

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL**

**DE INGENIERÍA DE MINAS**



**“OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE VOLADURA PRIMARIA  
APLICANDO EL USO DE MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA EN EL  
TAJO FERROBAMBA EN LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**ALEJANDRO DONAIRES SORIA**

**EDDY NIXON FERNÁNDEZ AMPUERO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**ABANCAY – PERÚ**

**2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**Tesis**

**“OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE VOLADURA PRIMARIA APLICANDO  
EL USO DE MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA EN EL TAJO  
FERROBAMBA EN LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS”**

Presentado por **ALEJANDRO DONAIRES SORIA Y EDDY NIXON FERNÁNDEZ**  
**AMPUERO**, para optar el Título de:

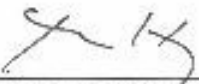
**INGENIERO DE MINAS**

Sustentado y aprobado el jueves 09 de mayo del 2019 ante el jurado:


**Presidente:**

  
Ing. Edgar Cristian Huacac Parfán


**Primer Miembro:**

  
Ing. Rodolfo Andrés Matos Ojeda

**Segundo Miembro:**

  
Ing. Giovanni Frisancho Triveño

**Asesor:**

  
Mg. Franklin Aguirre Huillcas

## AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Empresa Exsa S.A, por darnos la oportunidad de desenvolvimiento, así como a los Ingenieros y Supervisores de operaciones por habernos brindado todo el apoyo y la confianza necesaria para realizar el trabajo de investigación en las pruebas de campo de los proyectos de voladura , en la etapa de explotación de la unidad minera Las Bambas.

A mi asesor de tesis Ing. Franklin Aguirre Huillcas por su orientación, colaboración y enseñanzas compartidas.

Así mismo quiero manifestar un agradecimiento a los Ingenieros Edgar C. Huacac Farfán, Giovanni Frisancho Triveño, Rodolfo A. MatTos Ojeda y Merardo Ramos Huaccharaqui quienes supieron brindarnos todo su apoyo, conocimientos y experiencias.

A los docentes, compañeros y amigos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, por los conocimientos impartidos dedicados a la formación de profesionales altamente competitivos.

A toda mi familia en general, quienes nos acompañaron en toda nuestra infancia y juventud apoyándonos en todo momento para lograr nuestras metas.

A la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac por haber aceptado ser parte de ella y estudiar y estudiar la carrera de Ingeniería de Minas.



## **DEDICATORIA**

A Dios, que ha sido mi fuerza, por darme salud para lograr mis objetivos en mi vida personal y Profesional.

A mis queridos padres Alejandro Donaires Huamán, Claudina Soria Nieto, hermanos Rolling Donaires Soria, Rubén Donaires Soria y Thania Donaires Soria, abuelita Zoila Nieto Mendoza y amigos; por su apoyo, cariño, que siempre estuvieron a nuestro lado incondicionalmente. A mis compañeros de clases que compartieron las aulas conmigo en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.



## ÍNDICE DEL CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRAC .....	3
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>4</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.2. ENUNCIADO.....	4
1.2.1. General .....	4
1.2.2. Específicos .....	4
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.3.1. General .....	5
1.3.2. Específicos .....	5
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	5
1.5. DELIMITACIONES .....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
3.1. ANTECEDENTES.....	7
2.2. MARCO REFERENCIAL.....	8
2.2.1. Ubicación .....	8
2.2.2. Localización Geográfica y Política .....	8
2.2.3. Vías de Acceso .....	10
2.2.4. Aspectos Geológicos.....	11
2.2.4.1. Geología Regional.....	11
2.2.4.2. Geomorfología.....	12
2.2.4.3. Litología de la zona.....	12



2.2.4.4. Geología estructural.....	13
2.2.4.4. Geología local.....	13
2.2.4.4.1. Ferrobamba.....	13
2.2.5. PRODUCCIÓN MINA LAS BAMBAS.....	16
2.2.5.1. Dimensionamiento de la Mina Las Bambas.....	17
2.2.5.2. Ubicación de componentes Mina Las Bambas.....	17
2.2.6. COMPONENTES DE OPERACIÓN LAS BAMBAS.....	18
2.2.6.1. Planta concentradora.....	18
2.2.6.2. Chancado.....	19
2.2.6.3. Faja transportadora terrestre.....	19
2.2.6.4. Molienda.....	20
2.2.6.5. Área de flotación.....	21
2.2.6.6. Relaves.....	21
2.2.7. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN MINA LAS BAMBAS.....	22
2.2.7.1. Diseño del Tajo Ferrobamba.....	22
2.2.8. PROCESOS OPERATIVOS DE MINADO.....	22
2.2.8.1. Perforación.....	22
2.2.8.2. Perforación por rotación.....	22
2.2.8.2.1. Equipos de perforación.....	23
2.2.8.2.2. Perforación a talud final.....	23
2.2.8.2.3. Mallas de perforación y tipos de taladros.....	24
2.2.8.2. Voladura de rocas en el tajo Ferrobamba.....	24
2.2.8.2.1. Camión Mezclador Sistema Vaciable FOD-860 (Q-16).....	24
2.2.8.2.2. Camión Fábrica Sistema Bombeable C6F-842 (Q-18).....	25
2.2.8.3. Carguío de mineral.....	26
2.2.8.4. Acarreo – Transporte.....	27
2.2.9. MECÁNICA DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA.....	28
2.2.9.1. Proceso de fragmentación de la roca.....	29
2.2.9.2. Etapas del proceso de fracturamiento de rocas.....	29
2.2.9.3. Primera fase fracturas radiales (Brisance).....	29

2.2.9.3. Segunda fase Empuje hacia Adelante (Heave) .....	30
2.2.9.4. Tercera fase Fragmentación.....	31
2.2.10. FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN .....	31
2.2.10.1. Propiedades básicas de las ondas .....	32
2.2.10.2. Tipos de ondas en vibraciones .....	33
2.2.10.2.1. Onda Longitudinal - Onda de Compresión (P) .....	33
2.2.10.2.2. Onda Transversal (S):.....	34
2.2.10.2.3. Onda de Superficie .....	34
2.2.10.3. Onda aérea.....	35
2.2.10.3.1. Criterio de daño.....	35
2.2.11. VELOCIDAD PICO PARTICULA.....	36
2.2.11.1. Efectos de la Voladura .....	37
2.2.11.2. Análisis de la Velocidad Pico Partícula.....	37
2.2.11.3. Análisis de Frecuencias .....	37
2.2.11.4. Ecuación de la Velocidad Pico Partícula.....	37
2.2.11.4.1. Modelo General (Devine y Duvall, 1980) .....	38
2.2.12. NORMATIVA DE VIBRACIÓN INTERNACIONAL.....	39
2.2.12.1. Norma Alemana – DIN 4150.....	40
2.2.12.2. Normativa Americana USBM RI8507 .....	40
2.2.12.3. Normativa Americana OSM 817.67 .....	42
2.2.12.4. NORMATIVA PERUANA: GUIA AMBIENTAL PARA LA PERFORACION Y VOLADURA EN OPERACIONES MINERAS 1995 .....	43
2.2.13. PARÁMETRO DE DISEÑO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA.....	43
2.2.13.1. Burden .....	44
2.2.13.2. Espaciamiento.....	44
2.2.13.3. Sobreperforación.....	45
2.2.13.4. Longitud de taco (T).....	46
2.2.13.5. Altura de banco (H).....	46
2.2.14. CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EXPLOSIVA.....	46
2.2.14.1. Carga de fondo.....	46
2.2.14.2. Carga de columna .....	47

2.2.14.2. Cargas segmentadas o espaciadas .....	47
2.2.14.3. Carga específica (CE).....	47
2.2.14.4. Estimación de cargas.....	48
2.2.14.5. Volumen de explosivo.....	48
2.2.14.6. Factor de carga (FC).....	48
2.2.14.7. Factor de Potencia.....	48
2.2.14.8. Tonelaje roto.....	49
2.2.14.9. Carga específica para cada taladro en voladuras de varias hileras.....	49
2.2.14.10. Perforación específica .....	50
2.2.14.11. Densidad de Carga Lineal (DCL) .....	50
2.2.15. PROCESOS FISICOQUÍMICOS DE LOS EXPLOSIVOS .....	50
2.2.15.1. Combustión.....	50
2.2.15.2. Deflagración .....	51
2.2.15.3. Detonación.....	51
2.2.16. PROPIEDADES DE DETONACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS.....	51
2.2.16.1. Velocidad de detonación .....	51
2.2.16.2. Presión de detonación .....	52
2.2.16.3. Potencia .....	53
2.2.16.4. Energía (calor de reacción).....	54
2.2.17. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS EXPLOSIVOS.....	54
2.2.17.1. Densidad del Explosivo.....	54
2.2.17.2. Resistencia al agua.....	55
2.2.17.3. Humos .....	55
2.2.17.4. Flamabilidad .....	56
2.2.17.5. Sensitividad .....	56
2.2.18. ACCESORIOS DE VOLADURA .....	57
2.2.18.1. Cordón detonante.....	57
2.2.18.2. Conector Bidireccional.....	57
2.2.18.3. Detonador no eléctrico (Conector Unidireccional de Superficie).....	58
2.2.18.4. Detonador Electrónico DigiShot Plus .....	60



2.2.19. AGENTES DE VOLADURA .....	61
2.2.19.1. Booster de Pentolita .....	61
2.2.19.2. Nitrato de amonio .....	62
2.2.19.3. ANFO.....	63
2.2.19.4. ANFO Pesado .....	64
2.2.19.5. Emulsión explosiva .....	65
2.2.19.5.1. Características de la emulsión matriz .....	66
2.2.19.6. Emulsión Gasificable .....	66
2.2.19.7. Solución Gasificante (Nitrito de Sodio) .....	66
2.2.19.7.1. Propiedades y Beneficios .....	66
2.2.20. MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (ANFO PESADO GASIFICADO) .....	67
2.2.20.1. Sensibilización de la Emulsión .....	69
2.2.21. FACTOR DE ESPONJAMIENTO PARA UN EXPLOSIVO GASIFICABLE .....	69
2.2.21.1. Factor de Esponjamiento Teórico (Fe Teórico Campo) .....	69
2.2.21.2. Factor de Esponjamiento en Campo .....	69
2.2.21.3. Eficiencia en campo, del factor de esponjamiento (% K.) .....	70
2.2.21.4. Ajuste del factor de esponjamiento teórico en campo.....	70
2.2.21.5. Cálculo de longitud de carga con mezcla explosiva gasificable para cualquier longitud de carga final de diseño .....	70
2.2.22. ÍNDICADORES E ÍNDICE EN FRAGMENTACIÓN GLOBAL .....	71
2.2.22.1. Fragmentación en rango .....	71
2.2.22.2. Fragmentación fuera de rango .....	71
2.2.22. LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL PARA AGENTES QUÍMICOS .....	71
2.2.22.1. Tipos de límites.....	71
2.2.22.2. TWA: Media Moderada en el Tiempo (Time Weighted Average).....	71
2.2.22.3. STEL: Exposición de Corta Duración: Short Time Exposure Level .....	72
2.2.22.4. Ceiling. Nivel Techo de Exposición .....	72
2.2.23. PROCESO DE VOLADURA ELECTRÓNICA DIGISHOT PLUS.....	72
2.2.24. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SPLIT-DESKTOP.....	73
2.2.25. EQUIPO MICROTRAP (VOD/DATA RECORDER) .....	75
2.2.25.1. Ejecución de pruebas de muestras de Explosivos .....	75



2.2.25.2. Ubicación, instalación y encendido del equipo.....	75
2.2.26. EQUIPO DETECTOR MULTIGÁS.....	76
2.2.27. EQUIPO MEDICIÓN DE VIBRACIONES (SISMÓGRAFO) .....	77
2.2.28. SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL.....	79
2.2.28.1. Seguridad en primado de taladros .....	79
2.2.28.2. Seguridad en carguío de taladros .....	79
2.2.28.3. Seguridad en tapado de taladros .....	80
2.2.28.4. Seguridad en amarre electrónico.....	80
2.2.28.5. Seguridad en el uso de emulsiones.....	81
2.2.28.6. Seguridad en el carguío con camiones mezcladores .....	81
2.2.28.6.1. Sensores de alta y baja presión.....	81
2.2.28.6.2. Sensores de temperatura .....	82
2.2.28.6.3. Discos de ruptura.....	82
2.2.29. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS. (MARCO CONCEPTUAL) .....	82
2.2.29.1. Banco o cara .....	82
2.2.29.2. Cebo .....	83
2.2.29.3. Decibel (dB) .....	83
2.2.29.4. Detonador .....	83
2.2.29.5. Emulsión.....	83
2.2.29.6. Explosivos .....	83
2.2.29.7. Explosivo potente.....	83
2.2.29.8. Frecuencia .....	83
2.2.29.9. Gases .....	83
2.2.29.10. Humos .....	84
2.2.29.11. Material peligroso .....	84
2.2.29.12. Mina .....	84
2.2.29.13. Mineral .....	84
2.2.29.14. Minería a cielo abierto.....	84
2.2.29.15. Peligro .....	84
2.2.29.16. Proceso de voladura .....	84

2.2.29.17. Riesgo.....	84
2.2.29.18. Ruido.....	85
2.2.29.19. Software.....	85
2.2.29.20. Sonido .....	85
2.2.29.21. Vibración .....	85
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>86</b>
<b>DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>86</b>
3.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES .....	86
3.1.1. Variables Independientes .....	86
3.1.2. Variables Dependientes.....	86
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	86
3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	87
3.3.1 Hipótesis General.....	87
3.3.2. Hipótesis Específico.....	87
3.4. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	87
3.4.1. Tipo y nivel de la investigación.....	87
3.4.2. Método y diseño investigación .....	87
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	87
3.6. PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	88
3.6.1. Primera etapa.....	88
3.6.1.1. Antes del proceso de carguío de taladros .....	88
3.6.1.2. Durante el proceso de carguío de taladros y detonación .....	88
3.6.2. Segunda etapa.....	88
3.6.2.1. Antes del proceso de carguío de taladros .....	88
3.6.2.2. Durante el proceso de carguío de taladros y detonación .....	89
3.6.3. Tercera etapa .....	89
3.7. MATERIAL DE INVESTIGACIÓN .....	89
3.7.1. Instrumentos de investigación .....	89

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>91</b>
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>91</b>
<b>4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>91</b>
4.1.1. MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (HEAVY ANFO GASIFICADO) .....	91
4.1.1.1. Características del diseño de carga con mezcla explosiva gasificada (HA-G) .....	91
4.1.1.2. Cálculo y control de densidad en gabinete .....	91
4.1.1.3. Control de nitrito de sodio en solución – reactivo limitante.....	94
4.1.1.3.1. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.10% de solución gasificante .....	94
4.1.1.3.2. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.12% de solución gasificante .....	95
4.1.1.4.3. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.14% de solución gasificante .....	96
4.1.1.4.4. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.16% de solución gasificante .....	97
4.1.1.4.5. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.20% de solución gasificante .....	98
4.1.1.4.6. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.30% de solución gasificante .....	99
4.1.1.4. Calibración del Camion Mezclador MOD 030.....	100
4.1.1.4.1. Calibración para el nitrato de amonio .....	100
4.1.1.4.2. Calibración para el Slurrex G (emulsión G) .....	102
4.1.1.5. Control de densidades en campo con Camión Mezclador .....	103
<b>4.1.2. DESARROLLO DE PRUEBAS EN LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS</b> .....	<b>104</b>
<b>4.1.2.1. PRUEBA DE VOLADURA 01: PROYECTO (227) - NIVEL 3655 (ME-73G)</b> ...105	
4.1.2.1.1. Clasificación del macizo rocoso en la zona de Mini Tajo .....	105
4.1.2.1.3. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3655-227 ...	106
4.1.2.1.4. Densidad de carga lineal (kg/m) del proyecto de voladura primaria 3655-227 ...	108
4.1.2.1.5. Longitud total del taladro ( $L_t$ ) del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	109
4.1.2.1.6. Volumen roto por taladro del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	109
4.1.2.1.7. Longitud de carga total por taladro ( $L_{cT}$ ) del proyecto de voladura 3655-227 ....	109
4.1.2.1.8. Factor de esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) para el proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	110
4.1.2.1.8.1. Factor de esponjamiento teórico proyecto de voladura primaria 3655-227 ..	110



4.1.2.1.8.2. Factor de esponjamiento proveniente de datos de campo proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	111
4.1.2.1.8.3. Cálculo de la eficiencia de esponjamiento en campo (K) proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	111
4.1.2.1.8.4. Factor de esponjamiento efectivo ( $F_{e\text{fectivo}}$ ) proyecto 3655-227 .....	111
4.1.2.1.8.5. Cálculo de longitudes variables de carga según k calculado proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	112
4.1.2.1.9. Carga total por taladro ( $Q_c$ ) del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	112
4.1.2.1.10. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura primaria 3655-227 .....	113
4.1.2.1.11. Volumen total arrancado del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	113
4.1.2.1.12. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	113
4.1.2.1.13. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	113
4.1.2.1.14. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto de voladura primaria 3655-227 .....	114
4.1.2.1.15. Porcentaje y cantidad de nitrito de sodio utilizado para el proyecto 3655-227 ..	115
4.1.2.1.15.1. Cantidad de nitrito de sodio utilizado para el Proyecto 3655-227 .....	115
4.1.2.1.16. Reporte de Voladura Electrónica (digishot plus) proyecto 3655-227 .....	115
4.1.2.1.16.1. Diseño de Secuencia Electrónica proyecto de voladura primaria 3655: 227-228 .....	116
4.1.2.1.16.2. Línea de Iso-Tiempos proyecto de voladura primaria 3655: 227-228 .....	117
4.1.2.1.16.3. Desplazamiento de Material proyecto de voladura primaria 3655: 227-228 .....	117
4.1.2.1.16.4. Burden – Relief proyecto de voladura primaria 3655: 227-228 .....	118
4.1.2.1.16. Reporte de Velocidad de Detonación proyecto 3655-227 .....	118
4.1.2.1.17. Registro de Vibraciones (sismografo py. 3655 – 227) .....	119
4.1.2.1.18. Análisis de Fragmentación proyecto 3655-227 .....	120
4.1.2.1.19. Medición de Gases proyecto 3655-227 .....	120
<b>4.1.2.2. PROYECTO (228) - NIVEL 3655 AP-73 (HA73) .....</b>	<b>122</b>
4.1.2.2.1. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3655-228...	122
4.1.2.2.2. Diseño de carga del proyecto de voladura primaria 3655-228.....	124



4.1.2.2.3. Longitud de carga total por taladro ( $L_{CT}$ ) del proyecto de voladura primaria 3655-228 .....	124
4.1.2.2.4. Densidad de carga lineal del proyecto de voladura primaria 3655-228.....	124
4.1.2.2.5. Carga total por taladro del proyecto de voladura primaria 3655-228 .....	125
4.1.2.2.6. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura primaria 3655-228 .....	125
4.1.2.2.7. Volumen total arrancado por proyecto del proyecto de voladura 3655-228.....	125
4.1.2.2.8. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3655-228.....	125
4.1.2.2.9. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3655-228 .....	125
4.1.2.2.10. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto de voladura primaria 3655-228 .....	126
4.1.2.2.11. Consumos de agentes y accesorios proyecto de voladura primaria 3655-228 ...	127
4.1.2.2.13. Análisis de Fragmentación del proyecto de voladura 3655-228 .....	128
<b>4.1.3.3. PRUEBA DE VOLADURA 02: PROYECTO 234 - NIVEL 3770 (ME-73G) .....</b>	<b>130</b>
4.1.3.3.1. Clasificación del macizo rocoso en la zona de Jahuapaylla Baja.....	130
4.1.3.3.2. Parámetros de perforación del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	130
4.1.3.3.3. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3770-234...	131
4.1.3.3.4. Densidad de carga lineal (Kg/m) del proyecto de voladura primaria 3770-234 ..	133
4.1.3.3.5. Longitud total del taladro ( $L_T$ ) del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	133
4.1.3.3.6. Volumen roto por taladro del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	134
4.1.3.3.7. Longitud de carga total por taladro ( $L_{CT}$ ) del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	134
4.1.3.3.8. Factor de esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	134
4.1.3.3.8.1. Factor de esponjamiento teórico proyecto de voladura primaria 3770-234 ..	134
4.1.3.3.8.2. Factor de esponjamiento proveniente de datos de campo proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	135
4.1.3.3.8.4. Factor de esponjamiento efectivo ( $F_{e\text{fectivo}}$ ) proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	136
4.1.3.3.9. Carga total por taladro del proyecto de voladura primaria 3770-234.....	137
4.1.3.3.10. Carga Total de Explosivo del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	137



4.1.3.3.11. Volumen total arrancado del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	137
4.1.3.3.12. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3770-234.....	138
4.1.3.3.13. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	138
4.1.3.3.14. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado en el proyecto de voladura primaria 3770-234.....	138
4.1.3.3.15. Porcentaje y cantidad de nitrito de sodio utilizado del proyecto de voladura 3770-234 .....	139
4.1.3.3.15.1. Cantidad de Nitrito Utilizado para el Proyecto 3770-234.....	139
4.1.3.3.16. Reporte de Voladura Electronica (digishot plus) proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	140
4.1.3.3.16.1. Diseño de Secuencia Electrónica proyecto de voladura primaria 3770: 234-235 .....	140
4.1.3.3.16.2. Línea de Iso-Tiempos del proyecto de voladura primaria 3770: 234-235 ..	141
4.1.3.3.16.3. Desplazamiento de Material del proyecto de voladura primaria 3770: 234-235 .....	142
4.1.3.3.17. Reporte de Velocidad de Detonación proyecto de voladura primaria 3770-234	143
4.1.3.3.18. Registro de Vibraciones (sismografo py. 3770 : 234) .....	143
4.1.3.3.19. Análisis de Fragmentación del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	145
4.1.3.3.20. Medición de Gases del proyecto de voladura primaria 3770-234 .....	145
<b>4.1.3.4. PROYECTO (235) - NIVEL 3770 AP-73 (HA73) .....</b>	<b>146</b>
4.1.3.4.1. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3770-235...	147
4.1.3.4.2. Diseño de carga del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	148
4.1.3.4.3. Longitud de carga total por taladro proyecto de voladura primaria 3770-235.....	149
4.1.3.4.4. Densidad de carga lineal del proyecto de voladura primaria 3770-235.....	149
4.1.3.4.5. Carga total por taladro (qc) del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	150
4.1.3.4.6. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura primaria 3770-235 .....	150
4.1.3.4.7. Volumen total arrancado del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	150
4.1.3.4.8. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3770-235.....	150
4.1.3.4.9. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	150



4.1.3.4.10. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	151
4.1.3.4.11. Consumos de agentes y accesorios proyecto de voladura primaria 3770-235 ...	152
4.1.3.4.12. Registro de VOD del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	152
4.1.3.4.13. Análisis de Fragmentación del proyecto de voladura primaria 3770-235 .....	153
4.1.3.2.14. Medición de Gases del proyecto de voladura primaria 3770-23 .....	154
<b>4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>155</b>
4.2.1. Hipótesis estadística .....	155
4.2.1.1. Hipótesis estadística (nulas y alternas).....	155
<b>4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>155</b>
4.3.1. Resultados en Fragmentación .....	155
4.1.2. Rendimiento de Equipos de Carguío.....	157
4.1.3. Resultados en Velocidad de Excavación.....	159
4.1.4. Evaluación de Velocidad de Detonación.....	159
4.1.4.1 Resultados en Velocidad de Detonación .....	160
4.1.5. Resultados del Monitoreo de Vibraciones.....	161
4.1.5.1. Resultados Medición de Ruido .....	162
4.1.6. Evaluación Medición de Gases.....	162
4.1.7. Evaluación Incidencia Back Up.....	164
4.1.8. Evaluación Disponibilidad Mecánica, Operativa y Utilización de los camiones mezcladores.....	165
4.1.9. Evaluación Económica.....	166
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>171</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>171</b>
CONCLUSIONES .....	171
RECOMENDACIONES .....	173
BIBLIOGRAFÍA .....	174
ANEXOS.....	178



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 01: Características de la unidad minera Las Bambas. ....	17
Tabla N° 02: Especificaciones del tipo de diseño de taladros. ....	24
Tabla N° 03: Límites del nivel de ruido existentes. ....	35
Tabla N° 04: Efecto probable ocasionada por la sobrepresión. ....	36
Tabla N° 05: Normas Internacionales de Vibración. ....	39
Tabla N° 06: Norma Alemana DIN 4150 (1999).....	40
Tabla N° 07: Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U.S. Bureau of Mines en 1980. ....	41
Tabla N° 08: Valores Representativos USBM RI8507.....	42
Tabla N° 09: Norma Norteamericana OSM 817.67.....	42
Tabla N° 10: Norma Nacional Peruana.....	43
Tabla N° 11: Velocidad de detonación (m/s). ....	52
Tabla N° 12: Presión de detonación para diferentes tipos de agentes.....	53
Tabla N° 13: Densidades para diferentes agentes de voladura. ....	54
Tabla N° 14: Resistencia al agua de diferentes tipos de agentes de voladura. ....	55
Tabla N° 15: Clases de Humos (Institute of Makers of Explosives, EE.UU). ....	56
Tabla N° 16: Sensitividad de los diferentes tipos de agentes de voladura. ....	56
Tabla N° 17: Especificaciones técnicas del cordón detonante. ....	57
Tabla N° 18: Especificaciones técnicas del conector bidireccional. ....	58
Tabla N° 19: Especificaciones técnicas del detonador no eléctrico. ....	59
Tabla N° 20: Especificaciones técnicas del Booster. ....	61
Tabla N° 21: Dimensiones de los oxidantes en los explosivos (Bampffield & Morrey, 1984). ....	65
Tabla N° 22: Características de la emulsión G. ....	66
Tabla N° 23: Características del nitrito de sodio. ....	67
Tabla N° 24: Flujo de Nitrito de Sodio y Gasificación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G). ....	68
Tabla N° 25: Límites de exposición ocupacional de los agentes químicos en el aire. ....	72

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 01: Coordenadas UTM de la zona de estudio. ....	9
Cuadro N° 02: Coordenadas UTM - Mina Las Bambas. ....	9
Cuadro N° 03: Buzamiento y Rumbo de los Estratos y Fracturas. ....	13
Cuadro N° 04: Patrón perforación de taladros. ....	23
Cuadro N° 05: Equipo de carguío Mina Las Bambas. ....	26
Cuadro N° 06: Equipo de acarreo Mina Las Bambas. ....	27
Cuadro N° 07: Sistema de variables e índices. ....	86
Cuadro N° 08: Especificaciones del kit de medición de densidades. ....	91
Cuadro N° 09: Peso de las muestras de la mezcla explosiva gasificada. ....	92
Cuadro N° 10: Densidades tomadas en gabinete con 0.10% de solución G. ....	94
Cuadro N° 11: Densidades en gabinete con 0.12% de solución G. ....	95
Cuadro N° 12: Densidades en gabinete con 0.14% de solución G. ....	96
Cuadro N° 13: Densidades en gabinete con 0.16% de solución G. ....	97
Cuadro N° 14: Densidades en gabinete con 0.20% de solución G. ....	98
Cuadro N° 15: Densidades en gabinete con 0.30% de solución G. ....	99
Cuadro N° 16: Cálculo del nuevo factor promedio del tacómetro. ....	100
Cuadro N° 17: Cálculo del nuevo factor corregido del tacómetro. ....	101
Cuadro N° 18: Cálculo del nuevo factor final corregido del tacómetro. ....	101
Cuadro N° 19: Cálculo del nuevo factor promedio del tacómetro. ....	102
Cuadro N° 20: Cálculo del nuevo factor corregido del tacómetro. ....	102
Cuadro N° 21: Cálculo del nuevo factor final corregido del tacómetro. ....	103
Cuadro N° 22: Caracterización del macizo rocoso en la zona de Mini Tajo. ....	105
Cuadro N° 23: Parámetros de perforación del proyecto de voladura 3655-227. ....	106
Cuadro N° 24: Peso de muestra de la mezcla explosiva gasificada (HA 73G) proyecto 3655-227. ...	107
Cuadro N° 25: Control de gasificación de la muestra (ME-73G) proyecto 3655-227. ....	108
Cuadro N° 26: Consumo de explosivos y accesorios en el proyecto 3655-227. ....	116
Cuadro N° 27: Datos de análisis de fragmentación proyecto 3655-227 – Mineral. ....	120
Cuadro N° 28: Peso de muestra de la mezcla explosiva sin gasificar (HA-73) proyecto 3655-228. ....	122
Cuadro N° 29: Datos de campo del proyecto de voladura 3655 – 228. ....	123
Cuadro N° 30: Consumo de explosivos y accesorios del proyecto de voladura primaria 3655-228. ....	127
Cuadro N° 31: Caracterización del macizo rocoso en la zona de Jahuapaylla Baja. ....	130
Cuadro N° 32: Parámetros de perforación del proyecto de voladura 3770-234. ....	131
Cuadro N° 33: Datos técnicos del proyecto de voladura 3770-234. ....	131
Cuadro N° 34: Peso de muestra de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) proyecto 3770-234. ...	131
Cuadro N° 35: Control de gasificación de la muestra ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234. ....	132
Cuadro N° 36: Consumo de explosivos y accesorios en el proyecto 3770-234. ....	140



Cuadro N° 37: Datos de análisis de fragmentación proyecto 3770-234 – Mineral.....	145
Cuadro N° 38: Peso de muestra de la mezcla explosiva sin gasificar (HA-73) proyecto 3770-235....	147
Cuadro N° 39: Datos de campo del proyecto de voladura 3770 – 235. ....	148
Cuadro N° 40: Datos de campo del proyecto de voladura 3770 – 235. ....	152
Cuadro 41: Reporte de Fragmentación al mes de marzo del 2018. ....	155
Cuadro 42: Toneladas de roca volada de los tres meses de pruebas 2018. ....	156
Cuadro N° 43: Mejora en el rendimiento de los equipos de carguío. ....	158
Cuadro N° 44: Valores promedio de VOD por año. ....	160
Cuadro N° 45: Registro de voladuras y la cantidad de taladros por mes. ....	162
Cuadro N° 46: Promedio de gases post voladura 2018.....	163
Cuadro 47: Consumo e Incidencia Back UP de los detonadores electrónicos alternativo por mes. ....	164
Cuadro N° 48: Costo por mezcla explosiva HA-73 y HA-73G.....	166
Cuadro N° 49: Ahorro por consumo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G).....	166
Cuadro 50: Ahorro por taladro y tonelada métrica. ....	167
Cuadro N° 51: Ahorro por tonelaje roto mensual y total. ....	167
Cuadro N° 52: Ahorro por consumo de explosivo mensual y total. ....	168
Cuadro N° 53: Ahorro de combustible y nitrato por taladro entre los dos tipos de mezclas explosivas. .....	169
Cuadro N° 54: Ahorro consumo de mezcla explosiva por taladro.....	170

## ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura N° 01: Mapa de ubicación geográfica Mina LAS Bambas.....	10
Figura N° 02: Geología Regional Mina Las Bambas.....	12
Figura N° 03: Vista en planta de la Geología local Ferrobamba. ....	15
Figura N° 04: Producción proyectada de los tres tajos. ....	16
Figura N° 05: Componentes Las Bambas. ....	17
Figura N° 06: Componentes de operación Las Bambas.....	18
Figura N° 07: Planta concentradora Las Bambas. ....	19
Figura N° 08: Chancador primario Las Bambas.....	19
Figura N° 09: Faja transportadora Overland Las Bambas.....	20
Figura N° 10: Molienda Las Bambas.....	20
Figura N° 11: Área de flotación Las Bambas.....	21
Figura N° 12: Espesadores Delkor Hi-rate Las Bambas. ....	21
Figura N° 13: Equipos de perforación Mina Las Bambas.....	23
Figura N° 14: Camión mezclador sistema vaciable en Las Bambas.....	25
Figura N° 15: Camión mezclador sistema vaciable en Las Bambas.....	26
Figura N° 16: Carguío de mineral Las Bambas.....	27
Figura N° 17: Camión minero realizando el acarreo de mineral Las Bambas.....	28
Figura N° 18: Mecanismo de Fragmentación del Macizo Rocosos. ....	28
Figura N° 19: Etapas del proceso del Fragmentación de la Rocas. ....	29
Figura N° 20: Primera fase Fracturas Radiales.....	30
Figura N° 21: Segunda fase Empuje hacia Adelante. ....	30
Figura N° 22: Tercera fase Fragmentación de la roca.....	31
Figura N° 23: Distribución de la Energía no útil de Trabajo en la Voladura. ....	32
Figura N° 24: Compresión y Tensión no Simétrica de una Roca. ....	32
Figura N° 25: Esquema de los principales Tipo de Ondas Sísmicas. ....	33
Figura N° 26: Ondas Transversal o Secundaria (S).....	34
Figura N° 27: Ondas Transversal o Secundaria (S).....	34
Figura N° 28: Análisis de la Velocidad de partícula y de Propagación. Tomado de presentación “Shock Waves”, Dr. Eric Rinehart (Defense Threat Reduction Agency). ....	36
Figura N° 29: Análisis de la PPV según la Distancia y la Geometría de la Onda Sísmica. ....	38
Figura N° 30: Diseño de los parámetros de voladura.....	43
Figura N° 31: Diseño del Burden. ....	44
Figura N° 32: Burden y Espaciamiento.....	45
Figura N° 33: Sobre perforación sobre el nivel del piso ....	45
Figura N° 34: Cordón detonante.....	57
Figura N° 35: Conector bidireccional. ....	58



Figura N° 36: Detonador no eléctrico (Conector Unidireccional de Superficie). .....	59
Figura N° 37: Detonador Electrónico DigiShot.Plus. ....	60
Figura N° 38: Booster de pentolita cilíndrico. ....	62
Figura N° 39: Agentes explosivos secos con base Nitrato de Amonio. ....	63
Figura N° 40: Estructura del ANFO PESADO. ....	64
Figura N° 41: Fabricación de la mezcla explosiva gasificada. ....	67
Figura N° 42: Diseño comparativo de carga de taladros entre el ANFO Pesado 73 (HA-73) matriz y ANFO Pesado 73 gasificado (HA-73G). ....	68
Figura N° 43: Generación de burbujas de nitrógeno. ....	69
Figura N° 44: Diseño de malla electrónica. ....	72
Figura N° 45: Diseño en VIEWSHOT (Sistema Electrónico). ....	73
Figura N° 46: Toma de imágenes en campo del material fragmentado post voladura. ....	74
Figura N° 47: Análisis de fragmentación en el SPLIT-DESKTOP. ....	74
Figura N° 48: Equipo Microtrap en gabinete. ....	76
Figura N° 49: Monitoreo con el equipo detector multigás. ....	77
Figura N° 50: Sismógrafo Instantel (Sismógrafo). ....	78
Figura N° 51: Vista de los sensores de presión del camión mezclador. ....	81
Figura N° 52: Vista del sensor de temperatura del camión mezclador. ....	82
Figura N° 53: Vista del disco de ruptura del camión mezclador. ....	82
Figura N° 54: Plano de las zonas seleccionadas para las pruebas de voladura Tajo Ferrobamba. ....	104
Figura N° 55: Plano de ubicación del proyecto de voladura 3655-227 (Tajo Ferrobamba). ....	105
Figura N° 56: Esponjamiento de la ME -73G (HA 73G) a los 20 min. ....	106
Figura N° 57: Análisis de gases del proyecto de voladura 3655 - 227. ....	121
Figura N° 58: Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3655-227. ....	121
Figura N° 59: Análisis de gases del proyecto de voladura 3655 - 228. ....	129
Figura N° 60: Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3655-228. ....	129
Figura N° 61: Plano de ubicación del proyecto de voladura 3770-234 y 235. ....	130
Figura N° 62: Análisis de gases del proyecto de voladura 3770 - 234. ....	146
Figura N° 63: Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3770-234. ....	146
Figura N° 64: Análisis de gases del proyecto de voladura 3770 - 235. ....	154
Figura N° 65: Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3770-235. ....	154
Gráfico N° 01: Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines, 1980. Tomado de Siskind et al., 1980. ....	41
Gráfico N° 02: Sensibilidad del ANFO a la iniciación. ....	64
Gráfico N° 03: Variación de la sensibilidad del ANFO Pesado con el porcentaje de emulsión de la mezcla (Bampfield y Morrey, 1984). ....	65
Gráfico N° 04: Registro velocidad de detonación. ....	76
Gráfico N° 05: Análisis del vector suma de la velocidad pico partícula. ....	78



Gráfico N° 06: Comportamiento de gasificación de las dos muestras tomadas en Gabinete. ....	94
Gráfico N° 07: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.10% de Solución G. ....	95
Gráfico N° 08: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.12% de Solución G. ....	96
Gráfico N° 09: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.14% de Solución G. ....	97
Gráfico N° 10: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.16% de Solución G. ....	98
Gráfico N° 11: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.20% de Solución G. ....	99
Gráfico N° 12: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.30% de Solución G. ....	100
Gráfico N° 13: Comportamiento de la densidad para sistema vaciable. ....	103
Gráfico N° 14: Comportamiento de la densidad para sistema bombeable. ....	104
Gráfico N° 15: Proceso de gasificación en diferentes tiempos de la ME-73G proyecto 3655-227. ....	108
Gráfico N° 16: Comparativo inicial de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3655-227. .....	110
Gráfico N° 17: Comparativo final de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3655-227. .....	112
Gráfico N° 18: Diseño de malla y la posición en el diseño de amarre proyecto: 227-228. ....	116
Gráfico N° 19: Línea de Iso-Tiempos en el diseño de malla del proyecto de voladura. 227-228. ....	117
Gráfico N° 20: Desplazamiento de material volado del proyecto de voladura 227-228. ....	117
Gráfico N° 21: Zonas de alivio en el proyecto de voladura 227-228. ....	118
Gráfico N° 22: Registro de VOD en el taladro N° 028 del proyecto de voladura 3655-227. ....	118
Gráfico N° 23: Registro de Vibraciones del proyecto de voladura 3655-227. ....	119
Gráfico N° 24: Análisis del P80 del proyecto de voladura 3655 - 227. ....	120
Gráfico N° 25: Comportamiento de la densidad del AP-73 (HA-73) proyecto 3655 – 228. ....	123
Gráfico N° 26: Diseño de carga con AP-73 (HA-73) proyecto 3655 – 228. ....	124
Gráfico N° 27: Registro de VOD en el taladro N° 84 del proyecto de voladura 3655 - 228. ....	128
Gráfico N° 28: Análisis de granulometría P-80 del proyecto de voladura 3655 - 228. ....	128
Gráfico N° 29: Proceso de gasificación en diferentes tiempos de la ME-73G (HA-73G) proyecto 3770- 234. ....	133
Gráfico N° 30: Diseño inicial de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234. ....	135
Gráfico N° 31: Diseño final de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234. ....	137
Gráfico N° 32: Diseño de malla y la posición en el diseño de amarre proyecto 3770: 234-235. ....	141
Gráfico N° 33: Línea de Iso-Tiempos en el diseño de malla del proyecto de voladura 3770: 234-235. .....	141
Gráfico N° 34: Desplazamiento de material volado en el ´proyecto de voladura 3770: 234-235. ....	142
Gráfico N° 35: Zonas de alivio en el proyecto de voladura 3770: 234-235. ....	142
Gráfico N° 36: Registro de VOD en el taladro N° 2796 del proyecto de voladura 3770 - 234. ....	143
Gráfico N° 37: Registro de Vibraciones del proyecto de voladura 3770-234. ....	144
Gráfico N° 38: Análisis del P80 del proyecto de voladura 3770 - 234. ....	145
<b>Gráfico N° 39:</b> Comportamiento de la densidad del AP-73 (HA-73) proyecto 3770-235. ....	148



Gráfico N° 40: Diseño de carga con AP-73 (HA-73) proyecto 3770-235. ....	149
Gráfico N° 41: Registro de VOD en el taladro N° 2450 del proyecto de voladura 3770 - 235.....	153
Gráfico N° 42: Análisis de granulometría P-80 del proyecto de voladura 3770 - 235. ....	153
Gráfico N° 43: Mejora en la fragmentación de las pruebas realizadas. ....	156
Gráfico N° 44: Indicadores e índice de la fragmentación en rango. ....	157
Gráfico N° 45: Crecimiento en el rendimiento de los equipos de carguío al 2018.....	158
Gráfico N° 46: Mejora de la velocidad de minado en el tajo Ferrobamba 2018. ....	159
Gráfico N° 47: Velocidad de detonación variable de acuerdo a la densidad de campo. ....	160
Gráfico N° 48: Mejora de la velocidad de detonación por año en el tajo Ferrobamba. ....	161
Gráfico N° 49: Puntos de monitoreo dentro de la Norma USBM RI8507. ....	161
Gráfico N° 50: Registro del límite de ruido en el tajo Ferrobamba. ....	162
Gráfico N° 51: Porcentaje de disparos por mes con presencia de gases nitrosos. ....	163
Gráfico 52: Incidencia Back UP Vs Consumo DigiShot Enero – Marzo 2018. ....	164
Gráfico N° 53: Incidencia Back UP Vs Consumo Electrónico Alternativo Enero – Marzo 2018.....	165
Gráfico N° 54: Disponibilidad mecánica de los camiones mezcladores Enero – Marzo 2018.....	165
Gráfico N° 55: Costo total por tonelaje roto Enero-Marzo 2018.....	168
Gráfico N° 56: Costo total por consumo de mezcla explosiva gasificada Enero-Marzo 2018.....	169
Gráfico N° 57: Ahorro Consumo de Mezcla Explosiva (kg / tal.) 2018. ....	170

**“OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE VOLADURA PRIMARIA APLICANDO  
EL USO DE MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA EN EL TAJO  
FERROBAMBA EN LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS”**

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## INTRODUCCIÓN

En minería, la optimización de las operaciones unitarias se lleva a cabo mediante la evaluación y análisis del diseño de perforación y voladura, las características geo-mecánicas, físicas, químicas del macizo rocoso que son muy importantes para obtener una buena voladura reflejada en una buena fragmentación del material, aspecto que es muy importante para carguío y acarreo del material volado.

El objetivo principal de la optimización de voladura primaria es fragmentar la roca, de acuerdo al P80 requerido por la empresa.

La unidad minera Las Bambas está conformada por componentes que a continuación se detalla: 03 tajos, depósito de desmontes, planta concentradora, planta de filtros y molibdeno, depósito de relaves, presa de agua fresca, instalaciones auxiliares, campamentos y accesos.

En la unidad minera Las Bambas, se viene realizando pruebas con diferentes mezclas explosivas por parte de distintos proveedores para compáralas con el (Heavy ANFO o ANFO Pesado) que actualmente se vienen usando, se busca hacer todas las mejoras posibles, logrando reducir costos o mejorar los procesos operativos, sin alterar la productividad de los equipos de minado.

Hasta la actualidad se han desarrollado una gran variedad de mezclas explosivas comerciales y nuevos productos con el fin de obtener resultados óptimos en las voladuras, en la fragmentación y tener influencia en la optimización de las operaciones post voladura para disminuir sus costos.

En la actualidad casi en toda las minas superficiales a tajo abierto de gran y mediana minería en el Perú, se vienen usando Mezcla Explosiva gasificada, ya que por sus características de sensibilidad y homogeneidad puede llegar a obtener una mayor velocidad de onda de detonación (VOD) que el tradicional ANFO o ANFO pesado; y esto ha representado óptimos resultados en la fragmentación del mineral. Además el costo y el servicio técnico han llegado a ser tan competitivo en el mercado que significa importantes ahorros para la empresa.

Este proyecto de tesis se desarrolla en cinco capítulos principales:

Capítulo I, trata netamente del planteamiento del problema. El capítulo II, abarca las generalidades de la investigación, ubicación geográfica, descripción de la empresa, características del área, geología local y regional, entre otros, así como el marco teórico, donde se definirán los antecedentes de la investigación y bases teóricas, la cual incluye todo lo concerniente a la mezcla explosiva gasificada, agentes, accesorios, parámetros de perforación y voladura, propiedades de los explosivos, características de la roca, propiedades de detonación del explosivo, calculo y distribución de la carga explosiva, cálculo para un explosivo gasificable y fundamentos de la vibración . El capítulo III, trata de la definición de variables, operacionalización de variables, hipótesis de la investigación, tipo y diseño de la investigación, población y muestra, procedimiento de la investigación y el material de investigación. El capítulo IV, trata sobre la decepción de resultados, contrastación de hipótesis y la discusión de resultados, trata del análisis, descripción, desarrollo de la mezcla explosiva gasificada y la optimización económica. El último capítulo V, trata de las conclusiones y recomendación de la aplicación de la mezcla explosiva gasificada.



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de demostrar los resultados de las pruebas de voladuras con una nueva alternativa en explosivo, una mezcla explosiva gasificada, y los beneficios que representa en optimización en los resultados de fragmentación, vibraciones, gases nitrosos y ahorro en Costos.

El trabajo describe el desarrollo de las pruebas las cuales se llevaron a cabo el año 2018 y se estandariza su uso después de la prueba, esto originó la necesidad de modificar sistemas técnicos y operativos, como el rediseño en los parámetros de perforación y voladura, capacitación técnica especializada en la aplicación del nuevo explosivo, acondicionamiento de la logística a la tecnología de gasificación (camiones Fábrica).

Tras realizar las pruebas mencionadas, se hizo el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista económico, técnico y operativo. Se logró un ahorro importante sin afectar la tasa de excavación de los equipos de minado, además de eliminar la generación de gases nitrosos. En base a estos resultados, se implementó el uso de la mezcla explosiva gasificada en la unidad Minera Las Bambas.

Se obtuvieron mejores resultados en términos de fragmentación y uniformidad, el P80 disminuyó en un 22.79 % comparado con los resultados de los análisis obtenidos en los meses de octubre, noviembre y diciembre del 2017 y en comparación a la mezcla AP-73 (HA-73) durante los meses de enero a marzo se obtuvieron una disminución del 28.075%. Además en proporción directa a la mejora de fragmentación también se optimizó la velocidad de minado de los equipos de carguío en las tres zonas designadas en un 13%.

La optimización de la fragmentación es reflejado en el rendimiento de los equipos de carguío que alcanzaron un incremento del 7.87 % afectado por las pruebas realizadas con la “Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G)” durante los meses de enero a marzo del 2018, manteniéndose en un valor promedio de 5,578 tons/hr.

Los resultados obtenidos de las pruebas en el tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas con la aplicación integral de la mezcla explosiva gasificada, se hizo el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas en términos operativos y económicos, se ve reflejado en un ahorro tangible de \$ 48,004.616 en el consumo de dicha mezcla, en los tres primeros meses de pruebas del 2018 respecto al costo total que genera el uso del explosivo del proveedor actual.

## PALABRAS CLAVES

Optimización, diseño de voladura, mezcla explosiva gasificada, fragmentación y vibración.



**ABSTRAC**

The present research work has the purpose of demonstrating the results of the blasting tests with a new alternative in explosive, a gasified explosive mixture, and the benefits that optimization represents in the results of fragmentation, vibrations, nitrous gases and cost savings. .

The work describes the development of the tests which were carried out in 2018 and its use is standardized after the test, this originated the need to modify technical and operative systems, such as the redesign in the parameters of drilling and blasting, training specialized technician in the application of the new explosive, conditioning of logistics to gasification technology (Factory trucks).

After carrying out the mentioned tests, the corresponding analysis was made and it was determined that the product has advantages from the economic, technical and operational point of view. Significant savings were achieved without affecting the excavation rate of mining equipment, in addition to eliminating the generation of nitrous gases. Based on these results, the use of the gasified explosive mixture was implemented in the Minera Las Bambas unit.

Better results were obtained in terms of fragmentation and uniformity, the P80 decreased by 22.79% compared to the results of the analyzes obtained in the months of October, November and December of 2017 and compared to the AP-73 mixture (HA-73 ) during the months of January to March a decrease of 28,075% was obtained. In addition, in direct proportion to the improvement of fragmentation, the mining speed of the loading equipment in the three designated areas was also optimized by 13%.

Fragmentation optimization is reflected in the performance of the loading equipment that reached an increase of 7.87% affected by the tests carried out with the "Gasified Explosive Mixture (HA-73G)" during the months of January to March 2018, maintaining at an average value of 5,578 tons / hr.

The results obtained from the tests in the Ferrobamba pit of the Las Bambas mining unit with the integral application of the gasified explosive mixture, the corresponding analysis was made and it was determined that the product has advantages in operational and economic terms, is reflected in a tangible saving of \$ 48,004,616 in the consumption of said mixture, in the first three months of testing in 2018 with respect to the total cost generated by the use of the current supplier's explosive.

**KEYWORDS:**

Optimization, blasting design, gasified explosive mixture, fragmentation and vibration.



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la gran minería y mediana minería moderna a tajo abierto tiende a mecanizar y automatizar sus operaciones unitarias de perforación y voladura, con la finalidad de lograr mejoras en su producción diaria, mensual y anual y sobre todo en la seguridad y así disminuir sus costos operativos. Las operaciones de explotación en la Mina Las Bambas se efectúan mediante proceso de voladura de rocas, esto debido a los tipos de dureza de la roca que existen en el tajo ferrobamba, siendo el método de explotación superficial, empleando las operaciones unitarias de perforación y voladura, el método más económico, confiable y rápido para el desarrollo común de las operaciones de producción a tajo abierto.

La empresa plantea extraer más reservas y por consiguiente necesita optimizar sus operaciones unitarias de voladura, para lo cual necesita que sus variables operacionales estén dentro del estándar y aplicando una mezcla explosiva adecuada y alcancen los objetivos en producción, reflejados en ahorro para la empresa.

Se ha observado que actualmente en la Mina Las Bambas en la operación unitaria de voladura existen variaciones en la fragmentación de la roca, vibraciones, generación de gases nitrosos y ruido, lo que trae como consecuencias baja productividad y disponibilidad mecánica deficiente de los equipos de carga y acarreo, a su vez se traduce en un aumento en el costo de producción de material removido. En las zonas de menor dureza se observa sobre fragmentación, daño en los taludes circundantes a los proyectos de voladuras, generación y proyecciones indebidas de rocas, demostrando que la distribución de energía en estas zonas no es la apropiada, indicando que se ha incurrido en un consumo innecesario de explosivos y la generación de voladuras secundarias ocasionando un costo adicional.

#### 1.2. ENUNCIADO

##### 1.2.1. General

- ¿De qué manera influirá en la optimización de la operación unitaria de voladura primaria el uso de mezcla explosiva gasificada, en la etapa de explotación del tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas?

##### 1.2.2. Específicos

- ¿De qué manera influirá el uso de la mezcla explosiva gasificada en la fragmentación (P80) y generación de gases nitrosos?
- ¿Cómo influirá la optimización de la operación unitaria de voladura primaria en los costos de la unidad minera Las Bambas?



- ¿De qué manera influirá la vibración producto de la voladura primaria en el daño al macizo rocoso y a las estructuras de las viviendas de la comunidad aledaña al tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas?

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. General

Determinar la influencia del uso de la mezcla explosiva gasificada en la optimización de la operación unitaria de voladura primaria, en la etapa de explotación del tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas.

#### 1.3.2. Específicos

- Determinar la influencia del uso de la mezcla explosiva gasificada en la fragmentación (P80) y generación de gases nitrosos.
- Determinar la influencia de la optimización de la operación unitaria de voladura primaria en los costos, de la unidad minera Las Bambas.
- Determinar la influencia de la vibración, producto de la voladura primaria en el daño al macizo rocoso y a las estructuras de las viviendas de la comunidad aledaña al tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas.

### 1.4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la industria minera es importante para el desarrollo del Perú y el Mundo; la cual atraviesa una etapa de constante crecimiento debido a distintos factores, tal es el caso de la gran demanda internacional de metales que trae consigo el incremento de sus precios, mejores tecnologías tanto para el proceso de explotación a tajo abierto..

La ciencia y tecnología avanza a pasos agigantados y cada vez las empresas se enfrentan a nuevos retos, los cuales deben desafiarlos; y para desafiarlos deben estar a la vanguardia de los cambios haciendo investigación científica y/o aplicada para poder existir en el mercado. Es por ello, que la emulsión matriz se ha modificado en su composición optimizando las operaciones, la cual está siendo implementada en el campo minero, cuyo carguío mecanizado a los taladros se hace con el camión fábrica o camión mezclador.

En la actualidad, se utilizan patrones de diseño para las voladuras con mezclas ANFO/Emulsión, desarrollados en años anteriores y nuevas tecnologías se van desarrollando para la creación de nuevos productos efectivos en su uso y optimizando el costo de ellos, donde no se han tomado en cuenta las características de la mezcla explosiva gasificada y para definir nuevas configuraciones que optimicen.

Cuando se obtiene sobre-fragmentación de la roca, se está incurriendo en un gasto innecesario ya que se ha utilizado una cantidad de explosivo mayor a la necesaria o no se está utilizando la mezcla explosiva adecuada. Si al contrario, los resultados son grandes bloques de rocas mal fragmentados, se estaría



afectando la productividad de forma negativa la eficiencia para los equipos de carga y acarreo, generando costos adicionales incurriendo en pérdidas para la empresa, se presume que esta desviación se debe a algunas características, propiedades de la roca, del explosivo utilizado y mal diseño de voladura.

Con la presente investigación de estudio se pretende optimizar los diseños de voladura aplicando la mezcla explosiva gasificada, empleando criterios como características de la roca, propiedades de la mezcla explosiva gasificada y el control en laboratorio y campo, se pretende que disminuyan los costos por explosivo, así como también los costos de material removido, logrando mejorar la productividad de los equipos de carga y acarreo, empleados en la Mina Las Bambas y cumplir con las metas planteadas por la empresa.

### **1.5. DELIMITACIONES**

Con la ejecución del proyecto de tesis, en lo económico durante toda las pruebas de voladura se recurrirá a la Empresa que está ejecutando las pruebas de voladura, y por otra parte será el aporte de mis propios recursos, para el financiamiento de este trabajo de investigación.

La poca información proporcionada por parte del proveedor de Las Bambas que realiza las voladuras.

El tiempo requerido para desarrollar el trabajo de investigación en la mina Las Bambas calculado es de 3 meses aproximadamente.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1. ANTECEDENTES

Las Bambas es un yacimiento polimetálico de cobre, oro, molibdeno y plata situado a más de 4,000 m.s.n.m., entre las provincias de Cotabambas y Grau, Región Apurímac, a 72 km al suroeste de la ciudad de Cusco y cuenta con tre yacimientos principales: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba (LAS BAMBAS MMG LIMITED, 2018).

En agosto de 2010, se aprobó su construcción e inició la etapa de preparación en el año 2013 y finalizó su construcción en el primer trimestre de 2016, y continúa aumentando progresivamente con la producción comercial alcanzada el 1 de julio de 2016. Entrando recién en operación a inicios de Febrero del 2015 en el Tajo Ferrobamba a cargo de la Empresa MMG LIMITED.

Las Bambas es un proyecto de empresa conjunta entre el operador MMG (62.5%), una subsidiaria de propiedad total de Guoxin International Investment Co. Ltd (22.5%) y CITIC Metal Co. Ltd (15.0%) (LAS BAMBAS MMG LIMITED, 2018).

Las Bambas cuenta con reservas minerales de 7,494 millones de toneladas de cobre y recursos minerales de 11,625 millones de toneladas (LAS BAMBAS MMG LIMITED, 2018).

En la actualidad las mezclas explosivas comerciales calificadas se han modificado en su composición y uso, es el caso de la emulsión matriz que se ha modificado, agregando algunos catalizadores dando como resultado la emulsión gasificable y utilizado como mezcla explosiva gasificada en minas de mediana y gran minería a tajo abierto.

Actualmente los trabajos de voladura en las tres zonas de Jahuapaylla Baja, Mini Tajo y Jahuapaylla Alta del Tajo Ferrobamba son realizados por la empresa contratista especializada hace aproximadamente 3 años, quien se encarga de las voladuras primarias, controladas y secundarias, utilizando mezclas explosivas a base de emulsión matriz y gasificable, respectivamente como son el ANFO Pesado 73 (HA-73), HA-64 y HA-55, con densidades variables de 0.98 gr/cc a 1.302 gg/cc promedio.

La empresa contratista utilizó un diseño de carga de taladros de 16.5m, con carga de columna y fondo de 9-9.5m con ANFO Pesado 73 (HA-73) y un taco de 7m promedio en los taladros de producción de la voladura primaria, durante los tres últimos años a la fecha.

Los resultados promedio en fragmentación P80 post voladura de la empresa encargada de las voladuras, durante los últimos tres meses del 2017 fueron de 3.21pulgadas.

El sistema de carguío mecanizado con ANFO Pesado (HA-73) por parte de la contratista se realiza mediante camiones mezcladores de 20 a 23 toneladas de capacidad con compartimientos de emulsión, nitrato de amonio y diésel.

Se puede dar referencia de los siguientes trabajos de investigación que tiene correlación con el estudio de la aplicación de la mezcla explosiva gasificada como son:



(ARANIVAR, 2014) “Manual de Aplicación de Explosivos Gasificables – Exsa. Se detalla procedimientos y cálculos para la determinación del esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada.

(VILELA SANGAY, 2014) “Análisis de Factibilidad para el Uso de ANFO Pesado a base de Emulsión Gasificable en Minera Yanacocha”, Pontificia Universidad Católica de Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Donde se utiliza emulsión gasificable Slurrex G con nitrato poroso Cachimayo, para el desarrollo de dicho trabajo de investigación.

(LLACMA LLALLACACHI, 2017) “Evaluación Técnico Económica con el Uso de Emulsión Gasificada en Voladura Mina Cuajone”, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas. Su objetivo era analizar y cuantificar los resultados de la emulsión gasificada en fragmentación para optimizar los procesos post voladura en las operaciones de carguío y acarreo de material volado.

(AGREDA URIARTE, 2013) “Análisis y Control de Vibraciones en Voladura”. Señala los límites máximos permisibles de las vibraciones y frecuencias generadas por las voladuras.

(CONTRERAS PÉREZ, 2009) "Selección del explosivo adecuado y Carga máxima por retardo usando el Monitoreo, Modelamiento y Análisis de Vibraciones” (Aplicación en Minas Ares), Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, PERÚ. Tenía como objetivo investigar el campo de las vibraciones causadas por el trabajo de explotación de minerales mediante el acopio y análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial.

## **2.2. MARCO REFERENCIAL**

En este capítulo se describe los aspectos generales de la mina, la ubicación geográfica, vías de acceso a mina y aspectos geológicos relacionados con la geomorfología, clima y temperatura, hidrografía, mineralización y estructura de la zona minera con la finalidad de ofrecer una mayor información para desarrollar el presente proyecto.

Asimismo se describe la base teórica, los procedimientos, cálculos matemáticos, tablas y cuadros que sirvieron para el desarrollo el proyecto de tesis durante los meses de prueba.

### **2.2.1. UBICACIÓN**

La Unidad Minera Las Bambas se ubica entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, y el distrito de Progreso, provincia de Grau, en la Región Apurímac, a una altitud que varía entre los 3,800 y 4,600 m.s.n.m., aproximadamente a 75 km al suroeste de la ciudad de Cusco.

Se ubica en el sector norte del cuadrángulo de Santo Tomás (29-r) de la carta geológica nacional.

### **2.2.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y POLÍTICA**

La Unidad Minera Las Bambas y el Tajo Ferrobamba tienen aproximadamente las siguientes coordenadas UTM:



**Cuadro N° 01:** Coordenadas UTM de la zona de estudio.

DESCRIPCIÓN	NORTE	ESTE	ALTITUD (m.s.n.m)
Mina Las Bambas	8 439 672	789 408	3800 - 4600
Tajo Ferrobamba	8 440000	793500	3500 - 3800

**Fuente:** Área de perforación y voladura Las Bambas.

La unidad minera Las Bambas comprende instalaciones que se ubican en tres áreas distintas tal como se muestra a continuación:

- Área Las Bambas (consistente en la mina).
- La planta concentradora.
- Instalaciones auxiliares).

Las áreas están delimitadas por la poligonal que se describe con los siguientes vértices:

**Cuadro N° 02:** Coordenadas UTM - Mina Las Bambas.

Punto	Norte	Este
P1	8 438 500	796 000
P2	8 438 500	794 000
P3	8 440 500	791 000
P4	8 441 700	790 000
P5	8 441 700	789 000
P6	8 440 500	789 000
P7	8 440 500	778 500
P8	8 446 500	778 500
P9	8 446 500	792 000
P10	8 443 000	792 000
P11	8 443 000	796 000

**Fuente:** EIA – Mina Las Bambas.

En la siguiente figura se muestra la ubicación geográfica de la unidad minera Las Bambas, colindante con los departamentos de Ayacucho, Cusco y Arequipa. Además se tiene las coordenadas de todo los componentes que conforman la operación en la Mina Las Bambas.



