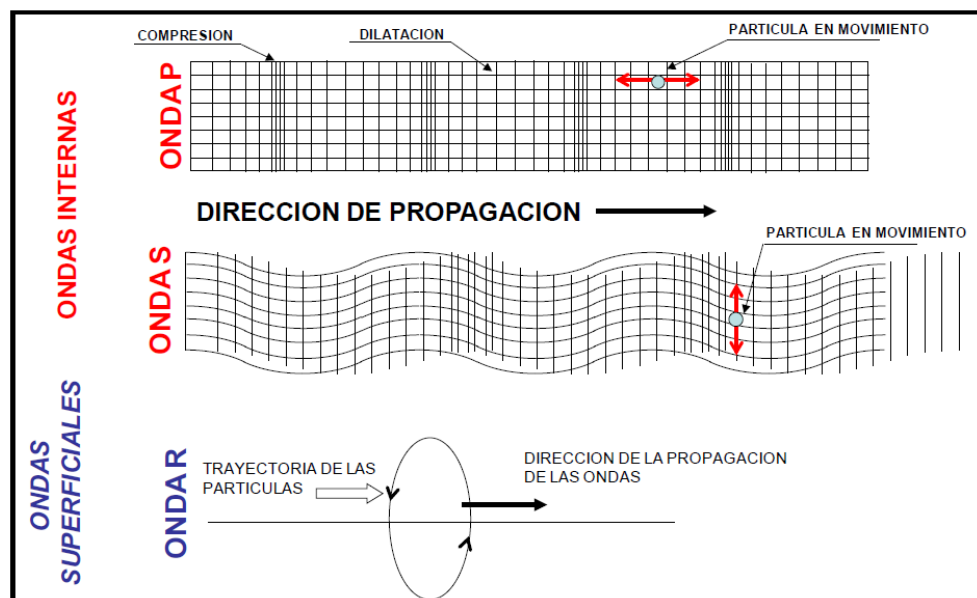


Figura 2.1 Ondas vibratorias internas y superficiales (EXSA 2010)

A continuación damos una breve descripción de cada tipo de onda generada por la voladura.

Las ondas P (PRIMARIAS O o PRIMAE) son ondas longitudinales o compresionales lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.

Las ondas S (SECUNDARIAS o SECUNDAE) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se trasladan a través de elementos sólidos. La velocidad de propagación de las ondas S en medios isótropos y homogéneos depende del módulo de corte μ y de la densidad ρ del material.

Las ondas superficiales Tipo Love, son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al matemático neozelandés A.E.H. Love quien desarrolló un modelo matemático de estas ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh.

Las ondas Rayleigh, también denominadas ground roll, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo. La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt, Lord Rayleigh, en 1885. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S.

En el Figura 2.2 siguiente podemos observar en forma esquemática las ondas primarias y secundarias, como las superficiales.

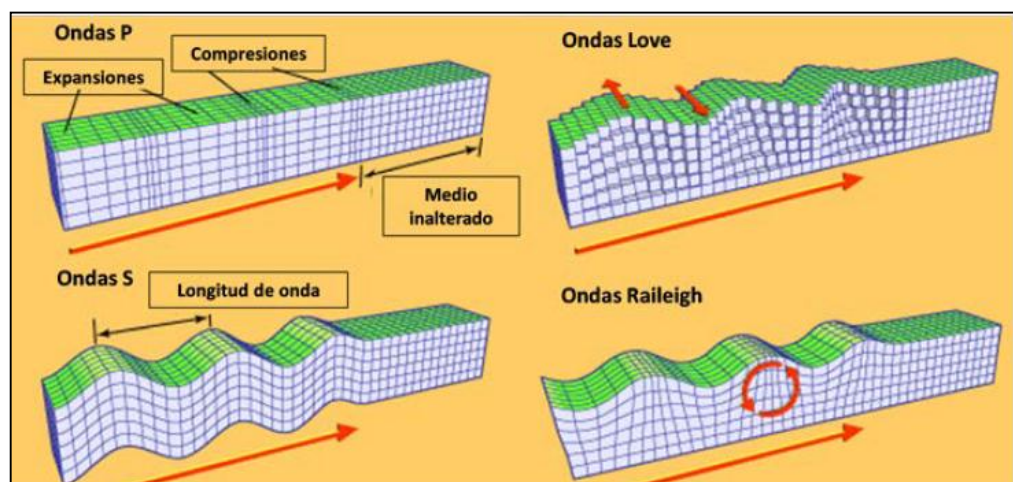


Figura 2.2 Tipos de ondas sísmicas (P/V de rocas Madrid 2013)

2.2.3. Medidas de las vibraciones producidas por la voladura.

Bernaola, Castilla, Herrera, 2013, es preciso hacer aquí una distinción entre aspectos bien diferenciados del fenómeno de la vibración. Uno de ellos es la propagación o transmisividad de la vibración por el medio y otro es el movimiento propio que el paso de la vibración genera en las partículas del medio. Cabe entonces diferenciar entre dos tipos de velocidades:

- ✓ Velocidad de onda o de propagación es aquella con la que la vibración se propaga por el medio.
- ✓ Velocidad de partícula es aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria.

Como ya se ha dicho, una partícula sometida a una vibración, experimenta un movimiento oscilante del que sus parámetros medibles pueden ser desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y la frecuencia del movimiento ondulatorio. Conociendo cualquier pareja de estos parámetros, se puede deducir el valor del resto, por integración y/o derivación. De todos los parámetros posibles de medida, universalmente se toma la velocidad de vibración como el que mejor representa el nivel de vibración y daños producidos, para edificaciones. No obstante es imposible hoy día establecer un criterio fiable que no considere las frecuencias dominantes en la vibración. Las vibraciones reales no se corresponden a un movimiento armónico puro, pero cualquier señal recibida por el captador se puede representar como la suma de una serie de movimientos armónicos individuales, que se conoce con desarrollo en serie de Fourier de la señal.

2.2.4. Equipos de medida de las vibraciones generas por voladura.

Bernaola, Castilla, Herrera (2013), para recoger la oscilación generada por el terreno se emplean equipos de medida denominados sismógrafos. Un sismógrafo cuenta con:

- ✓ Una serie de sensores o elementos para captar el ruido y las vibraciones del terreno transformándolos en impulsos eléctricos (micrófonos, velocímetros y acelerómetros).
- ✓ Un amplificador de la señal.
- ✓ Un módulo de memoria para el almacenamiento de datos.
- ✓ Algunos modelos incorporan un sistema de impresión que visualiza y gestiona los datos.



Figura 2.3 Sismógrafo con sus accesorios (Bernaola, Castilla 2013).

Para captar las vibraciones del terreno pueden utilizarse sismógrafos o acelerómetros. Los sismógrafos más antiguos y actualmente en desuso consistían básicamente en una masa suspendida del aparato mediante un muelle, que al moverse el terreno no se desplaza con éste, sino que permanece inmóvil provocando la deformación del resorte. Esta deformación permitirá medir en distintas escalas, desplazamientos, velocidades o aceleraciones del movimiento. Obviamente la gama de frecuencias a la que estos aparatos son utilizables está limitada por la propia frecuencia natural del movimiento del muelle, pero por otra parte, cuanto mayor sea ésta, menores son las deformaciones del mismo y más débil la respuesta del aparato.

Los geófonos electrodinámicos son los más usados en la actualidad y están basados en el desplazamiento relativo de una bobina en el interior

de un campo magnético lo que genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional a la velocidad de desplazamiento. Uno de los elementos (el imán o la bobina) se fija al aparato y, con éste, al terreno, mientras que el otro está libremente suspendido de aquel y por tanto permanece inmóvil. De esta forma, la velocidad de partícula resulta ser proporcional a la f.e.m. generada.

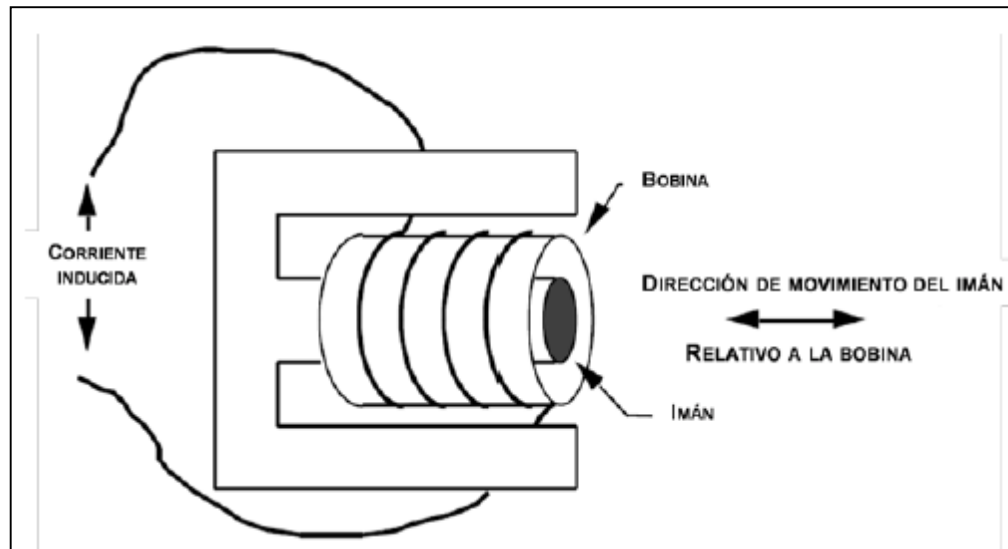


Figura 2.4 Geófono electrodinámico (Bernaola, Castilla 2013).

Los sismógrafos actuales llevan incorporado tres geófonos colocados perpendicularmente entre sí para captar la vibración producida en las direcciones del espacio. Así se puede recoger la respuesta en la dirección longitudinal, vertical y transversal además de la onda aérea por medio de un micrófono.

Los acelerómetros se basan en el cambio de ciertas propiedades físicas de algunas sustancias cuando son sometidas a esfuerzos de presión y se caracterizan por dar respuesta tanto a altas como a bajas frecuencias.

Así los acelerómetros piezoeléctricos consisten en un material de este tipo (cuarzo o ciertos materiales cerámicos), en el que el esfuerzo de presión producido por el movimiento brusco del terreno, genera una separación de cargas eléctricas, que se transforma en una corriente o diferencia de potencial proporcional a la aceleración del movimiento. Un circuito electrónico de integración adicional permite convertir los valores de

aceleración en valores de velocidad (velocímetros), y éstos, a su vez en valores de desplazamiento.

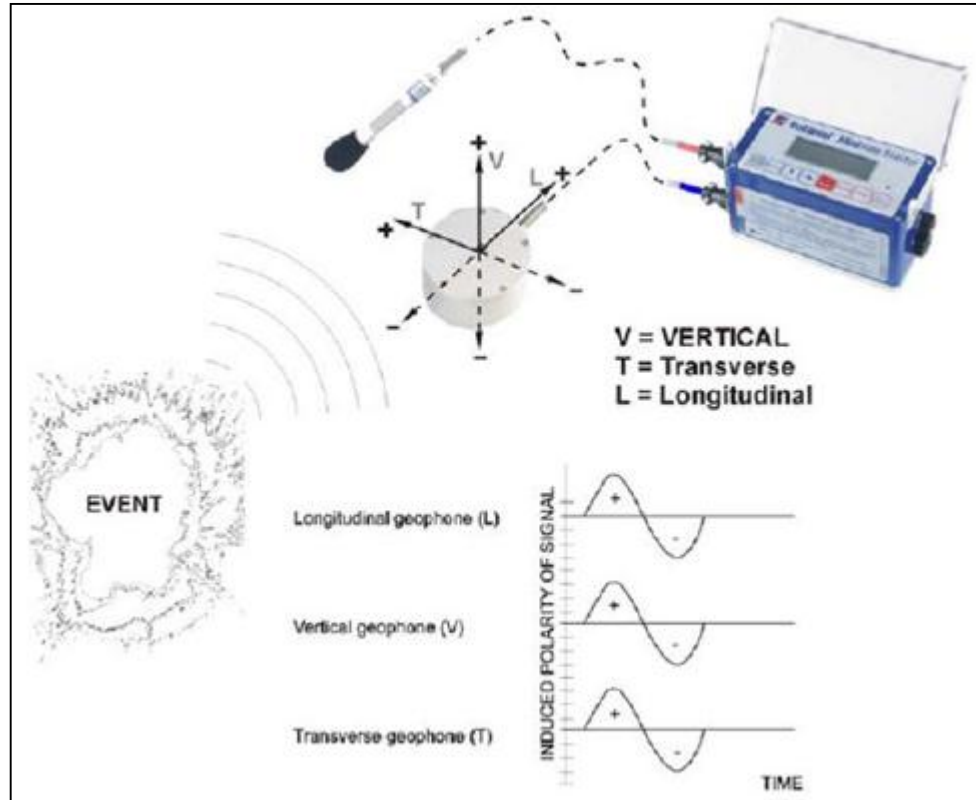


Figura 2.5 Geófono electrodinámico (Bernaola, Castilla 2013).

A diferencia de los acelerómetros piezoeléctricos, los acelerómetros piezoresistivos no generan corriente alguna, sino que, simplemente, por efecto de la presión, varía de forma proporcional la resistividad del elemento semiconductor que incorpora, normalmente sílice. De esta forma este material actúa como una resistencia variable. Generalmente un acelerómetro de este tipo está constituido por uno o dos pares de elementos semiconductores dispuestos de forma que el movimiento pone a un elemento en tensión y al otro en compresión, y así sus resistividades varían en sentido contrario, mejorando la sensibilidad del aparato. Esta variación de las resistencias se mide en un puente de Wheatstone. La principal ventaja de este tipo de acelerómetros es que dan una respuesta más amplificada tanto para bajas como para altas frecuencias.

La forma de fijación de estos aparatos al terreno dependerá lógicamente de la superficie de fijación y de la magnitud esperable del movimiento a medir. Si se dispone de una superficie plana y horizontal y no es probable

que la aceleración del movimiento vibratorio supere el valor de 0'2 g, siendo "g" la aceleración de la gravedad, el sensor puede estar simplemente apoyado sobre dicha superficie. En otras circunstancias, el sensor habrá de ser enterrado en el terreno o fijado al mismo mediante un sistema apropiado de adherencia o anclaje.

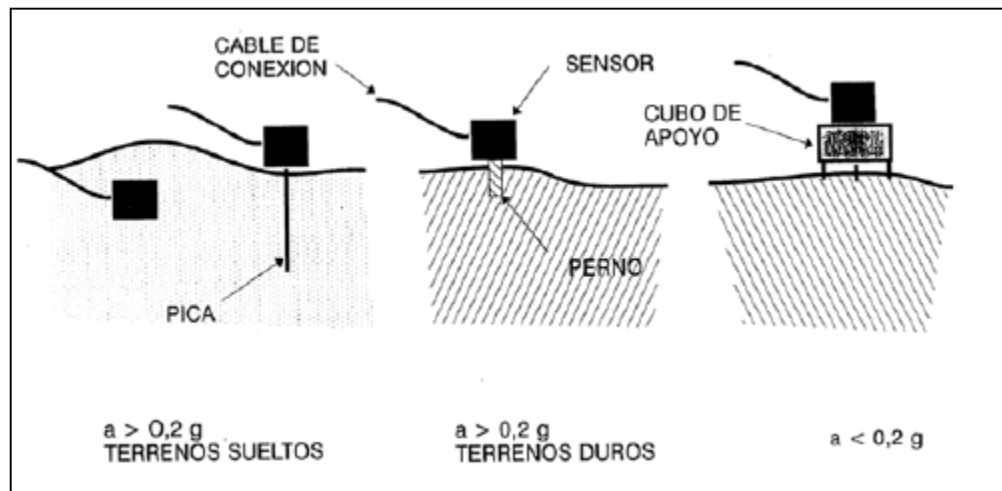


Figura 2.6 Ubicación de sensores enterrados en el terreno o fijados al mismo.

2.2.5. Uso de cámaras de aire en columnas explosivas.

Salas (2011) ha dado importantes alcances sobre el uso de cámaras de aire en voladura de rocas:

- ✓ Es un espacio de aire que se genera por medio del "taponamiento" del taladro con un accesorio especial, el cual se ubica convenientemente dentro del taladro de la voladura.
- ✓ Puede ocupar hasta un 40% por volumen del total de la columna explosiva.
- ✓ Puede ser ubicada en la parte superior, media o inferior de la carga explosiva dependiendo del propósito. Puede ubicarse también 02 cámaras de aire en un solo taladro.

2.2.5.1. Ubicación de cámaras de aire

La posición y el tamaño de las cámaras de aire cambian la fragmentación y el despliegue de la voladura.

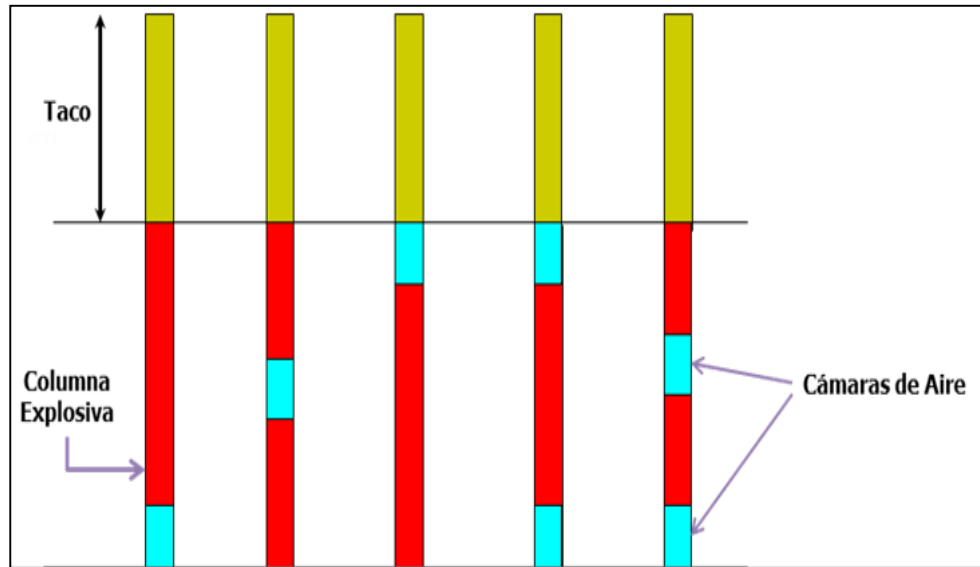


Figura 2.7 Ubicación de cámaras de aire en la columna explosiva Salas (2011).

2.2.5.2. Efecto de la cámara de aire ubicada en el centro de la carga vs carga continua.

Los efectos de las cámaras de aire son pulsos reducidos pero prolongados, los cuales originan incremento de fracturas:

Pulso no tan intenso como la producida por una columna sólida, pero la efectividad de las ondas de choque y tensión, se extienden sobre un mayor volumen de roca.

Diversos estudios concluyen que las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de las ondas de choque sobre el macizo rocoso, de 2 a 5 veces.

En la Figura 2.8 podemos observar una comparación entre los niveles de presión y los tiempos que duran los efectos de dicha presión sobre las rocas a volar. También se puede observar que la cámara de aire tiende a generar una rápida expansión de los gases que se encuentran en el medio de la columna explosiva. En la Figura 2.9 podemos observar el perfil y las diferentes geometrías que se forman después de la voladura.

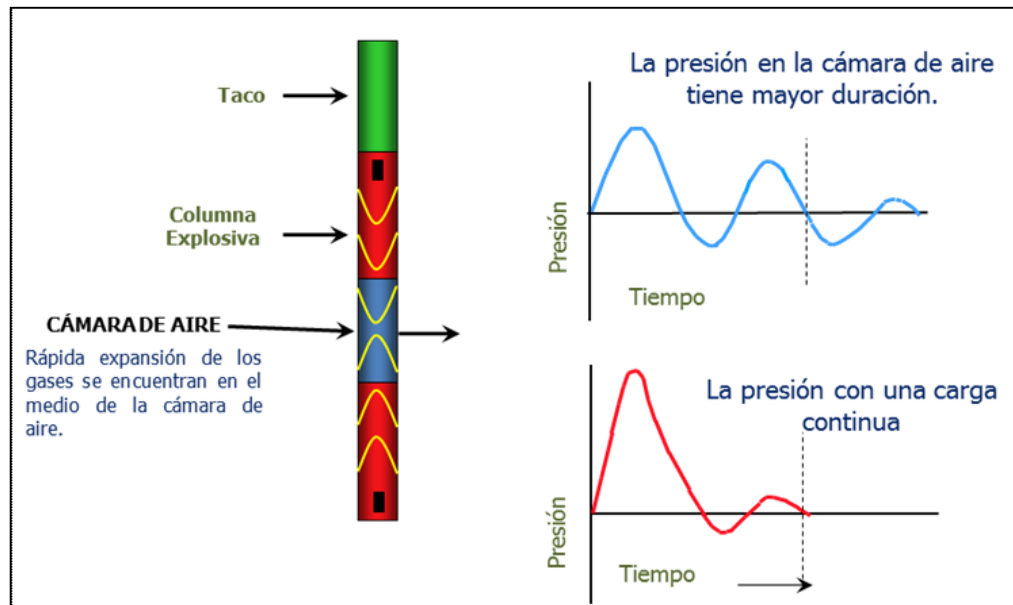


Figura 2.8 Presión de la cámara de aire tiene mayor duración, Salas (2011).

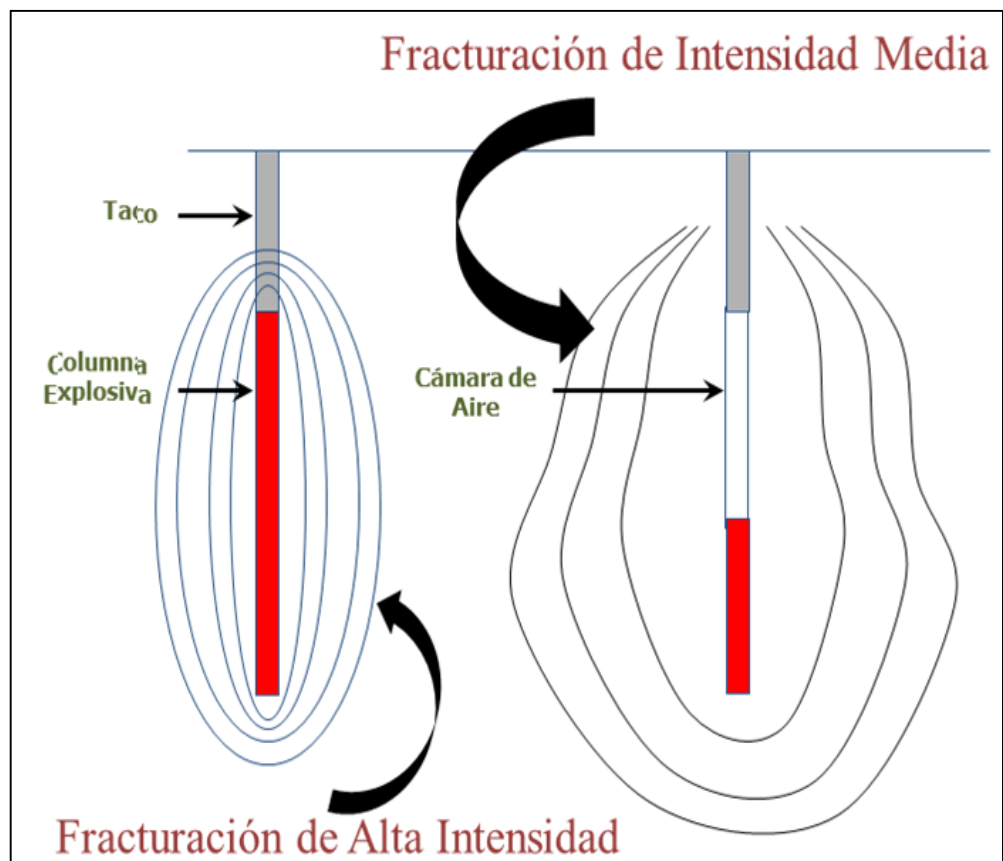


Figura 2.9 Perfil de diferentes geometrías y cargas, Salas (2011).

2.2.5.3. Principio de acción de las cámaras de aire.

- Las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de la onda de choque sobre el medio circundante, esto debido a una serie de pulsos causados por las reflexiones de las ondas de presión originadas inmediatamente después de la detonación de un taladro.
- Con el uso de las cámaras de aire, la tensión máxima aplicada sobre la roca que la rodea, es menor que la tensión extrema aplicada por el explosivo en columnas continuas.
- Reduciendo la presión inicial aplicada por la carga explosiva, pero incrementando la duración del pulso de presión. Esto, efectivamente reduce la energía utilizada para quebrantar la roca cercana al taladro, al mismo tiempo, incrementa la cantidad de energía transmitiéndola a mayor distancia dentro de la roca.
- En presencia de agua, los resultados del uso de cámaras de aire es óptimo, por cuanto el agua es un excelente conductor de las ondas de choque.

2.2.5.4. Etapas del proceso en cámara de aire de fondo.

El mecanismo de voladura presenta principalmente cuatro etapas:

En la **primera etapa** la onda de detonación se dirige hacia el fondo del taladro, creando una fractura que se expande en forma horizontal hacia los taladros vecinos.

En la **segunda etapa** se genera una especie de pre-corte que se forma simultáneamente con los taladros colindantes.

En la **tercera etapa** las ondas de choque son reflejadas al penetrar en un cambio de medio, formado por el plano de fractura al fondo de la voladura.

En la **cuarta etapa** las ondas de tensión y choque son reflejadas con mayor intensidad en una forma de ondas de tensión.