Figura N° 01: Mapa de ubicación geográfica Mina LAS Bambas.



Fuente: EIA – Mina Las Bambas.

### 2.2.3. VÍAS DE ACCESO

Para acceder a la unidad minera Las Bambas por vía aérea desde Lima a Cusco, por carretera asfaltada desde Cusco –Anta – Chinchaypuccllu (Cotabambas) - Cotabambas - Tambobamba – Challhuahuacho, la distancia aproximada con referencia a Cusco hasta la zona de estudio es de 220 Km y el tiempo de recorrido en vehículo se estima en 7 horas.

Otra vía para acceder a la Mina Las Bambas es usando la panamericana sur carretera asfaltada Lima-Nazca-Puquio-Abancay en un tiempo aproximado de 16 horas, debiéndose tomar un desvío de carretera afirmada antes de llegar a Abancay, para pasar por la provincia de Grau. Con referencia a Abancay se

puede ir por Lambrama - Chuquibambilla (provincia de Grau) - Vilcambamba - Progreso (Provincia de Cotabambas) - Challhuahuacho. Todo este recorrido en un tiempo de aproximadamente 7 horas y de una distancia de 220 km.

## 2.2.4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 2.2.4.1. Geología regional.

El terreno se ubica entre en la cordillera occidental el altiplano de las regiones de Ayacucho, Apurímac, Cusco y Puno. Está relacionada con Granitoides Dioríticos a Granodioríticos del batolito de Andahuaylas-Yauri del eoceno-oligoceno, emplazados en las condiciones transpersonales (Carlotto 1999, Perello et al 2003) controlados, por los sistemas de fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas-Totos-Chincheros-Lipaca y Abancay-Condorama-Caylloma. Los intrusivos intermedios a ácidos están relacionados con la mineralización Cu-Mo (Au) y en contacto con secuencias carbonadas del Albiano-Turoniano desarrollan cuerpos de Skarn de Cu-Zn. Los intrusivos básicos están relacionados con la mineralización es de Cu-Fe-Au que se presenta a manera de cuerpos, el contacto con secuencias carbonatadas del Albiano-Turoniano y vetas principales de Au-Cu en los intrusivos ("Mapa Metalogénico del Peru", 2009).

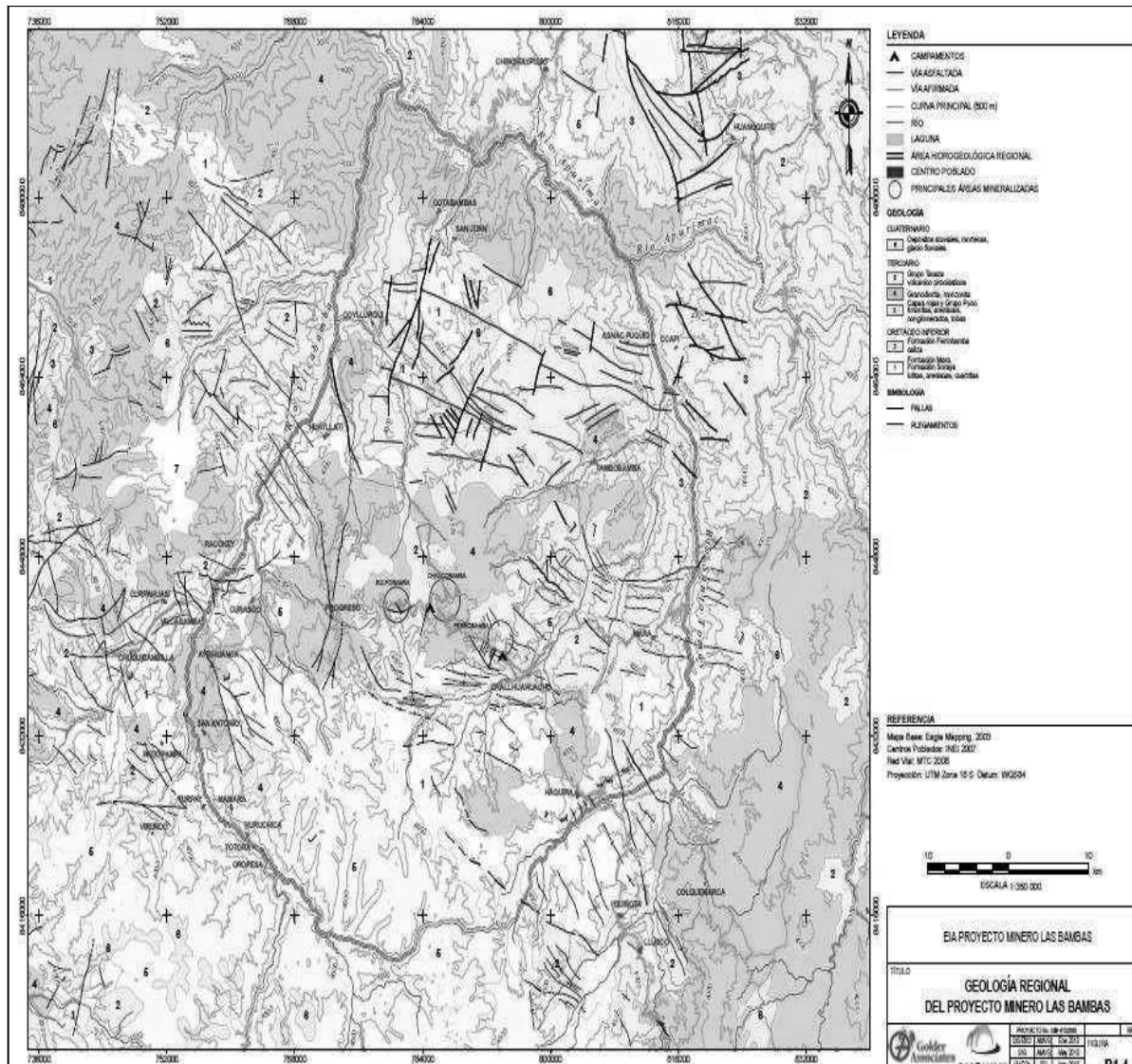
Las edades de la mineralización están entre 42 a 30 Ma., los el terreno está enmarcado entre afloramientos rocosos de tipo volcánico y afloramientos de rocas sedimentarias de tipo arenisca cuarzosa pertenecientes al terciario, que están en contacto con el intrusivo y con depósitos de material coluvial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

La Mina Las Bambas, dentro de este contexto geológico regional, está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn belt Andahuaylas-Yauri situado al SE del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis Inca del Eoceno al Oligoceno temprano (M. Brookes, 2005); este cinturón metalogénico esta hospedado principalmente en el Batolito de Andahuaylas-Yauri, el cual presenta intrusiones múltiples de composición calcoalcalina. Las principales deformaciones en la región, causantes del fallamiento y plegamiento son asociadas a la fase Inca (VILLEGAS CORDOVA, 2016). Localmente el área del yacimiento Las Bambas presenta rocas de naturaleza ácida (granodiorita) a intermedia (monzonita) que intruyen a las rocas sedimentarias y entre ellas a las calizas de la Formación Ferrobamba. Las monzonitas asociadas a los yacimientos de Ferrobamba, Chalcobamba, Charcas, Sulfobamba y Azuljaja obedecen a un alineamiento estructural ONO-ESE de la misma dirección que el trend del batolito Andahuaylas – Yauri (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

La actividad magmática del Eoceno-Oligoceno, en el sureste peruano ha emplazado una serie de cuerpos intrusivos calcoalcalinos, en múltiples fases intrusivas, conocida como Batolito de Andahuaylas- Yauri (300 Km x 60 Km); evento que comprende fases plutónicas, intrusiones de stocks, sills y diques de pórfidos hipabisales (VILLEGAS CORDOVA, 2016).



Figura N° 02: Geología Regional Mina Las Bambas.



Fuente: Área de Geología Las Bambas.

#### 2.2.4.2. Geomorfología.

El terreno está formado por algunas colinas rocosas de suave pendiente ( $30^\circ$  y  $40^\circ$ ) y unas terrazas aluviales contiguas a las quebradas y cursos de agua cuyo drenaje va de sur a norte. Suave pendiente ( $6$  a  $15^\circ$  bajando en dirección Este) al pie de una ladera rocosa, topografía ondulada, con pendientes suaves (menores a  $15^\circ$ ), en el extremo Norte. Los diferentes procesos de erosión glacial han dado como resultado los tipos de valles en “U” (“Mapa Metalogénico del Peru”, 2009).

#### 2.2.4.3. Litología de la zona

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

- **Depósitos Aluviales:** Son redondeados a subredondeados, los cuales nos indica un cierto grado de transporte y se ubican en las terrazas aluviales.
- **Depósitos Glaciares:** Se les ubica en la parte central de la zona. Se caracterizan por presentar materiales sub angulares y heterogéneos.

- **Depósitos Coluviales:** Se les ubica en las partes bajas de las colinas y están formados por fragmentos sub angulares y heterogéneos.
- **Areniscas Cuarzosas:** Son rocas sedimentarias formadas en su mayoría por granos de cuarzo y se les ubica fuera del área de explotación, hacia las parte Este y parte del Oeste.
- **Toba Riolítica:** consiste de un material volcánico muy poroso y se le ubican fuera del área de explotación en los extremos Norte y Sur de la zona.
- **Cuarcita:** son rocas metamórficas formada en su mayoría por el cuarzo, la que le da, la propiedad de ser muy abrasiva ("Mapa Metalogénico del Peru", 2009).

#### 2.2.4.4. Geología estructural

Los Estratos fracturas y fallas encontradas tienen las siguientes características (D & E Desarrollo y Ecología S.A.C., 2006):

**Cuadro N° 03:** Buzamiento y Rumbo de los Estratos y Fracturas.

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

**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 2.2.4.4. Geología local

La roca predominante durante la ejecución de explotación del tajo ferrobamba de la unidad minera Las Bambas es la Caliza además de la existencia de otro tipo de rocas como la monzonita y el mármol en menor proporción, se muestra en la figura n° 02. La velocidad de propagación de la caliza es de 4000 a 6000 m/s y de la dolomita esta entre 5000 a 6000 m/s según lo mencionado en el Tratado de Geofísica Aplicada (C. Figueroa, s.f.) Unidad estratigráfica del grupo pucara esencialmente calcáreo con intercalaciones de evaporitas, además las calizas se intercalan con capas de lutitas oscuras laminadas y generalmente endurecidas. Las evaporitas se presentan intercaladas a depósitos de halitas y calizas dolomíticas. La formación Ferrobamba está constituida por calizas fosilíferas asociadas con dolomitas. En todos los niveles abundan cherts negros o marrón es paralelo y estratificado ("Mapa Metalogénico del Peru", 2009).

##### 2.2.4.4.1. Ferrobamba

Se encuentra ubicada en el sector SE del distrito de Las Bambas y es una de las áreas de mayor interés por su mineralización de Cu, con valores de Mo, Au y Ag; tiene una extensión con evidencias de mineralización de 300 ha aproximadamente (VILLEGAS CORDOVA, 2016).



La mineralización se encuentra tanto en los intrusivos como en los cuerpos irregulares de skarn que los rodean, justo al contacto con la secuencia carbonatada de la Formación Ferrobamba (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

### **Rocas sedimentarias**

En el área aflora una potente secuencia de horizontes calcáreos de la Fm. Ferrobamba, constituidos por niveles de calizas con chert, calizas fosilíferas y bioclásticas, calizas impuras con clásticos finos, así como horizontes masivos y laminados. Los estratos presentan, en general, azimuts entre 100° a 130° y buzamientos variables de 50° a 60° (zona norte) y casi horizontales (al sur) (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

En general la formación Ferrobamba, se encuentra fuertemente plegada debido a eventos tectónicos del Mesozoico superior y principios del Cenozoico (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

### **Rocas intrusivas**

Las calizas de la formación Ferrobamba ha sido cortada por varias fases de intrusión, la primera fase es una monzonita biotítica (MZB), de grano medio a grueso con textura porfirítica; presenta “libros” de biotita hasta 4 mm de diámetro y plagioclasas seriadas. Aflora en gran parte en el sector sur y es una de las fases que ha formado cuerpos de skarn de granate - piroxeno > magnetita; con mineralización de calcopirita, bornita y molibdenita asociada a la alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

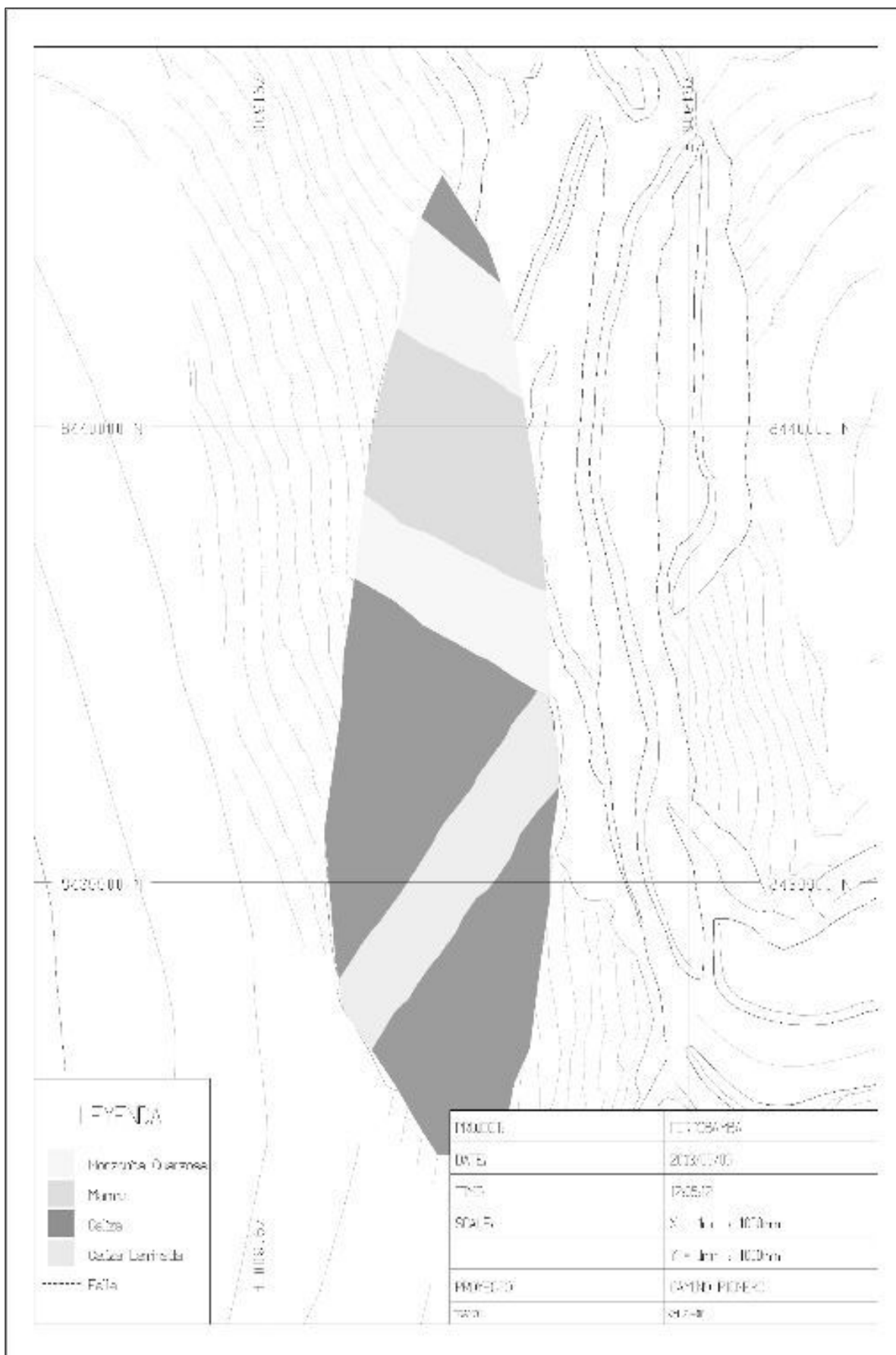
La segunda fase y tercera fase denominadas monzonita biotítica fina (MBF1 y MBF2), presentan grano medio a grueso, textura porfirítica, “ojos” de cuarzo irregulares, plagioclasas bimodales; la diferencia es la presencia “libros” de biotita en una (MBF1) y pequeños cristales de biotita en la otra (MBF2). Forman cuerpos de skarn de granate - piroxeno > magnetita; con mineralización de calcopirita y bornita. El pórfido también esta mineralizado con calcopirita, bornita y molibdenita a manera de venillas con cuarzo y diseminaciones; la mineralización está asociada a la alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita. Para modelo geológico han sido agrupadas en una sola unidad: MBF (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

La cuarta fase, monzonita máfica (MZM), es de grano medio a fino, con alto contenido de minerales máficos (hornblenda>biotita), plagioclasa seriada y escasos “ojos” de cuarzo. Aflora en el sector norte y en contacto con las calizas Ferrobamba, ha originado cuerpos de skarn de granate - piroxeno > magnetita. Presenta alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

La quinta fase es llamada monzonita hornbléndica (MZH), de grano medio, con plagioclasas tabulares cortas y hornblendas prismáticas. Aflora en la parte central y se ramifica en forma de diques en diferentes direcciones. Esta fase cortó y enriqueció a los cuerpos de skarn a través de venillas de cuarzo con calcopirita, bornita y molibdenita (VILLEGAS CORDOVA, 2016).



Figura N° 03: Vista en planta de la Geología local Ferrobamba.



Fuente: Área de Geología Mina Las Bambas.

### 2.2.5. PRODUCCIÓN MINA LAS BAMBAS

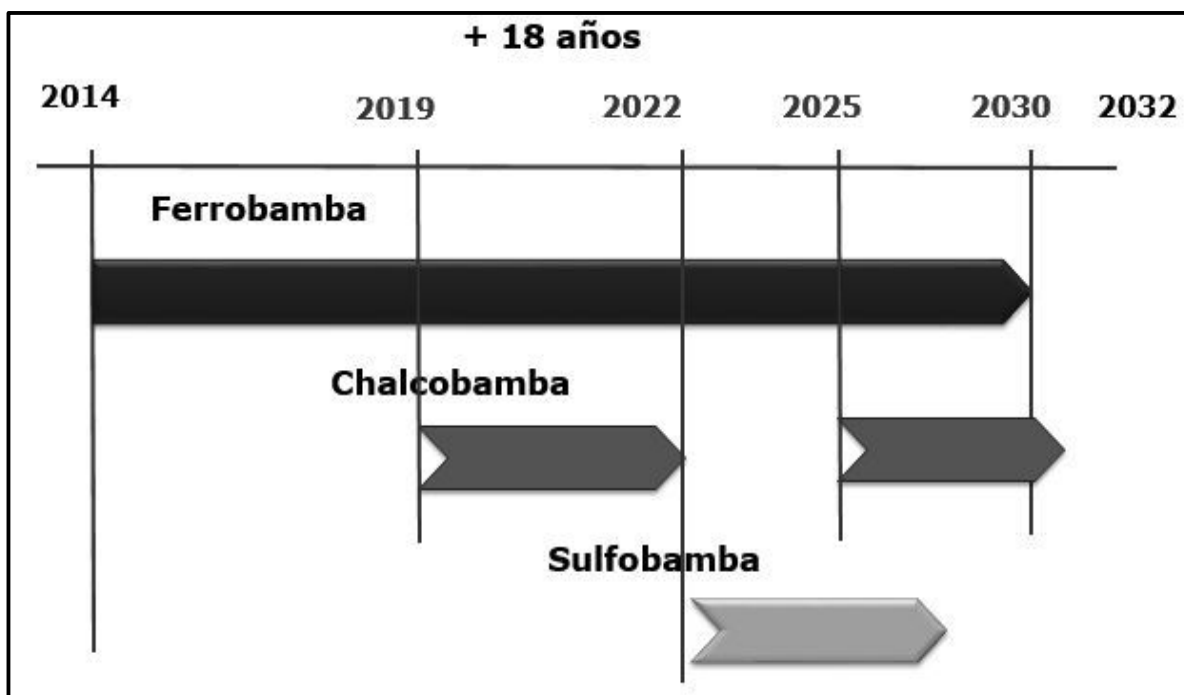
La unidad minera Las Bambas es la cuarta mina más grande del mundo en producción de cobre a tajo abierto, cuenta con una planta concentradora de cobre convencional y produce cobre limpio con créditos de oro, plata y molibdeno.

Las Bambas se encuentra en la fase de producción desde julio del 2016; los resultados de producción anual y la calidad del concentrado obtenido han sido positivos. Es importante destacar que la producción peruana de cobre se incrementó en 3.9%, con nuestro aporte y el de otras grandes mineras de cobre ubicadas en el Perú (LAS BAMBAS, 2018).

La planta concentradora de Las Bambas tiene una capacidad instalada de 145 toneladas por día (t/d), y genera concentrado de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) como producto. Durante el 2017, la producción supero las 450,000 toneladas de cobre en concentrado y una producción anual de 51,1 millones de toneladas y se espera que se produzcan entre 375,00 y 395,000 toneladas de cobre en concentrado de cobre en el 2018 (LAS BAMBAS, 2018).

Se espera producir de 455.000 a 475.000\* toneladas de cobre, y de 210.000 a 230.000 toneladas de zinc, en 2018.

**Figura N° 04:** Producción proyectada de los tres tajos.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas.

El tiempo de vida de la unidad minera Las Bambas es de dieciocho años, con un considerable potencial de exploración (LAS BAMBAS, 2018).

En la actualidad se viene explotando el tajo ferrobamba y se vienen realizando trabajos de preparación (desbroce), realizando voladuras secundarias para empezar con los trabajos de accesos para el preminado del tajo chalcobamba.

### 2.2.5.1. Dimensionamiento de la Mina Las Bambas

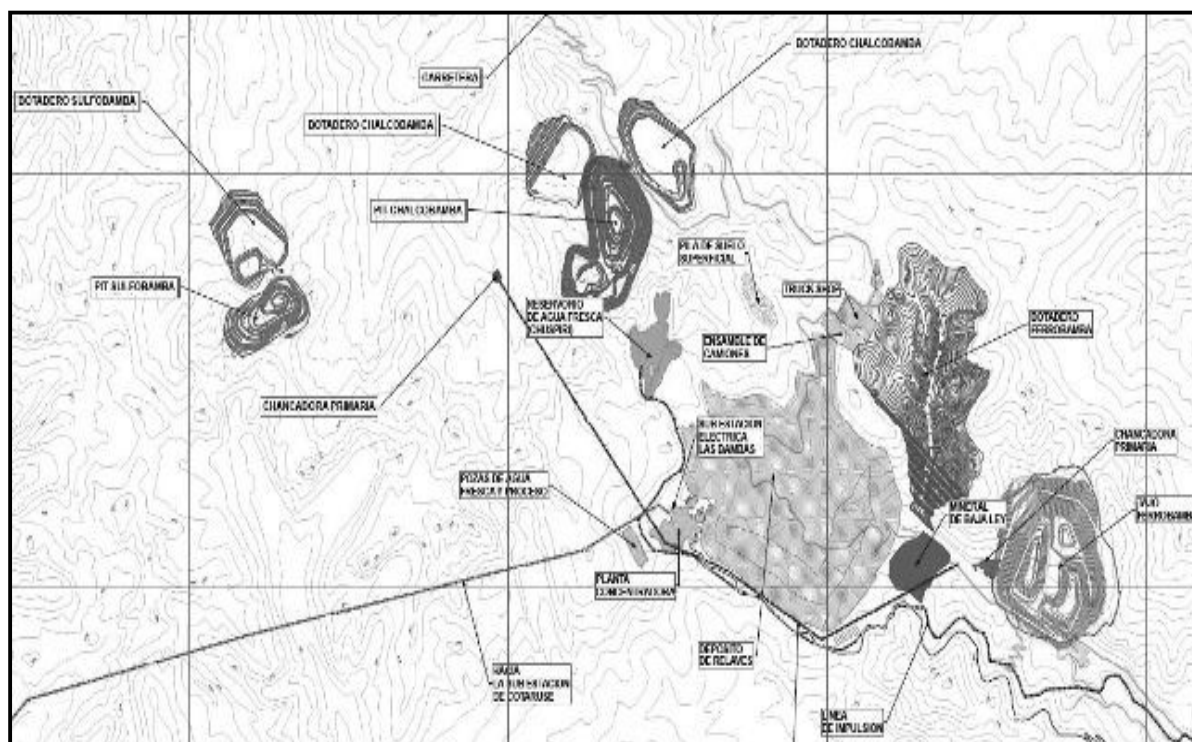
Tabla N° 01: Características de la unidad minera Las Bambas.

Características Mina Las Bambas	
Cobre	1100 MTn. / 0.77% de Ley
Molibdeno	169 ppm
Obtención de concentrado de Cobre	Flotación de Sulfuros
Molienda diaria	140,000 Tn/día
Producción de Concentrado de Cobre	300,000 Tn/año
Vida Útil	18 años
Uso de agua	1100 l/s

Fuente: Unidad Minera Las Bambas.

### 2.2.5.2. Ubicación de componentes Mina Las Bambas.

Figura N° 05: Componentes Las Bambas.

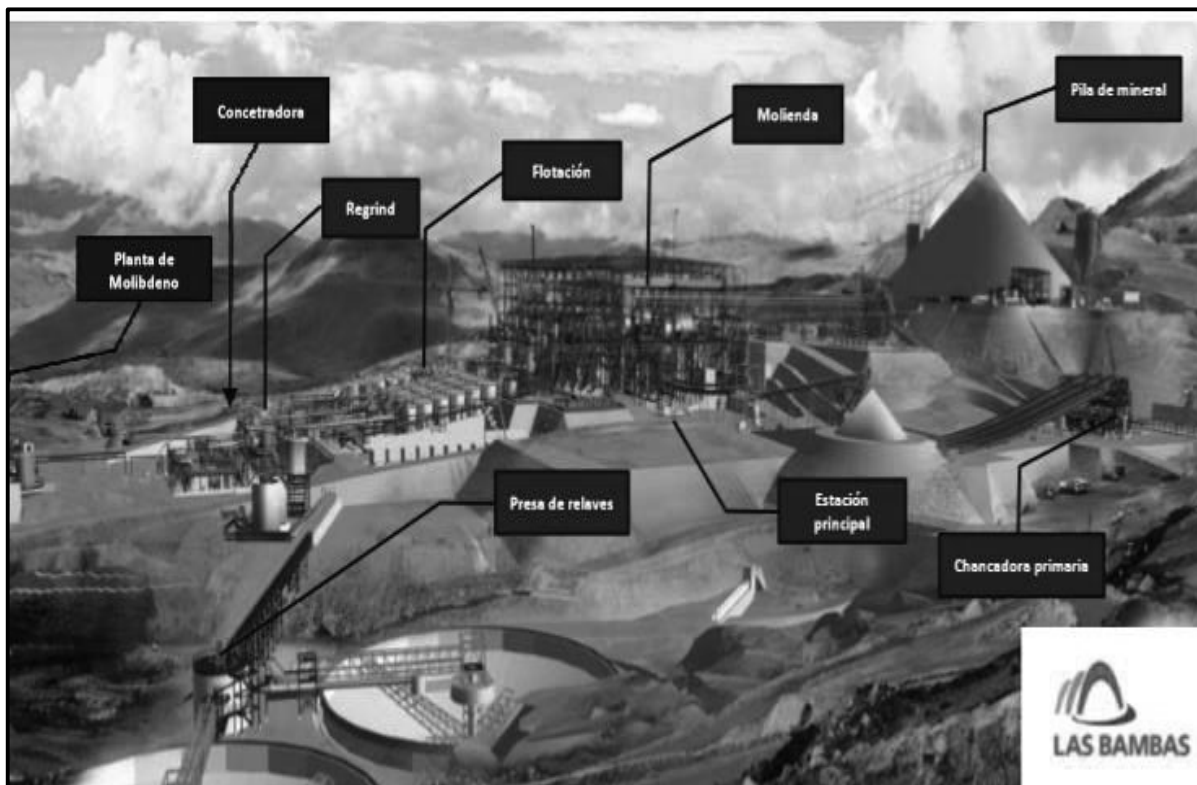


Fuente: Unidad Minera Las Bambas.

### 2.2.6. COMPONENTES DE OPERACIÓN LAS BAMBAS

Se detalla a continuación los siguientes componentes del procesamiento de mineral de la planta concentradora:

**Figura N° 06:** Componentes de operación Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 2015).

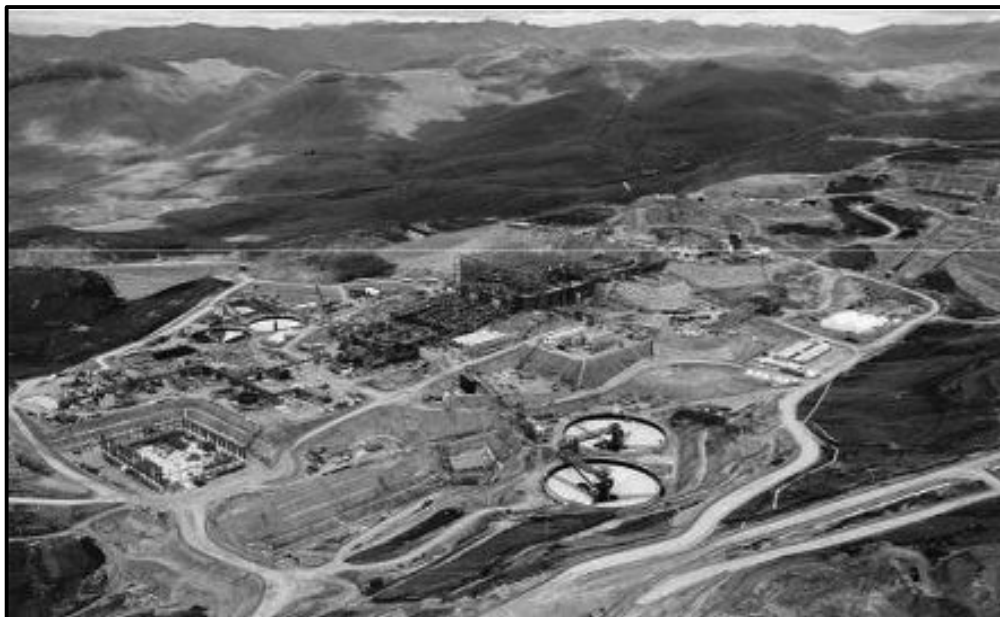
#### 2.2.6.1. Planta concentradora

El mineral triturado se almacenara en una pila de acopio de gruesos con capacidad total de 420 000 t. El mineral grueso servirá de alimentación para el circuito de molienda donde será molido hasta obtener los tamaños de partícula necesarios para permitir la liberación de los minerales valiosos de cobre y molibdeno. El mineral molido en forma de pulpa será clasificado en ciclones (gruesos y finos), y el material será conducido al circuito de flotación, en donde será sometido a distintos ciclos de flotación y limpieza (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

El concentrado Cu-Mo final procedente de la tercera limpieza será conducido a un espesador. Una fracción importante del agua utilizada en el procesamiento metalúrgico será recuperada a través del rebose (overflow) del espesador que fluirá por gravedad hacia la poza de acumulación de agua para proceso (VILLEGAS CORDOVA, 2016).