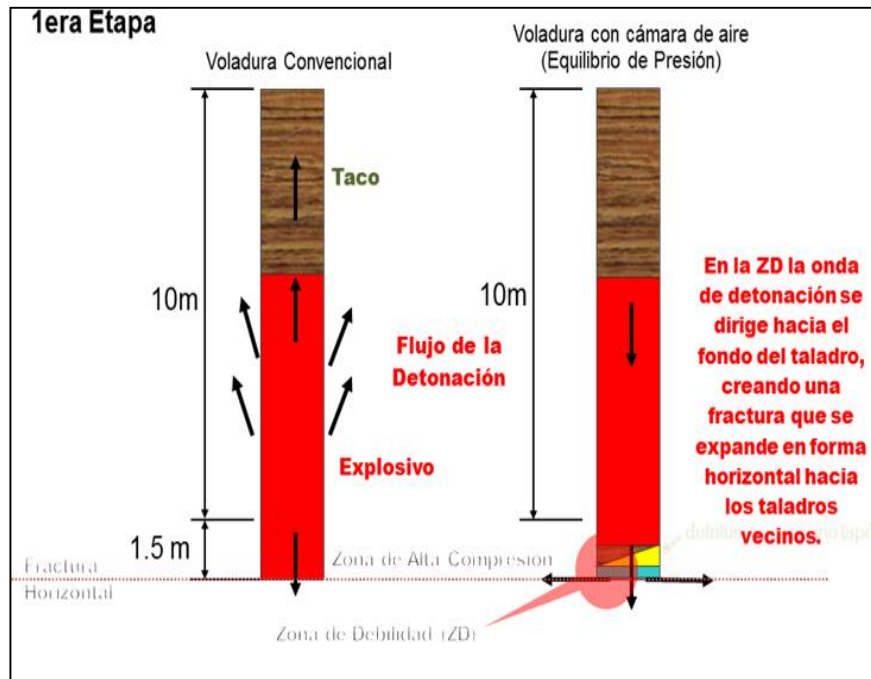


Figura 2.10 Primera etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).

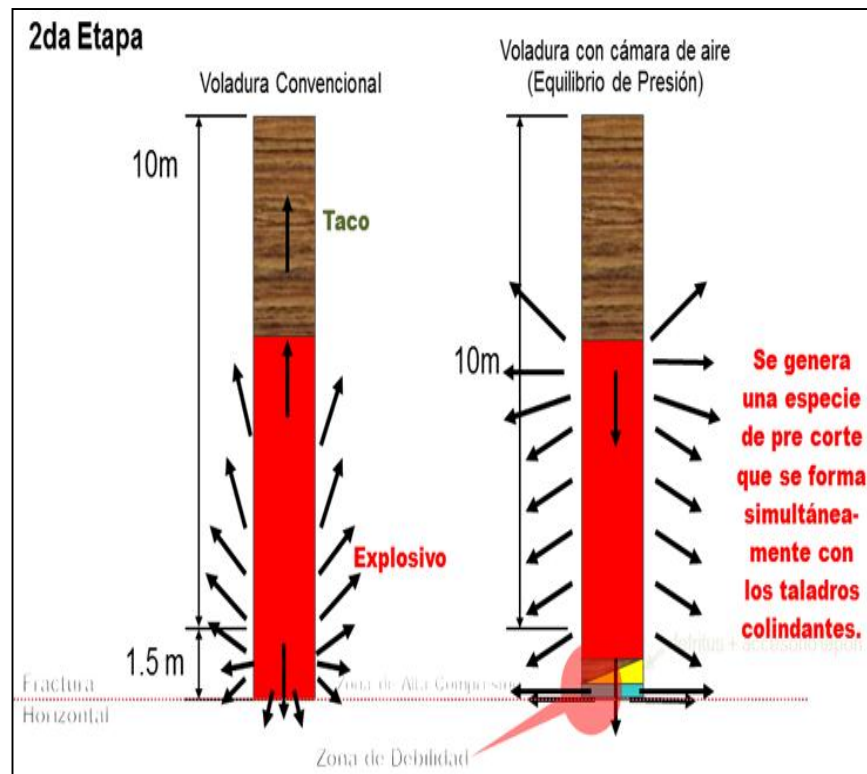


Figura 2.11 Perfil de diferentes geometrías y cargas Chiappetta (2004).

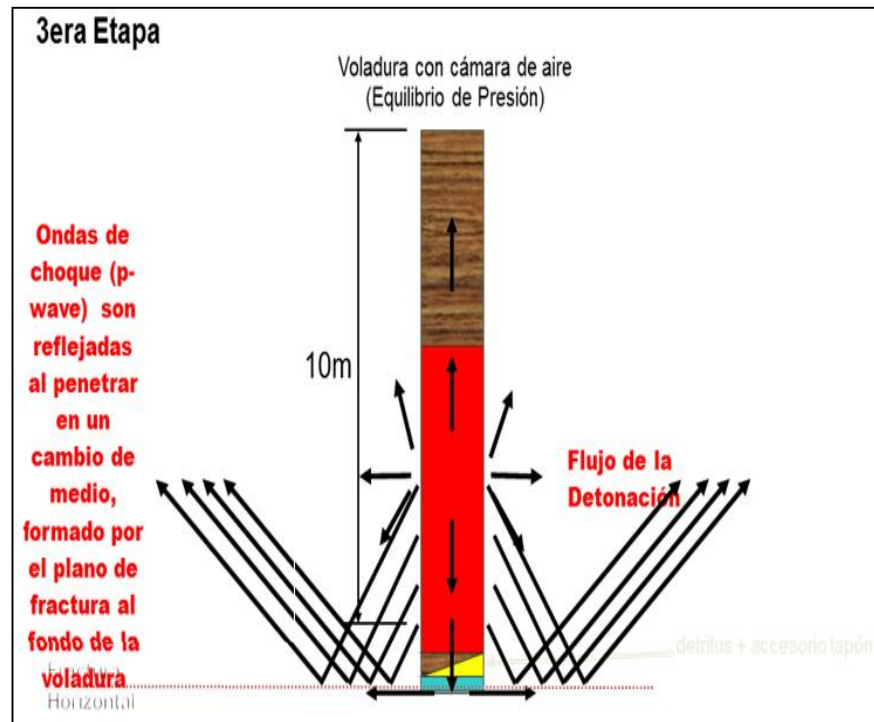


Figura 2.12 Tercera etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).

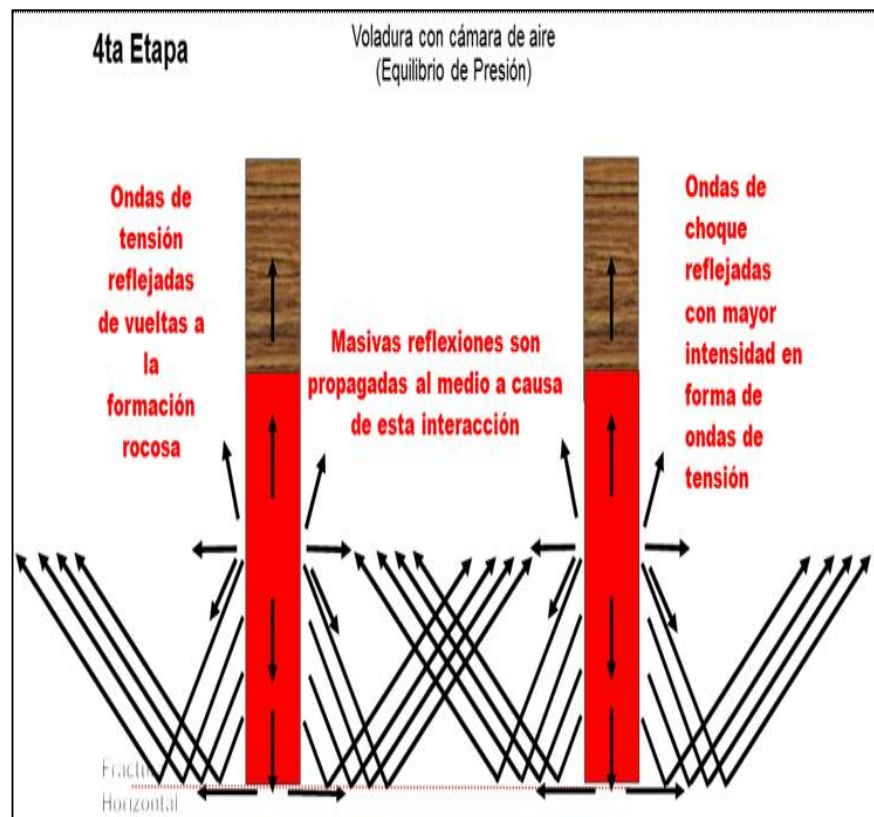


Figura 2.13 Cuarta etapa utilizando cámaras de aire Chiappetta (2004).

2.2.5.5. Experimentos utilizando cámaras de aire.

Chiappetta (2004), hizo experimentos en una mina en Pennsylvania para obtener una explicación técnica del proceso en un material no estratificado. Se efectuaron varias pruebas en los cuales se miden los mismos parámetros para poder evaluar y comparar, estos se pueden ver en la Figura 2.14.

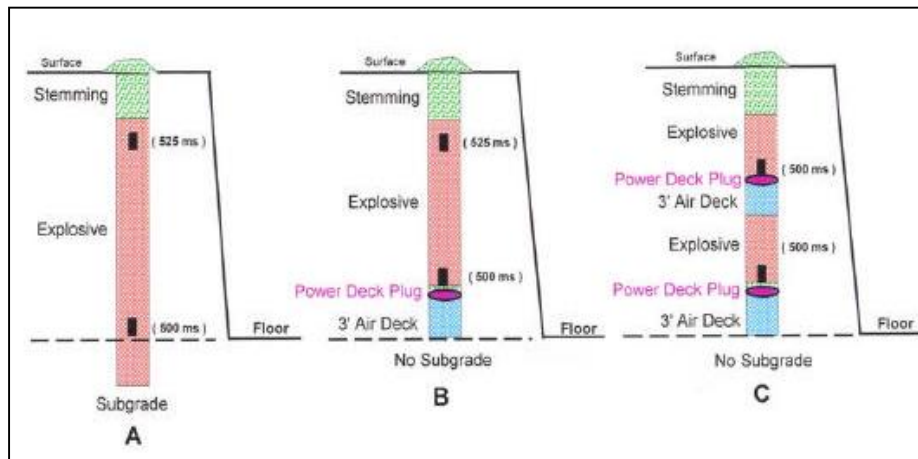


Figura 2.14 Esquema pruebas con cámaras de aire Chiappetta (2004).

Para medir la velocidad de detonación VOD se perfora desde la cara libre del banco un pozo de 3" inclinado para interceptar al pozo vertical y extraer por ahí el cable coaxial, el esquema se muestra en la Figura 2.15.

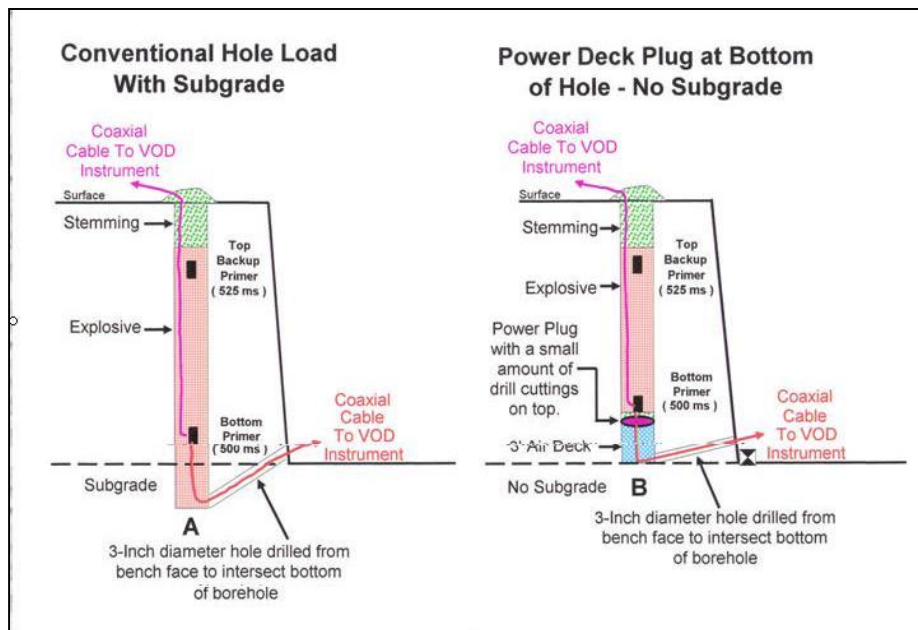


Figura 2.15 Esquema para medir VOD en cámara inferior Chiappetta (2004).

Todas las pruebas anteriores se realizan pozo a pozo, para evaluar: el daño al piso del piso de perforación, desplazamiento, sobre quiebre, fragmentación y vibración. Se puede ver en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Pruebas voladura completa Chiappetta (2004).

Los resultados obtenidos con el estudio realizado por se comprueba que las cámaras de aire inferior transforman la Voladura Tradicional compresiva en una nueva Técnica de Voladura Tensional.

Los principales resultados son:

- a) Aumento de la presión de taladro en la zona de la cámara.
- b) Se transforma la energía potencial del aire en Energía cinética.
- c) Se reduce el factor de carga
- d) Se disminuye las vibraciones
- e) Se reduce Fly Rock
- f) Se disminuye la Onda aérea.

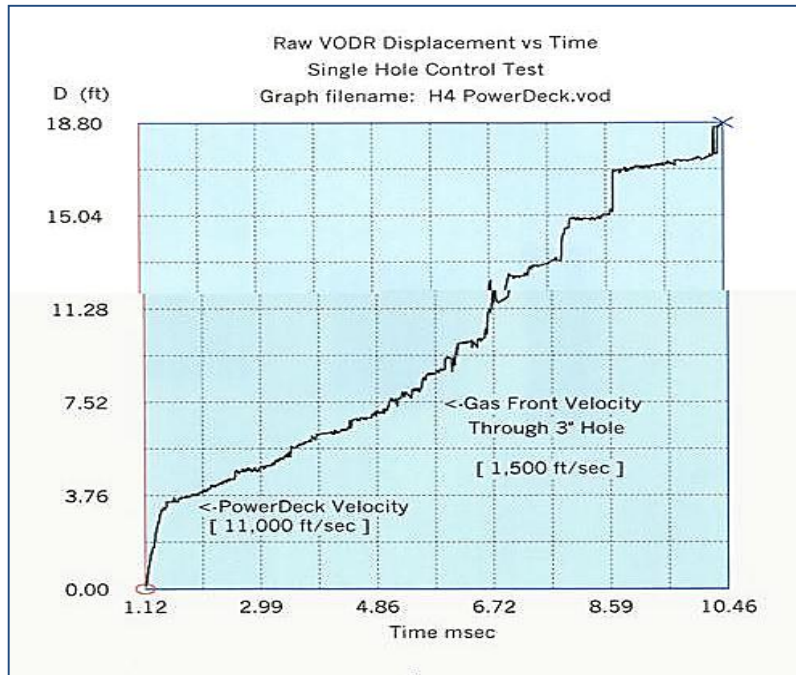


Figura 2.17 VOD en cámara de aire Chiappetta (2004).

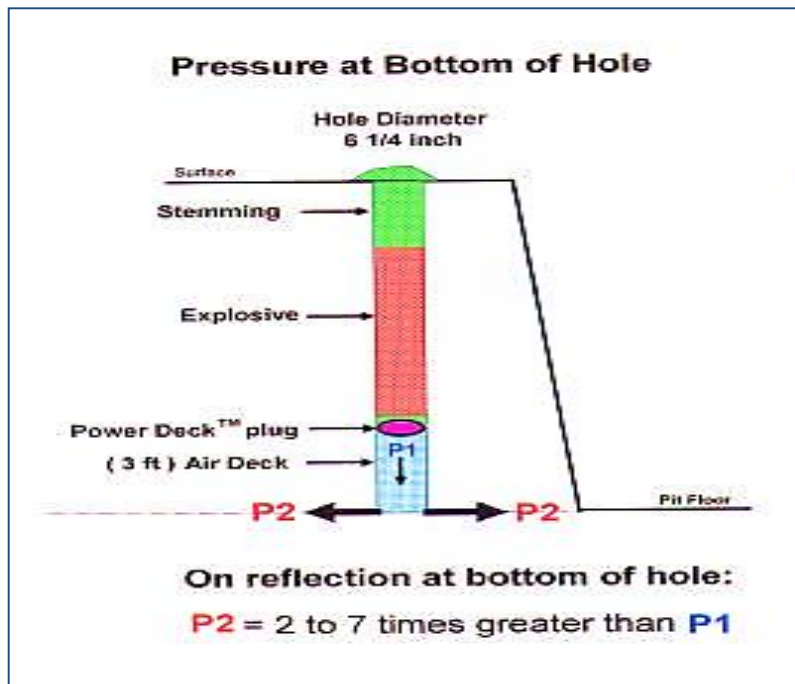


Figura 2.18 Aumento de Presión en cámara de aire Chiappetta (2004).

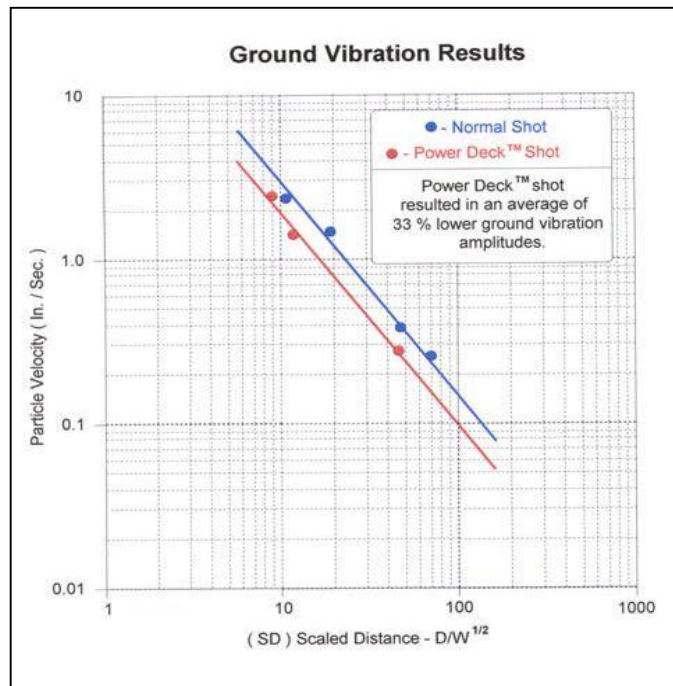


Figura 2.19. Vibración medida, Chiappetta (2004).

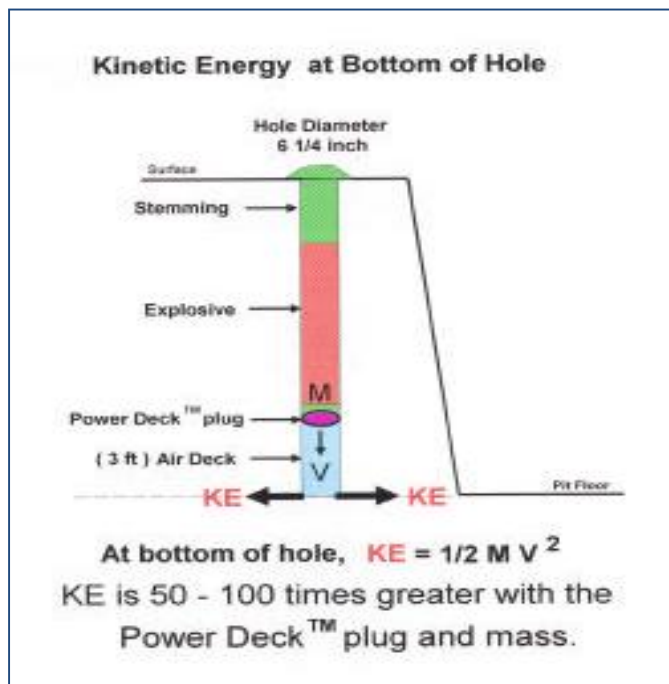


Figura 2.20 Transformación de Energía, Chiappetta (2004).

2.2.5.6. Beneficios diversos de las cámaras de aire según aplicación.

- Reducción de la columna explosiva y ahorro en el consumo de explosivos.
- Reducción de vibraciones por menor uso de carga explosiva.

- Eliminación o reducción de la sobre perforación, ahorro en perforación.
- Reducción de la eyección de tacos (fly rock).
- Fragmentación más homogénea (reducción de gruesos en la zona del taco)
- Reducción de finos.
- En algunas aplicaciones evita la contaminación del taco con el explosivo.
- Mejora de pisos.
- Reducción del largo del taco.

2.2.6. Aplicación industrial Taponex.

Según reporte de la Empresa EXSA (2015), el Taponex es un accesorio de plástico (Polietileno) con un diseño particular que permite crear cámaras de aire en un pozo de voladura, su exclusivo diseño permite ser instalado sin la necesidad de aire comprimido, su forma es auto soportante.

Esta nueva técnica utiliza un accesorio de diseño único, con una cámara de aire en el fondo del pozo y una masa predeterminada de detritus encima del tapón. A esta combinación se le denomina Power Deck™ en inglés ó Taponex para Latino América

2.2.6.1. Componentes

- El Elevador de Energía TAPONEX está compuesto por el recipiente polietileno, una cuerda polipropileno, y una vara de madera o plástico de 100 cm de longitud. La longitud de la cuerda dependerá de la longitud del taladro donde se instalará el TAPONEX.
- Para el caso de colocarlo en el fondo de los taladros el TAPONEX consiste de un recipiente plástico y una vara de madera o plástico de un (01) metro de longitud en la mayoría de los casos, ésta longitud dependerá de la longitud de la cámara de aire que se elija dejar en el fondo.

EXSA S.A empresa la cual se dedica a la optimización de Perforación y Voladura. Diseña, fabrica y comercializa el producto TAPONEX, sistema y accesorio patentado, a nivel mundial con oficinas en EEUU, Perú, Sudáfrica, Australia y Chile.

El sistema TAPONEX está especialmente diseñado para asegurar la creación y aplicación de ondas de Tensión en el medio rocoso circundante al taladro cargado con explosivos, dando como origen el método de Voladura de Tensión.

Su peculiar diseño producto de numerosas pruebas en campo y su construcción en plástico de alta resistencia, aseguran que el TAPONEX quede finalmente en la posición correcta.

Esto garantiza una instalación simple y rápida, principalmente en los siguientes casos: sobre el explosivo en la zona del Taco, como cámara de aire; y/o bajo el explosivo, para control del piso en una voladura.

Adicionalmente puede ser usado en taladros secos y saturados con agua, además de poder sostener columnas de explosivos o material inerte con absoluta seguridad, así como sellar los taladros evitando la eyección de los tacos, e impidiendo la contaminación de los explosivos con material del taco en taladros saturados con agua.

2.2.6.2. Funcionamiento Taponex

El Taponex permite mantener confinada unos milisegundos más, la energía generada por la columna explosiva para lograr fragmentar mejor la roca en la zona del taco. Sin embargo en forma indirecta se ha podido apreciar beneficios como son reducción de la fly rock, cantidad de material explosivo utilizado y vibración por voladuras. A continuación presentamos una tabla donde están las dimensiones estándar del Taponex.

Tabla 2.1 Dimensiones del taponex (EXSA-2015).

DIMENSIONES #		
Para diámetro de perforación	Unidades por embalaje	Peso embalaje (Kg)
9"	50	16
9 7/8" a 10 5/8"	50	16,5
12 1/4" (c/cuerda)	40	20
12 1/4" (c/vástago)	40	25

El Taponex presenta los siguientes efectos:

- Reacciona a la onda explosiva.
- Mecanismos friccionales dificultan eyección de rocas.
- La Cámara de Aire produce un cambio de medio que refleja las ondas de choque.
- La onda de devuelve hacia abajo disminuyendo presión sobre el taco.

Principales aplicaciones del TAPONEX se destacan las orientadas a:

- Reforzar el comportamiento del taco
- Formar cámaras de aire en pozos secos
- Formar cámaras de agua en pozos saturados de agua
- Reducir el Air Blast u Onda Expansiva de la voladura
- Evitar la contaminación de columnas de emulsión con el material del taco
- Reducir las vibraciones producidas por la voladura
- Control del piso y reducción o eliminación del sobre rompimiento, lo que permite disminuir el largo de la perforación
- Fragmentación más homogénea.
- La granulometría es más fina a pesar de la disminución del factor de carga.
- El sistema se ha utilizado en rocas de 80 MPa hasta 230 MPa.
- Se mantiene la misma malla, secuencia de salida y tipos de explosivo.

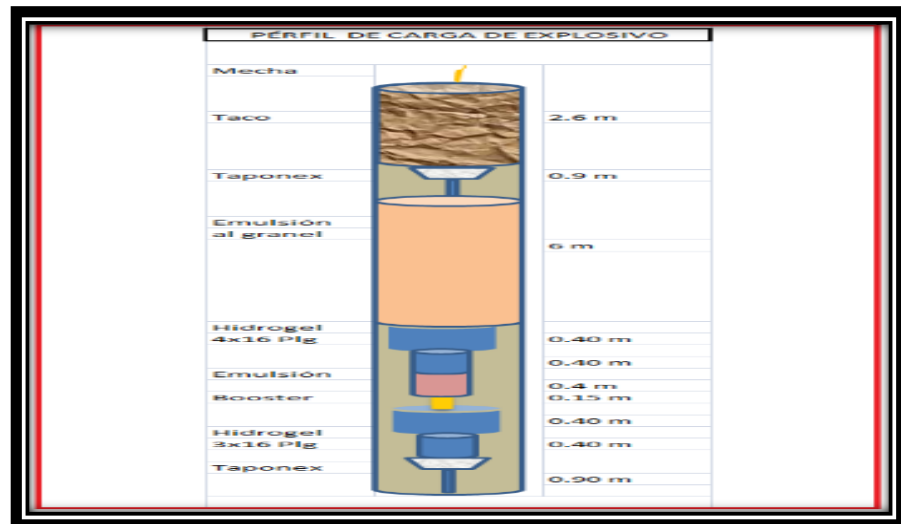


Figura 2.1 Esquema de una perforación con Taponex (EXSA 2015).

2.3. Definición de términos básicos.

Altura del banco: Es la distancia vertical entre dos niveles, o lo que es lo mismo, desde el pie del banco hasta la parte más alta o cabeza del mismo.

Amplitud: es el desplazamiento máximo de un punto del terreno desde su posición de reposo, en pulgadas o milímetros.

Banco: Es el modulo o escalón comprendido entre dos niveles que constituyen la rebanada que se explota de estéril o mineral, y que es objeto de excavación desde un punto del espacio hasta una posición final preestablecida. Puede pues ser comparado con un escalón en el terreno.

Burden ó distancia de menor resistencia: Es la distancia perpendicular entre dos hileras adyacentes de taladros. Se mide en ángulo recto con la inclinación del taladro. En taladros inclinados no será pues, igual a la distancia que puede ser medida sobre la superficie superior del banco.

Carga de columna “Lp” (Kg/M): Es la carga encima de la carga de fondo. Puede ser de menor potencia ya que la roca, en esta parte, no es tan resistente.

Carga de fondo “Lb” (Kg/M): Es la carga más potente que es requerida en el fondo del taladro, debido a que la roca es más resistente en esa parte.

Carga específica ó factor de potencia (Kg/M3): Es la cantidad de explosivo (en kg) usada por m³ de roca volada.

Diámetro del taladro (milímetros ó pulgadas): Es el diámetro del agujero que se va a perforar, y que tiene forma de cilindro alargado.

Espaciamiento: Es la distancia entre dos taladros, uno junto a otro en la misma hilera de taladros.

Open Pit: (término inglés, castellanizado) se denomina una explotación a cielo o tajo abierto de un yacimiento.

Perforación específica ó factor de perforación (m/m³): Es la expresión usada para el número de metros que deben ser perforados por metro cúbico de roca volada.

Sobreperforación: Es el exceso de longitud de un taladro situado bajo el fondo teórico del banco.

Taco: Es el material estéril usado en la parte superior del taladro y consiste de arena seca, detrito o similares. El propósito del atacado es, por ejemplo, evitar que al momento de la detonación los gases se dirijan hacia arriba arrancando partículas de roca alrededor de la boca del taladro (Fly rock).

Velocidad pico partícula (VPP): Para la medición de las vibraciones se emplea el criterio de la Velocidad Pico de Partículas (VPP), que es el mejor parámetro que correlaciona los daños en general con la intensidad de la vibración en pulg/s o en mm/s.

Vibración: Las voladuras generan vibraciones del terreno que pueden tener diferentes efectos sobre las estructuras de la masa rocosa (discontinuidades como fallas, diaclasas, juntas, contactos), pudiendo ocasionar deslizamientos, causando en consecuencia, efectos graves, como por ejemplo el cierre de acceso hacia otras zonas de la mina y/o afectar equipos o personal. Esto en algunos casos puede llevar a una paralización de las operaciones.

Las vibraciones se caracterizan por ser generadas por dos tipos de ondas: Ondas de superficie, y de Cuerpo. Las ondas de superficie se caracterizan por tener grandes amplitudes, bajas frecuencias y bajas velocidades de propagación. En muchos casos, estas ondas contienen significativamente más energía que las ondas de cuerpo, (no obstante se generan cuando las ondas de cuerpo llegan a una superficie libre) decayendo además más lentamente con la distancia.

Las ondas de superficie son las que causan daños a estructuras en general, y a los bancos en minas a cielo abierto.; es por ello que para evaluar los daños por efecto de las vibraciones del terreno, son estas las ondas que se miden y se evalúan.

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

Con el uso de cámaras de aire en la columna explosiva se podrá reducir y controlar las vibraciones producidas por la voladura en tajo abierto.

3.2. Variables.

3.1 Variable Independiente

Cámaras de aire en la columna explosiva.

3.2 Variable Dependiente

Vibraciones producto de la voladura.

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 3.1 Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Cámaras de aire en la columna explosiva	Es un espacio de aire que se genera por medio del “taponamiento” del taladro con un accesorio especial, el cual se ubica convenientemente dentro de la columna explosiva.	Ubicación	Parte superior medio e inferior
		Puede ocupar hasta un 40% por volumen del total de la columna explosiva.	%
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Vibraciones producto de la voladura	Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio).	Velocidad de partícula (VPP): es la velocidad a la que se desplaza el punto.	Pulgadas/s mm/s

CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Tipo de investigación.

La Investigación es experimental, con diseño pre-experimental. Porque se realizará pruebas experimentales en campo, variando la variable independiente que son la ubicación de las cámaras de aire y evaluaremos las distintas respuestas con énfasis en las vibraciones.

4.2. Material.

La investigación también es cuasi-experimental puesto que se analiza comparativamente el efecto de las vibraciones de una voladura convencional con otra que utiliza cámaras de aire.

4.2.1. Unidad de estudio.

Un taladro de producción de la Minera Corporación del Centro.

4.2.2. Población.

Taladros de producción de la Minera Corporación del Centro.

4.2.3. Muestra.

Taladros de producción de la minera Corporación del Centro en los bancos 3420, 3428, 3444 y 3452.

4.3. Métodos.

4.3.1. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos:

Los métodos para obtener la información y la metodología usada para elaborar el presenta trabajo son:

- Información secundaria: obtenida de diversas fuentes, entre las cuales destacamos tesis para la obtención de título de diferentes universidades, revistas especializadas, anuarios de empresas, entre otros, la cual ha sido aplicada a la presente tesis.
- Informes preliminares elaborados por la empresa EXSA y otros informes de estudios previos de Corporación Minera del Centro.

- Las técnicas usadas en la investigación se basaran en la medición de la vibración (proporcionada por el sismógrafo) de voladura a tajo abierto cuando se usan cámaras de aire y por el método convencional.
- Se debe realizar prueba experimentales y obtener datos que permitan la comparación cuantitativa y cualitativa de los métodos usados, podremos alcanzar el mejoramiento en los aspectos técnicos, operacionales, ambientales y económicos.

4.3.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se utilizó diferentes programas o softwares de la minería, para procesar y/o analizar los datos:

- Hojas de cálculo Excel
- Bases de datos del área de voladura.
- Graficadores: Autocad y Excel.
- Sismógrafos Minimate Plus (equipo para medir la vibración)
- WipFrag (Software Medición de Fragmentación voladuras)
- JK SimBlast (Software para la simulación, análisis, gestión y evaluación de voladuras)

4.3.3. Procedimiento experimental.

- Se realizó el mapeo geo mecánico del macizo rocoso del banco a estudiar.
- Se realizó la perforación de los bancos, teniendo en cuenta los respectivos parámetros.
- Se colocó las cámaras de aire al centro del taladro, luego la columna explosiva con su respectivo taco.
- Se instaló sismógrafos y equipos adecuados para medir las vibraciones.
- Se midió la vibración con los sismógrafos con y sin cámara de aire.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO

5.1. Ubicación:

La empresa minera aurífera Corporación del Centro SAC, se encuentra ubicada a 15 Km al SE del distrito de Huamachuco, a unos 180 Km de la ciudad de Trujillo, localizado geográficamente en los Andes Occidentales del Perú. Ubicada Políticamente en el Distrito de Huamachuco, Provincia de Sánchez Carrión, Departamento de La Libertad al Norte del territorio peruano.

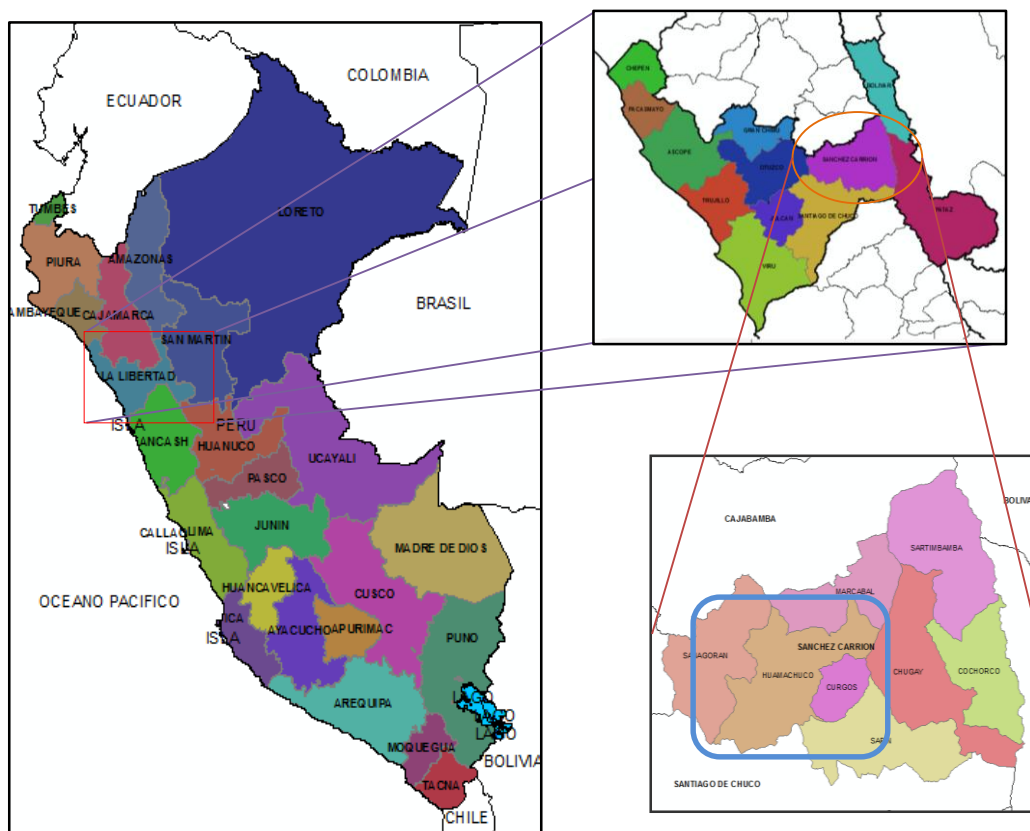


Figura 5.1 Plano de ubicación del proyecto (Fuente INGEMET).

5.1.1. Concesiones mineras de Corporación del centro

La empresa minera Corporación del Centro, se encuentra ubicado sobre las áreas que cubren las concesiones mineras “Rosa Amparo A.C. 3”, “Rosa Amparo A.C. 6” y “Rosa Amparo A.C. 7” (tabla 5.1).

Tabla 5.1 Concesiones mineras de Corporación del centro.

Concesión	Vértice	Coordenadas UTM PSAD 56		Coordenadas UTM WGS 84	
		Este	Norte	Este	Norte
ROSA AMPARO A.C.3	1	831012.31	9136404.18	830771.18	9136022.57
	2	830522.28	9134465.15	830281.15	9134083.56
	3	828001.53	9135102.19	827760.43	9134720.61
	4	828491.56	9137041.23	828250.46	9136659.62
ROSA AMPARO A.C.6	1	831467.36	9134226.28	831226.21	9133844.69
	2	830763.02	9131319.27	830521.87	9130937.72
	3	828332.38	9131908.19	828091.26	9131526.64
	4	828336.05	9131923.34	828094.93	9131541.79
	5	828352.34	9131919.22	828111.22	9131537.67
	6	829083.93	9134814.09	828842.81	9134432.51
	7	830479.07	9134476.07	830237.94	9134094.48
ROSA AMPARO A.C.7	1	834419.74	9133480.18	834178.56	9133098.59
	2	833880.70	9131347.23	833639.52	9130965.67
	3	830972.15	9132082.29	830731.00	9131700.73
	4	831511.18	9134215.22	831270.03	9133833.63

Fuente: INGEMMET-GEOCATMIN

5.1.2. Vías de acceso a la empresa minera Corporación del centro.

5.1.2.1. Vía terrestre

Para acceder a la empresa minera Corporación del centro SAC., se realiza vía terrestre o vía aérea desde la Ciudad de Lima hasta la Ciudad de Trujillo, y desde ahí por carretera hasta la mina, a continuación se detalla las alternativas de vías de acceso:

Alternativa 1: Lima-Trujillo- Huamachuco- Corporación del centro SAC

Alternativa 2: Lima-Trujillo-Santiago de Chuco-Angasmarca - Corporación del centro SAC

Alternativa 3: Lima-Chimbote-Mollepata - Corporación del centro SAC

Alternativa 4: Lima-Cajamarca-Cajabamba - Corporación del centro SAC

Para acceder a la empresa minera Corporación del centro SAC., se recomienda la primera alternativa, el cual se dirige desde la Ciudad de Lima hasta la Ciudad de Trujillo, desde ahí es mediante la carretera departamental 10 A que conduce a Otuzco (vía asfaltada hasta el Kilómetro 69 y desde ahí en adelante afirmada de tipo vecinal). Antes de llegar a esta ciudad, existe un ramal hacia la derecha que conduce a la localidad de Quiruvilca, finalmente se dirige hasta la ciudad de Huamachuco. De la ciudad de Huamachuco se dirige hacia el este mediante una carretera afirmada que conduce a Corporación del centro SAC. El recorrido desde Trujillo toma aproximadamente 4 horas en camioneta 4x4. Además como accesibilidad Alternativa 4 a la empresa minera Corporación del centro SAC, es realizar vía aérea desde la Ciudad de Lima hasta la Ciudad de Cajamarca, y desde ahí mediante la carretera departamental 003 N que conduce hasta la ciudad de Cajabamba recorriendo 116.36 Km. De ahí se conduce hasta la Ciudad de Huamachuco recorriendo 47.49 Km.

Tabla 5.2 Acceso vía terrestre a Corporación del Centro

Desde	Hacia	Tipo de Accesibilidad	Distancia Km	Tiempo Estimado (Horas/Minutos)
Lima	Trujillo	Vía Asfaltada	545.00	10h y 00 m
Trujillo	Dv. Otuzco	Vía Asfaltada	70.00	01h y 10 m
Dv. Otuzco	Agallpampa	Vía Afirmada	12.00	25 m
Agallpampa	Quiruvilca	Vía Afirmada	36.00	01h y 00 m
		Vía Asfaltada	3.5.00	05 m
Quiruvilca	Huamachuco	Vía Afirmada	3.50	05 m
		Vía Afirmada	46.00	01m y 20 h
Huamachuco	El Toro	Vía Afirmada	8.35	15 m
TOTAL				14 h y 20 m

Fuente: Elaboración ACOMISA

5.1.2.2. Vía Aérea

En cuanto al transporte aéreo, Huamachuco cuenta con un aeródromo en el que aterrizan avionetas de poco fuselaje. Las empresas que brindan servicios lo hacen en un tiempo de vuelo de 40 minutos aproximados, desde la ciudad de Trujillo hasta la ciudad de Huamachuco.

5.1.3. Comunidades del área de influencia a la unidad minera

La información de la distancia a las diferentes comunidades al área de influencia a la Empresa Minera Corporación del Centro SAC.

Tabla 5.3 Distancia de la unidad minera a Comunidades Cercanas.

Centro Poblado	Categoría	Tipo de Vía de Acceso	Distancia al Área del proyecto
CCPP Shiracmaca	Centro Poblado	Camino Carrozable	2.0 km
CCPP Coigobamba	Centro Poblado	Camino Herradura	1.3 km
Caserío El Toro	Caserío	Camino Herradura	1.1 km
Anexo Santa Cruz	Anexo	Trocha Carrozable	0.8 km
Caserío Paranshique	Caserío	Camino de Herradura	0.7 km
Huamachuco	Capital Distrital	Trocha Carrozable	8.0 km

Fuente: Elaboración ACOMISA

5.2. Información meteorológica

Se cuenta con información meteorológica disponible en estaciones administradas por el SENAMHI.

Tabla 5.4 Estaciones Meteorológicas en comunidades cercanas.

Estación Meteorológica	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Tipo	Ubicación
	Este	Norte			
Huamachuco/000374/DRE-03	825371	9134830	3290	Climatológica Ordinaria	Dpto.: La Libertad Prov.: Sánchez Carrión Dist.: Huamachuco
Cajabamba/000373/DRE-03	825524	9156968	2612	Climatológica Ordinaria	Dpto.: Cajamarca Prov.: Cajabamba Dist.: Cajabamba
Huangagocha/153327/DRE-03	823440	9121929	3780	Pluviométrica	Dpto.: La Libertad Prov.: Santiago de Chuco Dist.: Cachimán

Fuente: SENAMHI

5.2.1. Temperatura

La Estación Meteorológica Huamachuco, ha registrado datos históricos de temperaturas medias mensuales, correspondientes al periodo de 1997 a 2011. Según se observa en la Tabla siguiente las temperaturas fluctúan entre 10°C y 13°C.

Tabla 5.5 Temperatura media mensual de la estación Huamachuco

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997	11.7	12.4	12.5	12.7	13	11.8	12.3	12.6	13.3	13.3	12.9	13.1
1998	13.6	13.7	13.4	13.8	13.2	12.4	12.2	12.7	12.8	13.2	12.2	12
1999	11.6	11.1	11.7	12.6	12	11.6	11.4	11.9	11.8	12.4	12.3	12
2000	11.7	10.9	11.4	12	12.4	11.9	11.5	12.1	11.9	13.1	12	11.9
2001	11.1	11.8	11.4	12.6	12.2	12	12.2	12.7	13	13.8	12.6	13.1
2002	12.7	12.6	12.5	12.3	13.1	12.3	12.4	12.8	13.8	12.8	12.6	13.1
2003	13.4	13	12.4	13.1	13.2	12.3	12.2	12.9	13.2	13.4	13	12.6
2004	12.5	12.8	13.6	12.6	13.2	12.1	12.1	12.3	12.8	12.9	12.6	12.7
2005	12.6	13.8	12.1	13.4	12.4	12.9	12.4	12.8	13.7	12.4	12.9	11.9
2006	12.7	12.7	12.1	12.5	12.6	12.3	12.3	13	13.1	13	12.4	12.3
2007	13.7	12.5	12.4	12.6	12.8	12.4	12.4	12.4	12.8	12.3	12.5	12.2
2008	12.1	11.6	11	11.7	11.9	11.5	11.5	12.4	12.5	12.2	12.5	12.1
2009	11.9	11.9	11.8	12.6	12.2	12.2	12.2	13.1	13.6	13.1	12.6	12.7
2010	13.7	13.7	13.5	13.7	12.9	12.6	12.6	12.5	13	12.7	12.2	11.6
2011	11.6	11.5	11	12.1	12.4	12.5	12.5	13	S/D	S/D	S/D	S/D
TOTAL	186.6	186	182.8	190.3	189.5	182.8	182.2	189.2	181.3	180.6	175.3	173.3
Máximo	13.7	13.8	13.6	13.8	13.2	12.9	12.6	13.1	13.8	13.8	13	13.1
Promedio	12.44	12.4	12.19	12.69	12.63	12.19	12.15	12.61	12.95	12.9	12.52	12.38
Mínimo	11.1	10.9	11	11.7	11.9	11.5	11.4	11.9	11.8	12.2	12	11.6

Fuente: SENAMHI-Oficina de Estadística

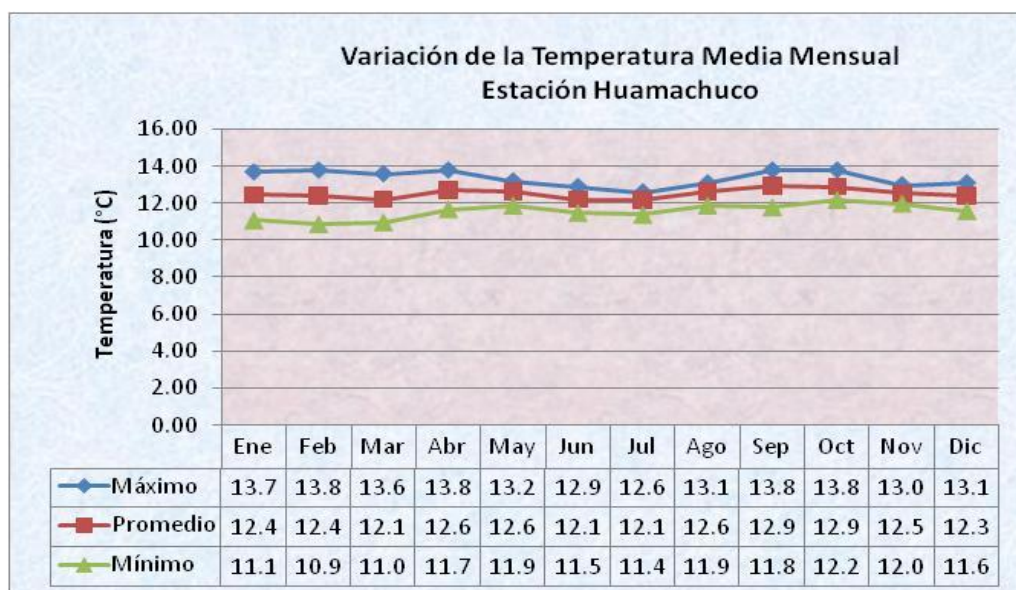


Figura 5.2 Estaciones meteorológicas más cercanas (Fuente: Elaborado por ACOMISA).

De acuerdo al gráfico mostrado se puede apreciar que la variación de la temperatura no es demasiado (10-13°C) y estos valores se mantienen en todo el año no se aprecia cambios considerables en el registro de la temperatura.

5.3. Geomorfología.

Las características geomorfológicas que se observan en el área de estudio son el resultado de los procesos tectónicos y plutónicos, sobre impuesto por los procesos de la geodinámica interna y externa, que han modelado el rasgo morfo estructural de la región.

Valles

En los alrededores de Huamachuco se han desarrollado valles de origen glaciar, de sección transversal en “U”, que actualmente están originando valles de origen fluvial cuya sección transversal en “V” se observa en el Río Chamish y en el río Shiracmaca. Sobre la base de los rasgos geomorfológicos descritos se ha determinado que el drenaje conformado por las siguientes quebradas estarían relacionados directamente con el yacimiento: Qda. Coigobamba y Qda. Suro.

Superficies de Erosión

Actualmente, las superficies superiores del área de estudio están siendo erosionadas por la meteorización y la acción eólica. Estas superficies de mayor altitud se caracterizan por presentar un relieve suave con restos de pequeños valles maduros.

En la actualidad el levantamiento de los Andes continúa y los agentes erosivos están en plena actividad, destruyendo y modificando la topografía.

En el área del Proyecto se presentan alineamiento de colinas que van desde empinada hasta moderadamente inclinada de rumbo NNO-SSE, en cuyos flancos se ubican el Pad lixiviación y pozas proyectadas. Las cumbres están conformadas por una intercalación de areniscas, cuarcitas, y lutitas, que en conjunto siguen el sistema de estratificación NO-SE.

Presencia de Laderas Moderadas a Fuerte Pendiente, esta morfología se observa en el flanco oriental del área de estudio, donde se ubica el Pad y pozas proyectadas. Está constituida por laderas uniformes, suavemente disectadas, labradas en areniscas y lutitas muy alteradas y fracturadas, y cubiertas en parte por depósitos coluviales y aluviales.

Además se observan laderas disectadas en el flanco oeste del área de interés donde se ha proyectado el botadero de desmontes. Es disectada por pequeños cursos de agua estacional, que configuran quebradas incipientes a su paso por suelos residuales arcillosos, coluviales y aluviales, fácilmente erosionables en contraste con los afloramientos de cuarcitas y areniscas más resistentes. Ver Plano CDC-3-05. Plano Geomorfología.

Geomorfología.

En el área de estudio, los grandes paisajes están definidos por las formas y características del relieve, litología y procesos de formación. Las formas de la tierra varían desde planicies plano-onduladas (2-4% de gradiente) hasta montañas muy a extremadamente empinadas (>75% de gradiente).

El método utilizado es el Análisis Fisiográfico, que consiste en la separación y delimitación de unidades naturales, basado en rasgos del paisaje identificables en las imágenes vistas preliminarmente en el Google Earth, estas a su vez contrastadas en campo para su descripción de unidades fisiográficas. Estas unidades han sido delimitadas y reajustadas con las unidades ecológicas y geológica–litológicas delimitadas previamente, por lo que se ha obtenido como producto un Mapa Fisiográfico a escala 1:25 000, con sus respectivas geo-formas y fases por pendiente.

Tabla 5.6 Unidades fisiográficas de la unidad minera

Descripción	Símbolo	Extensión (Ha)	%
Colina Empinada	C-e	177.10	10.37
Colina Fuertemente inclinada	C-fi	576.37	33.73
Colina Ligeramente Inclinada	C-li	300.73	17.60
Colina Moderadamente Inclinada	C-mi	445.71	26.09
Fondo de Valle	F-v	208.65	12.21

Fuente: Elaborado por ACOMISA

5.4. Geología de la zona:

5.4.1. Geología regional

La morfología regional se caracteriza por una superficie fuertemente disectada, con valles fluviales de flancos suaves a encañonados, cerros de cimas angulosas, y extensos conos aluviales.

La estratigrafía está representada de la unidad más antigua a la más reciente, por una potente secuencia de lutitas carbonosas y areniscas, asignadas a la Formación Chicama del Jurásico.

Le siguen una alternancia de cuarcitas y lutitas, correspondientes a las formaciones Chimú, Santa-Carhuaz, y Farrat, del Cretácico inferior; y luego lutitas y calizas de las formaciones Inca, Chuléc y Pariatambo, del Cretácico medio a superior. Sobre yaciendo se tienen depósitos coluviales y aluviales.

Las secuencias Jurasico-Cretácicas han sido afectadas por intrusivos terciarios dacíticos y andesíticos-dioríticos, relacionados probablemente a la mineralización del yacimiento.

Los principales rasgos estructurales están constituidos por fallas y pliegues de orientación NO-SE y extensión kilométrica que afectan al basamento Jurasico-Cretácico (INGEMMET, 1980); así como fallas más locales de rumbo predominante E-O.

Formaciones del Cuaternario

➤ **Depósitos Aluviales**; bajo este denominativo, se extiende una serie de conos y terrazas altas, formados por conglomerados calcáreos de consolidación variable a la franja oeste del río Cajamarca.

➤ **Pleistoceno**

Depósitos Lagunares y Glaciares, constituida por el material localizado en lo que fue áreas lagunares.

- **Formaciones de Terciario**

Formación Condebamba, está compuesta por niveles de terrazas muy altas, frecuentes en San Marcos y zonas aledañas al sur de la Región Cajamarca, se encuentra también en un pequeño afloramiento al Norte de Matara y consta de conglomerados y arenas de diversas composiciones.

Formaciones del Cretáceo

➤ Cretáceo Superior

Formación Inca-Chulec-Pariatambo, se encuentra dentro de toda el área estudiada bordeada generalmente la formación Farrat, litológicamente consiste de lutitas calcáreas nodulares de color gris claro, calizas oscuras, calizas arenosas de tono pardusco y margas gris oscuras a veces nodulares que contienen fósiles en abundancia. Por intemperismo, el conjunto adopta una coloración gris amarillenta claramente perceptible a la distancia.

➤ Cretáceo Inferior

Formación Farrat, constituida de areniscas y cuarcitas blanquecinas de grano fino a media con un aspecto sacaroideo. Se presentan en bancos de grosor mediano a delgado, teniendo en algunos lugares areniscas conglomeradica de granos hasta 1 centímetro sub redondeado. Sin embargo las cuarcitas son predominantemente sub horizontales, presentando una estratificación sesgada y marcas de oleaje. A veces se le puede confundir con la Formación Chimú cuando se le encuentra aislada.