La planta concentradora se encuentra a una distancia de 5km del área de operaciones tajo Ferrobamba, donde inicialmente se tritura el material en el chancador primario para luego ser transportado mediante la faja transportadora overland hasta llegar a un punto de acopio y luego a los molinos de bolas y su posterior procesamiento.

**Figura N° 07:** Planta concentradora Las Bambas.



**Fuente** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

#### 2.2.6.2. Chancado

**Chancador primario:** dos juegos de chancadores giratorios ubicados junto al tajo Ferrobamba, para cuatro camiones en ciclo de descarga simultáneo Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

**Figura N° 08:** Chancador primario Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

#### 2.2.6.3. Faja transportadora terrestre

- El mineral se transporta desde el chancador primario hasta la planta concentradora a través de la faja transportadora terrestre (RIVERA, 20015).

- El chancador primario está a 5km de distancia de la planta concentradora (RIVERA, 20015).
- .El mineral se descarga desde la faja transportadora a una pila de acopio con capacidad viva de aproximadamente 18 horas de operación (RIVERA, 20015).

**Figura N° 09:** Faja transportadora Overland Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

#### 2.2.6.4. Molienda

Características del proceso de molienda:

- El mineral se recupera de la pila de acopio de ocho alimentadores de placas (RIVERA, 20015).
- Molienda a través de dos líneas que consisten en un molino SAG y un molino de bolas (RIVERA, 20015).
- Capacidad – 140,000 toneladas por día. Procesa unos 52 Mt por año (RIVERA, 20015).

**Figura N° 10:** Molienda Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

### 2.2.6.5. Área de flotación

A continuación se detalla las características del área de flotación:

- Planta de flotación de espuma convencional de Cu – Mo (RIVERA, 20015).
- Se tiene 28 celdas en el círculo rougher scavenger y 22 celdas en la 3ra. etapa de limpieza (RIVERA, 20015).
- El concentrado a granel se envía por tubería a la planta de separación de Mo que esta junto a la planta de flotación a granel (RIVERA, 20015).

**Figura N° 11:** Área de flotación Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

### 2.2.6.6. Relaves

Se tiene las siguientes características:

- Dos espesadores Delkor Hi-rate con un diámetro de 80m (RIVERA, 20015).
- La pulpa del flujo inferior tiene un 62% de sólidos (RIVERA, 20015).
- Recuperación de agua de 78% (RIVERA, 20015).

**Figura N° 12:** Espesadores Delkor Hi-rate Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas (RIVERA, 20015).

### 2.2.7. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN MINA LAS BAMBAS

Actualmente se mina el tajo ferrobamba con métodos de tajo abierto convencionales con perforadoras eléctricas, camiones mineros y palas eléctricas.

#### 2.2.7.1. Diseño del Tajo Ferrobamba

Los criterios de diseño para el pit ferrobamba son los siguientes:

- **Altura de Banco:** 15 m (H) para banco simple y 30 m para banco doble.
- **Angulo de Talud Total:** 34° (a) y ángulo de cara de banco de 65° (y).
- **Profundidad de los Tajos:** 855 m para el Tajo Ferrobamba, 435 m para el Tajo Chalcobamba, y 360 m para el Tajo Sulfobamba.
- **Ancho de Rampa:** 35 m, basado en un camión típico de 300 t.
- **Ancho Mínimo de Expansión:** 70 m por ambos costados y 45 m por un sólo costado, considerando un radio de carguío de 30 metros.
- **Pendiente de Rampa:** Máximo 10 %.
- **Altura de Berma:** Mínimo 1,7 m.

### 2.2.8. PROCESOS OPERATIVOS DE MINADO

El proceso operativo de minado en el Tajo Ferrobamba se describe básicamente en cuatro etapas, en torno a las cuales gira toda la operación de extracción. Estas son: Perforación, Voladura, Carguío y Acarreo.

#### 2.2.8.1. Perforación

Según (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003) la perforación de las rocas dentro del campo de las voladuras es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir unos huecos, con la distribución y geometría adecuada dentro de los macizos, donde alojar a las cargas de explosivo y sus accesorios iniciadores.

#### 2.2.8.2. Perforación por rotación

La rotación, que hace girar la broca entre impactos sucesivos, tiene como misión hacer que ésta actúe sobre puntos distintos de la roca en el fondo del barrero. En cada tipo de roca existe una velocidad óptima de rotación para la cual se producen los detritus de mayor tamaño al aprovechar la superficie libre del hueco que se crea en cada impacto (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003). Cuando se perfora con brocas de pastillas las velocidades de rotación más usuales oscilan entre 80 y 150 r.p.m, con unos ángulos entre indentaciones de 10° a 20 (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

En la Mina Las Bambas se realiza perforación rotativa con brocas tónicas efectuada con perforadoras eléctricas para taladros de producción y perforadoras Rock Drill para taladros de precorte.



### 2.2.8.2.1. Equipos de perforación

La Mina Las Bambas cuenta con 8 perforadoras rotativas eléctricas entre las marcas P&H y CAT, modelos 250XP y 320XPC.

La disponibilidad mecánica de estos equipos está en el rango de 91% llegándose a perforar 120 000 metros al mes, la productividad diaria por máquina es de 800 metros perforados.

Para la perforación de precorte se utilizan dos perforadoras a combustible de la marca Sandvik modelo DR560 y una perforadora Atlas Copco PV351D que perforan diámetros de 5" de 15 metros de longitud con inclinaciones de taladros de 45°, 53° y 70°.

La disponibilidad mecánica de los equipos de perforación de taladros de precorte está en el rango del 90%.

**Figura N° 13:** Equipos de perforación Mina Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas.

### 2.2.8.2.2. Perforación a talud final

Se tiene un patrón de perforación de los proyectos de voladura como se muestra a continuación.

**Cuadro N° 04:** Patrón perforación de taladros.

Tipo de Taladro	Diámetro (pulg)	Longitud (m)
Precorte	5"	16.50
Piloto	5"	5.50
Buffer	5"	15.50
Buffer	11" – 12 ¼"	15.50
Producción 1	13 ¼"	15.50
Producción	14 ¼"	16.50

**Fuente:** Área de perforación y voladura Mina Las Bambas.

### 2.2.8.2.3. Mallas de perforación y tipos de taladros

Las mallas de perforación son diseñadas por el área de perforación y voladura Las Bambas, que utilizan parámetros geológicos y geotécnicos para determinar el tipo de mezcla explosiva a utilizar, y asignar el burden, espaciamiento, sobreperforación y tipo de carga para cada malla y sus respectivos taladros. Taladros cargados con una, dos o tres primas.

**Tabla N° 02:** Especificaciones del tipo de diseño de taladros.

Tipo de diseño	Diámetro (pulg)	Equipo de Perforación	Carga Explosiva	Espaciamiento (m)
Precorte	5	Rock Drill DR 560	No	1.7
Buffer	5" - 12 1/4"	P&H	De acuerdo al diseño	5 - 6
Producción	12 1/4"	P&H	De acuerdo al diseño	7 - 8

**Fuente:** Área de perforación y voladura Las Bambas.

### 2.2.8.2. Voladura de rocas en el tajo Ferrobamba

De acuerdo a los criterios de la mecánica de rotura, la voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento (EXSA S.A, 2011).

Para la realización de las pruebas se utiliza mezcla explosiva gasificada en base a emulsión gasificable HA-73G (70 % Emulsión gasificable, 30 % Nitrato de Amonio), la mezcla es fabricada en el camión mezclador y cargado directamente a los taladros del proyecto de voladura, durante el proceso de carguío la mezcla explosiva sufre un proceso de gasificación que se da por la aplicación de un aditivo emulsificante Nitrito de Sodio emulsión es sometida a un proceso de gasificación mediante la aplicación del aditivo Nitrito de Sodio el cual durante la detonación y post voladura se optimizan los procesos.

Para realizar el carguío de taladros con mezcla explosiva gasificada se contó con la disponibilidad mecánica de 02 camiones preparados para el inicio de pruebas el camión MOD-030 (utilizado en sistema vaciable y bombeable) y el F0D-860 (apoyo en sistema bombeable), Estos camiones tienen las siguientes características:

#### 2.2.8.2.1. Camión Mezclador Sistema Vaciable FOD-860 (Q-16)

El camión mezclador se encuentra en perfectas condiciones mecánicas y operativas para realizar las pruebas con la ME 73G (Heavy Anfo Gasificado) en sistema vaciable.

Se realizó la calibración de los flujos del porcentaje de la solución gasificante determinándose las condiciones de trabajo siguiente:



- Flujo de ME-73G : 630 kg/min.
- Velocidad de Bomba : 1500 rpm
- Presión de bombeo : 45 psi
- Porcentaje de Solución G : 0.10 - 0.20%
- Flujo de Solución G : 0.8 lt/min
- Flujo de Petróleo + Aceite : 1.6 gl/min
- Porcentaje de Absorción de Petróleo : 6%

**Figura N° 14:** Camión mezclador sistema vaciable en Las Bambas.



**Fuente:** Área de operaciones Exsa S.A Las Bambas.

#### 2.2.8.2.2. Camión Fábrica Sistema Bombeable C6F-842 (Q-18)

El camión fábrica se encuentra en perfectas condiciones mecánicas y operativas para realizar las pruebas con mezcla explosiva gasificada (HA-73G).

Se realizó la calibración de los flujos del porcentaje de la solución gasificante determinándose las condiciones de trabajo siguiente:

- Flujo de ME-73G : 320 - 350 kg/min.
- Velocidad de Bomba : 1200 rpm
- Presión de bombeo : 60 psi
- Porcentaje de Solución G : 0.20%
- Flujo de Solución G : 07-08 lt/min
- Porcentaje de Absorción de Petróleo : 6%

Se cuenta con un equipo de voladura que a continuación se detalla:

- 02 camiones fábrica de 20 ton
- 02 camionetas accesorios

- 01 camioneta supervisión

Se mencionan algunas actividades preliminares a la detonación:

- Carguío de taladros con camión mezclador o fabrica.
- Control de densidad de la mezcla explosiva.
- Control del esponjamiento de la mezcla explosiva.
- Tapado de taladros con material inerte (gravilla).
- Amarre de malla.
- Iniciación electrónica.

**Figura N° 15:** Camión mezclador sistema vaciable en Las Bambas.



**Fuente:** Área de operaciones Exsa S.A Las Bambas.

### 2.2.8.3. Carguío de mineral

Una vez concluido el proceso de voladura y dando el claro para normalizar las operaciones por parte del área de perforación y voladura, se procede al carguío y acarreo de material. Para ello Las Bambas cuenta actualmente con una flota de equipos de carguío que a continuación se detalla:

**Cuadro N° 05:** Equipo de carguío Mina Las Bambas.

Flota de equipos	# Unidades	Capacidad cucharón (yd <sup>3</sup> )
CAT 7495	2	82
P&H 4100XPC	3	60
CAT 6060 FS	3	45
LETOURNEAU L2350-II	1	50

**Fuente:** Área Dispatch Mina Las Bambas.

En la siguiente figura se observa el carguío de mineral de la pala eléctrica al camión minero de 300 toneladas.

**Figura N° 16:** Carguío de mineral Las Bambas.



**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas.

#### 2.2.8.4. Acarreo – Transporte

El material fragmentado post voladura es minado por las palas eléctricas y cargadores frontales y cargados directamente al camión minero y llevado al chancador primario, botaderos y a diferentes puntos de acuerdo a la indicación del área de control Dispatch. La unidad minera Las Bambas cuenta con una flota de camiones de distintos modelos y capacidad de carga.

**Cuadro N° 06:** Equipo de acarreo Mina Las Bambas.

Flota de camiones	# Unidades	Capacidad cucharón (tn)
KOMATSU 930E-4SE	74	292
CAT 797F	12	363

**Fuente:** Área Dispatch Mina Las Bambas.

En la siguiente figura se observa al camión minero de 300 toneladas realizando el acarreo de mineral de las zonas de post voladura en distintas zonas del tajo Ferrobamba al chancador primario o al botadero, de acuerdo a un análisis del material volado.

Los camiones mineros se desplazan por vías principales en un carril de doble vía en dirección norte, oeste y sur.

**Figura N° 17:** Camión minero realizando el acarreo de mineral Las Bambas.



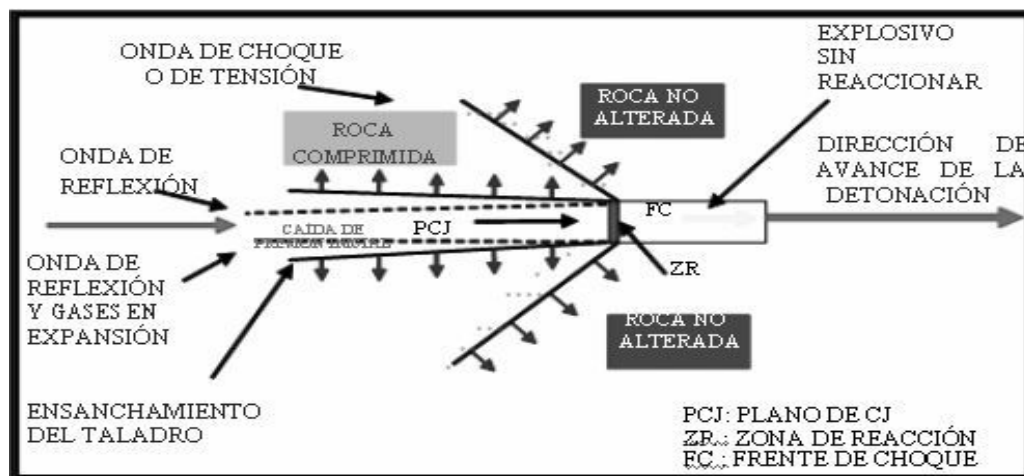
**Fuente:** Unidad Minera Las Bambas.

### 2.2.9. MECÁNICA DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA.

La fragmentación de las rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y la consecuente respuesta de la masa de la roca circundante involucrando factores de tiempo energía termodinámica onda de presión mecánica de rocas y otros en un rápido y complejo mecanismo de interacción (EXSA S.A, 2011).

Una explicación sencilla, comúnmente aceptada, que resume varios de los conceptos considerados en estas teorías, estima que el proceso ocurre en varias etapas o fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, de pocos milisegundos, durante el cual ocurre la completa detonación de una carga confinada, comprendiendo desde la fragmentación hasta el total desplazamiento del material volado (EXSA S.A, 2011). Estas etapas son:

**Figura N° 18:** Mecanismo de Fragmentación del Macizo Rocoso.



**Fuente:** Manual Práctico de Voladura (EXSA S.A, 2011).

Formación de Grietas Radiales. Una carga explosiva puntual (relación longitudinal /diámetro máximo: (6/1). Es decir no mayor a 6 veces el equivalente del diámetro del taladro produce generalmente una

excavación en forma de copa o de cráter de limitada profundidad, mientras que un taladro convencional (largo mayor de 6 diámetros) tiene expansión cilíndrica radial en toda su longitud (EXSA S.A, 2011).

Este mecanismo aún no está plenamente definido, existiendo varias teorías que tratan de explicarlo entre las que se pueden mencionar (EXSA S.A, 2011), son las siguientes:

- Teoría de reflexión (ondas de tensión reflejadas en una cara libre).
- Teoría de expansión de gases.
- Teoría de ruptura flexural (por expansión de gases).
- Teoría de torque (torsión) o de cizallamiento.
- Teoría de craterización.

### 2.2.9.1. Proceso de fragmentación de la roca

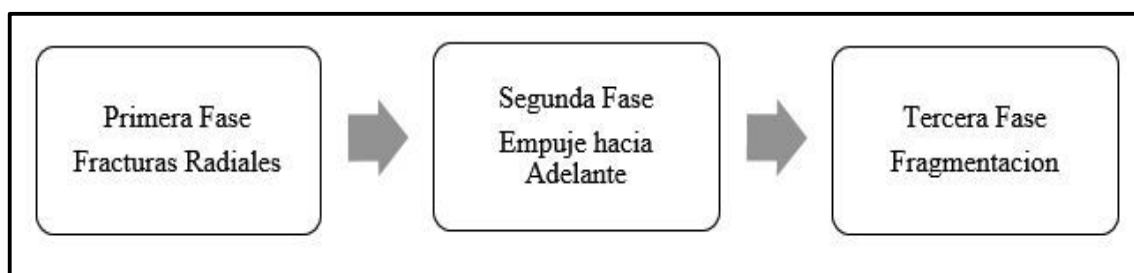
Según (AGREDA URIARTE, 1993), para poder obtener una buena fragmentación, como resultado de las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura, el proceso de fragmentación de rocas se debe ser bien entendido.

Existen también muchas teorías que tratan de explicar el proceso de los diversos mecanismos que toman lugar cuando se lleva a cabo la fragmentación de la masa rocosa por efecto de la energía producida por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial (AGREDA URIARTE, 1993),

### 2.2.9.2. Etapas del proceso de fracturamiento de rocas

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

**Figura N° 19:** Etapas del proceso del Fragmentación de la Rocas.



**Fuente:** Elaboración Propia.

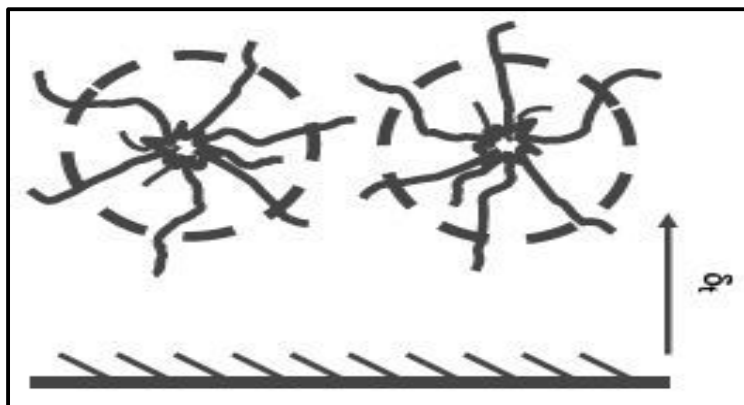
### 2.2.9.3. Primera fase fracturas radiales (Brisance)

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

del taladro y la relación de la velocidad de detonación con la velocidad de propagación de las ondas a través del macizo rocoso (AGREDA URIARTE, 1993).

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

**Figura N° 20:** Primera fase Fracturas Radiales.



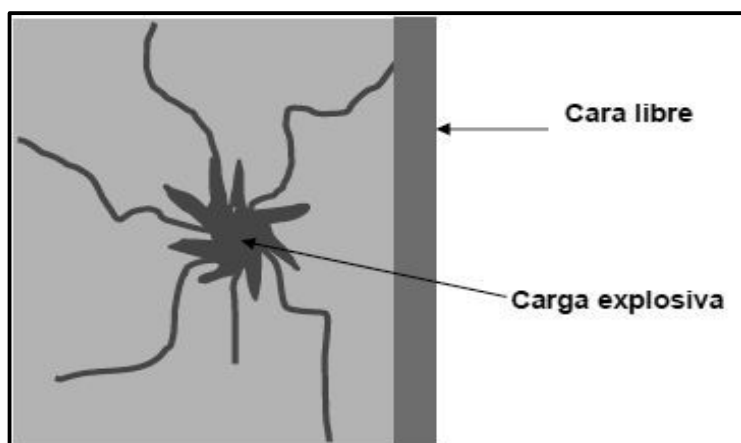
**Fuente:** Curso de Modelamiento matemático de la voladura de rocas (AGREDA URIARTE, 1993).

### 2.2.9.3. Segunda fase Empuje hacia Adelante (Heave)

Las altas presiones de los gases, hacen que estos produzcan las ondas compresivas las cuales serán refractadas y reflejadas. Las ondas compresivas reflejadas cambiarán de signo (negativo) y se convertirán en ondas tensionales. Esta transformación ocurrirá cuando las ondas compresivas arriben a una cara libre, cuando la masa rocosa cambie de densidad o cuando ellas encuentran fallas geológicas, planos estructurales, etc.

La fragmentación de la roca comenzará en la cara libre o en cualquier discontinuidad donde las ondas compresivas son reflejadas. Cuando las ondas compresivas cambian de signo y se convierten en ondas tensionales; ellas regresan de la cara libre o cualquier discontinuidad estructural, hacia el punto de origen de la detonación fracturando el macizo rocoso (AGREDA URIARTE, 1993).

**Figura N° 21:** Segunda fase Empuje hacia Adelante.



**Fuente:** Curso de modelamiento matemático de la voladura de rocas (AGREDA URIARTE, 1993).

#### 2.2.9.4. Tercera fase Fragmentación

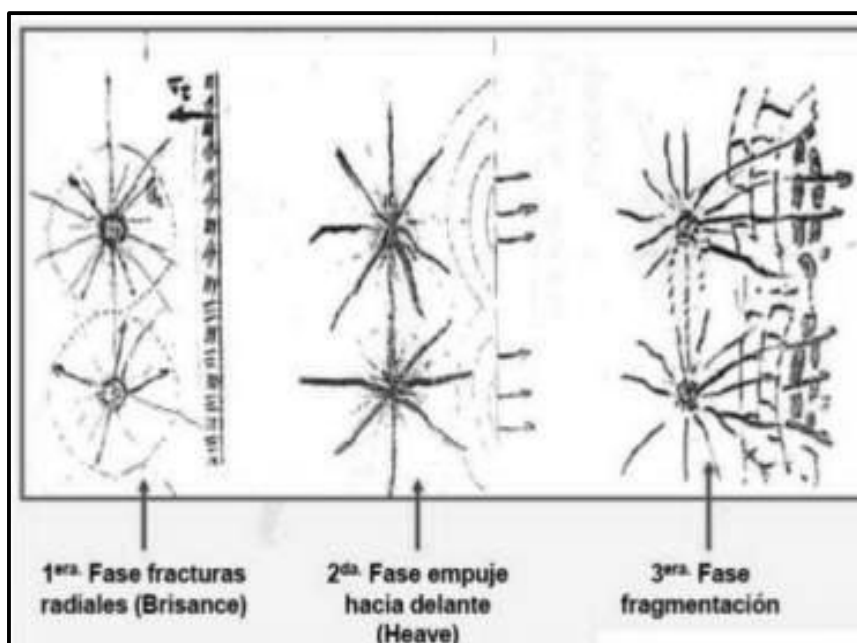
En esta etapa se produce la fragmentación total de la roca Johansson ha dicho que “Bajo la influencia de las altas presiones de los gases producidos por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial; las primeras fracturas radiales son extendidas, la cara libre falla y esta es movida hacia el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

Como en el caso del empuje hacia adelante (HEAVE); la primera parte del macizo rocoso es movida hacia adelante y la nueva cara libre reflejara lo restante de las ondas de choque producidas por las ondas compresivas (AGREDA URIARTE, 1993).

Luego, las ondas tensionales son suficientes para fracturar el macizo rocoso en estudio. Este proceso continuara hasta que las ondas tensionales requeridas para fracturar al macizo rocoso; y por fin todo el proceso de fragmentación de la roca habrán terminado (AGREDA URIARTE, 1993).

Muchos investigadores han dicho que la fragmentación es la más importante y única variable que debe ser tomada en cuenta para evaluar los resultados de un disparo desde un punto de vista técnico-económico-ecológico. Es debido a que la fragmentación es la única variable que Inter.-relaciona a todas las operaciones minero - metalúrgicas que conforman el ciclo total de la extracción del mineral (pre-minado, minado propiamente dicho procesamiento de minerales y venta de los productos minerales) (AGREDA URIARTE, 1993).

**Figura N° 22:** Tercera fase Fragmentación de la roca.

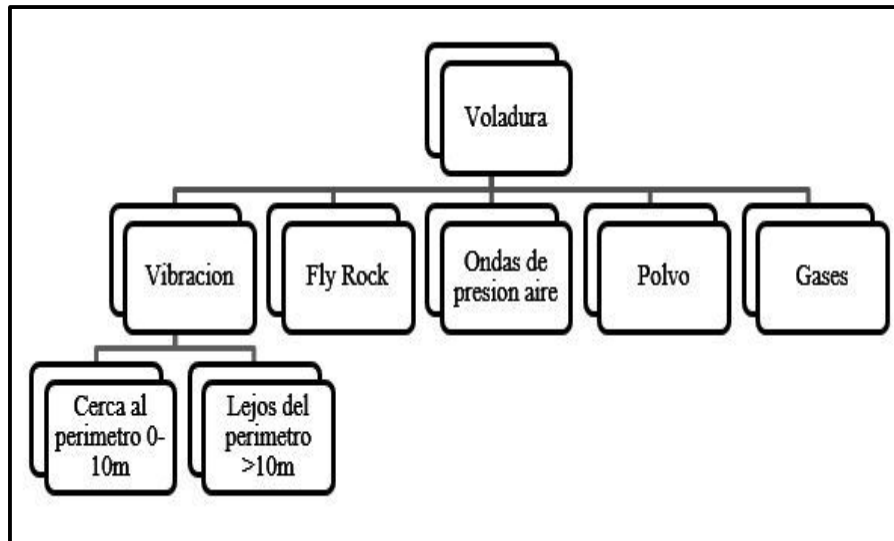


**Fuente:** Curso de modelamiento matemático de la voladura de rocas (AGREDA URIARTE, 1993).

#### 2.2.10. FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN

La definición mencionada es que “las vibraciones generadas por la voladura son movimientos cíclicos que ocurren dentro del macizo rocoso, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión” (“Curso de Vibraciones”, 2009).

**Figura N° 23:** Distribución de la Energía no útil de Trabajo en la Voladura.



**Fuente:** Voladura Controlada teoría y aplicaciones (AGREDA URIARTE, 2001).

### 2.2.10.1. Propiedades básicas de las ondas

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

$$Y = A * \text{sen}(wt + \phi) = A * (2\pi f) \quad (1)$$

**Figura N° 24:** Compresión y Tensión no Simétrica de una Roca.



**Fuente:** Centro de Innovación Tecnológico de Explosivos de Enaex (CINTEX, 2006)

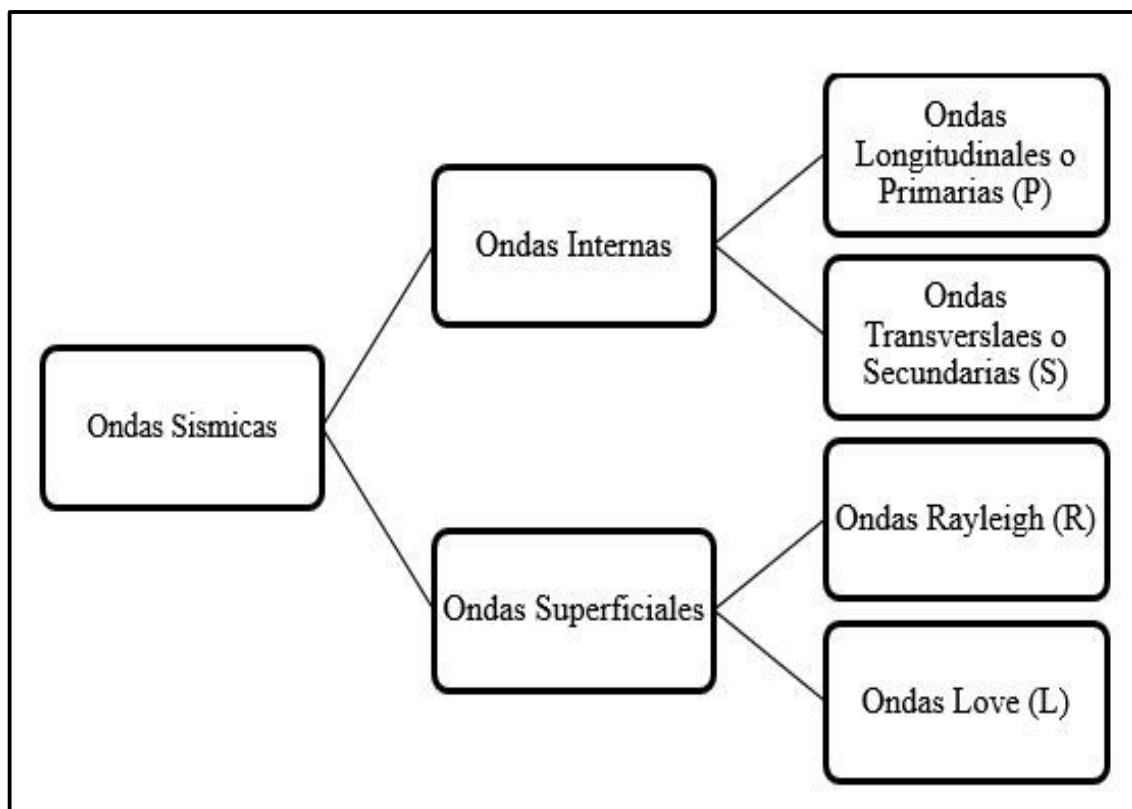
El fenómeno de la vibración por efecto de una voladura busca ser descrito por algunas ecuaciones clásicas de ondas elásticas sin embargo, aunque hasta la fecha es el modelo simplificado que mejor se adecúa para el análisis de este fenómeno.