Formación Carhuaz, serie sedimentaria del Valanginiano superior a Aptiano (Cretáceo inferior), consta de lutitas continentales intercaladas con areniscas de estratificación cruzada. Tiene una potencia de 1,300 m. y aflora en el valle del Santa, contiene además dos estratos de yeso y uno de caliza.

Formación Santa, Serie sedimentaria del Valanginiano superior (Cretáceo inferior), consta de calizas oscuras, calizas dolomíticas y algunas intercalaciones de lutitas. Aflora en el Callejón de Huaylas, entre Carhuás y Pariahuanca. Su potencia es de 284 metros.

Formación Chimú, es una serie sedimentaria del Valanginiano inferior, consta de areniscas cuarzosas, estratos gruesos y macizos contiene lutitas carbonáceas y mantos de carbón. Tiene una potencia de 685 m. y aflora en los Baños Chimú (parte alta del valle de Chicama) y se extiende desde el valle de Jequetepeque hasta Huaraz.

Tabla 5.7 Unidades estratigráficas

Era	Sistema	Periodo	Unidad litoestratigrafica	leyenda	Rocas intrusivas	
Cenozoico	Cuaternario	Reciente	Depósitos aluviales	<i>Q-al</i>		
	Terciario	Inferior	Volcánicos Calipuy	<i>Kti-va</i>	Ti - da	
Mesozoico	Cretácico	superior	Formación Celendin	<i>Ks - c</i>		
			Formación Jumasha	<i>Ks - j</i>		
			Formación Pariatambo	<i>Ki - pt</i>		
			Formación Chulec	<i>Ki - chu</i>		
		Goyllarisquiza	Inferior	Formación Pariahuanca	<i>Ki - ph</i>	
				Formación Farrat	<i>Ki - f</i>	
				Formación Carhuaz	<i>Ki - ca</i>	
				Formación Santa	<i>Ki - sa</i>	
				Formación chimu	<i>Ki - him</i>	
				Formación Oyon	<i>Ki - o</i>	

Fuente: Cartas Geológicas-INGEMMET

5.4.2. Geología local:

Se aprecian afloramientos de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, las cuales muy probablemente son las que hayan traído la mineralización determinada por la presencia de varias vetas o filones de sulfuros de plomo, plata y zinc. Tanto las rocas volcánicas como las sedimentarias se encuentran alteradas debido al paso de las soluciones hidrotermales.

En la zona se observan fallamientos locales y regionales que han desplazado las estructuras mineralizadas considerablemente. El fallamiento y fracturamiento tienen un rumbo Este- Oeste, donde se han emplazado las vetas y vetillas mineralizadas. Existe un segundo sistema de fracturamiento y fallamiento que se desliza al primer sistema, pero mayormente no tiene mayor importancia.

5.4.2.1. Geología estructural

Las estructuras geológicas a nivel regional están relacionadas directamente con el segundo movimiento del Ciclo Andino, que definió nítidamente una tectónica transicional entre la parte Norte de la Cordillera Occidental del Perú, caracterizado por numerosos fallamientos en bloques mayormente dentro de intrusivos y rocas volcánicas del Mesozoico Superior y Cenozoico y la parte Este caracterizado por Cinturones

delgados deformados dentro de los estratos del Miogeo sinclinal del Mesozoico. (Megard, 1984 – Reyes, 1980)

- **Diaclasas**

Junturas de espacios reducidos y corta longitud son comunes en los estratos de cuarcitas. Se tiene de 2 a 3 sistemas de diaclasas, con orientaciones de NO a SO.

- **Estabilidad y Riesgo Geomorfológico**

Con respecto a la estabilidad geomorfológica, la zona de estudio se encuentra bastante estable, colinas ondulantes suaves, que han originado taludes de baja pendiente con un ángulo promedio de 15° a 25°.

5.4.2.2. Estratigrafía

Las rocas expuestas en el área de estudio corresponden principalmente a rocas sedimentarias plegadas clásticas, silicificadas y calcáreas, cuyas formaciones más antiguas corresponden al Jurásico Superior y al Cretáceo Inferior, las cuales están en discordancia con las rocas volcánicas del Grupo Callipuy.

En menor proporción tenemos una cobertura Cenozoica, la cual está constituida por rocas efusivas o volcánicas, delgados lechos morrénicos, lechos fluvio-aluvionales y suelos de edad Cuaternaria. Aisladamente se tiene pequeños afloramientos de intrusivos. Cartas Geológicas-INGEMMET

5.4.2.3. Mineralogía

El ensamble mineralógico principal está constituido por:

- Limonita : $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{nH}_2\text{O}$
- Oro nativo : Au
- Esfalerita : ZnS
- Pirita : FeS_2
- Marcasita : FeS_2
- Cuarzo : SiO_2

- Alunita : $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
- Clorita : $(Si_4O_{10})Mg_3(OH)_2Mg_3(OH)_6$
- Arcillas : Silicatos aluminicos hidratados de K, Na, Ca y Mg.

El cuerpo aurífero está asociado con la oxidación de la pirita, que fue transformado por procesos de alteración en Limonita, Jarosita y Goethita (óxidos de fierro).

5.4.2.4. Sismicidad

Dentro del territorio peruano se han establecido diversas zonas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo a la mayor o menor presencia de los sismos. Esta sismicidad es producto principalmente de la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Continental a lo largo de la costa peruana, con un índice de convergencia de aproximadamente 10 cm por año.

Zonificación Sísmica

Según el Mapa de Zonificación Sísmica propuesto en la Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente, del Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), el área de estudio se encuentra comprendida en la Zona 3, correspondiéndole una alta sismicidad, habiendo ocurrido en el área cercana al proyecto sismos de intensidades de VI en la Escala de Mercalli Modificada, según la información de sismicidad histórica recopilada por (Silgado 1978).

Riesgo Sísmico

A continuación se presenta información sobre la geología y la historia sísmica registrada e instrumental dentro de un radio de 400 km alrededor del Proyecto. Se considera que la distancia de 400 km es suficiente para evaluar todos los sismos importantes que puedan haber afectado el área del Proyecto. Esta sección también provee valores potenciales de aceleración máxima horizontal, es decir, movimientos sísmicos para el área de estudio a nivel regional. Estos movimientos sísmicos estimados se

basan en estudios de peligro sísmico regionales del Perú. (Macharé et al. 1991).

Los movimientos sísmicos generados en el área del Proyecto por las fallas activas ubicadas en el área de estudio a nivel regional se basan en la distancia, longitud del sistema y magnitud máxima de los sismos históricos registrados. Las zonas de fallas de la Cordillera Blanca y de Quiches son las que tienen la mayor probabilidad de producir las mayores aceleraciones. (Macharé et al. 1991).

5.4.2.5. Tectónica

La ocurrencia de sismos en la parte occidental del Perú está asociada con el proceso continuo de subducción de la placa de Nazca bajo la placa tectónica Sudamericana. Este proceso de subducción genera sismos de magnitud elevada y extensos con relativa frecuencia, los cuales presentan rangos de magnitud de momento (M_w) entre aproximadamente 7,5 y 9,0 (West 1999; Wyss et al. 2000). La ocurrencia de los sismos también está asociada con la deformación continua de la Cordillera de los Andes. En los Andes se presentan sismos de magnitud moderada a elevada (M_w entre 6,0 y 7,5) (Suárez et al. 1983, West 1999).

En la parte del norte del Perú, la zona Andina presenta un alto índice de ocurrencia de sismos, en comparación con las regiones centro y sur. Tavera y Buforn (1998) sugieren que debido a la más alta velocidad de subsidencia del Escudo Brasileño, se originan una mayor cantidad de fallas geológicas las cuales generan más sismos.

A continuación se describen las fallas activas en el área de influencia del Proyecto. La información de estas fallas está basada en el Estudio de Observaciones Neo-tectónicas del Perú (Sebrier et al. 1982) y el Mapa actualizado Neo-tectónico del Perú (Macharé et al. 1991).

– **Falla Chaquilbamba**

La Falla Chaquilbamba está ubicada en la Cordillera Occidental del norte del Perú, entre Chaquilbamba y Marcabal (en el límite del Departamento

de Cajamarca y el Departamento de La Libertad). Esta falla normal se orienta con dirección NNO-SSE y tiene un buzamiento hacia el SO. La falla tiene una longitud total conocida de aproximadamente 1,5 km. La escarpa de la falla genera un desplazamiento máximo de la topografía de 8 a 10 m. El desplazamiento en superficie más reciente de esta falla, puede estar asociado a dos sismos ocurridos en 1937. La distancia de esta falla al Proyecto es de aproximadamente 50 km. (Macharé et al. 1991).

– ***Falla Quiches***

La Falla Quiches se extiende con rumbo NNO entre los pueblos de Quiches y Chingalpo, sobre la margen occidental del Río Marañón, al NNE de Huaraz. La falla de 20 km de longitud comprende varias secciones con buzamientos al este y al oeste. La Falla Quiches se reactivó durante un fuerte sismo ocurrido en 1946, el cual formó una escarpa de falla de unos 3,5 m de desplazamiento vertical. La distancia más corta de esta falla al Proyecto es de aproximadamente 90 km. (Macharé et al. 1991).

– ***Sistema de fallas de la Cordillera Blanca***

El Sistema de Fallas de la Cordillera Blanca es el sistema de fallas activas más grande del Perú. Las fallas están ubicadas entre Chiquián y Corongo (Ancash) a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Blanca. Las fallas presentan rumbos NNE y ENE, con un buzamiento de 45° a 60° hacia el SO y son fallas normales. Las fallas han estado activas por más de 5 millones de años, (es decir, desde las eras Plioceno y Cuaternaria). La Falla de la Cordillera Blanca tiene dos secciones: una sección de fallas continuas de 100 km de largo al norte de Huaraz, y una sección de fallas discontinuas de 77 km de largo ubicada al sur. El desplazamiento vertical de los últimos 50 000 años ha sido de hasta 35 m, estimado en base a la altura de las escarpas. En los últimos 1,6 millones de años (Cuaternario) el desplazamiento vertical ha sido de 1 000 m, siendo el desplazamiento de los últimos 5 millones de años (Plioceno) de 4 500 m. La distancia más corta de este sistema de fallas al Proyecto es de aproximadamente 170 km. (Macharé et al. 1991).

– **Fallas Rioja-Moyobamba**

Las Fallas Rioja-Moyobamba comprenden una serie de fallas relacionadas a movimientos tectónicos del Terciario, las cuales controlan la cuenca cuaternaria Alto Mayo ubicada en el área Sub-Andina del Norte de Perú (6°S, 77°O). Se ha identificado recientemente un potencial de actividad sísmica en algunas fallas, particularmente para la Falla Shitari (o Rioja) y las fallas Moyobamba Norte y Sur. La alta actividad sísmica histórica que caracteriza el área (sismos en 1927, 1968, 1990 y 1991), parece estar estrechamente relacionada con la reactivación de estas estructuras de fallas. La distancia más corta de estas fallas al Proyecto es de aproximadamente 275 Km (Macharé et al. 1991).

5.5. Detalle de pruebas en campo

5.5.1. Requerimiento de botellas plásticas.

Se realizó un requerimiento de 5,000 unidades de botellas PET de 3 Lts, cantidad que estaba considerada dentro del presupuesto de la investigación.

5.5.2. Parámetros de diseño estándar para la voladura con cámara de aire.

En la Figura 5.3 podemos observar el diseño estándar de la columna explosiva, además de las características generales de las otras variables como son el burden, espaciamento, taco y la sobre perforación.

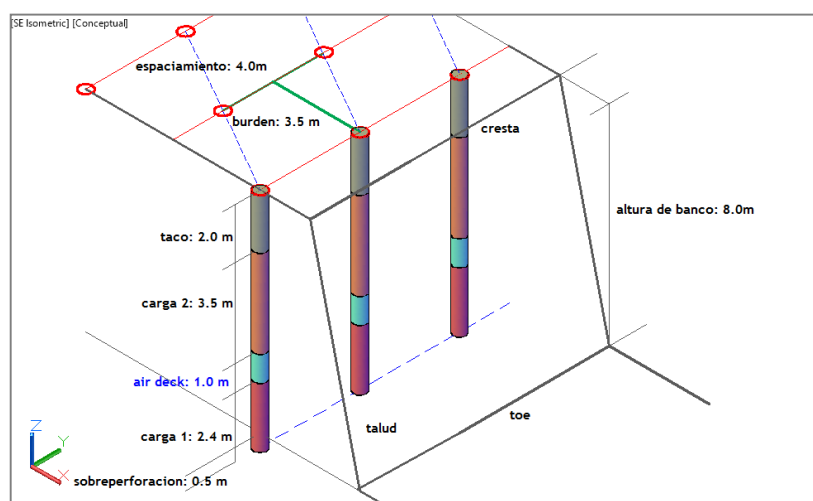


Figura 5.3 Parámetros diseño de la cámara de aire.

5.5.3. Instalación de equipos de medición de vibraciones.

Los equipos para la medición de las vibraciones (el equipo InstanTel) fueron instalados en la zona de influencia de la voladura. En las Figuras 5.4 y 5.5, podemos ver unas fotos de la instalación del equipo de medición.



Figura 5.4 Instalación del equipo de medición.



Figura 5.5 Detalle de instalación del equipo de medición.

5.5.4. Definición de zona de prueba para la aplicación de cámaras de aire.

Se definieron las zonas de pruebas en coordinación con las áreas de Planeamiento y Geología acorde con lo establecido en el plan de minado. Dentro de las diferentes zonas incluidas en el plan, se seleccionaron aquellas que presenten la ROCA TIPO II con RMR DE 61 a 81. En base a estas consideraciones, se realizaron cinco pruebas, en cinco proyectos de voladura, los cuales fueron:

1. Proyecto TORO 440-V1
2. Proyecto TORO 450 -V2
3. Proyecto TORO 460-V3
4. Proyecto TORO 470-V4
5. Proyecto TORO 480-V5

5.5.5. Prueba de campo N° 01: Proyecto TORO 440-V1.

En la ejecución de este proyecto ubicado en el tajo El Toro, banco 3444 con una producción de 75,687 TMH roca, se inicia con un plan de voladura donde se determinó el mapeo geo mecánico de proyecto, cálculos de parámetros de diseño y la simulación de secuencia de salida utilizando el software I-Blast 5.0. Al finalizar la voladura del proyecto TORO 440-V1, se realizó el análisis post voladura referente a costos de voladura, vibraciones por proyecto usando el sismógrafo Instantel, finalmente el cálculo de la fragmentación usando el software Wipfrag.

5.5.5.1. Mapeo geo mecánico proyecto TORO 440-V1.

En la figura 5.7 podemos observar el mapeo geo-mecánico del proyecto TORO 440-V1.

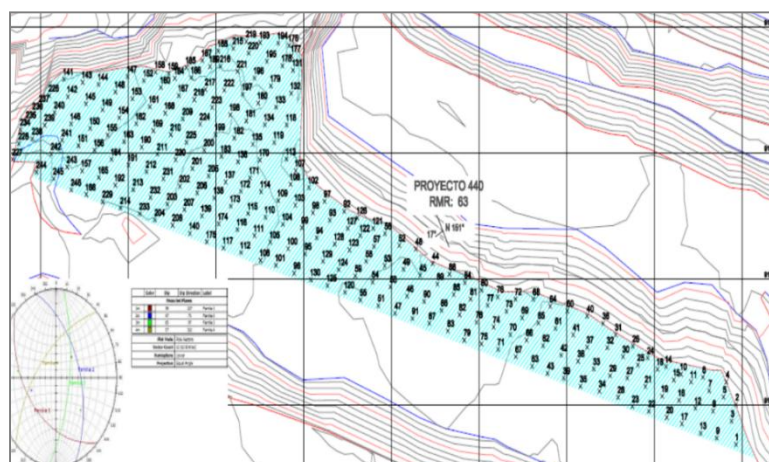


Figura 5.6 Plano geo mecánico proyecto 440-V1 (Área de Geología).

5.5.5.2. Secuencia de salida para la voladura con cámara de aire proyecto TORO 440-V1.

El proyecto de voladura TORO 440-V1 se inició en 03 paquetes con secuencia de salida en V, con tiempos de retardo entre filas de 25 ms, 35 ms y 42 ms para los 03 paquetes, se retardo la última fila con 42 ms y 65 ms.

El inicio en 03 paquetes indica la separación de mineral y desmante, con inicio en 0 ms y retardos de 59 ms y 65 ms en cada paquete.

Como se ve en el gráfico de las isolineas, estas indican la secuencia de salida de los taladros que están casi perpendicular al buzamiento de los estratos, lo que nos ayuda para la fragmentación.

El tiempo de quemado en superficie fue de 857 ms, con tiempo de fondo de 800 ms, con la probabilidad de corte que es mínima.

Así mismo se aprecia que la carga operante fue de 03 tal, detonando 263.49 kg de ANFO en un mismo tiempo

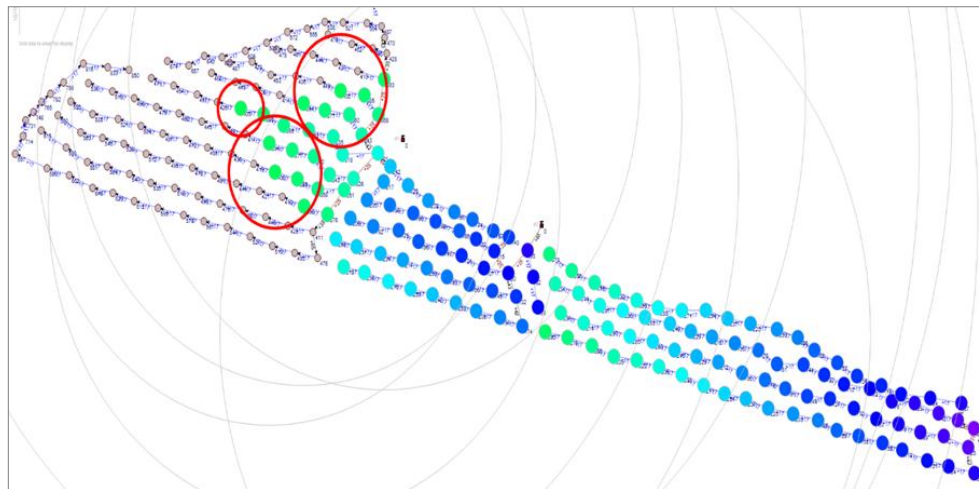


Figura 5.7 Simulación de secuencia de salida (Software de voladura I-blast 5.0).

En la Tabla 5.8, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con Air Deck o cámara de aire y una voladura tradicional. Para una mejor comparación, la Tabla 5.9 presenta cuatro categorías:

- a) Datos generales.
- b) Propiedades de la roca.

- c) Propiedades del explosivo.
- d) Parámetros de diseño

Tabla 5.8 Parámetros de diseño del proyecto TORO 440-V1.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Voladura con Air deck
Datos generales	Tajo			El Toro
	Fase			F1-Norte
	Banco			3444
	Proyecto			TORO 440-V1
	Fecha			26/06/2016
	Nº de taladros	NT	uni.	247
	Área	A	m ²	3,458.00
	Volumen	V	m ³	31,019.26
	Tonelaje	T	Ton	75,687.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm ³	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	63.5
	Porcentaje RQD	RQD	%	81
	Buzamiento de estratos	Bz		17°
	Dirección de estratos	Dir.		N 151°
	Descripción del macizo rocoso	RMR II	uni.	63
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3508
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm ³	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	24,553.10
	Cantidad total de booster	WB	kg.	177.80
	Factor de carga	FC	kg/m ³	0.797
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.327
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156.00
	Burden	B	m.	3.50
	Espaciamiento	S	m.	4.00
	Relación S/B	S/B	m.	1.14
	Altura de banco	H	m.	8.00
	Sobre perforación	J	m.	0.50
	Altura de carga N°1	C1	m.	2.00
	Altura de AIR DECK	AD	m.	1.00
	Altura de carga N°2	C2	m.	3.50
	Taco	T	m.	2.00

5.5.6. Prueba de campo N° 02: Proyecto TORO 450-V2.

En la ejecución de este proyecto ubicado en el tajo El Toro, banco 3452 con una producción de 148,732 TMH roca, se inicia con un plan de voladura donde se determinó el mapeo geo mecánico de proyecto, cálculos de parámetros de diseño y la simulación de secuencia de salida utilizando el software I-Blast 5.0. Al finalizar la voladura del proyecto TORO 450-V2, se realizó el análisis post voladura referente a costos de voladura, vibraciones por proyecto usando el sismógrafo Instantel, finalmente el cálculo de la fragmentación usando el software Wipfrag.

5.5.6.1. Mapeo geo mecánico proyecto TORO 450-V2.

En la figura 5.9 podemos observar el mapeo geo-mecánico del proyecto TORO 450-V2.

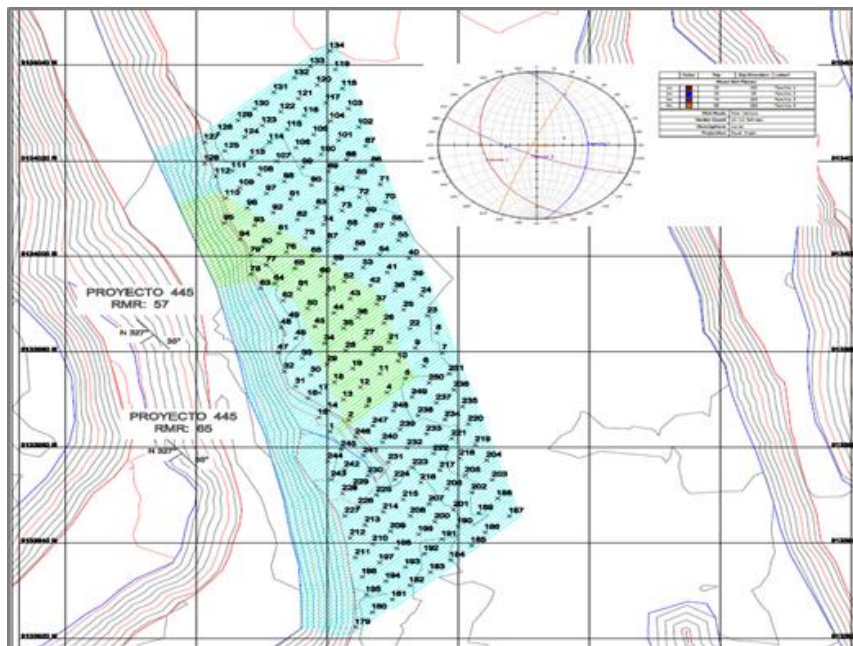


Figura 5.8 Plano geo mecánico del proyecto 450-V2 (Área de Geología).

5.5.6.2. Secuencia de salida para la voladura con cámara de aire proyecto TORO 450-V2.

El proyecto de voladura 450 se inició en 03 paquetes con secuencia de salida en V, con tiempos de retardo entre filas de 25 ms, 35 ms y 42 ms para los 03 paquetes, se retardo la última fila con 42 ms y 65 ms.

Como se ve en el gráfico 5.10 de las isoclinas, estas indican la secuencia de salida de los taladros que están casi perpendicular al buzamiento de los estratos, lo que nos ayuda para la fragmentación.

El tiempo de quemado en superficie fue de 647 ms, con tiempo de fondo de 800 ms, con la probabilidad de corte que es mínima.

Así mismo se aprecia que la carga operante fue de 8 tal, detonando 565.11 kg de ANFO en un mismo tiempo

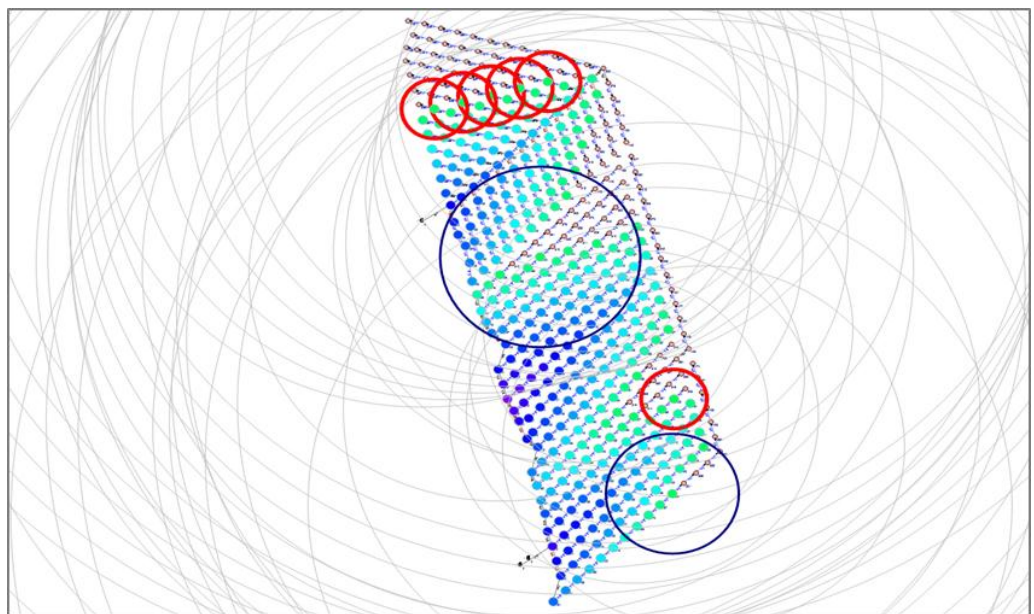


Figura 5.9 Parámetros de diseño Air deck proyecto 450-V2. (I-blast 5.0)

En la Tabla 5.9, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con Air Deck o cámara de aire y una voladura tradicional.