### 2.2.10.2. Tipos de ondas en vibraciones

La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas crea tensiones que producen el fracturamiento en la roca. Esta además se propaga en forma esférica (en todos los sentidos) y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso que es transmitida por una combinación de mecanismos que se representa fundamentalmente a través de ondas (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

Los tres tipos principales de onda que se pueden observar cuando se monitorean las vibraciones generadas por voladura, aunque no todas ellas siempre se presentan o detectan- son los siguientes: Ondas de Compresión; Ondas de Corte o Cizalle y Ondas de Superficie. Las ondas de compresión y de corte viajan dentro de la roca y pueden penetrar cientos de metros, aún kilómetros en la corteza terrestre, y están referidas como ondas de cuerpo. Las ondas de superficie, sin embargo, se transmiten muy cercanas a la superficie del terreno, y penetran dentro de la corteza terrestre no más que 1,5 a 2 veces su longitud de onda (aunque esto pueda representar algunos cientos de metros) (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

**Figura N° 25:** Esquema de los principales Tipo de Ondas Sísmicas.

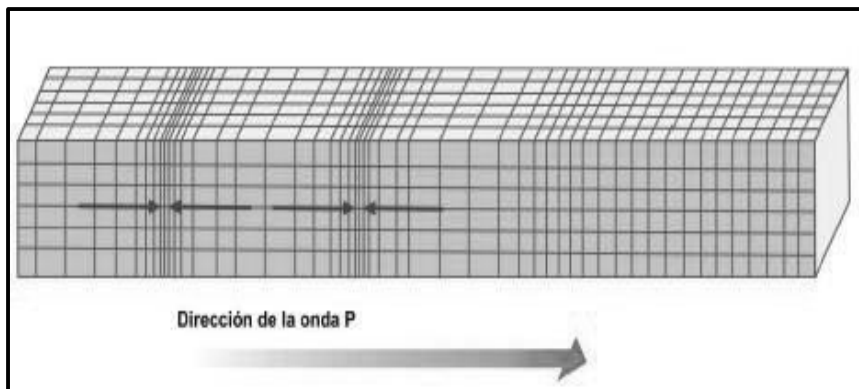


**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 2.2.10.2.1. Onda Longitudinal - Onda de Compresión (P)

Normal a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento a lo largo de una línea que une la fuente y el punto de registro. Consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión, con oscilaciones de las partículas en la misma dirección de propagación. El término primario se origina en que esta onda tiene una gran velocidad de propagación y por ende, es la primera en llegar al punto de medición (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

**Figura N° 26:** Ondas Transversal o Secundaria (S).



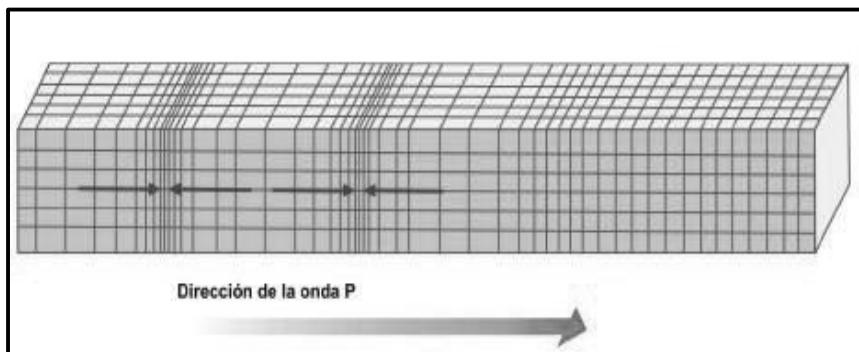
**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (CARAZO, 2012).

#### 2.2.10.2.2. Onda Transversal (S):

Perpendicular a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento en ángulos rectos a una línea que une la fuente y el punto de registro (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

Al momento que se genera la onda P, se produce un segundo tipo de onda que corta o tiende a cambiar la forma del material transmisor y genera movimientos en las partículas perpendiculares al frente de choque, acentuadas por el pulso de presión inicial; por la duración de la onda P o por discontinuidades del macizo rocoso. A este tipo de onda se le denomina de Onda S, de Corte, Forma o Secundaria (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

**Figura N° 27:** Ondas Transversal o Secundaria (S).



**Fuente:** Intervención Técnicas en Catástrofes (CARAZO, 2012)

#### 2.2.10.2.3. Onda de Superficie

Son generadas en la superficie en respuesta a la interacción de las ondas P y S con la superficie.

Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie de la tierra, ésta experimenta movimientos verticales y horizontales. Las ondas así producidas son denominadas “elásticas de superficie” y también como ondas Rayleigh y Love. La onda Rayleigh, predicha matemáticamente por Lord Rayleigh, imprime un movimiento en trayectoria elíptica contraria a la de propagación de avance de la onda. La onda Love (onda-Q) más rápida que la Rayleigh, da lugar a un movimiento transversal, relativo a la dirección de avance de la onda (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

### 2.2.10.3. Onda aérea

Según (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004), la detonación de una carga de explosivo dentro de un barreno desarrolla una alta presión debido a la expansión de los gases. Una vez que se produce la fracturación de la roca, los gases escapan hacia la atmósfera produciendo una perturbación conocida por onda aérea.

La onda aérea tiene dos componentes: el ruido, que es la parte del espectro comprendido entre 20.000 y 20 HZ y que es percibido por el oído humano, y la vibración restante, que es la parte del espectro comprendido por debajo de 20 HZ y que no es percibido por el oído (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).

Aunque la onda aérea normalmente disminuye con la distancia, debido a que las altas frecuencias se atenúan más rápidamente, es posible que a distancias apreciables de la voladura, se produzcan vibraciones con ruido mínimo (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).

Según (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004), menciona que el nivel de ruido se mide normalmente en decibeles (dB). También puede medirse como una sobrepresión, es decir, como la presión por encima de la presión atmosférica.

Oriard ilustra este fenómeno y llega a indicar que un observador es tres veces más sensible a las vibraciones acompañadas de ruidos que sin ellos (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).

#### 2.2.10.3.1. Criterio de daño

Según (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004), señala que ocasionalmente la onda aérea puede producir daños a la estructura directamente, lo normal es que se manifieste como ruido de ventanas, puertas, vajillas, etc. Siskind y Summers (1974) recomiendan los valores que se indican en la siguiente tabla.

**Tabla N° 03:** Límites del nivel de ruido existentes.

	LÍMITES DEL NIVEL DE RUIDO		
	LINEAL PICO * dB(L)	C-PICO dB(C)	A-PICO dB(A)
NIVEL SEGURO	128	120	95
NIVEL DE PRECAUCIÓN	128 a 136	120 a 130	95 a 115
NIVEL LÍMITE	136	130	115

(\*) **Recomendado**

**Fuente:** (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).



Especial atención debe ponerse en la comparación de los niveles de ruido, pues los dB(L) se refieren a una escala logarítmica. Una sobrepresión de 120 dB(L) es un 78.6 % mayor que otra de 115 dB(L) (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).

**Tabla N° 04:** Efecto probable ocasionada por la sobrepresión.

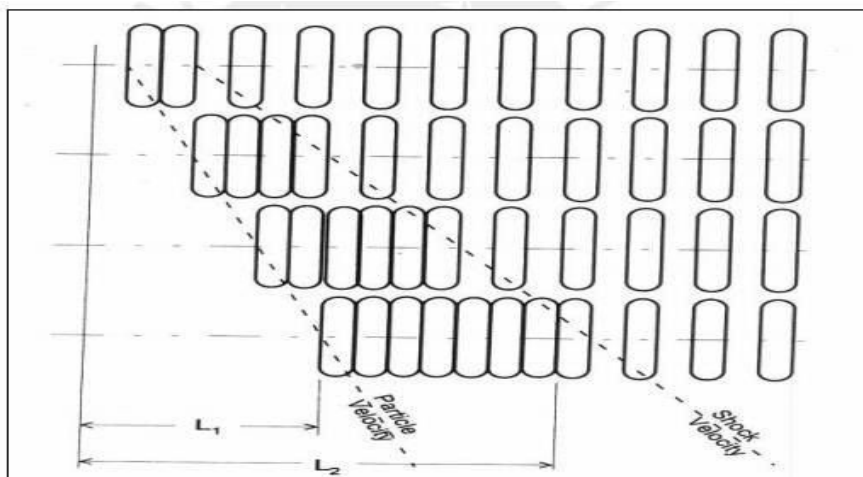
SOBREPRESION		EFEECTO PROBABLE
180 dB(L)	20,0 kPa	- Daños importantes en estructuras convencionales.
> 170	> 6,3	- Aparición de grietas en enlucidos.
170	6,3	- Rotura de muchos cristales de ventanas.
150	0,63	- Rotura de algunos cristales de ventales.
140	0,2	- Probable rotura de grandes cristales de ventanas.
136	0,13	- Límite de onda aérea propuesto por el USBM.
120	0,02	- Quejas.
115	0,0112	- < 6 % de la sobrepresión que puede causar la rotura de grandes cristales.

**Fuente:** (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 2004).

### 2.2.11. VELOCIDAD PICO PARTÍCULA

Analizando el fenómeno de las vibraciones, es importante hacer una distinción entre dos aspectos que aunque son bien diferenciados, suele caerse en el error de confundirlos y hasta usarlos equivocadamente al momento de realizar ciertos cálculos. Nos referimos a la propagación o transmisividad de la vibración por el medio, y al movimiento propio que genera el paso de dichas vibraciones en cada una de las partículas por dicho medio. Por lo tanto, es fundamental comprender que existe una separación entre los conceptos de velocidad de propagación (velocidad con la que la vibración se propaga por un medio) y la velocidad de partícula (SENCICO, 2016).

**Figura N° 28:** Análisis de la Velocidad de partícula y de Propagación. Tomado de presentación “Shock Waves”, Dr. Eric Rinehart (Defense Threat Reduction Agency).



**Fuente:** (ORIHUELA CASTILLO, 2009).

### **2.2.11.1. Efectos de la Voladura**

En general, las voladuras generan vibraciones en el macizo rocoso, las cuales pueden tener diferentes efectos negativos sobre infraestructuras (desde edificios hasta centrales hidroeléctricas), y además, ocasionar daños a las mismas estructuras de la masa rocosa, como fallas y diaclasas; todo esto puede traer consecuencias graves. Los análisis de la velocidad pico partícula y las frecuencias influyen directamente con el estudio de los efectos en una voladura (SENCICO, 2016).

### **2.2.11.2. Análisis de la Velocidad Pico Partícula**

Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física debe de ser cuantificada, entre las cuales tenemos el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Las velocidades Pico Partícula o también llamadas VPP, están definidas como el valor máximo de cualquiera de las tres magnitudes mencionadas que varía durante cierto intervalo de tiempo (SENCICO, 2016).

Según (SENCICO, 2016) de todos los parámetros mencionados, universalmente, se considera a la velocidad de vibración como la mejor representante del nivel de una vibración y los daños que pueda causar, tanto a edificaciones como a personas.

Los efectos en una voladura están referidos a la cantidad de vibraciones producidas en una masa rocosa, las cuales son medidas mediante las velocidades sísmicas. Por tal motivo, se puede encontrar una relación directa entre la naturaleza del daño producido por dichas vibraciones y la velocidad pico partícula, medida en el disparo de la voladura (SENCICO, 2016).

### **2.2.11.3. Análisis de Frecuencias**

Según (SENCICO, 2016) por otro lado, no solo el valor de la VPP es el único índice de la peligrosidad con respecto a una estructura de una vibración, sino también, se puede considerar la frecuencia de la misma.

Las dos principales respuestas de una estructura respecto a las vibraciones dependerán del nivel de la frecuencia, para rangos de frecuencias altas los componentes individuales de las estructuras vibran, dicho movimiento es conocido como la “respuesta midwall”; en el caso de tener rangos de frecuencias bajas, se puede producir un movimiento total de la estructura, debido a su frecuencia natural baja de oscilación, la cual normalmente se encuentra entre los rangos de 5 - 20 Hz (SENCICO, 2016).

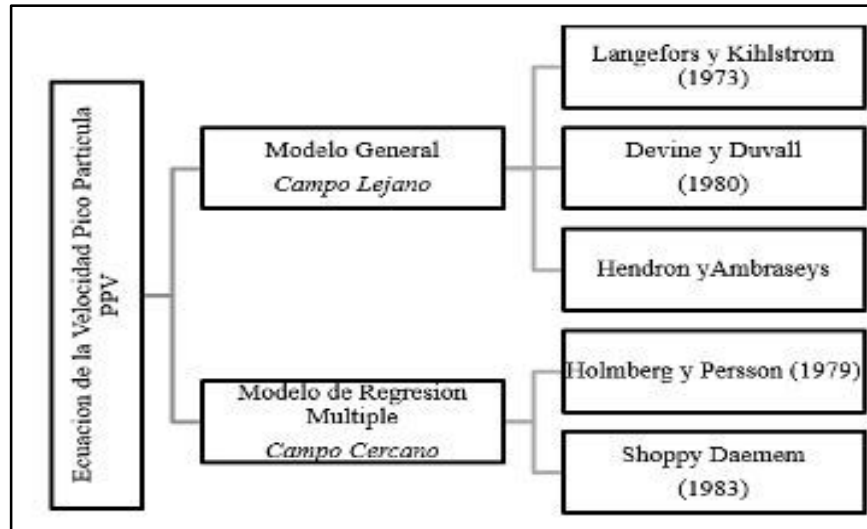
En este último caso, el daño se origina debido a que la frecuencia de onda, producida en un disparo en una voladura, resulta ser igual a la frecuencia natural de dicha estructura; esto originaría la máxima absorción de energía por parte de la estructura y aumentarían las probabilidades de que se puedan causar daños en la misma (SENCICO, 2016).

### **2.2.11.4. Ecuación de la Velocidad Pico Partícula**

Según (AGREDA URIARTE, 2013) Se menciona que “varios modelos experimentales que representan la velocidad partícula en función del explosivo detonante y la distancia a la que se registra dicha detonación(100-103):



**Figura N° 29:** Análisis de la PPV según la Distancia y la Geometría de la Onda Sísmica.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.2.11.4.1. Modelo General (Devine y Duvall, 1980)

$$PPV = K * (Ds)^\alpha \quad (2)$$

**Fuente:** (ORIHUELA CASTILLO, 2009).

Dónde:

PPV: Velocidad pico partícula (mm/s).

Ds: Distancia escalar.

K: Constante representativa de las características geológicas del lugar.

$\alpha$ : Factor de atenuación o decaimiento.

Según (ORIHUELA CASTILLO, 2009) el modelo más utilizado en minería superficial es el de raíz cuadrada y por ende también será utilizado en el presente estudio. Teóricamente el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generada por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto, es el de DEVINE puesto que utiliza cargas explosivas con geometría cilíndricas se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga. Según Dowding C.H. (2000) menciona que “la formulación clásica de la distancia escalada (raíz cuadrada) está basada en el análisis estadístico de un gran número de datos”

Se considera simetría cilíndrica:

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

**Fuente:** (ORIHUELA CASTILLO, 2009).

Se considera simetría esférica:

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/3}} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

**Fuente:** (ORIHUELA CASTILLO, 2009).

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula (mm/s).

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

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

K: Factor de velocidad.

$\alpha$ : Factor de atenuación o decaimiento.

### 2.2.12. NORMATIVA DE VIBRACIÓN INTERNACIONAL

Trabajos realizados en diversos países Europeos, en Canadá, USA y en Australia propusieron diferentes valores de velocidad máxima de partícula, tratando de esta manera evitar daños a construcciones. Los valores propuestos se sitúan usualmente entre el rango de 10 – 50 mm/s (SENCICO, 2016).

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

**Tabla N° 05:** Normas Internacionales de Vibración.

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

<sup>a</sup> La Norma Alemana tiene actualizaciones en los años 1999 y 2001.

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (AGREDA URIARTE, 2013 pág. 68).

### 2.2.12.1. Norma Alemana – DIN 4150

Según (ESCOBAR SÁNCHEZ, 2013) el Instituto de Normalización Alemana (DIN) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, el primero en 1975, el cual fue desglosado (3 partes) y actualizado en 1999 y 2001. Los criterios utilizados por la norma son:

- Su campo de aplicación es a todo tipo de fuente.
- Las variables medidas son: PVS (Velocidad de Partícula Resultante) Y PPV (Velocidad Pico Partícula – Vertical).
- Los valores indicativos recomendados dependen del tipo de edificación.

La normativa alemana es considerada una norma muy conservadora en lo que respecta a vibraciones producidas por voladura (ESCOBAR SÁNCHEZ, 2013).

En su tercera parte dan los valores de las velocidades máximas para la cimentación y para el plano del pico más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de corta duración. Si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente (ESCOBAR SÁNCHEZ, 2013) .

**Tabla N° 06:** Norma Alemana DIN 4150 (1999).

Clase de Construcción	FRECUENCIA FUNDAMENTAL			NS <sup>a</sup>
	1-10 Hz.	10-50 Hz.	50-100 Hz.	TF <sup>b</sup>
1-Edificaciones industriales con diseños robustos	20 <sup>c</sup>	20-40	40-50	40
2-Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	5-15	15-20	15
3- Edificaciones sensibles a vibraciones	3	3-8	8-10	8
Adaptado de DIN (2001a)		b. Todas las frecuencias.		
a. Nivel sup. Componente horizontal.		c. Velocidad de partícula en mm/s.		

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (AGREDA URIARTE, 2013 pág. 69).

### 2.2.12.2. Normativa Americana USBM RI8507

Según (AGREDA URIARTE, 2013) el USBM (United States Bureau of Mines), es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen.

Una de las primeras investigaciones relacionadas a las vibraciones producto de voladuras consistió en hacer detonar cierta cantidad de explosivo en un desmante de rocas, para posteriormente, medir los



daños causados en las estructuras cercanas. Este fue el inicio de un programa de investigaciones por el USBM en 1930 (AGREDA URIARTE, 2013).

El primer trabajo que realizó este equipo fue el de desarrollar un tipo de sismógrafo que se pudiera adaptar a la tarea de captar vibraciones producidas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones originadas por movimientos telúricos, y a varios proyectos (AGREDA URIARTE, 2013).

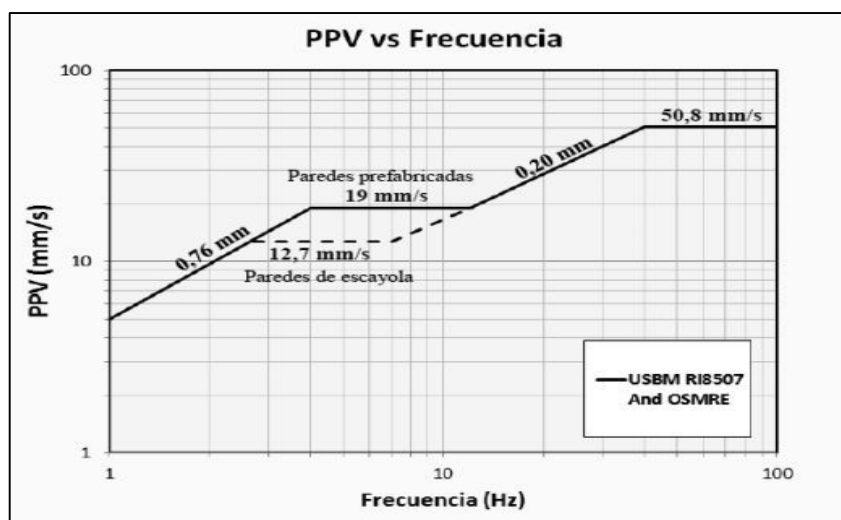
**Tabla N° 07:** Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U.S. Bureau of Mines en 1980.

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

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (AGREDA URIARTE, 2013 pág. 73).

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

**Gráfico N° 01:** Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines, 1980. Tomado de Siskind et al., 1980.



**Fuente:** (SENCICO, 2016).

Los límites de velocidad son exclusivos para edificaciones residenciales, diferenciando valores para viviendas con paredes con yeso y paredes aligeradas, a estas últimas se les permite mayores velocidades resultantes en el rango de frecuencias aproximadamente entre 4 y 11 Hz (SENCICO, 2016). Los valores representativos son:

**Tabla N° 08:** Valores Representativos USBM RI8507.

FRECUENCIA (HZ)	VPP (mm/s)
1 - 2.6	5 - 12.7
2.6 - 10	12.7
10 - 40	12.7 - 50.8
40 - 100	50.8

**Fuente:** (SENCICO, 2016).

### 2.2.12.3. Normativa Americana OSM 817.67

La norma OSM (Office of Surface Mining) esta norma se desarrolló para la minería de carbón. Cuando preparaba sus normas, modifico los criterios propuestos por la USBM basados en contrapropuestas que recibieron y que contenían estándares menos rigurosos, similares al criterio alterno de voladura de la USBM. Reconociendo una dependencia de la frecuencia para la vibración asociada con la distancia, la oficina de minería de superficie presento su norma de la siguiente manera (AGREDA URIARTE, 2013): La tabla N° 09 combina los efectos de la distancia y de la frecuencia, en distancia cortas, predomina la vibración con alta frecuencia. En distancias más grandes, la vibración de alta frecuencia se ha atenuado o disipado y predomina la vibración de baja frecuencia. Los edificios tienen características de respuesta de baja frecuencia entrara en resonancia y pueden resultar con daños. Por lo tanto, para distancias escaladas mayor  $D_s = 29.5$ . En las distancias más cortas se permite una velocidad pico partícula más alta de 31.8 mm/s y una distancia escalar menor de 22.7 (AGREDA URIARTE, 2013).

**Tabla N° 09:** Norma Norteamericana OSM 817.67.

Distancia al área de voladura (m)	Velocidad máxima de partícula (mm/s)	Distancia reducida que se aconseja cuando se dispone de instrumentos ( $m/Kg^{0.5}$ )
0 - 100 m	32	22.3
100 - 1500 m	25.4	24.5
> 1500 m	19	29

**Fuente:** Analisis y Control de Vibraciones en Voladura (AGREDA URIARTE, 2013 pág. 73).



#### 2.2.12.4. NORMATIVA PERUANA: GUIA AMBIENTAL PARA LA PERFORACION Y VOLADURA EN OPERACIONES MINERAS 1995

La vibración máxima de tierra no deberá exceder los siguientes límites en donde se encuentre cualquier vivienda, edificio público, colegio, iglesia, o edificios comunal o institucional fuera del área de coladura (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 1995):

**Tabla N° 10:** Norma Nacional Peruana.

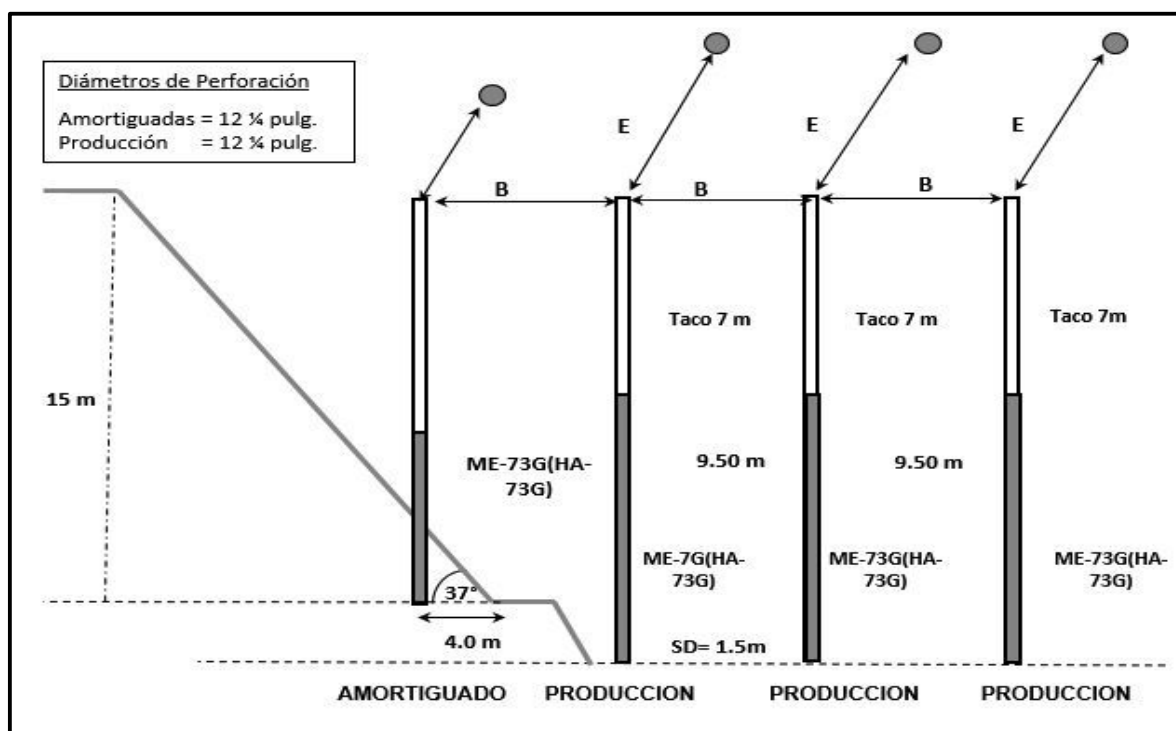
Distancia D desde el área de voladura en pies	PPVmax para vibraciones de tierra en pulg./seg.	Distancia Escalar para usarse en monitoreo sísmicos
0 – 300 pies (91m)	1.25 (31.75 mm/s)	50
301 – 5000 pies (91 - 1,524m)	1 (25.40 mm/s)	55
5001 a mas (1,524 a mas)	0.75 (19.05 mm/s)	65

**Fuente:** (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 1995).

La vibración de tierra se medirá como velocidad de partícula. La velocidad de partícula deberá registrarse en tres direcciones recíprocamente perpendiculares.

#### 2.2.13. PARÁMETRO DE DISEÑO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

**Figura N° 30:** Diseño de los parámetros de voladura.



**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.2.13.1. Burden

También denominada piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura. Se considera el parámetro más determinante de la voladura. Depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere conseguir (EXSA S.A, 2011).

$$B = 3,15 \varnothing_e \times \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_r}} \quad (5)$$

Fuente: (EXSA S.A, 2011)

Donde:

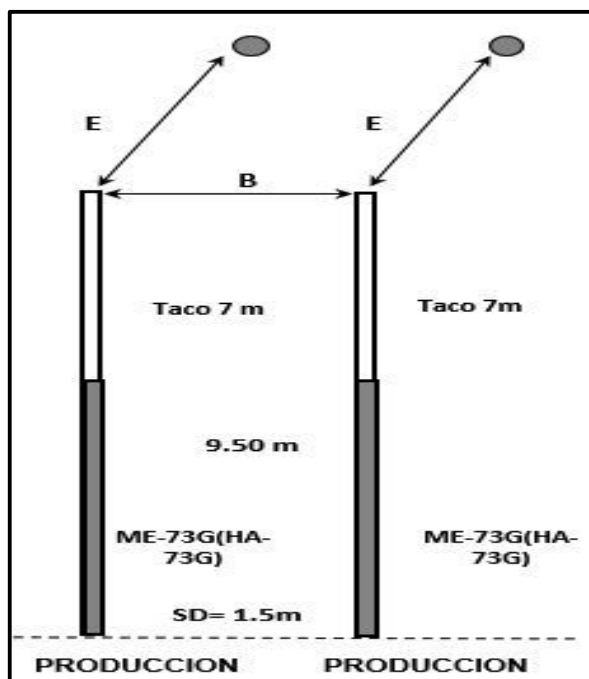
B : burden, en pies.

$\varnothing_e$  : diámetro del explosivo, en pulgadas.

$\rho_e$  : densidad del explosivo.

$\rho_r$  : densidad de la roca.

Figura N° 31: Diseño del Burden.



Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.13.2. Espaciamiento

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, espaciamentos muy pequeños producen exceso de trituración y craterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. (EXSA S.A, 2011).

$$E = 35 \text{ a } 34 \varnothing$$

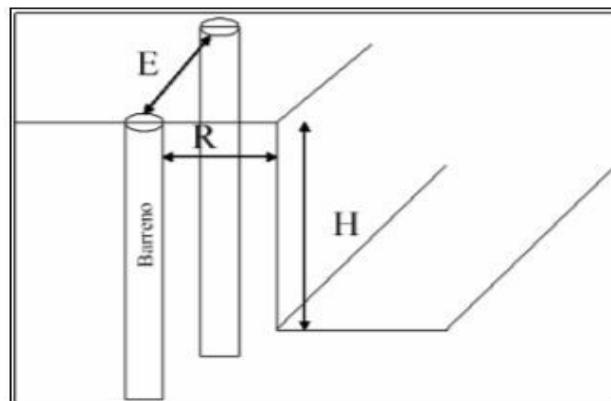
(6)

Fuente: (EXSA S.A, 2011).

Donde:

$\varnothing$ : Diámetro del taladro

Figura N° 32: Burden y Espaciamiento

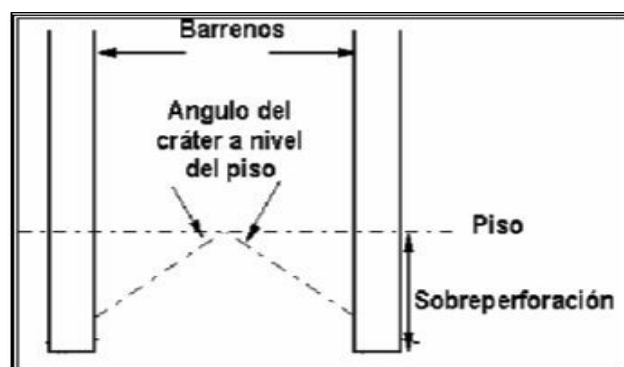


Fuente: Freites, 2002.

### 2.2.13.3. Sobreperforación

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 (EXSA S.A, 2011).

Figura N° 33: Sobreperforación sobre el nivel del piso



Fuente: Freites, 2002.

#### 2.2.13.4. Longitud de taco (T)

Normalmente el taladro no se llena en su parte superior o collar, la que se rellena con material inerte que tiene la función de retener a los gases generados durante la detonación, sólo durante fracciones de segundo, suficientes para evitar que estos gases fuguen como un soplo por la boca del taladro y más bien trabajen en la fragmentación y desplazamiento de la roca en toda la longitud de la columna de carga explosiva (EXSA S.A, 2011).

$$T = L + SP/3 \quad (7)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

o igual a la del burden:

$$T = B \quad (8)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.13.5. 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 (EXSA S.A, 2011).

$$H = 10 + 0,57 (C - 6) \quad (9)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

C : es la capacidad del cucharón de la excavadora en m<sup>3</sup>.

### 2.2.14. CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EXPLOSIVA

#### 2.2.14.1. Carga de fondo

Es la carga explosiva de mayor densidad y potencia requerida al fondo del taladro para romper la parte más confinada y garantizar la rotura al piso, para, junto con la sobreperforación, mantener la razante, evitando la formación de resaltos o lomos y también limitar la fragmentación gruesa con presencia de bolones. Su longitud es normalmente equivalente a la del burden más la sobreperforación:  $B + 0,3 B$ ; luego, la carga de fondo está conformada por un iniciador y un detonador que actúan directamente con un carga de columna (EXSA S.A, 2011):



$$CF = 1,3 B$$

(10)

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

No debe ser menor de 0,6 B para que su tope superior esté al menos al nivel del piso del banco. Se expresa en kg/m o lb/pie de explosivo (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.14.2. Carga de columna

Se ubica sobre la carga de fondo y puede ser de menos densidad, potencia o concentración ya que el confinamiento de la roca en este sector del taladro es menor, empleándose normalmente ANFO convencional, Examon-P o ANFO Pesado en relaciones de 10/90 a 20/80. La altura de la carga de columna se calcula por la diferencia entre la longitud del taladro y la suma la carga de fondo más el taco (EXSA S.A, 2011).

$$CC = L - (CF + T)$$

(11)

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Usualmente  $CC = 2,3 B$ .

#### 2.2.14.2. Cargas segmentadas o espaciadas

Normalmente se emplean cargas continuas en taladros de pequeña o mediana longitud, pero en taladros largos o en aquellos que se requiera disminuir la energía pero manteniéndola distribuida en toda su longitud, se emplean cargas espaciadas con tacos inertes intermedios y con un iniciador en cada una para garantizar su salida. Estas cargas pueden ser del mismo tipo de explosivo o emplearse uno de mayor densidad o potencia en la primera carga al fondo. Las salidas pueden ser simultáneas o con diferentes tiempos de salida para cada una, mediante retardos en orden ascendente o descendente, según el diseño de la voladura o los efectos que se quieran obtener (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.14.3. Carga específica (CE)

Llamado también consumo específico o factor de carga (powder factor). Es la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 m<sup>3</sup> o yd<sup>3</sup> de roca. Se expresa en kg/m o lb/yd (EXSA S.A, 2011)

$$CE = \frac{\text{Total de explosivo utilizado en kg}}{\text{Total de m}^3 \text{ rotoscubicados}}$$

(12)

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

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 (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.14.4. Estimación de cargas

Volumen a romper por taladro: Malla por altura de taladro (EXSA S.A, 2011).

$$V = B \times E \times H = m^3 \text{ por taladro} \quad (13)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Tonelaje: volumen por densidad de la roca o mineral.

#### 2.2.14.5. Volumen de explosivo

Diámetro de taladro por longitud de la columna explosiva (columna continua) o por la suma de las cargas segmentadas (EXSA S.A, 2011).

$$V_e = \emptyset \times C_e, \text{ en } m^3 \quad (14)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.14.6. Factor de carga (FC)

Es la relación entre el peso de explosivo utilizado y el volumen de material roto (EXSA S.A, 2011).

$$FC = \frac{W_e}{V} \quad (15)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

$W_e$  = Cantidad de explosivo (Kg).

$V$  = Volumen de material roto ( $m^3$ )

#### 2.2.14.7. Factor de Potencia

Es la relación entre el peso de explosivo utilizado y tonelada de roca (EXSA S.A, 2011).



$$FP = \frac{We}{Tn} \quad (16)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

We = Cantidad de explosivo (Kg).

Tn = Tonelada de roca

#### 2.2.14.8. Tonelaje roto

El tonelaje roto es igual al volumen del material roto multiplicado por la densidad de dicho material (EXSA S.A, 2011).

$$\text{Tonelaje} = V \times \rho r \quad (17)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

#### 2.2.14.9. Carga específica para cada taladro en voladuras de varias hileras

**Según,** (EXSA S.A, 2011). Primera fila (burden a la cara libre frontal inicial):

$$Ce = (H - SP) \times E \times (B + T/2) \times FC, \text{ en kg.} \quad (18)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

**Según,** (EXSA S.A, 2011). Para la segunda fila y subsiguientes:

$$Ce = (H - SP) \times E \times B \times FC, \text{ en kg.} \quad (19)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

Ce : carga explosiva, en kg.

H : profundidad de taladro.

SP : sobre perforación.

E : espaciamiento entre taladros.

B : burden.

T : piso quedado.

FC : factor de carga (por tipo de roca, tendrá que definirse para cada caso en especial).

#### 2.2.14.10. Perforación específica

Es el número de metros o pies que se tiene que perforar por cada m<sup>3</sup> de roca volada (EXSA S.A, 2011).

$$\frac{(L/H)}{B \times E} \quad (20)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

L : profundidad del taladro (altura de banco (H) – 0,3 B).

H : altura de banco.

B : burden.

E : espaciamiento.

#### 2.2.14.11. Densidad de Carga Lineal (DCL)

Es la cantidad de carga que sube en un metro para un diámetro determinado en el taladro (EXSA S.A, 2011)

$$DCL = 0.507 \times D^2 \times pe \quad (Kg/m) \quad (21)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

0,34 : Factor.

D : Diámetro del taladro (pulg.)

pe : Densidad del Explosivo a usar (gr/cc)

### 2.2.15. PROCESOS FISICOQUÍMICOS DE LOS EXPLOSIVOS

#### 2.2.15.1. Combustión

Puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no, ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento (EXSA S.A, 2011).

### 2.2.15.2. Deflagración

Es un proceso exotérmico en el que la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente en la conductividad térmica. Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas, a una velocidad baja, que generalmente no supera los 1 000 m/s (EXSA S.A, 2011).

La deflagración es sinónimo de una combustión rápida. Los explosivos más lentos al ser activados dan lugar a una deflagración en la que las reacciones se propagan por conducción térmica y radiación (EXSA S.A, 2011).

### 2.2.15.3. Detonación

Según (EXSA S.A, 2011) la detonación es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva (que se traduce en presión sobre el área circundante).

## 2.2.16. PROPIEDADES DE DETONACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS

### 2.2.16.1. Velocidad de detonación

(LOPEZ JIMENO, y otros, 2003), describe la velocidad de detonación como: “la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. La liberación de energía mencionada, en forma de sonido, calor y gases en un instante de tiempo, es la que se aprovecha para la fragmentación de la roca.

La velocidad de detonación es la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Tiene un rango que va de 1.524 a 7.620 m/s en los productos explosivos comerciales (KONYA J, y otros, 1998).

Los registros obtenidos de la velocidad de detonación deben estar dentro del parámetro de rendimiento de la mezcla explosiva, durante las pruebas de voladura.

$$\text{VOD} = S + W \quad (22)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

VOD : velocidad de detonación.

S : velocidad de sonido.

W : velocidad de partículas (productos).

Según (KONYA J, y otros, 1998) si el explosivo esta detonando a una velocidad significativamente menor a la especificada, es una indicación que el desempeño del explosivo no cumple con las normas

especificadas en la hoja técnica. Las velocidades de detonación típicas de los explosivos se dan a continuación:

**Tabla N° 11:** Velocidad de detonación (m/s).

Agente de Voladura	32 mm	76 mm	229 mm
Emulsión a Granel	4000 - 4600	4300 - 4900	3700 - 5800
ANFO Cargado Neumáticamente	2100 - 3000	3700 - 4300	4300 - 4600
ANFO Vaciado	1800 - 2100	3000 - 3400	4300 - 4600
ANFO Encartuchado	-	3000 - 3700	4300 - 4600
ANFO Pesado	-	-	3400 - 5800

**Fuente:** (KONYA J, y otros, 1998).

### 2.2.16.2. Presión de detonación

Según (EXSA S.A, 2011) la presión de detonación la presión que existe en el plano “CJ” detrás del frente de detonación, en el recorrido de la onda de detonación. Es función de la densidad y del cuadrado de velocidad y su valor se expresa en kilobares (kbar) o en mega pascales (MPa). Así, en los explosivos comerciales varía entre 500 y 1 500 MPa.

Existen varias formas para estimarla por cálculo y pruebas físicas complicadas como la del acuario para determinarla bajo agua (EXSA S.A, 2011), pero dentro de la teoría hidrodinámica se muestra que su valor práctico expresado en kilobares es:

$$PD = \rho_e \times VOD \times W \times 10^{-5} \quad (23)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

**PD** : presión de detonación, en kbar.

**$\rho_e$**  : densidad del explosivo, en g/cm<sup>3</sup>.

**VOD** : velocidad de detonación, en m/s.

**W** : velocidad de partícula (productos), en m/s.

**$10^{-5}$**  : factor de conversión.

En la tabla que se muestra a continuación, se observa los valores máximos alcanzados por distintos tipos de explosivos comerciales.

**Tabla N° 12:** Presión de detonación para diferentes tipos de agentes.

Tipo	Presión de Detonación (kbar)
Dinamita Granulada	20-70
Dinamita Gelatina	70-140
Emulsión Encartuchada	20-100
Emulsión a Granel	20-100
ANFO Vaciado	7-45
ANFO Encartuchado	20-60
ANFO Pesado	20-90

**Fuente:** (KONYA J, y otros, 1998).

### 2.2.16.3. Potencia

(KONYA J, y otros, 1998), expresa que el término potencia se refiere al contenido de energía de un explosivo que a su vez es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer un trabajo. La potencia ha sido clasificada por varios fabricantes sobre la base de un peso o volumen igual, y comúnmente se les llama potencia en peso y potencia en volumen. Aunque no existe un método de medición que se utilice para todos los fabricantes de explosivos, existen muchos métodos de medición de la potencia tales como: la prueba balística de mortero, valores de ejecución sísmica, medición del pulso de esfuerzo, craterización, cálculo de presiones de detonación, cálculo de presión de barreno y la determinación de la temperatura de reacción. Sin embargo, ninguno de estos métodos puede usarse satisfactoriamente para fines de diseño de voladuras.

La clasificación de potencia es engañosa y no compara, de manera certera, la efectividad de fragmentar la roca con el tipo de explosivo. En general se puede decir que, la clasificación de potencia, es sólo una herramienta para identificar los resultados finales y asociados con un producto específico (KONYA J, y otros, 1998).

$$S = \frac{1}{6} \left( \frac{S_e}{e_0} + \frac{V}{V_0} \right) \quad (24)$$

**Fuente:** (EXSA S.A, 2011).

Donde:

$S_e$  : energía calculada del explosivo.

$e_0$  : energía calculada de un explosivo de referencia (patrón) Gelatina explosiva, blasting o ANFO en ciertos casos.

$V_0$  : volumen de gases del explosivo de referencia.

#### 2.2.16.4. Energía (calor de reacción)

Según (EXSA S.A, 2011), la energía esta expresada en calorías por gramo de explosivo, se calcula a partir de la ecuación de reacción química, suponiendo principalmente la producción de agua, nitrógeno, gas carbónico y alúmina en cuanto el explosivo tuviera aluminio.

Es un valor teórico, el cual da una indicación sobre el potencial energético de un explosivo, siendo claramente entendido que solo una parte de este potencial sirve durante la voladura; el resto se pierde (EXSA S.A, 2011).

### 2.2.17. PROPIEDADES FISICAS DE LOS EXPLOSIVOS

#### 2.2.17.1. Densidad del Explosivo

Según (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003) la densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0,8 y 1,6 g/cm<sup>3</sup>, y al igual que con la velocidad de detonación cuanto mayor es, más intenso es el efecto rompedor que proporciona.

La densidad de un explosivo es un factor importante para el cálculo de la cantidad de carga necesaria para una voladura. Por regla general, en el fondo de los barrenos, que es donde se necesita mayor concentración de energía para el arranque de la roca, se utilizan explosivos más densos como son los gelatinosos e hidrogeles, mientras que en las cargas de columna se requieren explosivos menos densos como son los pulverulentos y los de base ANFO (KONYA J, y otros, 1998).

Según (KONYA J, y otros, 1998) cuando se encuentra roca dura y el costo de la barrenación es alto, un producto más denso y de precio más alto, es justificable. La densidad típica de algunos productos explosivos se da como se muestra a continuación:

**Tabla N° 13:** Densidades para diferentes agentes de voladura.

Tipo	Densidad (gr/cc)
Emulsión a Granel	1.1 - 1.6
ANFO Cargado Neumáticamente	0.8 - 1.0
ANFO Vaciado	0.8 - 0.9
ANFO Encartuchado	1.1 - 1.2
ANFO Pesado	1.1 - 1.4

**Fuente:** (KONYA J, y otros, 1998).



### 2.2.17.2. Resistencia al agua

Según (KONYA J, y otros, 1998) la resistencia al agua es la habilidad de un explosivo de soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño. Los productos explosivos tienen dos tipos de resistencia al agua: interna y externa. La resistencia al agua interna se define como la resistencia al agua que provee la composición misma del explosivo. Por ejemplo, algunas emulsiones e higrogeles pueden ser bombeados directamente al barreno lleno de agua. Estos explosivos desplazan el agua hacia arriba pero no se mezclan con ello y no muestran deterioro si se disparan dentro de un tiempo razonable.

La resistencia al agua externa se provee no por los materiales propios del explosivo, sino por el empaque o cartucho dentro del que se coloca el material. Por ejemplo, el ANFO no tiene resistencia al agua interna, sin embargo, si se coloca dentro de una manga de plástico o un cartucho en el barreno, puede mantenerse seco y se desempeñará satisfactoriamente. La manga o el cartucha proveen la resistencia al agua externa para este producto en particular (KONYA J, y otros, 1998).

**Tabla N° 14:** Resistencia al agua de diferentes tipos de agentes de voladura.

<b>Tipo</b>	<b>Resistencia</b>
Dinamita Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Buena o Excelente
Emulsión Encartuchada	Muy Buena
Emulsión a Granel	Muy Buena
ANFO Colocado Neumáticamente	Mala
ANFO Vaciado	Mala
ANFO Encartuchado	Muy bueno
ANFO Pesado	Mala o Muy Bueno

**Fuente:** (KONYA J, y otros, 1998).

### 2.2.17.3. Humos

Según (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003) la detonación de todo explosivo comercial produce vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono, y eventualmente, sólidos y líquidos, Entre los gases inocuos citados existe siempre cierto porcentaje de gases tóxicos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Al conjunto de todos esos productos resultantes se le designa “humos”.

De acuerdo con la proporción de los gases nocivos, se ha establecido una escala de clasificación por grado de toxicidad para la exposición de los operadores después de las voladuras.



**Tabla N° 15:** Clases de Humos (Institute of Makers of Explosives, EE.UU).

CATEGORIA	VOLUMEN DE GASES NOCIVOS (CO-NO <sub>2</sub> )-dm <sup>3</sup>
1	0 -4,53
2	4,53 - 9,34
3	9,34 - 18,96

**Fuente:** (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

#### 2.2.17.4. Flamabilidad

Según (KONYA J, y otros, 1998) la flamabilidad es la característica que tiene un explosivo para iniciar la reacción con facilidad a partir de una chispa, flama o fuego. Algunos explosivos explotan debido a una chispa mientras que otros pueden ser quemados y no detonan. La flamabilidad es importante desde el punto de vista del almacenamiento, transportación y uso. Algunos explosivos, aunque son muy económicas, han perdido mercado debido a la flamabilidad. Un buen ejemplo es el LOX (Liquid Oxygen and Carbon), oxígeno líquido y carbón, que fue utilizado en la década de los 50's como agente explosivo.

#### 2.2.17.5. Sensitividad

Según (KONYA J, y otros, 1998) la sensitividad de un explosivo está definida por la cantidad de energía que un explosivo requiere para detonar confiablemente. Esto es conocido en ocasiones como los requerimientos mínimos de cebado. Algunos explosivos requieren de muy poca energía para detonar confiablemente. El fulminante estándar número 8 hará detonar la dinamita y algunos de los hidrogeles y emulsiones sensibles al fulminante. Por otro lado, un fulminante solo no iniciará la reacción del ANFO o hidrogeles a granel. Para obtener una detonación confiable, uno debe usar un cebo o reforzador en combinación con el fulminante.

**Tabla N° 16:** Sensitividad de los diferentes tipos de agentes de voladura.

Tipo	Sensitividad de riesgo	Sensitividad de desempeño
Dinamita Granulada	Moderada Alta	Excelente
Dinamita Gelatina	Moderada	Excelente
Emulsión Encartuchada	Baja	Bueno o Muy Bueno
Emulsión a Granel	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Colocado Neumáticamente	Baja	Mala a Buena
ANFO Vacado	Baja	Malo a Bueno
ANFO Encartuchado	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Pesado	Baja	Mala a Buena

**Fuente:** (KONYA J, y otros, 1998).



## 2.2.18. ACCESORIOS DE VOLADURA

### 2.2.18.1. Cordón detonante

Según (EXSA S.A, 2017) sirve para unir los taladros y lograr una iniciación de voladura. El explosivo interno PETN tiene la mayor velocidad de detonación con 7000m por segundo.

Beneficios:

- **Flexible:** Su cobertura plástica exterior le brinda una excelente flexibilidad.
- **Impermeable:** Es completamente impermeable, asegurando su funcionamiento en situaciones con presencia de agua.
- **Resistente:** Presenta una alta resistencia a la tracción gracias a su cobertura plástica reforzada.

**Figura N° 34:** Cordón detonante.



**Fuente:** Sistemas de iniciación (EXSA S.A, 2017).

**Tabla N° 17:** Especificaciones técnicas del cordón detonante.

Especificaciones técnicas	Unidades	NP 03	NP 05	10R
Velocidad de detonación	m/s	6,800	7,000	7,000
Carga PETN lineal	g/m	4.3	5.5	10.3
Diámetro externo	mm	3.3	3.9	4.7
Resistencia a la tracción	kgf	60	70	70
Color de recubrimiento		Verde	Azul	Violeta

**Fuente:** Sistemas de iniciación (EXSA S.A, 2017).

### 2.2.18.2. Conector Bidireccional

Conector bidireccional de retardo no eléctrico diseñado para ser empleado con cordón detonante en voladura superficial. Está compuesto por 2 conectores plásticos ensamblados en los extremos de un

segmento de tubo de choque que lleva incorporado un detonador con tiempo de retardo determinado (EXSA S.A, 2017).

**Figura N° 35:** Conector bidireccional.



**Fuente:** Sistemas de iniciación (EXSA S.A, 2017).

El conector bidireccional utilizado para unir conexiones de cordón detonante consta de características que son:

**Tabla N° 18:** Especificaciones técnicas del conector bidireccional.

Especificaciones técnicas	Unidades	Mínimo	Nominal
Potencia del detonador	Fuerza No.	10	10
Esopo	mm	9	5.5
Resistencia al impacto	1 kg a 1 m	No detona	No detona
Resistencia al desgaste del tubo y el detonador, prueba (Pull test)	kgf	9	12
Velocidad de la onda de choque	mm	1,900	2,000
Resistencia a la tracción del tubo de choque	Newton	200	220
Elongación	%	150	240
Resistencia al agua	%	100	100

**Fuente:** Sistemas de iniciación (EXSA S.A, 2017)

### 2.2.18.3. Detonador no eléctrico (Conector Unidireccional de Superficie)

Según (EXSA S.A, 2017) el sistema de iniciación no eléctrico, compuesto por un detonador de retardo, un tubo de choque transmisor de señal y un conector plástico para asegurar el contacto óptimo entre el tubo de choque y el cordón detonante.

La función del detonador de retardo dentro del taladro es iniciar el cebo o primer de la columna de carga explosiva y retardar el tiempo designado (EXSA S.A, 2017).

Según (EXSA S.A, 2017) la función del tubo de choque es transmitir la señal de encendido que se inicia en la superficie mediante el cordón detonante en el taladro.

Comprende tres series de retardo de acuerdo con el uso destinado

**Figura N° 36:** Detonador no eléctrico (Conector Unidireccional de Superficie).



**Fuente:** Elaboración propia (EXSA S.A, 2017).

Las características técnicas del detonador no eléctrico son:

**Tabla N° 19:** Especificaciones técnicas del detonador no eléctrico.

Especificaciones técnicas	Unidades	Mínimo	Nominal
Potencia del detonador	Fuerza No.	1	1
Resistencia al impacto del detonador y tubo	2 kg a 1 m	No detona	No detona
Resistencia al desgaste del tubo y el detonador, prueba (Pull test)	kgf	9	12
Velocidad de la onda de choque	mm	1,900	2,000
Resistencia a la tracción del tubo de choque	Newton	200	220
Elongación	%	150	240
Resistencia al agua	%	100	

**Fuente:** Sistemas de iniciación (EXSA S.A, 2017).

#### 2.2.18.4. Detonador Electrónico DigiShot Plus

Según (DetNet, 2007) la función de los detonadores es iniciar la columna de explosivos de un tiro. Sólo se podrá utilizar el equipo de control DigiShot™ Plus para marcar (asignar localización), testear e iniciar el detonador DigiShot™ Plus. El detonador se encuentra al interior de una cápsula de cobre que protege la placa de circuitos electrónicos y la carga explosiva y está unido a una línea descendente color verde. El otro extremo de la línea descendente de salida se encuentra unido al conector utilizado para sujetarlo al cable de conexión de superficie. El conector se encuentra relleno de un gel a prueba de agua que protege al sistema de toda fuga causada por humedad debido al ingreso de agua.

**Figura N° 37:** Detonador Electrónico DigiShot.Plus.



**Fuente:** Elaboración propia.

Según (DetNet, 2007) el detonador electrónico consiste en:

- Cable descendente de 2 vías
- Crimpado simple y doble
- Placa de Circuitos Integrados
- Inflamador
- H-Plug de Seguridad
- Capsula de Cobre
- Carga explosiva

Según (DetNet, 2007) las características del detonador electrónico son:

- Completamente programable
- Retardo máximo de 20 000 ms
- Programable con incrementos de 1 ms
- Potencia 12

- Conectores sin sentido de polaridad
- 36 meses de vida útil
- Robusto cable con 2 líneas de acero electrogalvanizado.

### 2.2.19. AGENTES DE VOLADURA

(LOPEZ JIMENO, y otros, 2003), describe que los agentes de voladura son aquellos explosivos no sensibles al fulminante N° 8, por lo que necesitan un cebo reforzado, primer o Booster para iniciar su detonación. Estos explosivos a diferencia de los primarios que tienen alta energía y sensibilidad, se caracterizan por desarrollar un mayor trabajo útil, en el estricto sentido de arranque y fragmentación de roca. Es así que se tienen los siguientes agentes de voladura que se utilizan en minería de tajo abierto por su gran poder rompedor y bajo costo.

#### 2.2.19.1. Booster de Pentolita

Según (ENAEX, 2018) es una carga explosiva de pentolita (mezcla de TNT y PETN), de alta potencia y gran seguridad, para la iniciación de agentes de voladura.

Según (CAMPOS PUCUHUANCA, 2016) los iniciadores booster son cargas explosivas de alta potencia y gran seguridad por ser insensibles a los golpes o roces. El iniciador cilíndrico es el más eficiente iniciador de agentes de voladuras que se fabrica y es especialmente recomendable para diámetros medianos y grandes.

Su principal propósito es proveer un impulso energético suficiente para lograr rápidamente una óptima velocidad de detonación de la columna explosiva (ENAEX, 2018).

**Tabla N° 20:** Especificaciones técnicas del Booster.

<b>Especificaciones Técnicas para los diferentes tipos de Iniciadores Cilíndricos (Booster)</b>	
Densidad, en g/cm <sup>3</sup>	1,6 +/- 3%
Velocidad de detonación, en m/s	7000 +/- 3%
Presión de detonación, en kbar	199
Energía, en kcal/kg	1350
Resistencia al agua	excelente
Volumen de gases, en kg	692

**Fuente:** (CAMPOS PUCUHUANCA, 2016).



**Figura N° 38:** Booster de pentolita cilíndrico.

**Fuente:** Productos (EXSA S.A, 2017).

### 2.2.19.2. Nitrato de amonio

Según (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003) el nitrato amónico ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) es una sal inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es  $160,6\text{ }^\circ\text{C}$  31 aisladamente, no es un explosivo, pues sólo adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una pequeña cantidad de un combustible y reacciona violentamente con él aportando oxígeno. El aire que contiene el 21 % de oxígeno, mientras que el nitrato de amonio posee el 60 % de oxígeno.



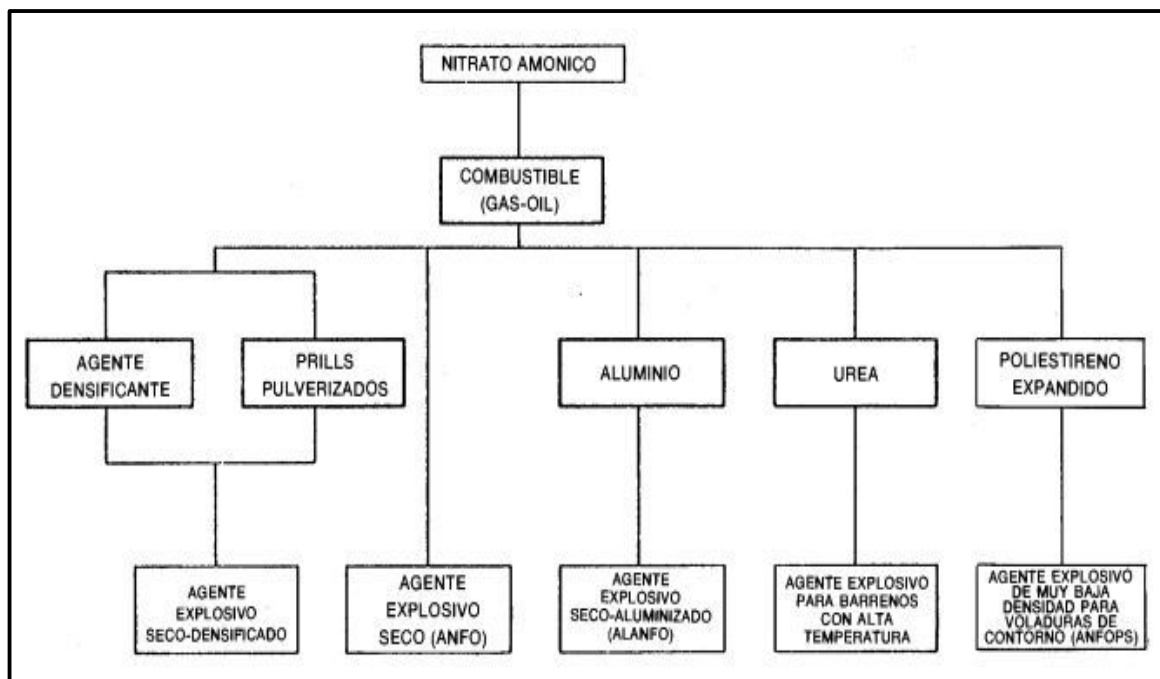
**Fuente:** (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

La densidad del nitrato de amonio poroso o a granel es aproximadamente  $0,8\text{ g/cc}$ , mientras que las densidades de las partículas del nitrato de amonio no poroso se acercan a la de los cristales ( $1,72\text{ g/cc}$ ), pero con valores algo inferiores ( $1,40 - 1,45\text{ g/cc}$ ) debido a la micro porosidad (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

(LOPEZ JIMENO, y otros, 2003), en cuanto al tamaño de las partículas suele variar entre 1 y 3 mm. La solubilidad del nitrato de amonio en el agua es grande y varía con la temperatura:

- A  $10\text{ }^\circ\text{C}$  el 60,0 % solubilidad.
- A  $20\text{ }^\circ\text{C}$  el 65,4 % solubilidad.
- A  $30\text{ }^\circ\text{C}$  el 70,0 % solubilidad.
- A  $40\text{ }^\circ\text{C}$  el 73,9 % solubilidad.

**Figura N° 39:** Agentes explosivos secos con base Nitrato de Amonio.



**Fuente:** (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

### 2.2.19.3. ANFO

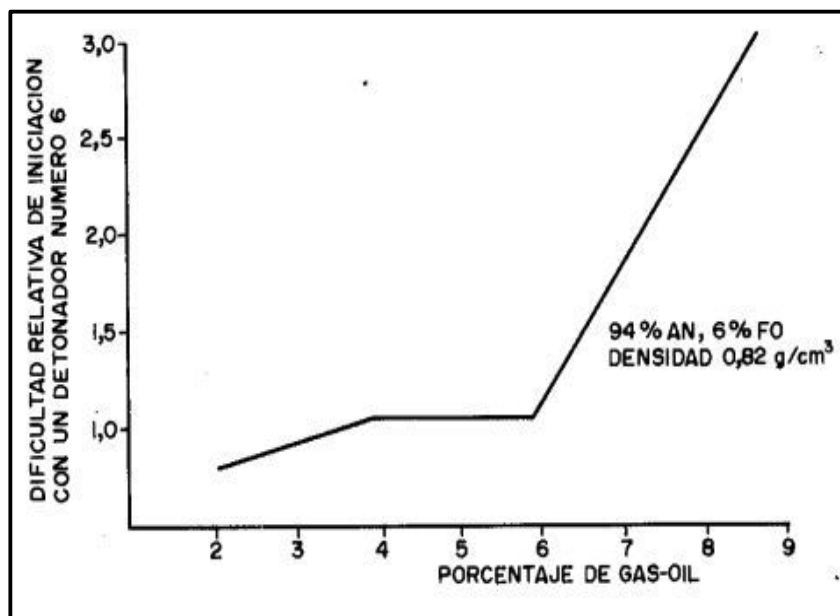
El Anfo es una mezcla explosiva industrial cuya aplicación se ha extendido por todo el mundo, debido a su seguridad en la manipulación, bajo costo y alto rendimiento energético. Anfo, por sus siglas en inglés hace referencia a Ammonium Nitrate/Fuel Oil, los componentes que se mezclan para formar el agente explosivo. Su composición es de 94 % nitrato de amonio y 6 % combustible. El nitrato de amonio es una sal inorgánica, no explosiva, siendo de aplicación en minería aquella que se fabrica como partículas esféricas o prills porosos, en consecuencia es crítica su capacidad de absorción y retención (VILELA SANGAY, 2014).

Hoy en día, teniendo un balance de oxígeno correcto, el Anfo es la fuente de mayor energía explosiva más barata del mercado (Konya & Albarrán, 1998). Sin embargo, la principal desventaja del Anfo es su nula resistencia al agua. Esto se debe a que el agua absorbe gran cantidad de energía para su vaporización y rebaja la potencia del explosivo. Además, el nitrato es soluble en agua, perdiendo todas sus características al estar en contacto con esta. Igualmente el nitrato es higroscópico, es decir, absorbe la humedad del medio ambiente, por lo que su almacenamiento debe ser en lugares apropiados (VILELA SANGAY, 2014).