Para una mejor comparación, la Tabla 5.10 presenta cuatro categorías:

- e) Datos generales.
- f) Propiedades de la roca.
- g) Propiedades del explosivo.
- h) Parámetros de diseño

Tabla 5.9 Parámetros de diseño del proyecto proyecto TORO 450-V2.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Voladura con Air deck
Datos generales	Tajo			El Toro
	Fase			F1-Norte
	Banco			3452
	Proyecto			TORO 450-V2
	Fecha			03/07/2016
	Nº de taladros	NT	uni.	446
	Área	A	m ²	6,244.00
	Volumen	V	m ³	60,955.74
	Tonelaje	T	Ton	148,732.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm ³	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	63.5
	Porcentaje RQD	RQD	%	63
	Buzamiento de estratos	Bz		35°
	Dirección de estratos	Dir.		N 327°
	Descripción del macizo rocoso	RMR IIIA	uni.	57
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3828.5
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm ³	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	37,466.00
	Cantidad total de booster	WB	kg.	272.25
	Factor de carga	FC	kg/m ³	0.619
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.254
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156.00
	Burden	B	m.	3.50
	Espaciamiento	S	m.	4.00
	Relación S/B	S/B	m.	1.14
	Altura de banco	H	m.	8.00
	Sobre perforación	J	m.	0.50
	Altura de carga N°1	C1	m.	2.00
	Altura de AIR DECK	AD	m.	1.00
	Altura de carga N°2	C2	m.	3.50
	Taco	T	m.	2.00

5.5.7. Prueba de campo N° 03: Proyecto TORO 460-V3.

En la ejecución de este proyecto ubicado en el tajo El Toro, banco 3380 con una producción de 50,060 TMH roca, se inicia con un plan de voladura donde se determinó el mapeo geo mecánico de proyecto, cálculos de parámetros de diseño y la simulación de secuencia de salida utilizando el software I-Blast 5.0. Al finalizar la voladura del proyecto TORO 460-V3, se realizó el análisis post voladura referente a costos de voladura, vibraciones por proyecto usando el sismógrafo Instantel, finalmente el cálculo de la fragmentación usando el software Wipfrag..

5.5.7.1. Mapeo geo mecánico proyecto TORO 460-V3.

En la figura 5.10 podemos observar el mapeo geo-mecánico del proyecto TORO 460-V3.

5.5.7.2. Secuencia de salida para la voladura con cámara de aire proyecto TORO 460-V3.

El proyecto 460-V3 se amarro en 2 paquetes. El primer paquete con salida en echelon, tiempo entre fila de 25ms, y 109ms al talud. El 2do paquete se retardo 218ms, salida en V, tiempo entre filas de 25ms, 35ms y 65ms al talud. El py 517 se amarro con tiempo entre taladros de 17ms, salida en V, tiempo entre filas de 42ms, 35ms y 109ms al talud.

El apilamiento del proyecto 460-V3 fue hacia el centro (lomo de pescado).

El tiempo de quemado en superficie fue de 555ms (incluyendo la dispersión de retardos) con tiempo de fondo de 800 ms, con la probabilidad de corte es menor.

Así mismo se aprecia que la carga operante fue de 5 tal, detonando 281.5 gr kg de ANFO en un mismo tiempo.

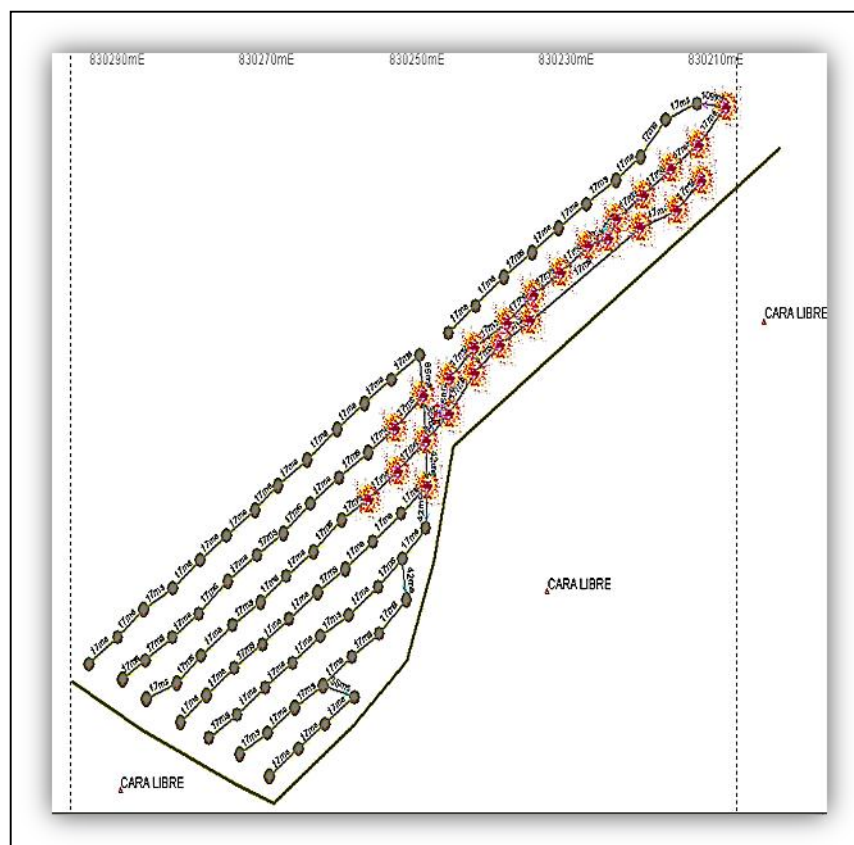


Figura 5.11 Simulación de secuencia de salida (Software JK Simblast 2.0)

En la Tabla 5.10, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con Air Deck o cámara de aire y una voladura tradicional.

Para una mejor comparación, la Tabla 5.11 presenta cuatro categorías:

- i) Datos generales.
- j) Propiedades de la roca.
- k) Propiedades del explosivo.
- l) Parámetros de diseño

Tabla 5.10 Parámetros de diseño del proyecto TORO 450-V2.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Voladura con Air deck
Datos generales	Tajo			El Toro
	Fase			F1-Norte
	Banco			3480
	Proyecto			TORO 460-V3
	Fecha			10/07/2016
	Nº de taladros	NT	uni.	157
	Área	A	m ²	2,198.00
	Volumen	V	m ³	20,516.39
	Tonelaje	T	Ton	50,060.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm ³	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	156
	Porcentaje RQD	RQD	%	81
	Buzamiento de estratos	Bz		65°
	Dirección de estratos	Dir.		N 85°
	Descripción del macizo rocoso	RMR II	uni.	68
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3750
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm ³	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	10,824.00
	Cantidad total de booster	WB	kg.	113.40
	Factor de carga	FC	kg/m ³	0.533
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.218
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156.00
	Burden	B	m.	3.50
	Espaciamiento	S	m.	4.00
	Relación S/B	S/B	m.	1.14
	Altura de banco	H	m.	8.00
	Sobre perforación	J	m.	0.50
	Altura de carga N°1	C1	m.	2.00
	Altura de AIR DECK	AD	m.	1.00
	Altura de carga N°2	C2	m.	3.50
	Taco	T	m.	2.00

5.5.8. Prueba decampo N° 04: Proyecto TORO 470-V4.

En la ejecución de este proyecto ubicado en el tajo El Toro, banco 3380 con una producción de 24,252 TMH roca, se inicia con un plan de voladura donde se determinó el mapeo geo mecánico de proyecto, cálculos de parámetros de diseño y la simulación de secuencia de salida utilizando el software I-Blast 5.0. Al finalizar la voladura del proyecto TORO 470-V4, se realizó el análisis post voladura referente a costos de voladura, vibraciones por proyecto usando el sismógrafo Instantel, finalmente el cálculo de la fragmentación usando el software Wipfrag...

5.5.8.1. Mapeo geo mecánico proyecto TORO 470-V4.

En la figura 5.13 podemos observar el mapeo geo-mecánico del proyecto TORO 470-V4.

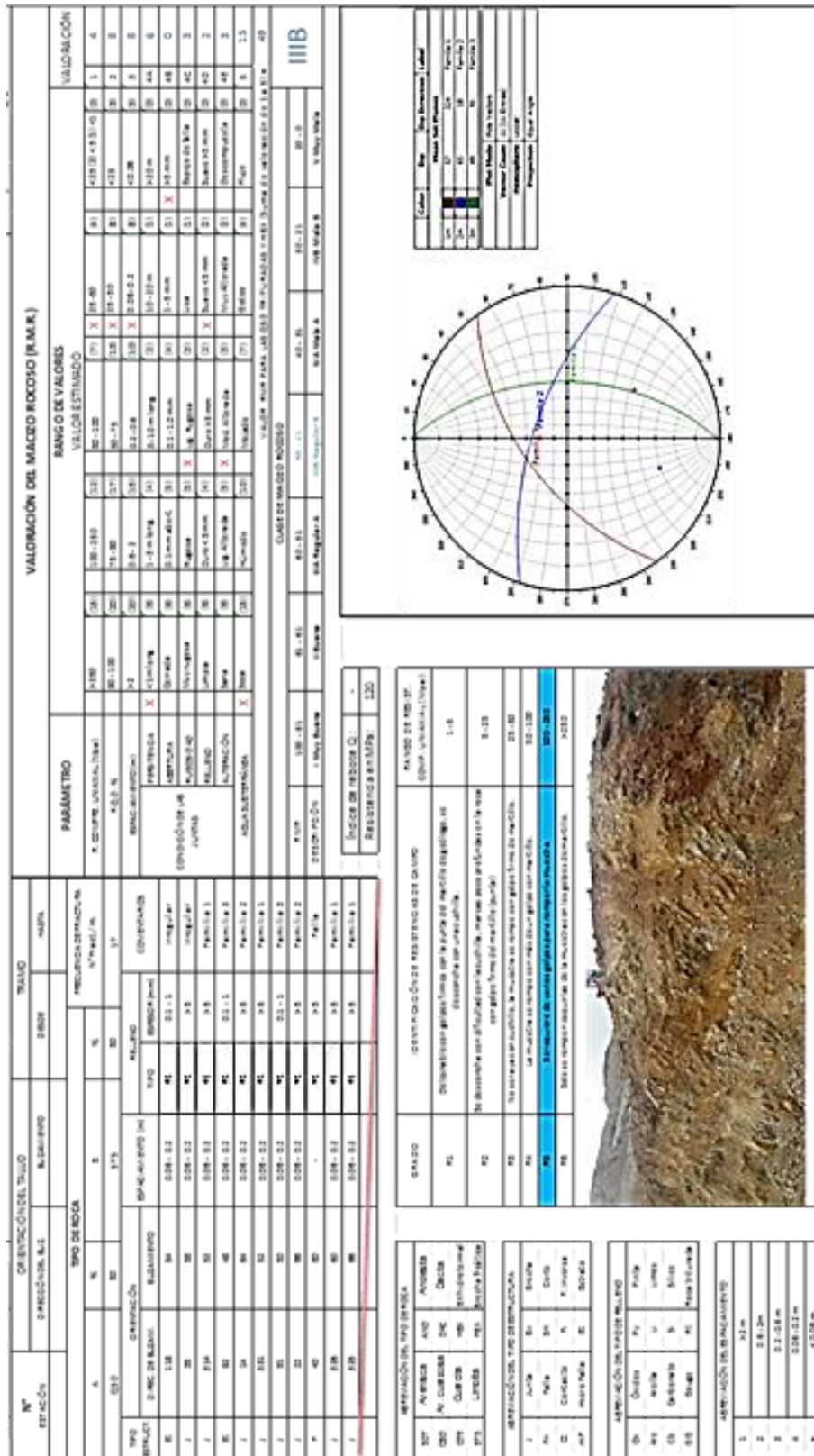


Figura 5.12 Plano geo mecánico proyecto 470-V4 (Área de Geología).

5.5.8.2. Secuencia de salida para la voladura con cámara de aire proyecto TORO 470-V4.

El proyecto de voladura TORO 470-V4 se amarro con fanel dual 17/800ms entre taladros , con salida en echelon para el lado este y salida en V para el oeste, tiempo entre filas de 25ms, 42ms, 35ms y 65ms, 109ms para la última fila del talud.

El apilamiento en la parte de la malla más amplia fue hacia el centro quedando como un lomo de pescado, la parte con 2 filas desplazo hacia el talud.

El tiempo de quemado en superficie fue de 400ms (incluyendo la dispersión de retardos) con tiempo de fondo de 800 ms, con la probabilidad de corte es menor.

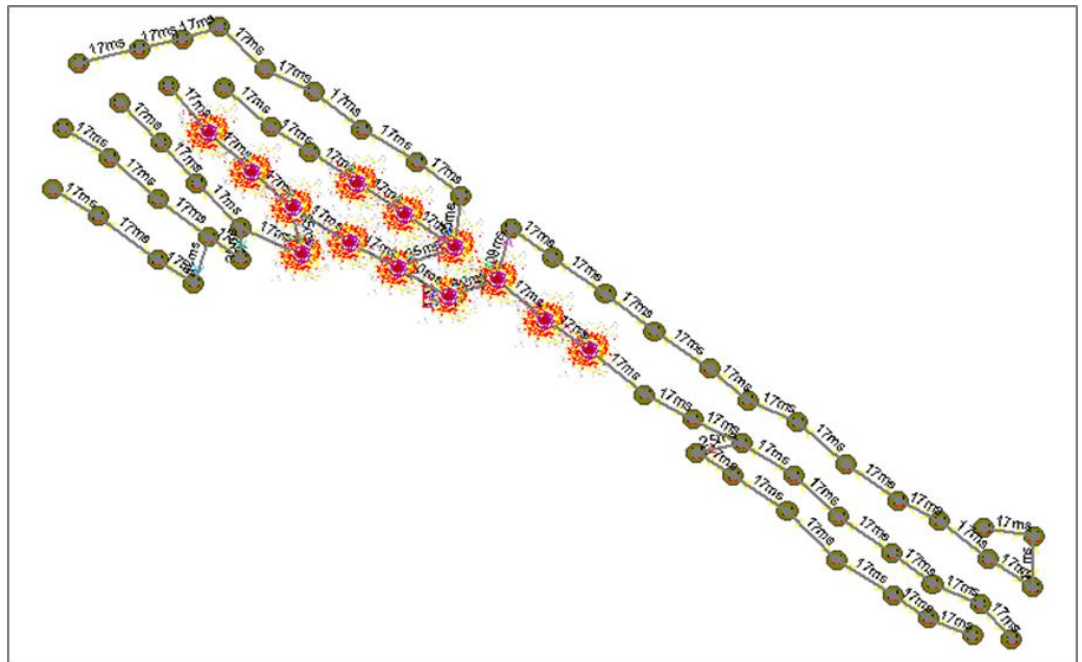


Figura 5.13 Simulación de secuencia de salida (Software JK Simblast 2.0)

En la Tabla 5.11, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con cámara de aire y una voladura tradicional.

Para una mejor comparación, la Tabla 5.11 presenta cuatro categorías:

- m) Datos generales.
- n) Propiedades de la roca.

o) Propiedades del explosivo.

p) Parámetros de diseño

Tabla 5.21 Parámetros de diseño del proyecto TORO 470-V4.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Voladura con Air deck
Datos generales	Tajo			El Toro
	Fase			F1-Norte
	Banco			3380
	Proyecto			TORO 470-V4
	Fecha			17/07/2016
	Nº de taladros	NT	uni.	69
	Área	A	m ²	966.00
	Volumen	V	m ³	9,939.34
	Tonelaje	T	Ton	24,252.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm ³	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	120
	Porcentaje RQD	RQD	%	81
	Buzamiento de estratos	Bz		55°
	Dirección de estratos	Dir.		N 130°
	Descripción del macizo rocoso	RMR IIIA	uni.	49
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3690
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm ³	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	6,199.00
	Cantidad total de booster	WB	kg.	62.10
	Factor de carga	FC	kg/m ³	0.630
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.258
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156.00
	Burden	B	m.	3.50
	Espaciamiento	S	m.	4.00
	Relación S/B	S/B	m.	1.14
	Altura de banco	H	m.	8.00
	Sobre perforación	J	m.	0.50
	Altura de carga Nº1	C1	m.	2.00
	Altura de AIR DECK	AD	m.	1.00
	Altura de carga Nº2	C2	m.	3.50
	Taco	T	m.	2.00

5.5.9. Prueba de campo N° 05: Proyecto TORO 480-V5.

En la ejecución de este proyecto ubicado en el tajo El Toro, banco 3404 con una producción de 59,138 TMH roca, se inicia con un plan de voladura donde se determinó el mapeo geo mecánico de proyecto, cálculos de parámetros de diseño y la simulación de secuencia de salida utilizando el software I-Blast 5.0. Al finalizar la voladura del proyecto TORO 480-V5, se realizó el análisis post voladura referente a costos de voladura, vibraciones por proyecto usando el sismógrafo Instantel, finalmente el cálculo de la fragmentación usando el software Wipfrag.

5.5.9.1. Mapeo geo mecánico proyecto TORO 480-V5.

En la figura 5.15 podemos observar el mapeo geo-mecánico del proyecto TORO 460-V3.

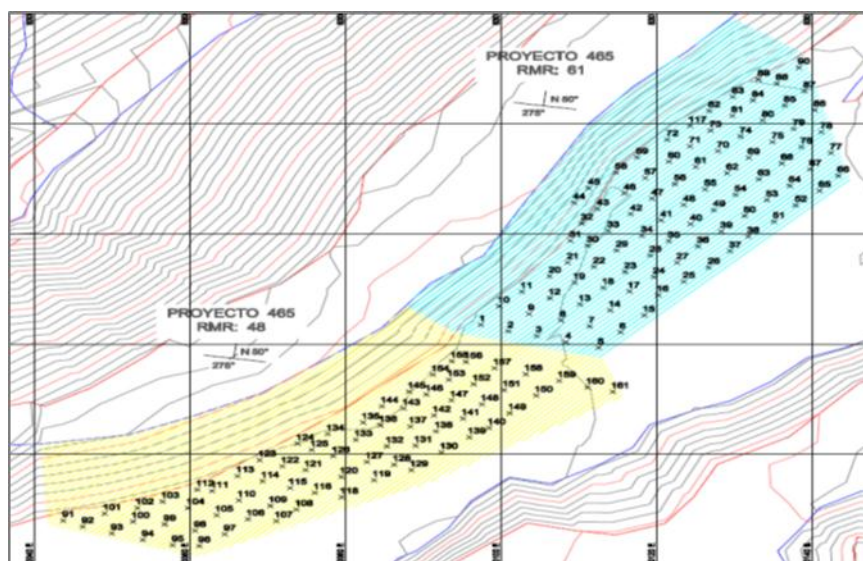


Figura 5.14 Plano geo mecánico proyecto 480-V5 (Área de Geología).

5.5.9.2. Secuencia de salida para la voladura con cámara de aire proyecto TORO 480-V5.

El proyecto de voladura TORO 480-V5 se amarro en 3 paquetes el primero para separar el carbón con sulfuro salida en V tiempos de retardos de 25ms, 35ms, el 2do paquete se retardo 84ms, y tiempo entre filas de 25ms, 35ms, 42ms salida en V, el 3er paquete se retardo 218ms, salida en V tiempo entre filas de 25ms,35ms y 42ms.

El tiempo de quemado en superficie fue de 584 ms, con tiempo de fondo de 800 ms, con la probabilidad de corte es menor.

Así mismo se aprecia que la carga operante fue de 10 tal, detonando 897 kg de ANFO en un mismo tiempo.

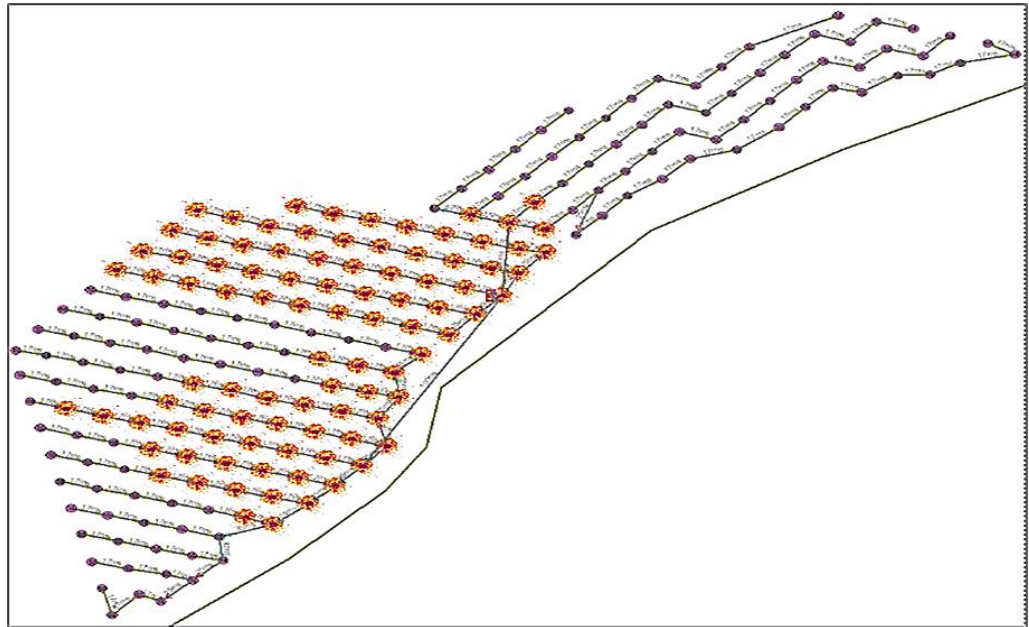


Figura 5.15 Simulación de secuencia de salida (Software de voladura JK Simblast 2.0)

En la Tabla 5.12, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con Air Deck o cámara de aire y una voladura tradicional.

Para una mejor comparación, la Tabla 5.8 presenta cuatro categorías:

- q) Datos generales.
- r) Propiedades de la roca.
- s) Propiedades del explosivo.
- t) Parámetros de diseño

Tabla 5.32 Parámetros de diseño del proyecto TORO 480-V5.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Voladura con Air deck
Datos generales	Tajo			El Toro
	Fase			F1-Norte
	Banco			3404
	Proyecto			TORO 480-V5
	Fecha			24/07/2016
	Nº de taladros	NT	uni.	204
	Área	A	m ²	2,856.00
	Volumen	V	m ³	24,236.89
	Tonelaje	T	Ton	59,138.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm ³	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	123
	Porcentaje RQD	RQD	%	85
	Buzamiento de estratos	Bz		275°
	Dirección de estratos	Dir.		N 50°
	Descripción del macizo rocoso	RMR II	uni.	61
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3747
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm ³	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	19,979.00
	Cantidad total de booster	WB	kg.	96.30
	Factor de carga	FC	kg/m ³	0.828
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.339
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156.00
	Burden	B	m.	3.50
	Espaciamiento	S	m.	4.00
	Relación S/B	S/B	m.	1.14
	Altura de banco	H	m.	8.00
	Sobre perforación	J	m.	0.50
	Altura de carga N°1	C1	m.	2.00
	Altura de AIR DECK	AD	m.	1.00
	Altura de carga N°2	C2	m.	3.50
	Taco	T	m.	2.00

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1. Análisis de vibraciones y otras variables post-voladura.

6.1.1. Resultados de la prueba de campo N° 1: Proyecto TORO 440-V1

- Costos de perforación y voladura

Tabla 6.1 Costos del proyecto TORO 440-V1.

PERFORACION	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck		
				CANTIDAD	COSTOS US\$	
	Metros perforados	m.	8.3	2,209.00	18,334.70	
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				18,334.70	
	COSTO UNITARIO DE PERFORACIÓN			0.242	US\$/t	
VOLADURA	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck		
				CANTIDAD	COSTOS US\$	
		NITRATO DE AMONIO	kg.	0.66	23080.00	15278.96
		BOOSTERS 1 Lb	uni.	3.80	394	1497.20
		FANEL DUAL 17/800 ms	uni.	4.60	394	1812.40
		CONECTA DET 0 ms	uni.	3.35	5	16.75
		CONECTA DET 25 ms	uni.	3.35	11	36.85
		CONECTA DET 35 ms	uni.	3.35	2	6.70
		CONECTA DET 42 ms	uni.	3.35	7	23.45
		CONECTA DET 65 ms	uni.	3.35	2	6.70
		LINEA SILENCIOSA x 100 m	m.	0.48	100.00	48.00
		LINEA SILENCIOSA x 500 m	m.	0.19	500.00	95.00
		FULMINANTE BALISTICO	uni.	0.15	1	0.15
		ARMADA DE MECHA LENTA	uni.	0.15	0	0.00
	PETROLEO	Gl.	4.77	458	2184.66	
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				21,006.82	
	COSTO UNITARIO DE PERFORACION			0.278	US\$/t	
P&V	COSTO UNITARIO DE P/V			0.520	US\$/t	

- **Vibraciones**

El miércoles 26/06/2016, se monitoreo la voladura en el banco 3444, el proyecto TORO 440-V1.

Vibración simulada Jk Simblast V 2.0

La velocidad pico partícula (PPV) considerando 280 metros, y teniendo los valores de K y B calculadas en base a los datos del sismógrafo se llega a 3.813 mm/s.

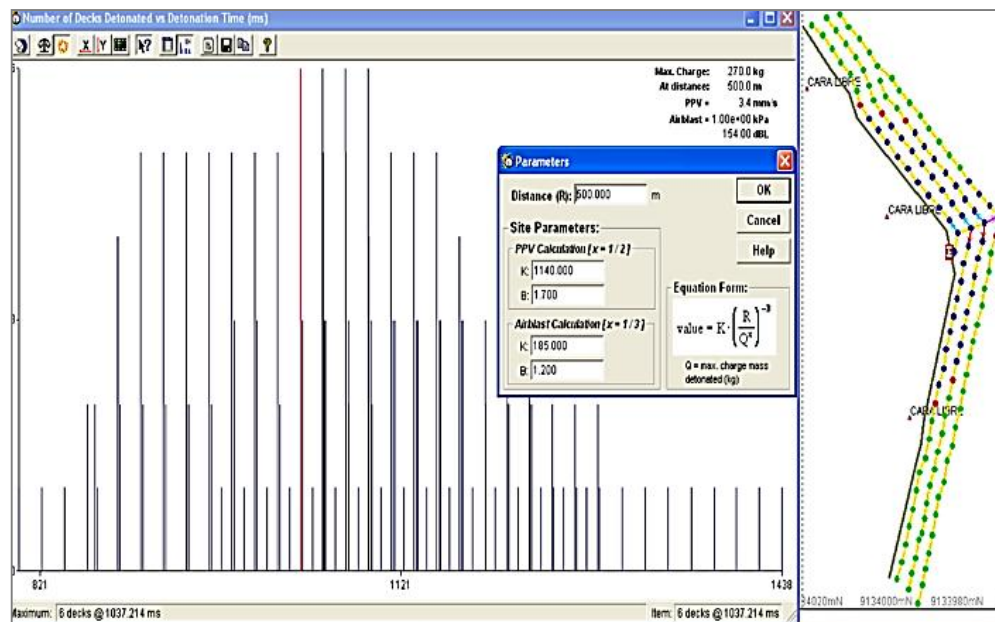


Figura 6.1 Simulación de Vibraciones (Software de voladura JK Simblast 2.0).