Las propiedades explosivas del ANFO están ligadas a su densidad. A medida que ésta aumenta, también aumenta su velocidad de detonación. Sin embargo, este aumento de densidad dificulta su iniciación, volviéndose inerte a una densidad por encima de 1.20 gr/cc, no pudiendo detonar o solamente en el área inmediata al iniciador (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

En la figura que a continuación se muestra, se puede observar la sensibilidad del ANFO a la iniciación, a una densidad de 0,82 gr/cm<sup>3</sup>.

Gráfico N° 02: Sensibilidad del ANFO a la iniciación.

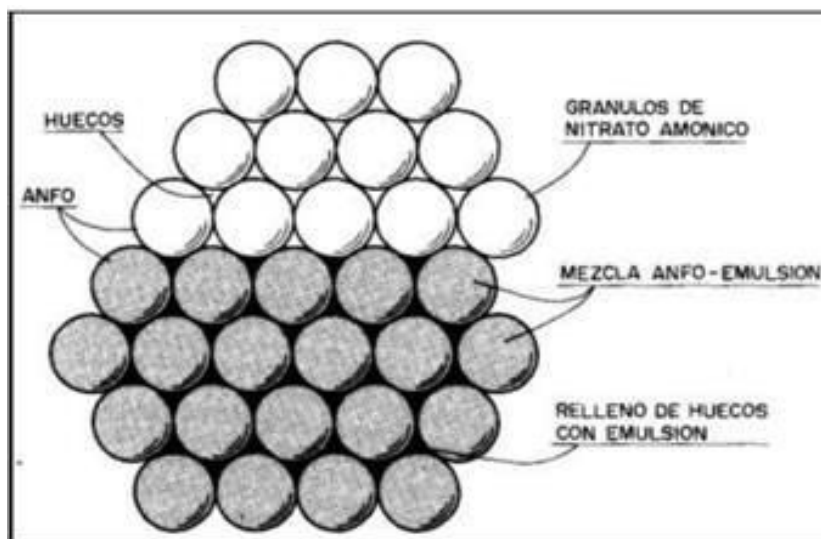


Fuente. (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003)

#### 2.2.19.4. ANFO Pesado

Según (KONYA J, y otros, 1998) el ANFO pesado es una combinación de perlas de nitrato de amonio, diesel y suspensión. La ventaja de las mezclas de ANFO pesado es que se pueden hacer y carga fácilmente al barreno. La proporción en las cantidades de suspensión y ANFO puede ser cambiada y obtener ya sea un explosivo con mayor energía o uno que sea resistente al agua. El costo del ANFO pesado aumenta con el porcentaje de suspensión. La ventaja sobre los productos encartuchados es que el barreno se encuentra cargado totalmente y no existen huecos entre el barreno y la carga. Una desventaja es que ya que el explosivo ocupa el volumen total del barreno, si existe agua, ésta es empujada hacia arriba, lo que significa que se debe utilizar esta mezcla en todo el barreno.

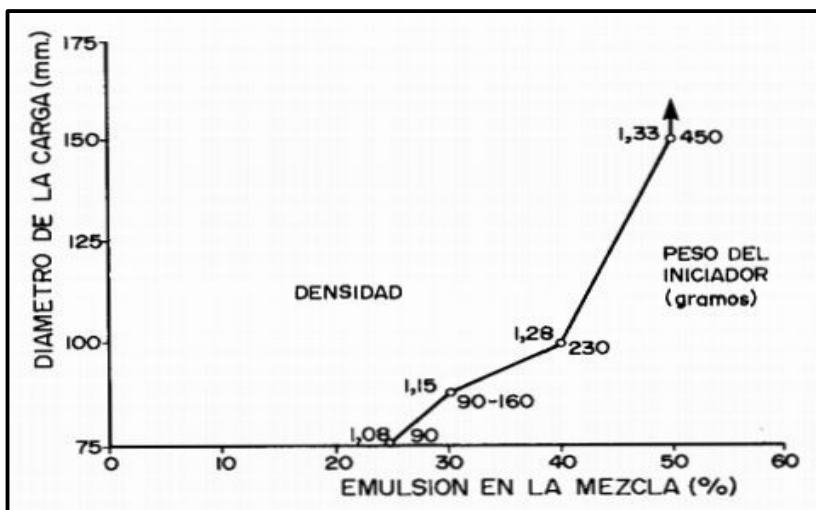
Figura N° 40: Estructura del ANFO PESADO.



Fuente: (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

Se indica la variación de la sensibilidad del ANFO Pesado conforme aumente el porcentaje de emulsión. La sensibilidad disminuye al incrementarse la densidad, siendo necesario cada vez un iniciador de mayor peso. Para una densidad de 1.33 se necesita un multiplicador de Pentolita de 450 gr como mínimo (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

**Gráfico N° 03:** Variación de la sensibilidad del ANFO Pesado con el porcentaje de emulsión de la mezcla (Bampfield y Morrey, 1984).



**Fuente:** (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

### 2.2.19.5. Emulsión explosiva

Las emulsiones explosivas son agentes de voladura del tipo denominado “agua en aceite” en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado.

Según (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003), “el desarrollo de los explosivos ha llevado aparejado una reducción progresiva del tamaño de las partículas, pasando desde los sólidos a las soluciones salinas con sólidos y, por último, a las microgotas de una emulsión explosiva.

El VOD de una emulsión varía de 4500 - 5800 m/s. La viscosidad de la emulsión está controlada por la naturaleza de la fase oleosa (cera, aceite, emulsificante) y el tamaño de la gotita oxidante (Bampfield, H. A., & Morrey, W. B. (1984).

**Tabla N° 21:** Dimensiones de los oxidantes en los explosivos (Bampfield & Morrey, 1984).

Explosivo	Tamaño (mm)	Estado	VOD (km/s)
ANFO	2	Sólido	3.2
Dinamita	0.2	Sólido	4
Hidrogel	0.2	Sólido/Líquido	3.3
Emulsión	0.001	Líquido	5.0 - 6.0

**Fuente:** (LOPEZ JIMENO, y otros, 2003).

### 2.2.19.5.1. Características de la emulsión matriz

- Apariencia: Pasta fluida.
- Densidad: 1,30 – 1,35 g/cc.
- Color y olor: color amarillento; olor a hidrocarburo.
- pH: 4,0 – 7,0.
- Viscosidad: 38 000 Cp.
- Resistente al agua.

### 2.2.19.6. Emulsión Gasificable

Emulsión a granel inerte no detonable diseñada para la reducción de gases nitrosos y para ser usados en taladros con agua. Se sensibiliza en el lugar de aplicación mediante la gasificación química que se produce durante la carga del producto en el taladro. Recomendado para minería superficial y canteras de mayor diámetro.

El tiempo de gasificación es de 15 a 20 minutos para lograr la densidad y esponjamiento deseado.

**Tabla N° 22: Características de la emulsión G.**

Especificaciones Técnicas	Unidades	Slurrex G
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.36 ± 3%
Velocidad de detonación	m/s	No aplica
Energía	kJ/kg	2,576
Volumen de gases	l/kg	1,085
Color y olor: Color amarillento; con olor a hidrocarburo		
Ph: 3,0 - 6,0		

**Fuente:** Emulsión a granel (EXSA S.A, 2017).

### 2.2.19.7. Solución Gasificante (Nitrito de Sodio)

Solución formulada para uso con emulsiones gasificables.

#### 2.2.19.7.1. Propiedades y Beneficios

- Líquido miscible en agua.
- Sensibilizador de emulsiones gasificables
- Regulador de densidad de emulsiones gasificables.

Brinda coloración verde cuando es mezclado, facilitando la visualización, homogeneidad y/o eficiencia del mezclado.



**Tabla N° 23:** Características del nitrito de sodio.

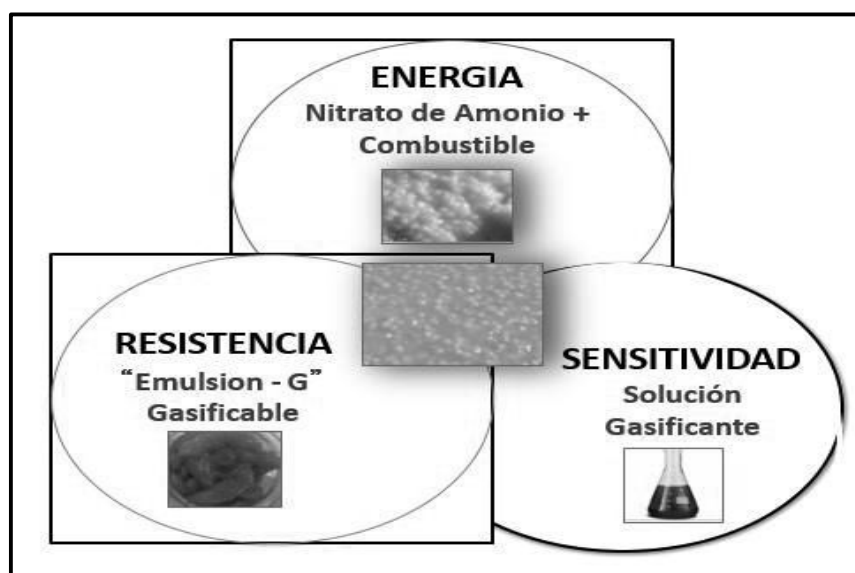
Especificaciones Técnicas	Unidades	Solución Gasificante
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.13 ± 0.02
Punto de Congelación	°C	-8 a -4
Color		Verde
PH		6 -9
Solubilidad en el agua		Completamente miscible

**Fuente:** Emulsión a granel (EXSA S.A, 2017).

### 2.2.20. MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (ANFO PESADO GASIFICADO)

El proceso de gasificación de la mezcla explosiva consiste en formar pequeñas burbujas en la emulsión gasificable que necesita de un sensibilizador, las cuales actúan en forma de hot spots (puntos calientes) dosificada en un porcentaje con la solución gasificable, obteniendo densidades variables de acuerdo a lo requerido.

El trabajo de investigación se centra en un ANFO Pesado 73G o mezcla explosiva gasificada (HA-73G) (70% Emulsión, 30% ANFO), trabajando con diferentes densidades de acuerdo a los tipos de dureza en las zonas de voladura, obteniendo resultados óptimos en comparación a los resultados obtenidos con mezcla explosiva sin gasificar (HA-73).

**Figura N° 41:** Fabricación de la mezcla explosiva gasificada.

**Fuente:** Manual de explosivos gasificables (ARANIVAR, 2014).

Se observa en la siguiente tabla el porcentaje de nitrito de sodio añadido a la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) para lograr la densidad final deseada y el esponjamiento deseado de acuerdo al diseño de voladura, mediante un proceso de gasificación de la mezcla en un tiempo de 15 – 20 minutos.

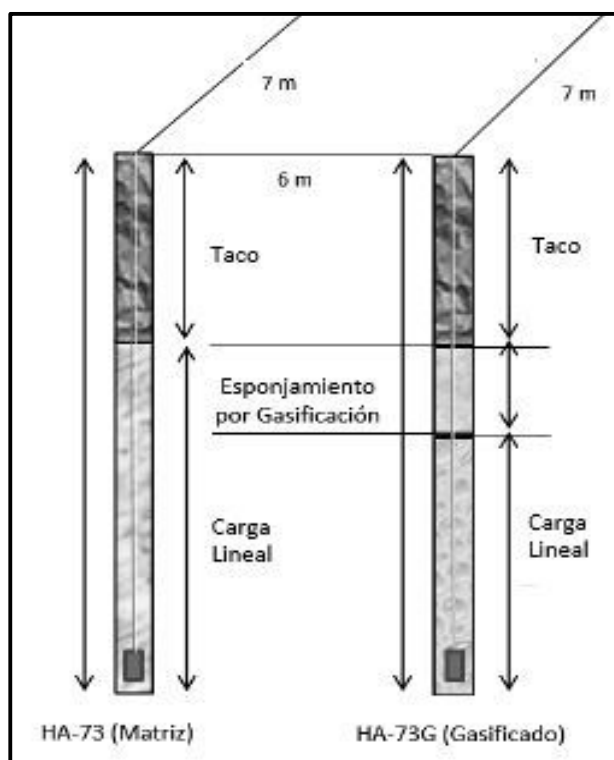
**Tabla N° 24:** Flujo de Nitrito de Sodio y Gasificación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).

PRODUCTO	% NITRITO	DENSIDAD DE COPA POR CADA 5 MIN (gr/cc)		VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	ESPONJAMIENTO DEL TALADRO SEGÚN ALTURA DE CARGA (m)
		Densidad Inicial gr/cc	Densidad Final gr/cc		9 - 10m
ME-73G (HA-73G)	0.34 - 0.37	1.36 - 1.38	0.95	4800 - 5000	1.3 - 1.4
	0.30 - 0.33	1.36 - 1.38	1.0	5000 - 5200	1.2 - 1.3
	0.20 - 0.24	1.36 - 1.38	1.1	5200 - 5400	1.1 - 1.2
	0.16 - 0.19	1.36 - 1.38	1.13	5300 - 5500	0.9 - 1.0
	0.14 - 0.16	1.36 - 1.38	1.15	5400 - 5600	0.8 - 0.9
<b>Diámetro (pulg.)</b>		12 1/4"		El esponjamiento en El taladro varía cuando es irregular.	
<b>Densidad Lineal (kg/m)</b>		103			

**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA Las Bambas 2018.

Se muestra en la siguiente figura el proceso de gasificación que ocurre en un taladro cargado con mezcla explosiva gasificada (HA-73G), en comparación a otro cargado con ANFO Pesado (HA-73) a base de emulsión matriz que en su composición no necesita de un sensibilizador.

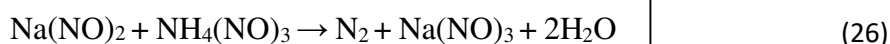
**Figura N° 42:** Diseño comparativo de carga de taladros entre el ANFO Pesado 73 (HA-73) matriz y ANFO Pesado 73 gasificado (HA-73G).



**Fuente:** Elaboración propia.

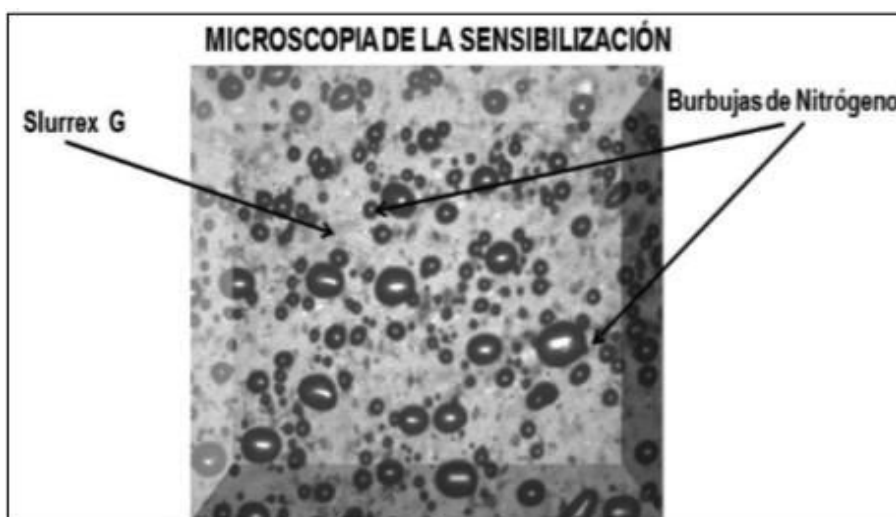
### 2.2.20.1. Sensibilización de la Emulsión

La sensibilización de la mezcla explosiva a base de una emulsión gasificable se desarrolla mediante la generación de burbujas de aire por la adición de un agente gasificante, siendo en este caso el nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ). Esta sustancia química reacciona con el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), generando pequeñas burbujas de gas nitrógeno (VILELA SANGAY, 2014). A continuación se muestra la reacción química que ocurre.



**Fuente:** (VILELA SANGAY, 2014).

**Figura N° 43:** Generación de burbujas de nitrógeno.



**Fuente:** Manual de explosivos gasificables (ARANIVAR, 2014).

## 2.2.21. FACTOR DE ESPONJAMIENTO PARA UN EXPLOSIVO GASIFICABLE

### 2.2.21.1. Factor de Esponjamiento Teórico (Fe Teórico Campo)

Para saber cuánto va a esponjar el explosivo se necesita determinar el factor de esponjamiento, con la siguiente fórmula (ARANIVAR, 2014):

$$F_{e\text{teórico}} = \frac{\rho_i}{\rho_f} = \frac{\text{Densidad inicial}}{\text{Densidad final promedio campo}} \quad (27)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

### 2.2.21.2. Factor de Esponjamiento en Campo

Para determinar el factor de esponjamiento en campo se realiza la medición inicial y final de la longitud del taladro de acuerdo a las condiciones encontradas en el proyecto de voladura, se calcula con la siguiente fórmula (ARANIVAR, 2014):

$$F_{e\text{campo}} = \frac{\text{Long.Carga Final en Campo}}{\text{Long.Carga Inicial en Campo}} \quad (28)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

Observaciones:

- Las longitudes de carga inicial y final deben ser de un mismo taladro.
- La densidad final del explosivo debe ser ajustado de acuerdo a la condición del terreno.

### 2.2.21.3. Eficiencia en campo, del factor de esponjamiento (% K.)

Comparando ambos factores, determinamos la eficiencia del último respecto al primero durante el carguio de taladros (ARANIVAR, 2014) y se calcula con la siguiente formula:.

$$K = \frac{Fe.campo}{Fe.teórico} \% \quad (29)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

### 2.2.21.4. Ajuste del factor de esponjamiento teórico en campo

Obteniendo los datos de la densidad inicial, final y la eficiencia de gasificación en campo de la mezcla explosiva gasificada (ARANIVAR, 2014), podemos calcular el factor real con la siguiente formula:

$$F_{e\text{Efectivo}} = \frac{\rho_i}{\rho_f} * K \quad (30)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

### 2.2.21.5. Cálculo de longitud de carga con mezcla explosiva gasificable para cualquier longitud de carga final de diseño

Se obtiene conociendo la longitud de carga requerida de acuerdo al diseño propuesto y el factor real obtenido en campo (ARANIVAR, 2014) y se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Long. Carga Gasificable} = \frac{\text{Long.Carga Requerido en Diseño}}{Fe. Real} \quad (31)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

## 2.2.22. ÍNDICADORES E ÍNDICE EN FRAGMENTACIÓN GLOBAL

### 2.2.22.1. Fragmentación en rango

Relación entre la cantidad de roca volada en las dimensiones deseadas (igual o inferior a 30 cm.) respecto al total de roca volada (ARANIVAR, 2014).

$$\boxed{\text{FR} = \frac{\text{RVCD}}{\text{RV}}} \quad (32)$$

**Fuente:** (ARANIVAR, 2014)

Dónde:

- FR : Índice de fragmentación en rango  
 RVCD : Toneladas de roca volada con dimensión menor o igual a 30 cm.  
 RV : Toneladas de roca volada (TM)

### 2.2.22.2. Fragmentación fuera de rango

Relación entre la cantidad de roca volada en dimensiones inaceptables (igual o mayor a 100 cm.) respecto al total de roca volada (ARANIVAR, 2014).

$$\boxed{\text{FFR} = \frac{\text{RVCD}}{\text{RV}}} \quad (33)$$

**Fuente.** (ARANIVAR, 2014).

Donde:

- FFR : Índice de fragmentación en rango.  
 RVCD : Toneladas de rocas volada con dimensión mayor o igual a 100 cm.  
 RV : Toneladas de roca volada (TM).

## 2.2.22. LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL PARA AGENTES QUÍMICOS

### 2.2.22.1. Tipos de límites

#### 2.2.22.2. TWA: Media Moderada en el Tiempo (Time Weighted Average)

Para comparar con el promedio ponderado en el tiempo de exposición a concentraciones individuales durante toda la jornada de trabajo. Los límites TWA para 8 horas necesitan corrección al ser aplicados a jornadas de trabajo diferentes (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016).

### 2.2.22.3. STEL: Exposición de Corta Duración: Short Time Exposure Level

Limita las exposiciones a corto tiempo, normalmente 15 minutos. Límite a comparar con la exposición promedio ponderada en el tiempo acumulado durante 15 minutos continuos. La exposición a concentraciones mayores no debe superar los 15 minutos y puede ocurrir un máximo de 4 veces por jornada con descansos de 1 hora mínimo entre exposiciones (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016)

### 2.2.22.4. Ceiling. Nivel Techo de Exposición

Límite que en ningún momento deberá ser sobrepasado.

**Tabla N° 25: Límites de exposición ocupacional de los agentes químicos en el aire.**

N°	Agentes Químicos (en el aire)	Límites de Exposición Ocupacional					
		TWA		STEL		C	
1	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	19.5	%			22.5	%
2	Acido Sulfidrico (H <sub>2</sub> S)	10	ppm	15	ppm		
3	Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	3	ppm	5	ppm		
4	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	5000	ppm	30000	ppm		

**Fuente:** (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016).

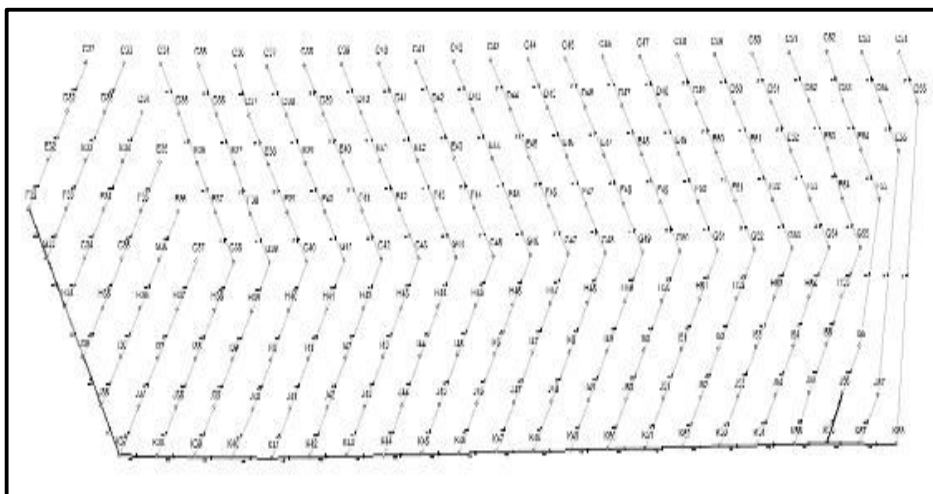
### 2.2.23. PROCESO DE VOLADURA ELECTRÓNICA DIGISHOT PLUS

Según (DetNet, 2007) el sistema DigiShot™ Plus™ está diseñado para ser utilizado en operaciones de voladura superficial, pudiendo iniciar hasta 1800 detonadores.

Las temperaturas recomendadas para las operaciones son las siguientes: Accesorios y detonadores, entre -40 °C/-40 °F hasta +70 °C/158 °F; (DetNet, 2007).

Se realiza el diseño de la malla en coordinación con el área de diseño de la compañía minera. Este diseño comprende la secuencia de salida de la malla de voladura como son tiempos entre taladros, tiempos entre filas y tiempo entre detonadores (DECK).

**Figura N° 44:** Diseño de malla electrónica.



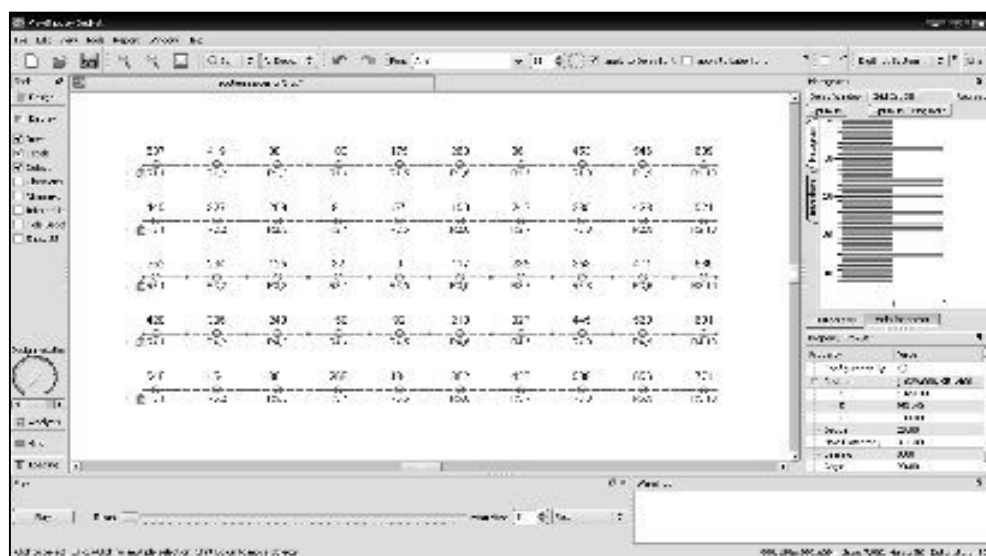
**Fuente:** Elaboración propia.

Habiendo obtenido los datos del diseño de la malla, se procede a hacer el diseño en el software ViewShot,

Este software permite asignar tiempos a una malla a partir de puntos topográficos en formato de texto, además de la secuencia de salida también se diseña el amarre de detonadores el cual brinda una posición a cada detonador.

Con el tiempo asignado a cada detonador en el diseño de malla y la posición en el diseño de amarre, estaría listo para la transferencia de datos.

**Figura N° 45:** Diseño en VIEWSHOT (Sistema Electrónico).



**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.2.24. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SPLIT-DESKTOP

La versión desktop de Split se conoce como la versión del software que es "asistida por el usuario" y que puede ser utilizada por ingenieros o técnicos de mina directamente en campo. El sistema Split-Desktop contiene el software de split, computadora, teclado y monitor (SPLIT ENGINEERING, 2018). Deberá de existir un mecanismo (software o hardware) para transmitir imágenes digitales o de video a la computadora. Para cámaras digitales se requiere del software que acompaña a la cámara y para cámaras de video se requiere una tarjeta sujetadora de imágenes. Se recomienda una cámara digital para una mayor resolución de imágenes y para facilitar la selección de las mismas.

El primer paso es que el usuario adquiera las imágenes en campo y las transfiera a la computadora. La fuente de estas imágenes puede ser pilas de material en bruto, camiones de acarreo, pilas de lixiviación, puntos de extracción, tiraderos de desmonte, almacenamientos de mineral, correas transportadoras, o cualquier otro lugar en donde las imágenes claras de roca fragmentada pueden ser obtenidas. El software de Split ayuda al usuario a escalar adecuadamente las imágenes. Split puede ahora automáticamente delinear los fragmentos en cada una de las imágenes y claramente determinar la distribución de los tamaños de los fragmentos de roca. Split permite que la distribución de tamaños resultante sea graficada en varias formas (linear-linear, log-linear, log-log, y RosinRammler). Los datos de la curva de tamaños

resultante pueden también ser guardada en archivos con campos delineados para ser acezados por hojas de cálculo o programas de gráficas (SPLIT ENGINEERING, 2018).

La versión desktop del software de Split tiene cinco partes importantes. La primera parte del programase relaciona con el escalamiento de las imágenes tomadas en el campo. La segunda parte involucra la delineación automática de los fragmentos de roca en cada una de las imágenes que son procesadas. La tercer parte permite la edición de los fragmentos delineados para asegurar resultados de alta calidad. La cuarta parte involucra el cálculo de la distribución de tamaños basada en la información de los fragmentos delineados. Finalmente, la quinta parte se refiere a la representación gráfica o exportación de los resultados (SPLIT ENGINEERING, 2018).

Se realiza la toma de imágenes en los proyectos post voladura como se muestra a continuación.

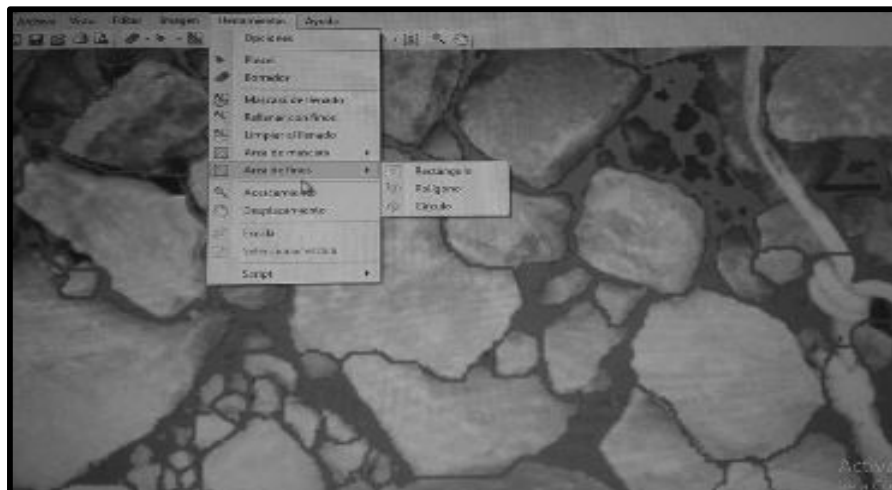
**Figura N° 46:** Toma de imágenes en campo del material fragmentado post voladura.



**Fuente:** Elaboración propia.

En gabinete se realiza todo el proceso el análisis granulométrico de las imágenes tomadas en campo para la determinación del (P80) requerido por la empresa.

**Figura N° 47:** Análisis de fragmentación en el SPLIT-DESKTOP.



**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.2.25. EQUIPO MICROTRAP (VOD/DATA RECORDER)

El MicroTrap™ es un registrador continuo de VOD de explosivos, de alta resolución, portátil, de 1 canal. El registrador MicroTrap™ puede ser mejorado fácilmente y sin incurrir en un gran gasto para proporcionar 4 canales adicionales de capacidad de registro de voltaje DC (VDC). Esto otorga al MicroTrap™ la capacidad sin paralelo de registrar VOD de alta resolución de explosivos y simultáneamente registrar eventos transitorios como vibraciones de la tronadura, presiones de explosión, chorros de aire, etc. a altas resoluciones.

El registrador MicroTrap™ ha demostrado su confiabilidad bajo condiciones extremas de temperatura, clima, polvo y las condiciones accidentadas que caracterizan a los medios de tronaduras alrededor del mundo.

El Software Analítico Avanzado de MicroTrap™ permite al operador analizar las huellas de la VOD y convertirlas en señales de voltaje DC registradas por el MicroTrap™ a las unidades de ingeniería deseadas para su análisis y presentación. El Software se usa para programar los parámetros de registro del MicroTrap™ y para recuperar, presentar, analizar, imprimir y exportar la VOD y los datos desde otros tipos de medidores (MREL GROUP OF COMPANIES LIMITED, 2013).