El sismograma de la voladura realizada con 247 taladros de 156 mm de diámetro, donde se utilizó 24,730.90 Kg. De ANFO, el mayor movimiento se registró en el eje de la Onda Longitudinal con 3.175 mm/s. y PPV es de 4.216 mm/s en la Sumatoria de los Vectores y con una frecuencia de 9.0 Hz en la Onda Vertical; el Sismógrafo es instalado a 280 m.

Tabla 6.2 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto TORO 440-V1

REGISTRO DE MONITOREO DE VIBRACIONES							
EJE ONDA LONGITUDINAL		EJE ONDA VERTICAL		EJE ONDA TRANSVERSAL		Sum. Vectores	Distancia al Sismografo
VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	
mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	m
3.175	7.4	1.27	7.5	3.175	7.5	4.216	280

Fuente: Informe técnico-FAMESA SAC.

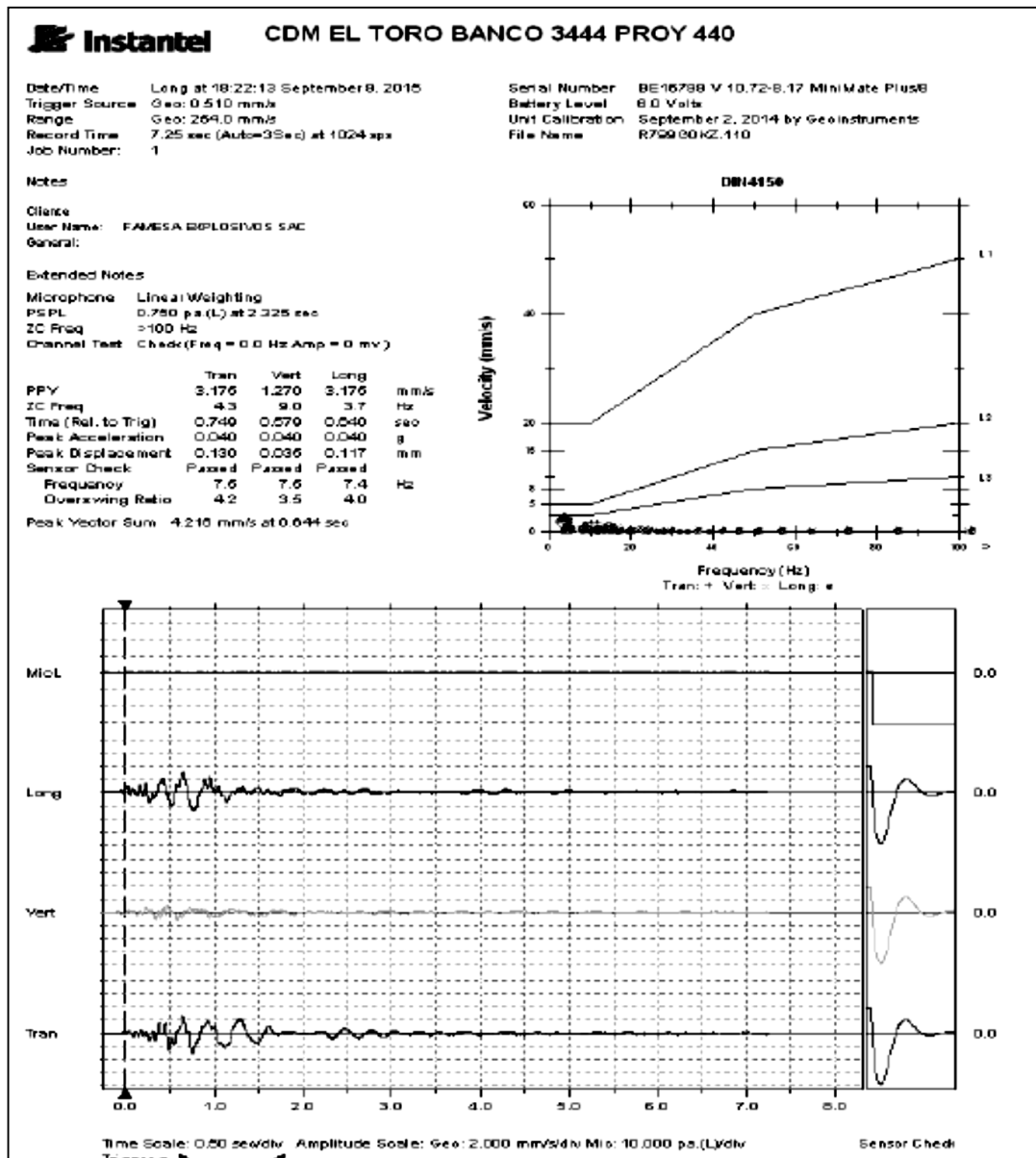


Figura 6.2 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel. (FAMESA SAC).

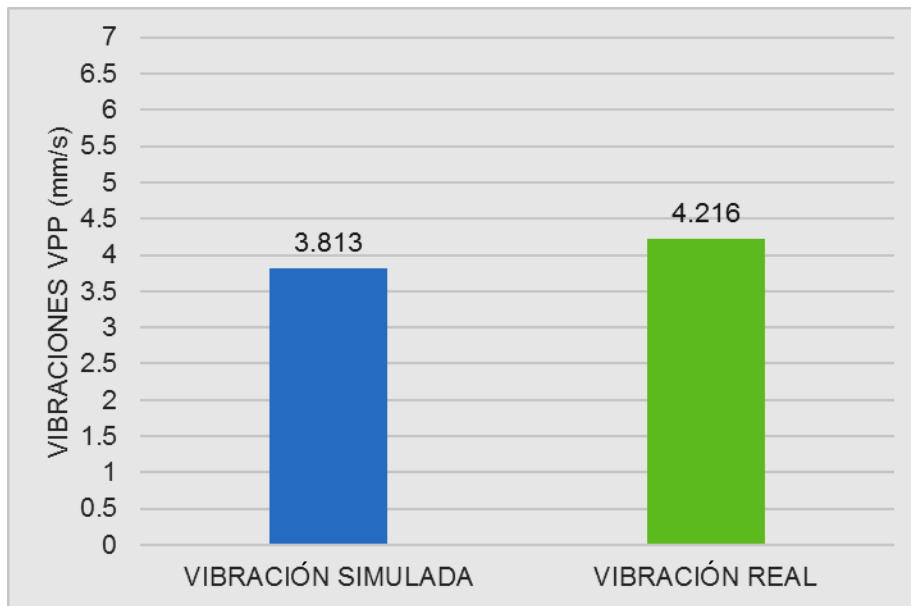


Figura 6.3 Comparación de Vibraciones simulada y real.

- **Fragmentación**

Como se puede apreciar en el grafico el análisis resultante de 7 imágenes tomadas antes y durante el minado nos arroja un P80 Resultante 5.38”

$$P80 = \frac{D90-D75}{3} + D75 \quad \text{Ec.6.1}$$

$$P80 = \frac{6.689 - 4.723}{3} 4.723 = 5.38''$$

Tabla 6.3 Fragmentación (Área de Perforación y Voladura-CDC)

BANCO 3444	Und.	Proyecto 440
HISTOGRAMA:		
Tamaños Minim os	Pulg	0.035
Tamaños Maxim os	Pulg	7.313
Block Analisados	Und	3195
CURVA ACUMULATIVA:		
El 10% Pasa por una Malla	Pulg	1.052
El 75% Pasa por una malla	Pulg	4.723
El 90% Pasa por una malla	Pulg	6.689
P80	Pulg	5.38
TABLA PORCENTUAL		
		100% < a 32.00 Pulg
		100% < a 16 Pulg
		100% < a 8 Pulg



Figura 6.4 Medición de Fragmentación con Wipfrag - proyecto 440-V1.

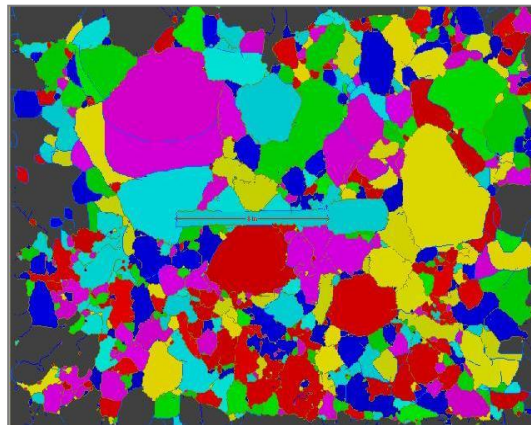


Figura 6.5 Fotografía delimitación de fragmentos(Software Wipfrag 2.3)

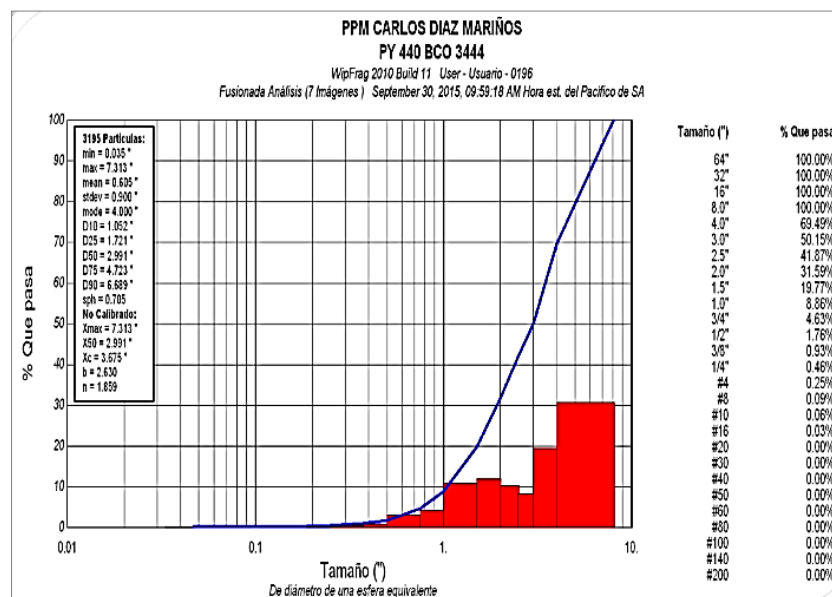


Figura 6.6 Distribución granulométrica proy-440-V1 (Software Wipfrag 2.3)

6.1.2. Resultados de la prueba de campo N° 2: Proyecto TORO 450-V2

- Costos de perforación y voladura

Tabla 6.4 Costos Proyecto TORO 450-V2.

PERFORACION	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck		
				CANTIDAD	COSTOS US\$	
	Metros perforados	m.	8.3	4,272.00	35,457.60	
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				35,457.60	
	COSTO UNITARIO DE PERFORACIÓN			0.238	US\$/Ton	
VOLADURA	Descripcion		U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
					CANTIDAD	COSTOS US\$
	NITRATO DE AMONIO		kg.	0.66	35219.00	23314.98
	BOOSTERS 1 Lb		uni.	3.80	565	2147.00
	FANEL DUAL 17/800 ms		uni.	4.60	565	2599.00
	CONECTA DET 0 mS		uni.	3.35	7	23.45
	CONECTA DET 25 mS		uni.	3.35	18	60.30
	CONECTA DET 35 mS		uni.	3.35	19	63.65
	CONECTA DET 42 mS		uni.	3.35	7	23.45
	CONECTA DET 65 mS		uni.	3.35	1	3.35
	LINEA SILENCIOSA x 100 m		m.	0.48	100.00	48.00
	LINEA SILENCIOSA x 500 m		m.	0.19	500.00	95.00
	FULMINANTE BALISTICO		uni.	0.15	1	0.15
	ARMADA DE MECHA LENTA		uni.	0.15	0	0.00
	PETROLEO		Gl.	4.77	742	3539.34
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				31917.67	
	COSTO UNITARIO DE VOLADURA			0.215	US\$/t	
P&V	COSTO UNITARIO DE P/V			0.453	US\$/t	

- **Vibraciones**

Se monitoreo la voladura en el banco 3452, el proyecto TORO 450-V2

Vibración simulada Jk Simblast V 2.0

La velocidad pico partícula (PPV) considerando 130 metros, y teniendo los valores de K y B calculadas en base a los datos del sismógrafo se llega a 15.10 mm/s.

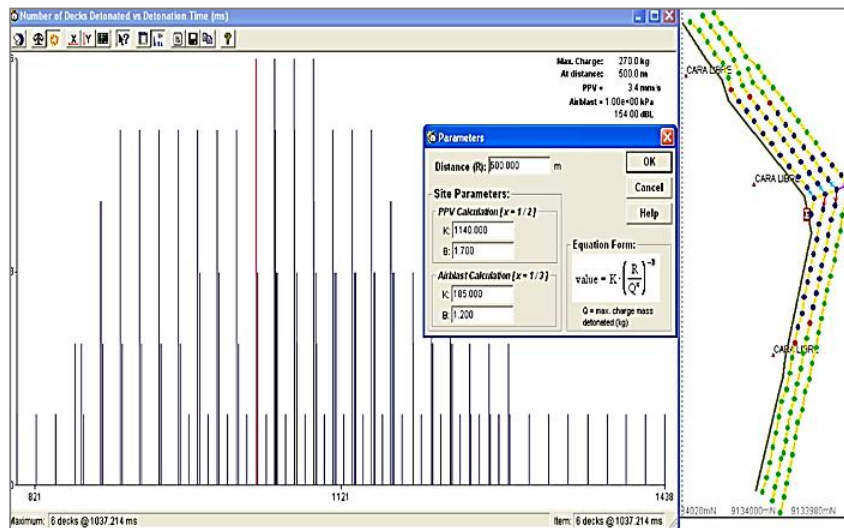


Figura 6.7 Simulación de Vibraciones (Software de voladura JK Simblast 2.0)

Vibración real

El sismograma de la voladura realizada con 466 taladros de 156 mm de diámetro, donde se utilizó 37,466 Kg. De ANFO, el mayor movimiento se registró en el eje de la Onda Longitudinal con 14.86 mm/s. y PPV es de 15.85 mm/s en la Sumatoria de los Vectores y con una frecuencia de 12.0 Hz en la Onda Longitudinal; el Sismógrafo es instalado a 130 m. aproximadamente de la voladura.

Tabla 6.5 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto TORO 450-V1

REGISTRO DE MONITOREO DE VIBRACIONES							
EJE ONDA LONGITUDINAL		EJE ONDA VERTICAL		EJE ONDA TRANSVERSAL		Sum. Vectores	Distancia al Sismografo
VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	
mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	m
14.86	7.5	7.75	7.6	9.017	7.6	15.85	130



Date/Time Long at 18:23:05 September 8, 2015
 Trigger Source Geo: 0.610 mm/s
 Range Geo: 254.0 mm/s
 Record Time 12.76 sec (Auto=3 Sec) at 1024 sps
 Job Number: 1

Serial Number BE16799 V 10.72-8.17 MiniMate Plus8
 Battery Level 6.1 Volts
 Unit Calibration September 2, 2014 by GeoInstruments
 File Name R788G-OFF.2H0

Notes

Client
 User Name: FAMESA EXPLOSIVOS SAC
 General:

Extended Notes

Microphone Linear Weighting
 PSFL 0.760 pa.(L) at 0.077 sec
 IC Freq 37 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.017	7.747	14.85	mm/s
IC Freq	6.7	7.5	12	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.068	0.170	0.120	sec
Peak Acceleration	0.088	0.093	0.148	g
Peak Displacement	0.231	0.168	0.180	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.6	7.5	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	3.5	3.0	

Peak Vector Sum: 15.85 mm/s at 0.120 sec

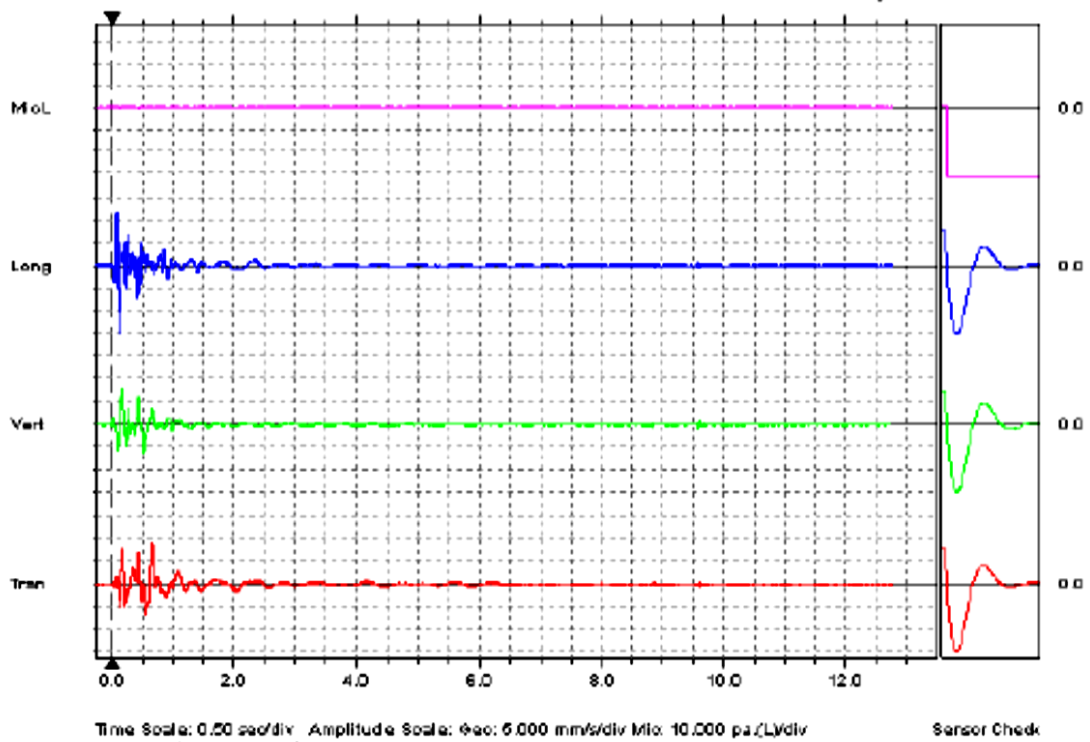
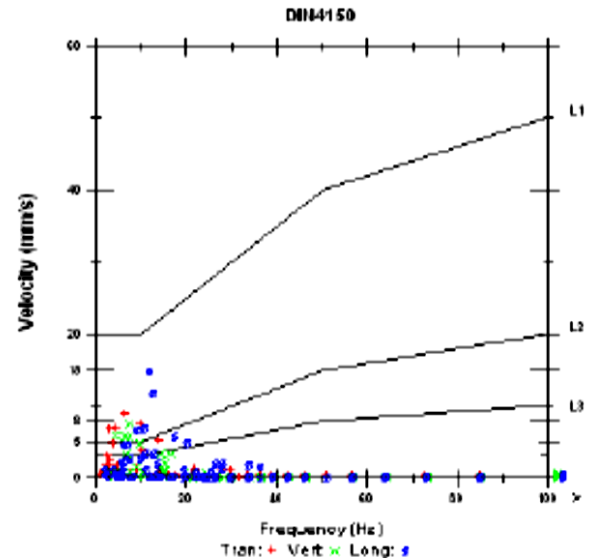


Figura 6.8 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel (FAMESA SAC).

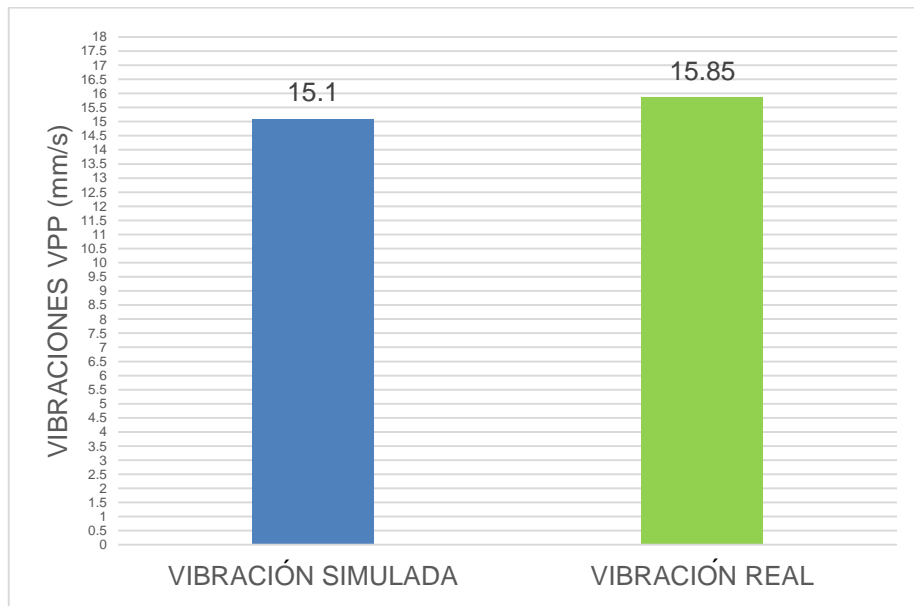


Figura 6.9 Comparación de vibraciones simulada y real.

- **Fragmentación**

Como se puede apreciar en el grafico el análisis resultante de 7 imágenes tomadas antes y durante el minado nos arroja un P80 Resultante 5.61”

$$P80 = \frac{D90 - D75}{3} + D75$$

$$P80 = \frac{6.946 - 4.941}{3} 4.941 = 5.61''$$

Tabla 6.6 Cuadro de Fragmentación (Área de Perforación y Voladura-CDC)

CUADRO DE FRAGMENTACION		
BANCO	Und.	Proyecto 445
<u>HISTOGRAMA:</u>		
Tamaños Minimos	Pulg	0.038
Tamaños Maximos	Pulg	8.649
Block Analis ados	Und	1352
<u>CURVA ACUMULATIVA:</u>		
El 10% Pasa por una Malla	Pulg	1.311
El 75% Pasa por una malla	Pulg	4.941
El 90% Pasa por una malla	Pulg	6.946
P80	Pulg	5.61
<u>TABLA PORCENTUAL</u>		
		100% < a 32.00 Pulg
		100% < a 16 Pulg
		97.88% < a 8 Pulg



Figura 6.10 Medición Fragmentación con Wipfrag - proyecto 450-V2

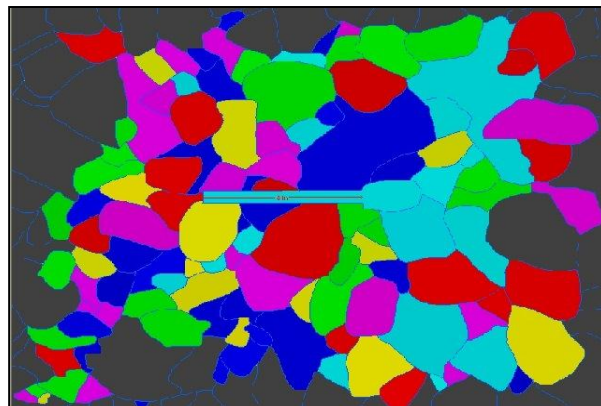


Figura 6.11 Fotografía delimitación de fragmentos (Software Wipfrag 2.3.)

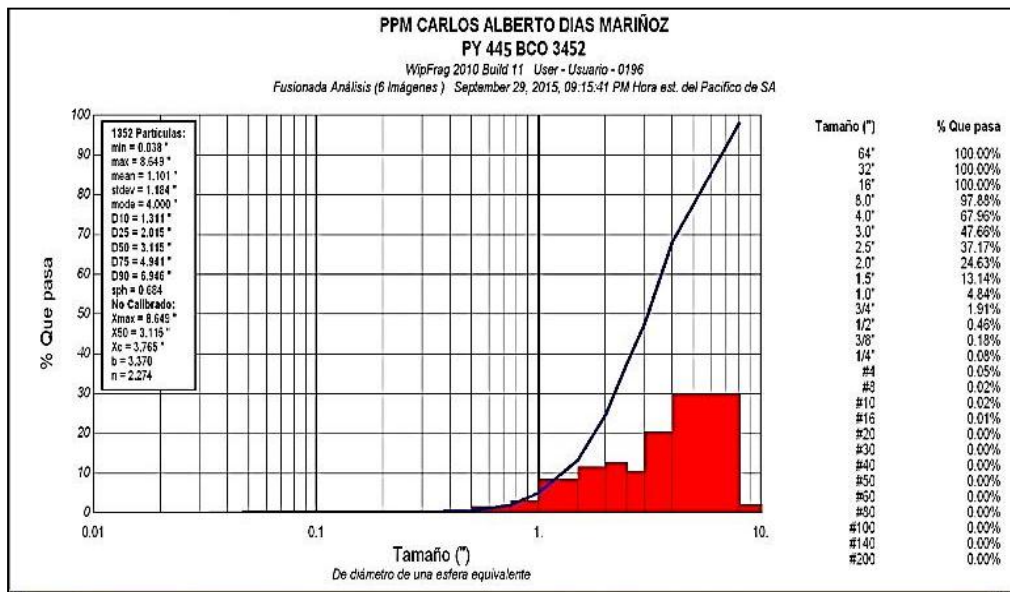


Figura 6.12 Distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3)

6.1.3. Resultados de la prueba de campo N° 3: Proyecto TORO 460-V3

- Costos de perforación y voladura

Tabla 6.7 Costos Proyecto TORO 460-V3.

PERFORACION	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
				CANTIDAD	COSTOS US\$
				Metros perforados	m.
COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$					12,234.20
COSTO UNITARIO DE PERFORACIÓN				0.244	US\$/t
VOLADURA	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
				CANTIDAD	COSTOS US\$
	NITRATO DE AMONIO	kg.	0.66	10282.00	6806.68
	BOOSTERS 1 Lb	uni.	3.80	204	775.20
	FANEL DUAL 17/800 ms	uni.	4.60	204	938.40
	CONECTA DET 0 mS	uni.	3.35	0	0.00
	CONECTA DET 25 mS	uni.	3.35	8	26.80
	CONECTA DET 35 mS	uni.	3.35	1	3.35
	CONECTA DET 42 mS	uni.	3.35	2	6.70
	CONECTA DET 65 mS	uni.	3.35	4	13.40
	LINEA SILENCIOSA x 100 m	m.	0.48	200.00	96.00
	LINEA SILENCIOSA x 500 m	m.	0.19	0	0.00
	FULMINANTE BALISTICO	uni.	0.15	0	0.00
	ARMADA DE MECHA LENTA	uni.	0.15	2	0.30
	CAMARAS DE AIRE	uni.	0.21	471	98.91
	ALQUILER DE CAMION FABRICA	hra.	46.70	10	467.00
	PETROLEO	Gl.	3.00	169	507.00
COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$					9739.74
COSTO UNITARIO VOLADURA				0.195	US\$/t
P&V	COSTO UNITARIO DE P/V			0.439	US\$/t

- **Vibraciones**

Vibración simulada Jk Simblast V 2.0

La velocidad pico partícula (PPV) considerando 195 metros, y teniendo los valores de K y B calculadas en base a los datos del sismógrafo se llega a 14.75 mm/s.

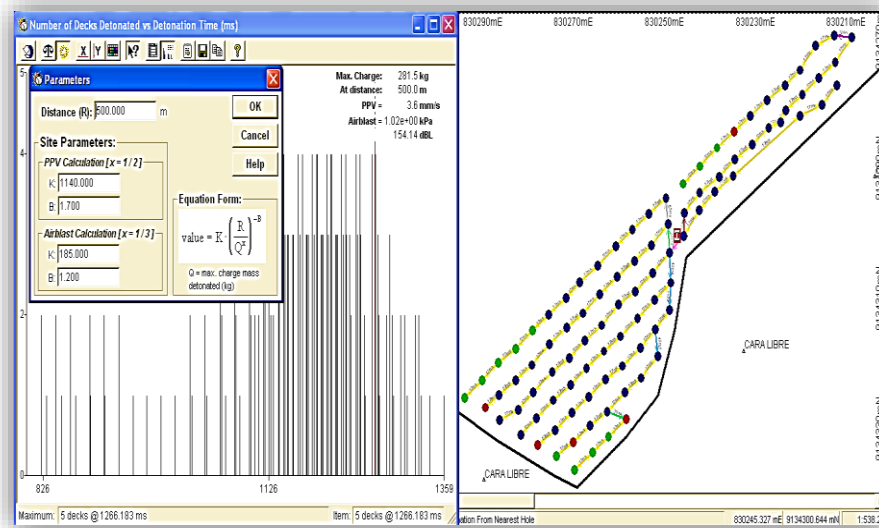


Figura 6.13 Simulación de vibraciones (Software JK Simblast 2.0)

Vibración real

El sismograma de la voladura realizada con 157 taladros de 156 mm de diámetro, donde se utilizó 10,824.00 Kg. De ANFO, el mayor movimiento se registró en el eje de la Onda transversal con 12.80 mm/s. y PPV es de 15.9 mm/s en la Sumatoria de los Vectores y con una frecuencia de 5.8 Hz en la Onda transversal; el Sismógrafo es instalado a 195 m. aproximadamente de la voladura.

Tabla 6.8 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 460-V3

REGISTRO DE MONITOREO DE VIBRACIONES							
EJE ONDA LONGITUDINAL		EJE ONDA VERTICAL		EJE ONDA TRANSVERSAL		Sum. Vectores	Distancia al Sismografo
VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	
mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	m
8.76	7.4	12.7	7.7	12.8	7.5	15.9	195



Event Report

Date/Time Tran at 18:30:54 March 11, 2016
 Trigger Source Geo: 1.01 mm/s
 Range Geo: 254 mm/s
 Record Time 6.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1
 Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Serial Number BE14224 V 10.72-8.17 MiniMate Plus/8
 Battery Level 6.1 Volts
 Unit Calibration December 9, 2015 by Geoinstruments
 File Name __TEMP.EVT

Post Event Notes
 COMPAÑIA MINERA CMD - PROYECTO EL TORO
 FAMESA EXPLOSIVOS SAC
 BANCO 3380
 Distancia al punto de monitoreo 195.9m

Extended Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.006 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	12.8	12.7	8.76	mm/s
ZC Freq	5.8	4.8	5.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.539	0.458	0.694	sec
Peak Acceleration	0.0928	0.0663	0.0663	g
Peak Displacement	0.301	0.512	0.401	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.7	7.4	Hz
Overswing Ratio	3.9	3.6	4.0	

Peak Vector Sum 15.9 mm/s at 0.539 sec

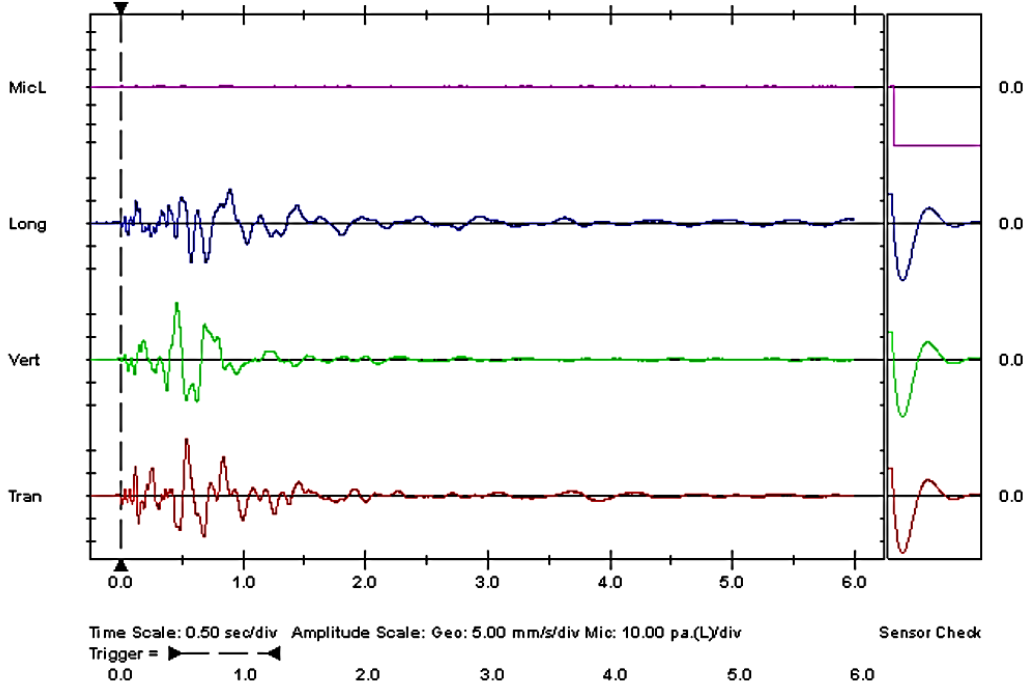
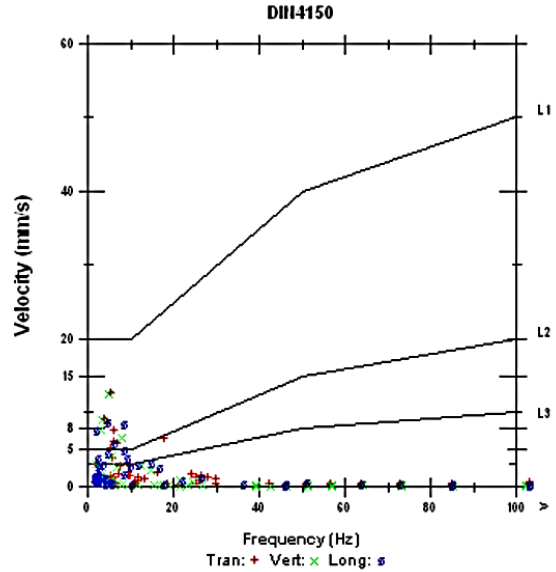


Figura 6.14 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel (FAMESA SAC).

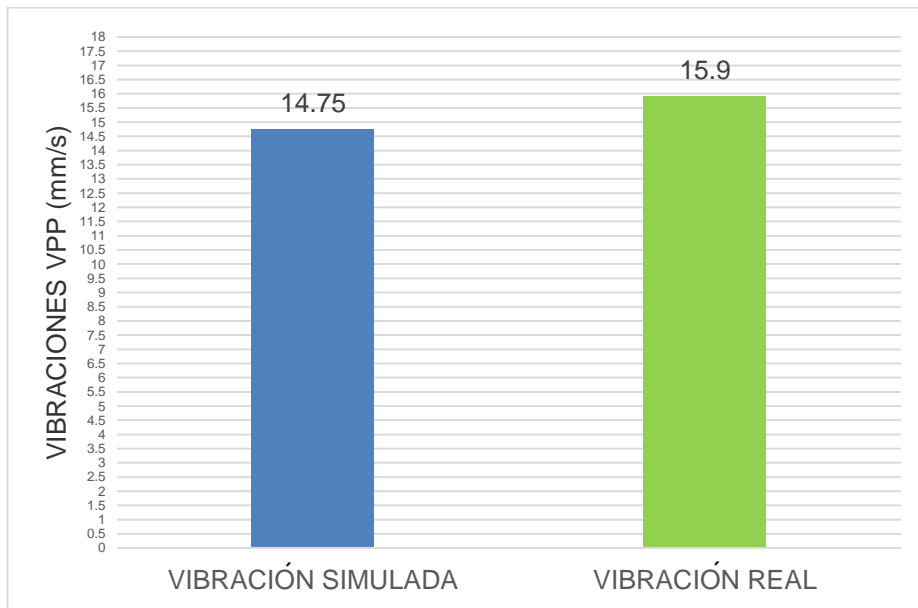


Figura 6.15 Comparación de Vibraciones simulada y real.

- **Fragmentación**

Como se puede apreciar en el grafico el análisis resultante de 11 imágenes tomadas antes y durante el minado nos arroja un P80 Resultante 4.2”

$$P80 = \frac{D90 - D75}{3} + D75$$

$$P80 = \frac{5.635 - 3.465}{3} + 3.464 = 4.20''$$

Tabla 6.9 Cuadro de fragmentación (área de perforación y voladura-CDC)

CUADRO DE FRAGMENTACION		
BANCO	Und.	PROYECTO 450
HISTOGRAMA:		
Tamaños Minimios	Pulg	0.021
Tamaños Maximos	Pulg	7.47
Fotos Analizadas	Pza	11
Block Analizados	Und	14399
CURVA ACUMULATIVA:		
El 10% Pasa por una Malla	Pulg	0.537
El 75% Pasa por una malla	Pulg	3.465
El 90% Pasa por una malla	Pulg	5.635
P80	Pulg	4.2
TABLA PORCENTUAL		
		100% < a 32.00 Pulg
		100% < a 16 Pulg
		83.04% < a 4 Pulg



Figura 6.16 Medición de Fragmentación con Wipfrag - proyecto 460-V3

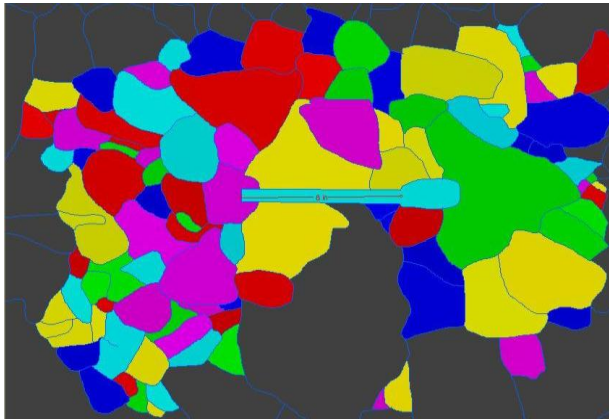


Figura 6.17 Fotografía de la delimitación de fragmentos (Software Wipfrag)

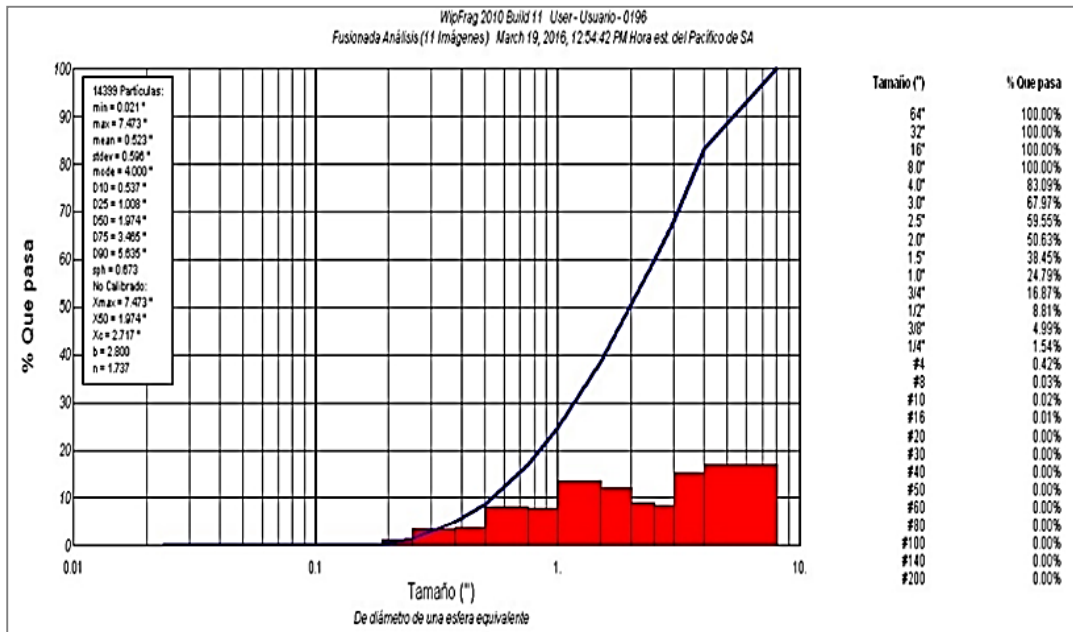


Figura 6.18 Distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3)

6.1.4. Resultados de la prueba de campo N° 4: Proyecto TORO 470-V4

- Costos de perforación y voladura

Tabla 6.10 Costos proyecto 470-V4

PERFORACION	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck		
				CANTIDAD	COSTOS US\$	
	Metros perforados	m.	8.3	608.00	5,046.40	
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				5,046.40	
	COSTO UNITARIO DE PERFORACIÓN			0.208	US\$/t	
VOLADURA	Descripción		U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
					CANTIDAD	COSTOS US\$
	NITRATO DE AMONIO		kg.	0.66	5796.00	3836.95
	BOOSTERS 1 Lb		uni.	3.80	138	524.40
	FANEL DUAL 17/800 ms		uni.	4.60	138	634.80
	CONECTA DET 0 mS		uni.	3.35	2	6.70
	CONECTA DET 25 mS		uni.	3.35	2	6.70
	CONECTA DET 35 mS		uni.	3.35	2	6.70
	CONECTA DET 42 mS		uni.	3.35	2	6.70
	CONECTA DET 65 mS		uni.	3.35	1	3.35
	LINEA SILENCIOSA x 100 m		m.	0.48	0	0.00
	LINEA SILENCIOSA x 500 m		m.	0.19	0	0.00
	FULMINANTE BALISTICO		uni.	0.15	0	0.00
	ARMADA DE MECHA LENTA		uni.	0.15	1	0.15
	CAMARAS DE AIRE		uni.	0.21	207	43.47
	ALQUILER DE CAMION FABRICA		hra.	46.70	10	467.00
	PETROLEO		Gl.	3.00	126	378.00
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				5914.92	
	COSTO UNITARIO DE PERFORACION			0.244	US\$/t	
P&V	COSTO UNITARIO DE P/V			0.452	US\$/t	

- **Vibraciones**

Vibración simulada Jk Simblast V 2.0

Como se puede apreciar la velocidad pico partícula (ppv) considerando 300 mt, y teniendo los valores de K y B calculadas en base a los datos del sismógrafo se llega a 3.3 mm/s.

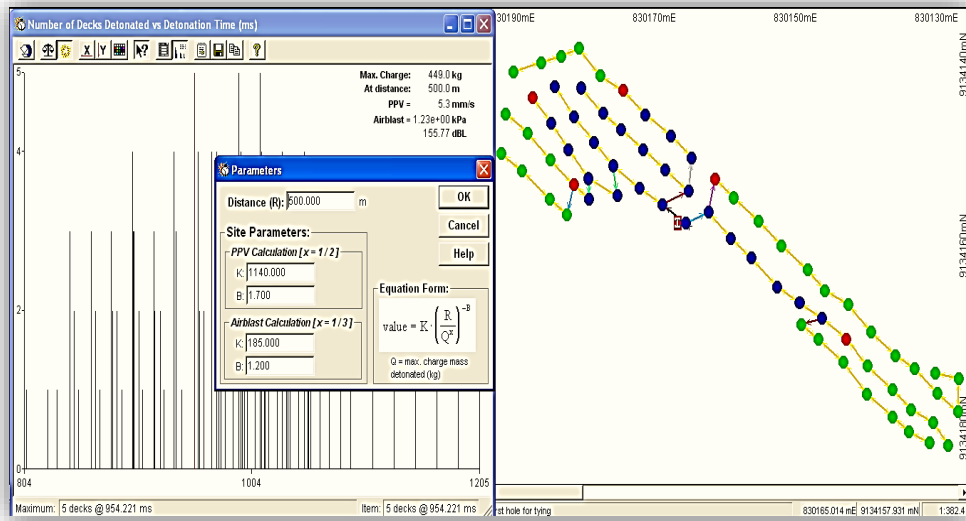


Figura 6.19 Simulación de Vibraciones (Software JK Simblast 2.0)

Vibración real

El sismograma de la voladura realizada con 69 taladros de 156 mm de diámetro, donde se utilizó 6,199.00 Kg. De ANFO, el mayor movimiento se registró en el eje de la Onda longitudinal con 3.30 mm/s. y PPV es de 3.41 mm/s en la Sumatoria de los Vectores y con una frecuencia de 5.8 Hz en la Onda transversal; el Sismógrafo es instalado a 300 m. aproximadamente de la voladura.

Tabla 6.11 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 470-V4.

REGISTRO DE MONITOREO DE VIBRACIONES							
EJE ONDA LONGITUDINAL		EJE ONDA VERTICAL		EJE ONDA TRANSVERSAL		Sum. Vectores	Distancia al Sismografo
VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	
mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	m
3.3	7.4	1.65	7.7	1.52	7.6	3.41	300



Event Report

Date/Time Vert at 18:32:27 March 14, 2016
 Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
 Range Geo: 254 mm/s
 Record Time 12.75 sec (Auto=6Sec) at 1024 sps
 Job Number: 2
 Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Serial Number BE14224 V 10.72-8.17 MiniMate Plus/8
 Battery Level 5.9 Volts
 Unit Calibration December 9, 2015 by Geoinstruments
 File Name __TEMP.EVT

Post Event Notes
 COMPAÑIA MINERA CDM - PROYECTO EL TORO
 FAMESA EXPLOSIVOS SAC
 BANCO 3380 - PROYECTO 519

Extended Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.750 pa.(L) at 5.365 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.52	1.65	3.30	mm/s
ZC Freq	3.2	4.0	3.3	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.281	0.494	0.793	sec
Peak Acceleration	0.0398	0.0398	0.0398	g
Peak Displacement	0.0971	0.0695	0.156	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.6	7.7	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.0	3.7	4.1	

Peak Vector Sum 3.41 mm/s at 0.793 sec

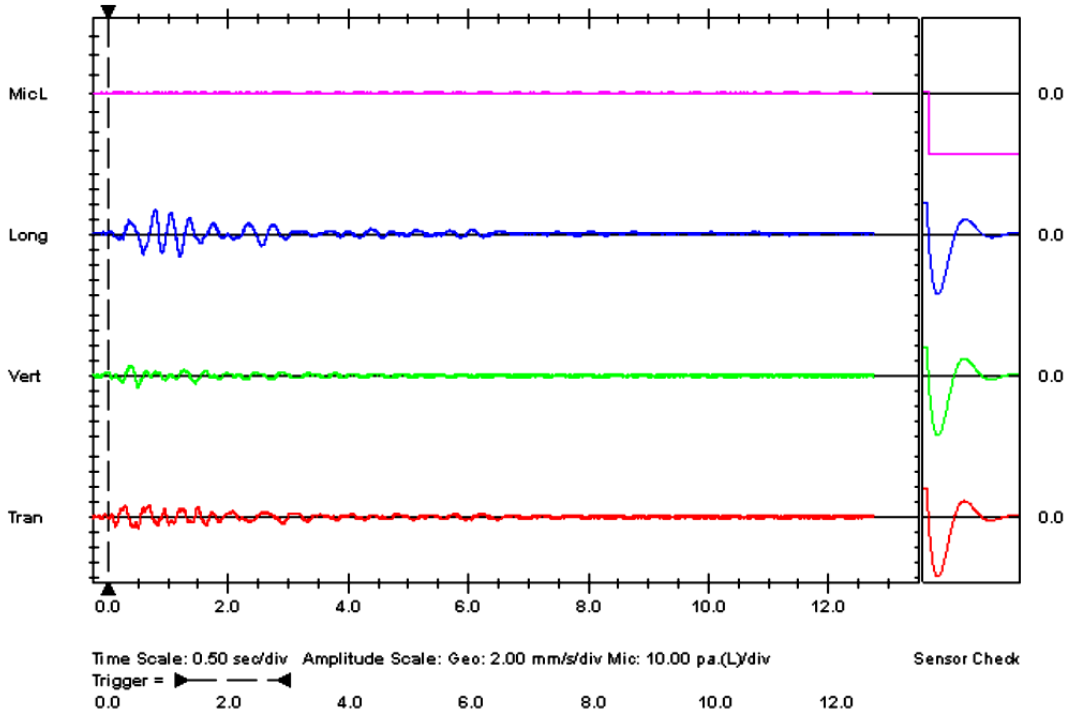
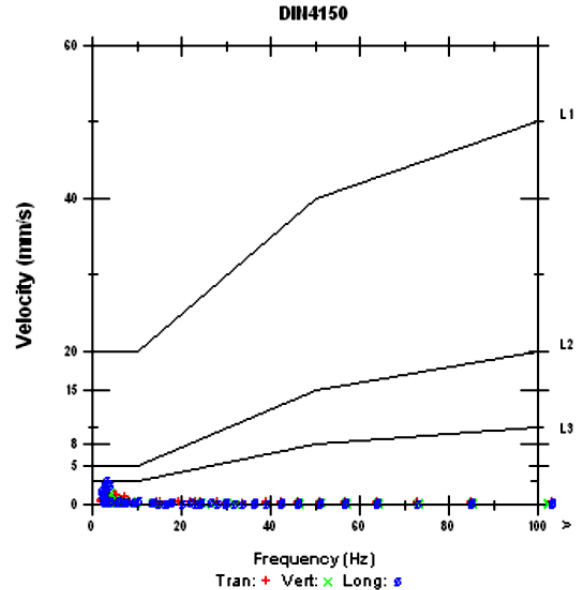


Figura 6.20 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel. (FAMESA SAC)

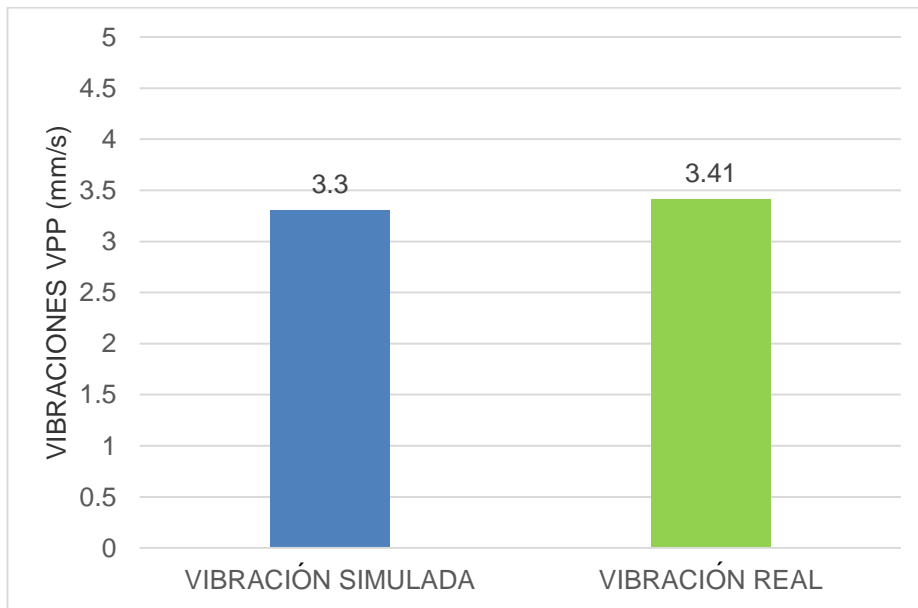


Figura 6.21 Comparación de Vibraciones simulada y real.

Como se puede apreciar en el grafico el análisis resultante de 6 imágenes tomadas antes y durante el minado nos arroja un P80 Resultante 5.78"

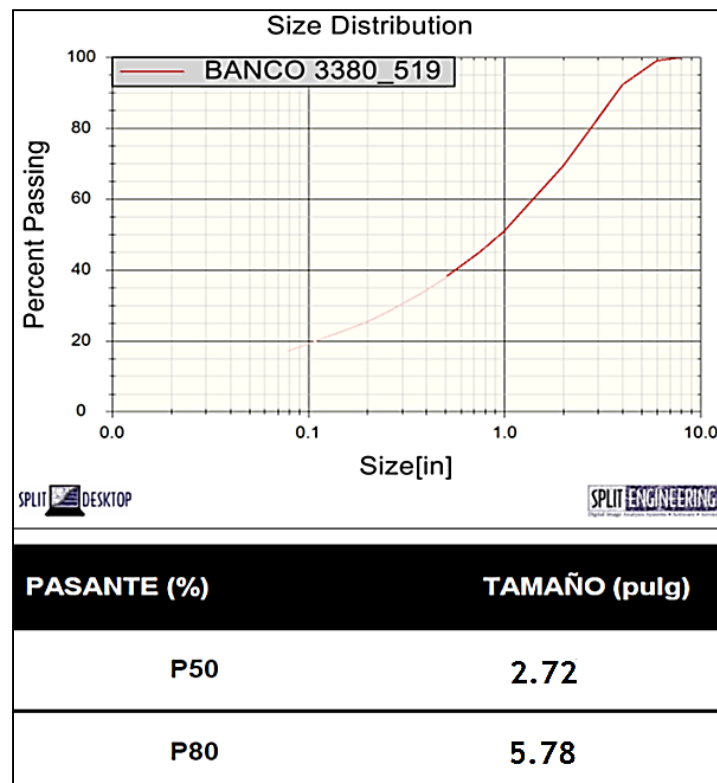


Figura 6.22 Distribución granulométrica (P/V-CDC)

6.1.5. Resultados de la prueba de campo N° 4: Proyecto TORO 480-V5

- Costos de perforación y voladura

Tabla 6.12 Costos Proyecto 480-V5

PERFORACION	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
				CANTIDAD	COSTOS US\$
	Metros perforados	m.	8.3	1,825.00	15,147.50
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				15,147.50
	COSTO UNITARIO DE PERFORACIÓN			0.256	US\$/t
VOLADURA	Descripción	U.M.	C.U.	Voladura con Air deck	
				CANTIDAD	COSTOS US\$
	NITRATO DE AMONIO	kg.	0.66	18582.00	12301.28
	BOOSTERS 1 Lb	uni.	3.80	204	775.20
	FANEL DUAL 17/800 ms	uni.	4.60	204	938.40
	CONECTA DET 0 mS	uni.	3.35	5	16.75
	CONECTA DET 25 mS	uni.	3.35	0	0.00
	CONECTA DET 35 mS	uni.	3.35	8	26.80
	CONECTA DET 42 mS	uni.	3.35	4	13.40
	CONECTA DET 65 mS	uni.	3.35	0	0.00
	LINEA SILENCIOSA x 100 m	m.	0.48	100	48.00
	LINEA SILENCIOSA x 500 m	m.	0.19	500	95.00
	FULMINANTE BALISTICO	uni.	0.15	1	0.15
	ARMADA DE MECHA LENTA	uni.	0.15	0	0.00
	CAMARAS DE AIRE	uni.	0.21	693	145.53
	ALQUILER DE CAMION FABRICA	hra.	46.70	12	560.40
	PETROLEO	Gl.	3.00	435	1305.00
	COSTO TOTAL DE VOLADURA US\$				16225.91
	COSTO UNITARIO DE VOLADURA			0.274	US\$/t
P&V	COSTO UNITARIO DE P/V			0.531	US\$/t

- **Vibraciones**

Vibración simulada Jk Simblast V 2.0

Como se puede apreciar la velocidad pico partícula (ppv) considerando 300 mt, y teniendo los valores de K y B calculadas en base a los datos del sismógrafo se llega a 5.9 mm/s.

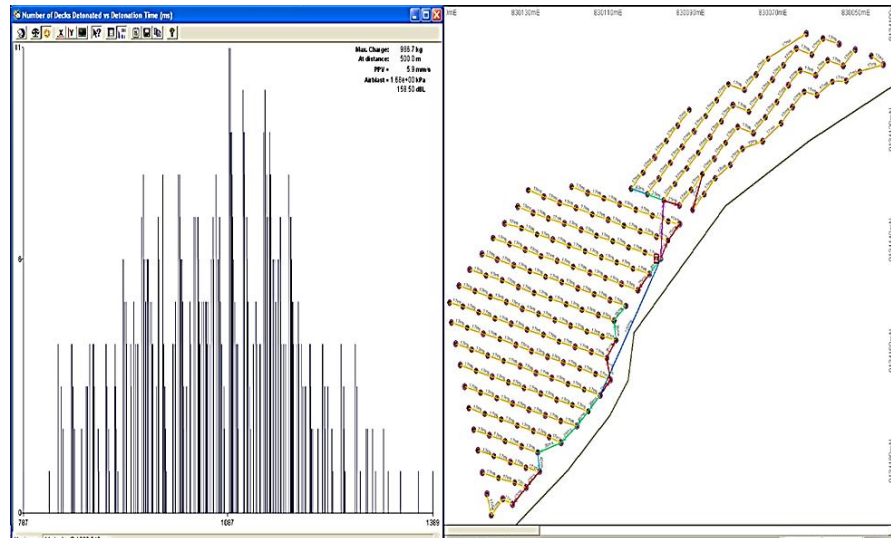


Figura 6.23 Simulación de Vibraciones (Software JK Simblast 2.0)

Vibración real

El sismograma de la voladura realizada con 69 taladros de 156 mm de diámetro, donde se utilizó 20075.3 Kg. De explosivo, el mayor movimiento se registró en el eje de la Onda longitudinal con 3.048 mm/s. y PPV es de 4.19 mm/s en la Sumatoria de los Vectores y con una frecuencia de 5.1Hz en la Onda vertical; el Sismógrafo es instalado a 300 m. aproximadamente de la voladura.

Tabla 6.13 Registro de monitoreo de vibraciones del proyecto 470-V4

REGISTRO DE MONITOREO DE VIBRACIONES							
EJE ONDA LONGITUDINAL		EJE ONDA VERTICAL		EJE ONDA TRANSVERSAL		Sum. Vectores	Distancia al Sismografo
VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	FRECUENCIA	VPP	
mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	m
3.048	4.0	1.52	5.1	2.794	4.0	4.19	300

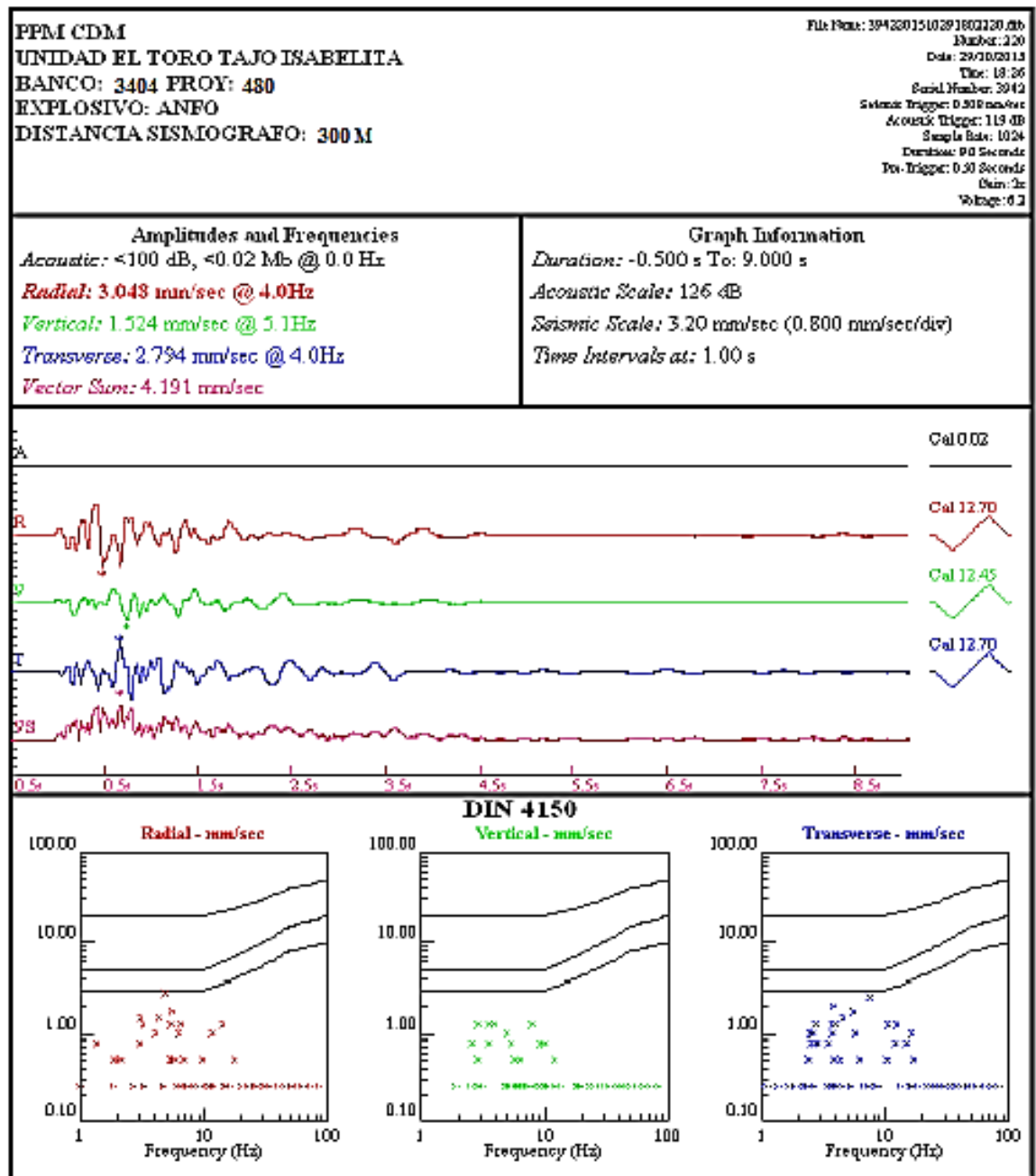


Figura 6.24 Reporte de vibraciones Sismógrafo Instantel (FAMESA SAC).

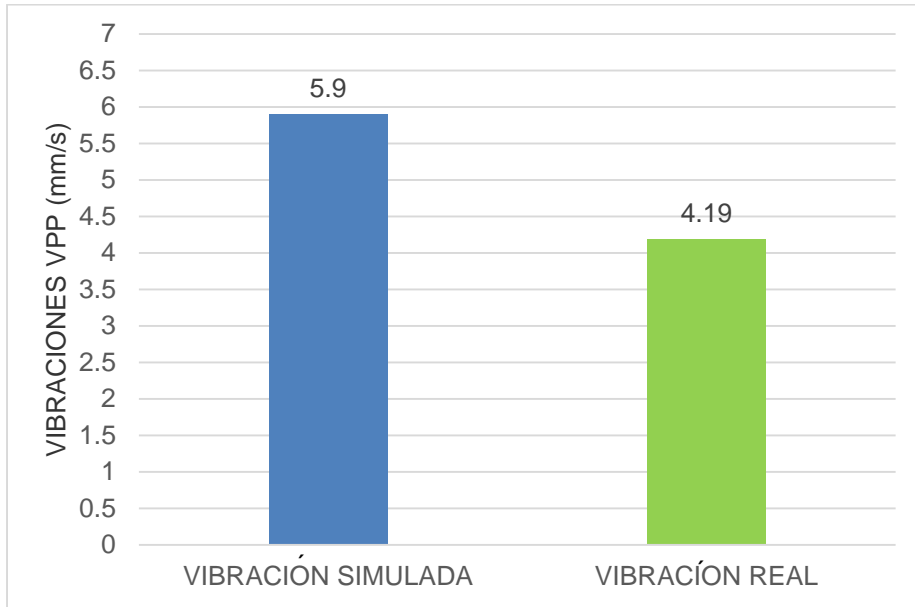


Figura 6.25 Comparación de Vibraciones simulada y real.

• **Fragmentación**

Como se puede apreciar en el grafico el análisis resultante de 6 imágenes tomadas antes y durante el minado nos arroja un P80 Resultante 5.57”

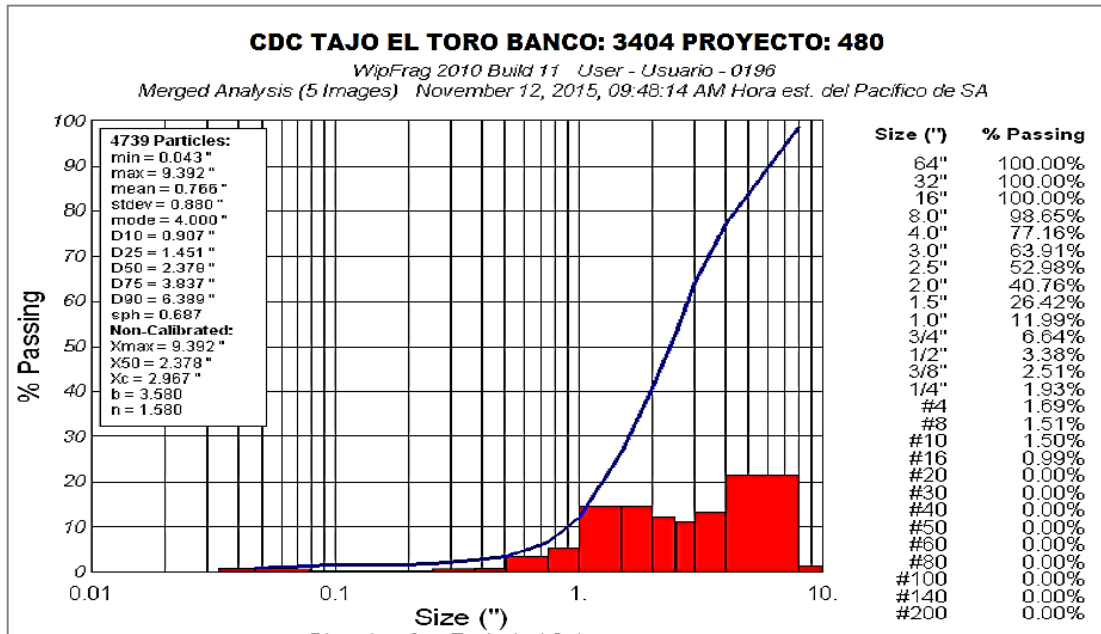


Figura 6.26 Curva de fragmentación (P/V-CDC)

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Efectos de cámaras de aire en la columna explosiva sobre las vibraciones.

En la Figura 7.1 podemos observar los resultados de las vibraciones reales y vibraciones simuladas con el programa Jk Simblast V 2.0.

Para distancias entre 280 y 300 metros, los valores de vibración simulada y real están en promedio de 4.3 y 3.9 mm/s, muestran una desviación estándar de 0.19.

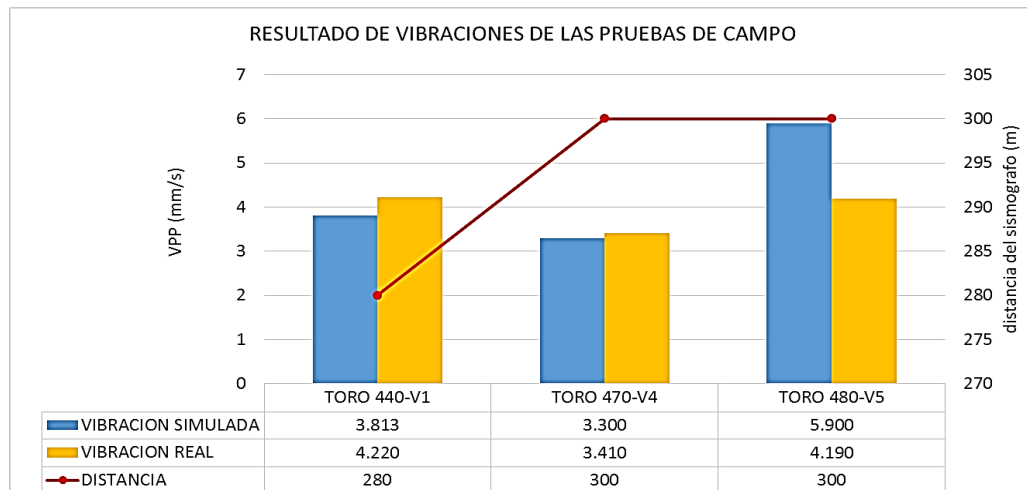


Figura 7.1 Vibraciones teóricas y reales a distancias de 280 y 300 metros.

En la Figura 7.2 podemos observar los resultados de las vibraciones reales y vibraciones simuladas con el programa Jk Simblast V 2.0.

Para distancias entre 130 y 195 metros, los valores de vibración simulada y real están en promedio de 14.9 y 15.8 mm/s, muestran una desviación estándar de 0.47.

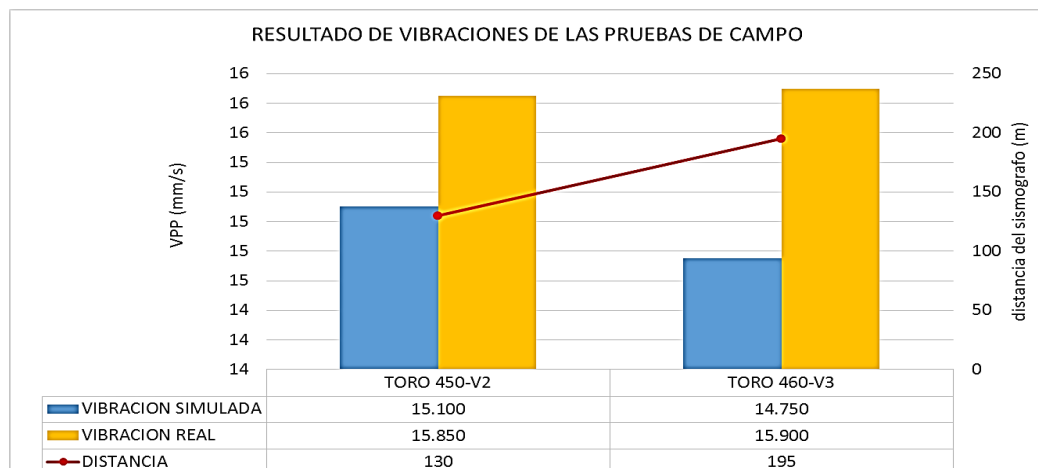


Figura 7.2 Vibraciones teóricas y reales a distancias entre 130 y 195 metros.

En la Figura 7.3 podemos ver las vibraciones de las cinco experiencias que se realizaron para comparar las vibraciones, podemos observar que en todos los casos están bajo el límite máximo de la norma peruana que es de 25 mm/s

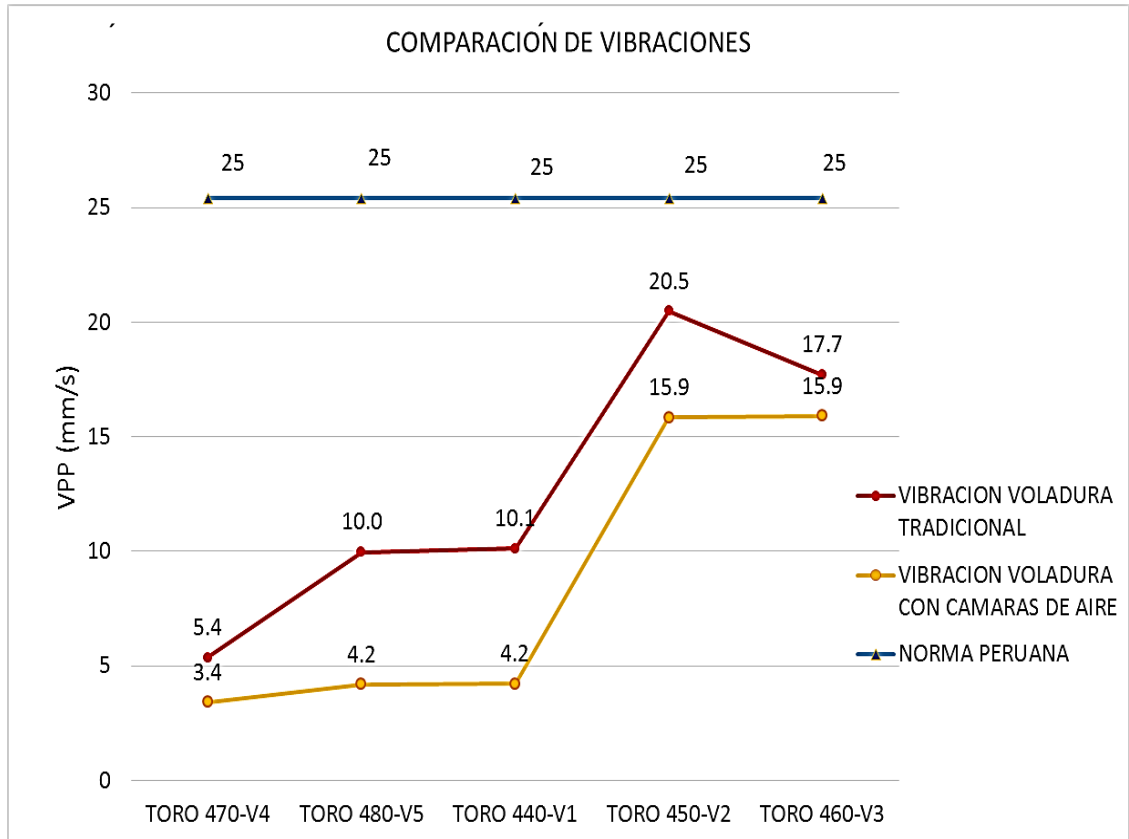


Figura 7.3 Comparación de las vibraciones con y sin cámaras de aire.

En la Tabla 7.1 podemos apreciar que el uso de las cámaras de aire disminuye en un 37% las vibraciones, otro factor importante es que se destaca son las percepciones que significan esta reducción de vibraciones sobre las comunidades aledañas.

Tabla 7.1 Diferencia entre la voladura convencional y cámaras de aire.

Proyecto	VIBRACION VOLADURA TRADICIONAL	VIBRACION VOLADURA CON CAMARAS DE AIRE	% diferencia
TORO 470-V4	5.360	3.410	36%
TORO 480-V5	9.970	4.190	58%
TORO 440-V1	10.120	4.220	58%
TORO 450-V2	20.480	15.850	23%
TORO 460-V3	17.700	15.900	10%
		Promedio	37%

7.2. Efectos en los costos y tamaño de partícula.

El uso de las cámaras de aire no afecta negativamente las otras variables respuesta que son importantes para los procesos posteriores y para la productividad del proceso de perforación y voladura; en cambio afectan positivamente en un menor p80, tal como se puede ver en el gráfico el p80 varía de 4.2 a 5.8 pulgadas con un promedio de 5.31.

Otra variable importante a evaluar es el costo específico por tonelada de mineral volado, este varía entre 0.44 a 0.53 US\$/t, con un promedio de 0.48.

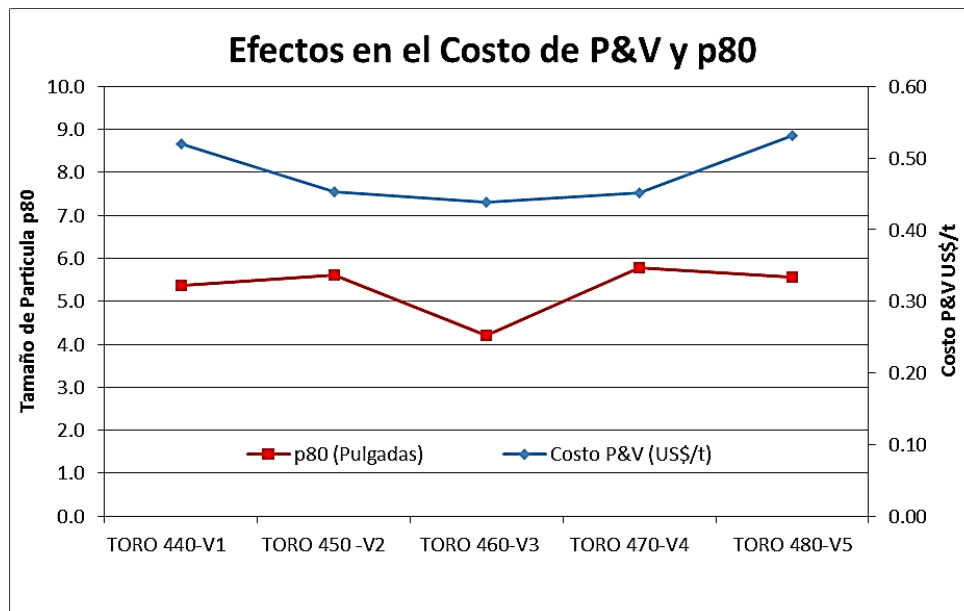


Figura 7.4 4 Efectos del uso de las cámaras de aire en el costo de P&V y p80.

CONCLUSIONES

- El uso de cámaras de aire en la columna explosiva reduce las vibraciones en un 37% frente a la voladura convencional que no utiliza cámaras de aire. Esta importante reducción de las vibraciones es fundamental porque evita la percepción de las comunidades aledañas sobre el daño de sus viviendas.
- EL efecto del uso de cámaras de aire sobre la distribución granulométrica producto de la voladura p80, es favorable, y se mantiene en el valor de 5.31 pulgadas en promedio. Dicha variable impacta positivamente en los procesos de carguío y acarreo y finalmente en la recuperación metalúrgica.
- Los costos unitarios para los procesos de perforación y voladura son menores con uso de cámaras de aire, debido al menor consumo específico por columna explosiva. El promedio esta alrededor de 0.48 US\$/t muy por debajo de costos estándar de otras compañías que bordean los 0.8 US\$/t en yacimientos similares al de las pruebas.

RECOMENDACIONES

- Se debe estandarizar el uso de las cámaras de aire en la unidad minera Corporación del Centro SAC, para minimizar el nivel de vibraciones y cumplir la normativa peruana de vibraciones que está basada en la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras de 25 mm/s de velocidad pico partícula máximo. Además Permite obtener buena fragmentación reduciendo el P80 y minimizar los costos de operaciones mina, lográndose optimizar la rentabilidad de la empresa minera.

REFERENCIAS

- ✓ Araya. E. 2007. Aplicación de cámaras de aire en minas Los Colorados (Informe técnico). Atacama: Orica.
- ✓ Bernaola J., Castilla J, Herrera J, Perforación y Voladura de Rocas en Minería, Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid 2013.
- ✓ Carta Geológica Nacional – Ingemmet, 2016.
- ✓ Cebrián B. Control de estabilidad de taludes mediante voladuras de contorno – cámara de aire. (Artículo científico).2007.
- ✓ Cebrián, B. Técnicas especiales de voladura (Informe técnico). 2010.
- ✓ Chiappeta, R. 2004. Optimización de Voladura con Cámaras de Aire (Informe técnico). New Orleans: ISEE.
- ✓ Cruces J. 2009. Optimización de la fragmentación de roca en mina y su influencia en los circuitos de trituración y molinos (Investigación). Peru: PERUMIN 30 CONVENCION MINERA.
- ✓ EXSA S.A (2001). “Manual Práctico de Voladura” Perú. Lima.
- ✓ International Society of Explosives Engineers (ISEE), Manual del Especialista en Voladuras, Cleveland, Onio. USA, International Society of Explosives Engineers
- ✓ Pérez, A. 2010. Análisis Comparativo de la Reducción de Vibraciones en la Cantera de Cerro Blanco, durante Voladuras; Utilizando Carga Tradicional de Explosivo y el Uso de Taponex (Tesis). Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- ✓ Montoya I, (2002). “Modelos Predictivo de Fragmentación” Enaex S.A. Buenos Aires. Argentina
- ✓ Salas .2011. Voladura de rocas en bancos. Santiago: Enaex
- ✓ Konya. 1988. Diseño de Voladura de Rocas. Madrid: CUICATL.