#### 2.2.25.1. Ejecución de pruebas de muestras de Explosivos

Probar el desempeño de los explosivos en comparación con los estándares de control de calidad establecidos por los fabricantes (MREL GROUP OF COMPANIES LIMITED, 2013).

- Determinar el diámetro crítico y la densidad crítica de una carga de explosivos.
- Determinar la sensibilidad de los explosivos al espacio (gap sensitivity).
- Determinar la precisión de la sincronización de los detonadores.
- Medir la VOD continua de los iniciadores/detonadores auxiliares.
- Determinar el tamaño mínimo de los detonadores auxiliares midiendo las velocidades aumentadas.

#### 2.2.25.2. Ubicación, instalación y encendido del equipo

- Analizar la zona más segura para ubicar el monitor Microtrap, evitar zona cercana a taludes, considerar posible proyección de fly rock de la voladura o circulación de equipos en la zona (EXSA S.A, 2016).
- Instalar el equipo Microtrap, empalmar conector del cable resistivo al cable coaxial RG58 usando el alicate y cinta aislante. La conexión deberá ser de protección a protección y de conductor central a conductor central (EXSA S.A, 2016).
- Activar el equipo, verificar funcionamiento, cubrir o proteger con la caja metálica, señalizar con conos y se evacua a un lugar seguro convenientemente (EXSA S.A, 2016).
- Cuando se satisface la condición de disparo (la detonación ha consumido una longitud suficiente de cable resistivo), el equipo se disparara y comenzará a recolectar la información VOD (EXSA S.A, 2016).



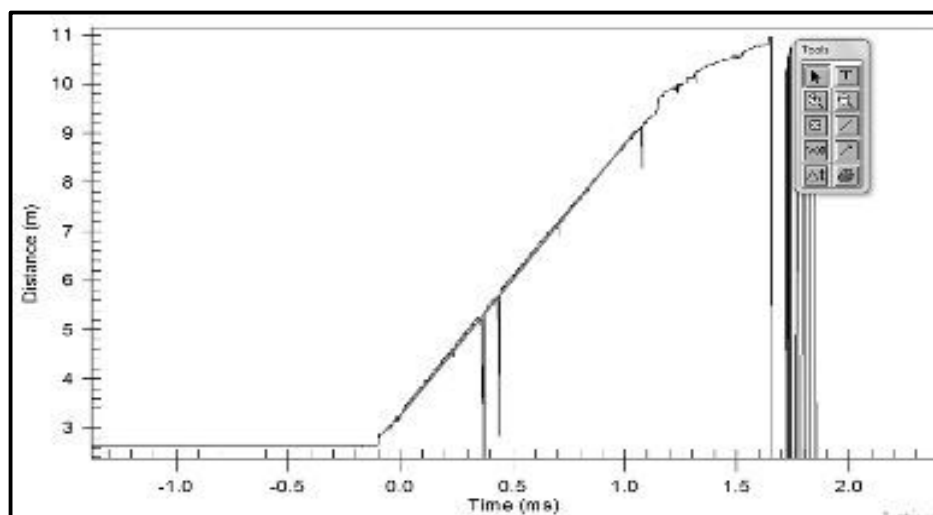
**Figura N° 48:** Equipo Microtrap en gabinete.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia técnica Exsa Las Bambas).

En la figura siguiente se observa el registro de la velocidad de detonación post voladura.

**Gráfico N° 04:** Registro velocidad de detonación.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa Las Bambas).

### 2.2.26. EQUIPO DETECTOR MULTIGÁS

El detector de gas portátil controla simultáneamente hasta cinco peligros atmosféricos, incluido el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>), el gas combustible (% LEL) y una amplia selección de gases tóxicos. Compacto y ligero, activa alarmas audibles, visuales y vibratorias en caso de alarma baja, alta, TWA o STE (HONEYWELL, 2018).

Características adicionales (HONEYWELL, 2018).

- Medición de 0-5% vol (0-50,000 ppm) de dióxido de carbono
- Gabinete integral a prueba de conmoción cerebral para los entornos más resistentes

- Dos opciones de energía: tres batería alcalina AA o una batería recargable
- Procedimiento de calibración automática simple
- Proporciona un tono de alarma de 95 Db

**Figura N° 49:** Monitoreo con el equipo detector multigás.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia técnica Exsa Las Bambas).

### 2.2.27. EQUIPO MEDICIÓN DE VIBRACIONES (SISMÓGRAFO)

Los sismógrafos contiene tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, radial y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento de la tierra tendrá una velocidad pico partícula (VPP) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico partícula (CONTRERAS PÉREZ, 2009).

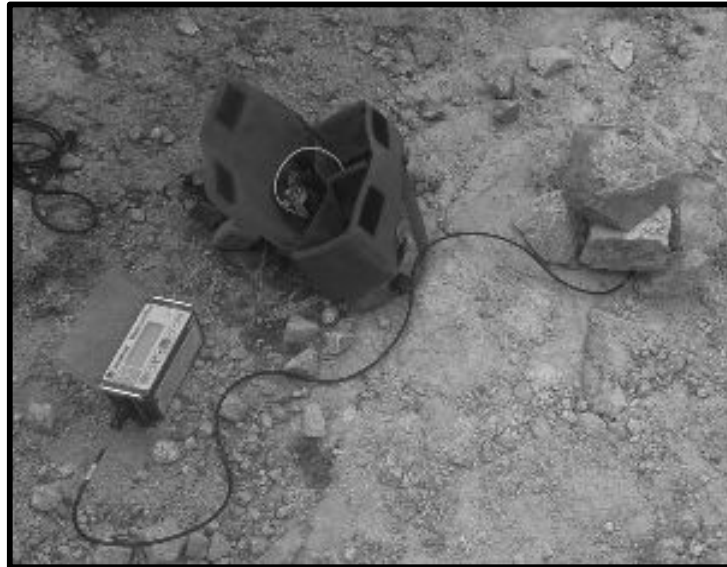
Para ello pasa por manejar algunos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura a su alrededor. Estas son importantes puesto que transportan la energía vibracional, por lo tanto, debemos tener presente sus relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto son importantes su medición en un campo lejano, al contrario de las ondas P y S que son más significativas cerca de la voladura. Por esto los registros de las vibraciones producidas por voladuras son almacenados en los sismógrafos, los cuales graban las amplitudes y duración de los movimientos de la tierra, producto de dichas voladuras, usando los siguientes componentes (CONTRERAS PÉREZ, 2009):

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.
- Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.

- Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria.
- Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

El equipo usado para la realización del trabajo de investigación en los proyectos de voladura durante las pruebas fue el Minimate Plus™ de InstanTel y el Software usado es el Blastware III.

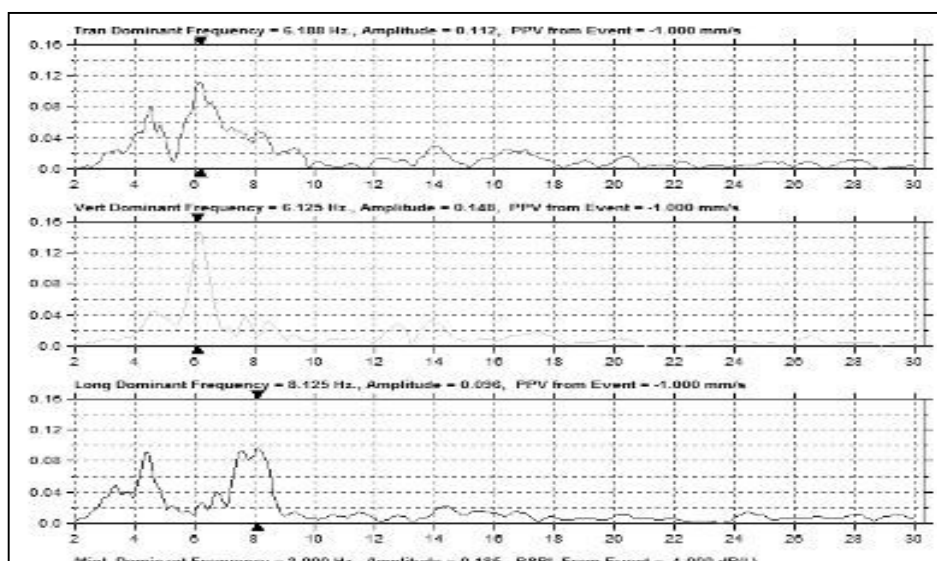
**Figura N° 50:** Sismógrafo InstanTel (Sismógrafo).



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia técnica Exsa Las Bambas).

Un vez realizado el monitoreo de las vibraciones en un puntos estratégicos aledaño a viviendas, se procede a realizar el análisis de datos en gabinete.

**Gráfico N° 05:** Análisis del vector suma de la velocidad pico partícula.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia técnica Exsa Las Bambas).

## 2.2.28. SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL

Dentro del proceso de voladura se tienen que tomar las siguientes medidas de seguridad de todas las actividades que involucra a todo el personal encargado de dicho proceso, que a continuación se detallan:

### 2.2.28.1. Seguridad en primado de taladros

- Antes de iniciar la actividad se debe elaborar las herramientas de gestión en seguridad, realizando la identificación de peligros, evaluar y controlar los riesgos (EXSA S.A, 2016).
- Durante tormentas eléctricas : Alerta roja suspender toda actividad y dirigirse a refugio establecido, en alerta naranja realizar trabajo restringido, en alerta amarilla alistar todo lo necesario y comunicar al supervisor para la evacuación respectiva de la zona.
- No primar taladros con un solo detonador si no tiene el diseño de primado y carga de taladros aprobados por encargados del área respectiva de la empresa (EXSA S.A, 2016).
- No usar celular en la malla de carguío con explosivos y polvorines (EXSA S.A, 2016).
- Nunca manipule o fuerce la labor con accesorios defectuosos de fabricación, comunique inmediatamente al supervisor (EXSA S.A, 2016).
- Si esta fatigado, auto medicado, o con síntomas de salud anormal, paralice la labor y comunique al supervisor (EXSA S.A, 2016).
- No usar herramientas hechizas, o reacondicionadas para la labor (EXSA S.A, 2016).
- Detener toda actividad si algún equipo presenta condiciones sub estándares que pongan en riesgo la integridad personal, medio ambiente o equipos/vehículos (EXSA S.A, 2016).
- Revisar frecuentemente los taludes y zonas de riesgo en campo.
- Nunca pasar por debajo de la línea de fuego y/o cargas suspendidas (EXSA S.A, 2016).
- Si no hay las condiciones seguras para la labor, tiene el derecho a decir NO (EXSA S.A, 2016).

### 2.2.28.2. Seguridad en carguío de taladros

- Antes de iniciar la actividad se debe elaborar las herramientas de gestión en seguridad, realizando la identificación de peligros, evaluar y controlar los riesgos (EXSA S.A, 2016).
- No usar celular en la malla de carguío con explosivos y polvorines (EXSA S.A, 2016).
- Este proceso se realizara con el radio musical apagado, estando atento a las comunicaciones radiales por frecuencia mina (EXSA S.A, 2016).
- Está prohibido el ingreso de vehículos y/o equipos a zonas donde se haya distribuido accesorios de voladura, zonas amarradas para el proceso de detonación, zonas donde se haya iniciado el carguío de taladros con explosivos, zona de taladros cargados con explosivos.
- Para trasladarse de taladro a taladro puede hacerlo sin desencrochar, pero nunca realice cambio de velocidad durante el traslado con camión encrochado (EXSA S.A, 2016).
- Revisar frecuentemente los taludes y zonas de riesgo en campo.
- Ubicar la camioneta conservando distancia establecida a taludes (EXSA S.A, 2016).
- Si las condiciones de luz artificial son deficientes, no realice esta labor.



- Prohibido transitar personal bajo el brazo de descarga extendido o en labor de carguío de taladros (EXSA S.A, 2016).
- Prohibido carguío de taladros retrocediendo el camión mezclador (EXSA S.A, 2016).
- El operador no puede movilizar el camión con personal sosteniendo la manga o manguera bombeable (EXSA S.A, 2016).
- No desplazar el camión si la manga no está insertada en su gancho o este desplazamiento permite caída de explosivo al piso (EXSA S.A, 2016).
- Si no hay condiciones de trabajo seguras, tiene el derecho a decir No (EXSA S.A, 2016).

#### 2.2.28.3. Seguridad en tapado de taladros

- Antes de iniciar la actividad se debe elaborar las herramientas de gestión en seguridad, realizando la identificación de peligros, evaluar y controlar los riesgos (EXSA S.A, 2016).
- Al primer síntoma de anomalía corporal, fatiga, comunicar al supervisor, compañero o personal más cercano (EXSA S.A, 2016).
- No tapar taladros que estén primados con un detonador electrónico y sin Back Up si antes no ha sido testeado (EXSA S.A, 2016).
- Durante el tapado de taladros, mantener distancia del mini cargador aproximadamente de 2m.
- Detener toda actividad si algún equipo presenta condiciones sub estándares que pongan en riesgo la integridad personal, medio ambiente o equipos/vehículos (EXSA S.A, 2016).
- El cucharón debe estar pegado íntegramente y paralelo al piso (EXSA S.A, 2016).
- El operador de piso, se desplaza en la zona de taladros a tapar siempre observando las condiciones de seguridad (EXSA S.A, 2016).
- Nunca pasar por la línea de fuego del mini cargador cuando este en movimiento.
- De existir una emergencia, active la comunicación por los canales establecidos.

#### 2.2.28.4. Seguridad en amarre electrónico

- Antes de iniciar la actividad se debe elaborar las herramientas de gestión en seguridad, realizando la identificación de peligros, evaluar y controlar los riesgos (EXSA S.A, 2016).
- Asegúrese que los tubos de choque hayan sido instalados al conector de forma segura.
- Nunca abandone una fila sin terminar de amarrar (EXSA S.A, 2016).
- Verificar que todas las conexiones se encuentren completamente aseguradas y que el material este en buenas condiciones, reporte de inmediato cualquier observación que se presente.
- Verifique la línea troncal, ya que generalmente ocurren problemas por falta de conexión.
- Queda terminantemente prohíbo el ingreso de equipos y personas al área cargada y amarrada con explosivos (EXSA S.A, 2016).
- Asegúrese de bloquear cualquier ingreso de personas o equipos al proyecto (EXSA S.A, 2016).
- Revisar frecuentemente los taludes y zonas de riesgo en taludes (EXSA S.A, 2016).



- El personal asignado a la tarea, debe ser calificado y contar con entrenamiento en el desarrollo del proceso (EXSA S.A, 2016).
- Durante una tormenta eléctrica, se debe retirar inmediatamente al personal de la zona de carguío a refugios establecidos (EXSA S.A, 2016).
- Si no hay las condiciones seguras para la labor, tiene el derecho a decir NO (EXSA S.A, 2016).
- Estar en comunicación permanente por radio con los supervisores para cualquier eventualidad que pudiera suceder durante el proceso (EXSA S.A, 2016).

#### 2.2.28.5. Seguridad en el uso de emulsiones

Cuando se bombean emulsiones se debe tener cuidado en que la bomba no se seque o se bombee contra un sistema cerrado, en cualquiera de estos casos, la fricción puede elevar la temperatura de la emulsión que se encuentra en la bomba más allá del punto de descomposición del nitrato de amonio o de los otros componentes de la emulsión. Si esto sucede, puede darse una detonación. Bombear emulsiones sin sensibilizar (emulsiones matriz), puede resultar tan peligroso como bombear emulsiones en proceso de sensibilización (emulsiones gasificables); sabemos que las emulsiones tienen un alto grado de seguridad, éstas detonarán si se les somete a condiciones severas (ARANIVAR, 2014).

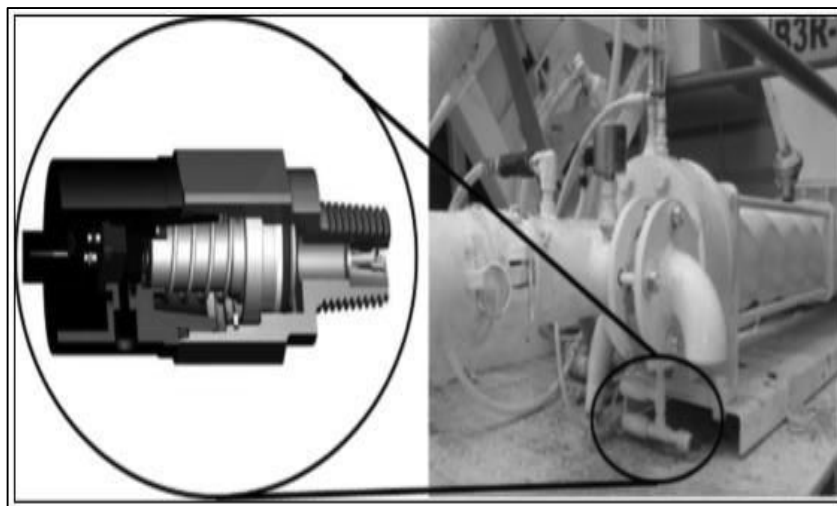
#### 2.2.28.6. Seguridad en el carguío con camiones mezcladores

Los camiones mezcladores de EXSA cuentan con una gama de dispositivos de seguridad que garantizan un trabajo seguro de bombeo de emulsión y/o ANFO pesado siempre que estos estén operativos.

##### 2.2.28.6.1. Sensores de alta y baja presión

Protegen a la bomba ALLWEILER de presiones anómalas altas mayores a 175PSI y bajas menores a 15PSI, que podrían generar calentamiento de ésta. La función del sensor es de enviar una señal negativa al PLC cuando la presión de bombeo del ANFO pesado y/o EMULSIÓN está fuera del rango de trabajo de los dos sensores deteniendo la mezcla y bombeo del agente explosivo (ARANIVAR, 2014).

**Figura N° 51:** Vista de los sensores de presión del camión mezclador.

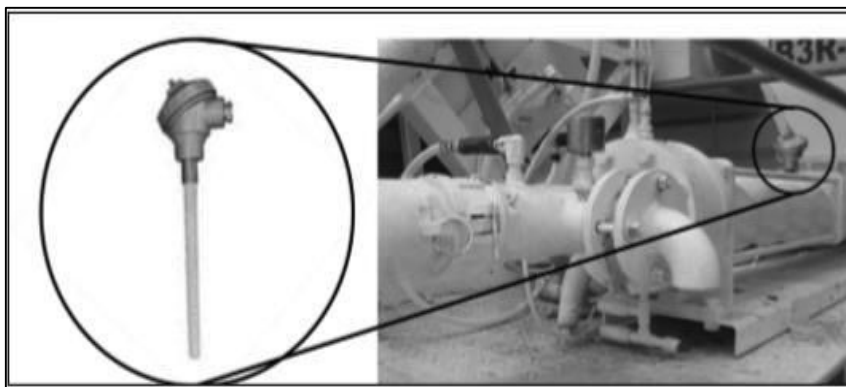


Fuente: (ARANIVAR, 2014).

### 2.2.28.6.2. Sensores de temperatura

Ubicado en las bombas ALLWEILER y BOWIE, son del tipo PT-100 y tienen como finalidad proteger la bomba a temperaturas mayores a 35 °C. Pasada ésta temperatura manda una señal al PLC deteniendo así la mezcla y bombeo del agente explosivo (ARANIVAR, 2014).

**Figura N° 52:** Vista del sensor de temperatura del camión mezclador.

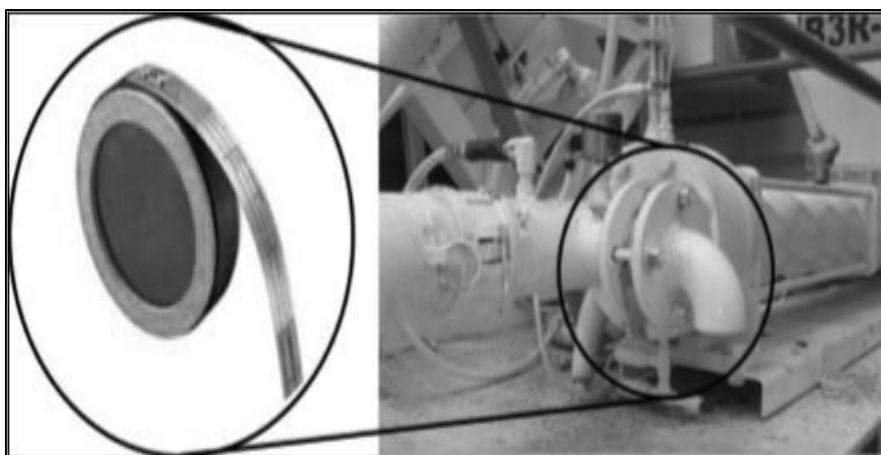


**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

### 2.2.28.6.3. Discos de ruptura

Están presentes en las bombas ALLWEILER y BOWIE que soportan 200 y 100PSI respectivamente. Es un dispositivo de seguridad reactivo. Cuando la bomba crea una sobrepresión por una obstrucción en el sistema. Eleva la presión y cuando supera los 200 y/o 100 PSI el disco de grafito se rompe produciendo un desfogue aliviando la presión en el sistema (ARANIVAR, 2014).

**Figura N° 53:** Vista del disco de ruptura del camión mezclador.



**Fuente:** (ARANIVAR, 2014).

## 2.2.29. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS. (MARCO CONCEPTUAL)

### 2.2.29.1. Banco o cara

Es la parte de cualquier mina subterránea o a cielo abierto donde se va a efectuar trabajos de excavación (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 7).

**2.2.29.2. Cebo**

Es un tipo de iniciador, compuesto por un explosivo con un fulminante conectado a un tipo de mecha (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 8).

**2.2.29.3. Decibel (dB)**

Unidad a dimensional utilizada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. El decibel es utilizado para describir niveles de presión, de potencia o de intensidad sonora; es diez veces el logaritmo decimal de su relación numérica el belio (REYES JIMÉNEZ, 2011 pág. 27)

**2.2.29.4. Detonador**

Es todo dispositivo que contiene una carga detonante para iniciar un explosivo, al que normalmente se le conoce con el nombre de fulminante. Pueden ser eléctricos o no, instantáneos o con retardo. El término detonador no incluye al cordón detonante (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016).

**2.2.29.5. Emulsión**

En forma similar, los agentes de voladura emulsión carecen de un elemento explosivo en su composición (eventualmente se sensibilizan con micro esferas) por lo que también requieren ser detonadas con un cebo reforzador de alta presión de detonación (EXSA S.A, 2011 págs. 27,28).

**2.2.29.6. Explosivos**

Son compuestos químicos susceptibles de descomposición muy rápida que generan instantáneamente gran volumen de gases a altas temperaturas y presión ocasionando efectos destructivos (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 9).

**2.2.29.7. Explosivo potente**

Es un explosivo de alta densidad, velocidad y presión de detonación utilizada para iniciar taladros de gran longitud y diámetro, siempre que estén utilizando agentes de voladura (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 9).

**2.2.29.8. Frecuencia**

La segunda propiedad es la frecuencia. Se mide en Hercios (Hertz, Hz) y nos permite saber a cuantos ciclos por segundo va esa onda. Un ciclo es cuando la onda sube hasta un punto máximo de amplitud, baja hasta atravesar la línea central y llega hasta el punto de amplitud máximo negativo y vuelve a subir hasta alcanzar la línea central. El tono o altura de un sonido depende de su frecuencia, es decir, del número de oscilaciones por segundo (REYES JIMÉNEZ, 2011 pág. 23).

**2.2.29.9. Gases**

Fluidos sin forma emitidos por los equipos diésel, explosivos y fuentes naturales, que ocupan cualquier espacio que esté disponible para ellos (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 9).



**2.2.29.10. Humos**

Partículas sólidas en suspensión en el aire producidas en los procesos de combustión incompleta (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 9).

**2.2.29.11. Material peligroso**

Aquél que por sus características físico-químicas y biológicas o por el manejo al que es o va a ser sometido, puede generar o desprender polvos, humos, gases, líquidos, vapores o fibras infecciosos, irritantes, inflamables, explosivos, corrosivos, asfixiantes, tóxicos o de otra naturaleza peligrosa o radiaciones ionizantes en cantidades que representen un riesgo significativo para la salud, el ambiente y/o a la propiedad. En esta definición están comprendidos el mercurio, cianuro, ácido sulfúrico, entre otros (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 10).

**2.2.29.12. Mina**

Es un yacimiento mineral que se encuentra en proceso de explotación (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 11).

**2.2.29.13. Mineral**

Un mineral es una sustancia natural, de composición química definida, normalmente sólido e inorgánico, y que tiene una cierta estructura cristalina. Es diferente de una roca, que puede ser un agregado de minerales o no minerales y que no tiene una composición química específica (WIKIPEDIA, 2018).

**2.2.29.14. Minería a cielo abierto**

Se llaman minas a cielo abierto, y también minas a tajo (o rajo) abierto, a las explotaciones mineras que se desarrollan en la superficie del terreno, a diferencia de las subterráneas, que se desarrollan bajo ella. Para la explotación, es necesario excavar, con medios mecánicos o con explosivos, los terrenos que recubren o rodean la formación geológica que forma el (WIKIPEDIA, 2018).

**2.2.29.15. Peligro**

Situación o característica intrínseca de algo capaz de ocasionar daños a las personas, equipos, procesos y ambiente (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 11)

**2.2.29.16. Proceso de voladura**

Es un conjunto de tareas que comprende: el traslado del explosivo y accesorios de los polvorines al lugar del disparo, las disposiciones preventivas antes del carguío, el carguío de los explosivos, la conexión de los taladros cargados, la verificación de las medidas de seguridad, la autorización y el encendido del disparo (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 11).

**2.2.29.17. Riesgo**

Probabilidad de que un peligro se materialice en determinadas condiciones y genere daños a las personas, equipos y al ambiente (MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, 2016 pág. 12).



**2.2.29.18. Ruido**

El ruido se define como un sonido no deseado. El grado de «inestabilidad» es, con frecuencia, una cuestión psicológica puesto que los efectos del ruido pueden variar desde una molestia moderada a la pérdida permanente de audición (REYES JIMÉNEZ, 2011 pág. 28).

**2.2.29.19. Software**

Se conoce como software al soporte lógico de un sistema informático, que comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas, en contraposición a los componentes físicos que son llamados hardware. La interacción entre el software y el hardware hace operativo un ordenador (u otro dispositivo), es decir, el Software envía instrucciones que el Hardware ejecuta, haciendo posible su funcionamiento (WIKIPEDIA, 2018).

**2.2.29.20. Sonido**

Es una alteración física producida por ondas sonoras, en un medio (un gas, líquido o sólido) que puede ser detectada por el oído humano, también puede definirse como la sensación auditiva excitada por una perturbación física en un medio. El medio por el cual viajan las ondas sonoras ha de poseer masa y elasticidad. Por tanto, las ondas sonoras no viajarán a través de un vacío (REYES JIMÉNEZ, 2011 pág. 20).

**2.2.29.21. Vibración**

La vibración en su sentido general es un movimiento periódico, es decir, un movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo llamado período de vibración y que se designado con el símbolo  $T$ . Una gráfica de desplazamiento  $x$  en el tiempo  $t$  puede describir una curva de complejidad considerable (BENÍTEZ GONZALES, 2011 pág. 27)



## CAPÍTULO III

### DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Se denominan variables a los constructos, propiedades o características que adquieren diversos valores. Es un símbolo o una representación, por lo tanto, una abstracción que adquiere un valor no constante. Son elementos constitutivos de la estructura de la hipótesis, o sea del enunciado de la hipótesis que establece su relación (NUÑEZ FLORES, 2007).

##### 3.1.1. Variables Independientes

Se denominan así las supuestas causas. Dependientes las de posibles efectos. Otros autores mencionan que la variable independiente es susceptible de ser manipulada por el investigador (NUÑEZ FLORES, 2007).

##### 3.1.2. Variables Dependientes

Son el resultado de la manipulación de las variables independientes por cuanto reciben sus efectos. Característica o propiedad que se supone ser la causa (NUÑEZ FLORES, 2007).

#### 3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Se detalla en el siguiente cuadro.

**Cuadro N° 07:** Sistema de variables e índices.

VARIABLES	ÍNDICES
<p><b>Variable Independiente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RMR, RQD y Q del macizo rocoso.</li> <li>Velocidad sísmica del macizo rocoso.</li> <li>Resistencia dinámica y a la tracción.</li> <li>Presencia de agua en los proyectos.</li> <li>Densidad de la roca.</li> <li>Discontinuidades.</li> </ul>
<p><b>Variable Dependiente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Optimización de Voladura Primaria Aplicando el Uso de Mezcla Explosiva Gasificada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carga operante.</li> <li>Velocidad de detonación y presión de detonación.</li> <li>Velocidad pico partícula</li> <li>Densidad y esponjamiento de la mezcla explosiva</li> <li>Factor de carga, potencia y carga lineal.</li> <li>Fragmentación de la roca (P80).</li> <li>Velocidad de excavación</li> <li>Costos.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia.



### 3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.3.1 Hipótesis General

La aplicación del uso de la mezcla explosiva gasificada en la etapa de explotación del tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas, influye en la optimización de la operación unitaria de voladura primaria.

#### 3.3.2. Hipótesis Específico

- La aplicación del uso de la mezcla explosiva gasificada influye en los resultados óptimos de la fragmentación (P80) y generación de gases nitrosos.
- La optimización de la operación unitaria de voladura influye en los costos de la unidad minera Las Bambas.
- La vibración, producto de la voladura primaria influye en el daño al macizo rocoso y a las estructuras de las viviendas de la comunidad aledaña al tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas.

### 3.4. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1. Tipo y nivel de la investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo descriptivo correlacional, y aplicativo para la Unidad Minera LAS BAMBAS en el Tajo Ferrobamba.

#### 3.4.2. Método y diseño investigación

El proyecto de investigación se realiza mediante dos tipos de métodos:

**Método general:** análisis y comparación.

**Método específico:** observación y medición.

En la presente investigación se empleará el método descriptivo correlacional – cuasi experimental, para lo cual el objetivo es el estudio de los proyectos donde se realizaran las voladuras y así lograr incrementar la eficiencia de las operaciones unitarias y reducción de costos en beneficio de la Unidad Minera Las Bambas.

### 3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio de la investigación está conformada por el Tajo Ferrobamba. La muestra está representada por los 34 proyectos de voladura primaria designados en la zona de Jahuapaylla Alta, Mini Tajo y Jahuapaylla Baja del Tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas.

### 3.6. PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Los trabajos comprenderán la ejecución de la investigación en campo y trabajo de gabinete en dos etapas:

#### 3.6.1. Primera etapa

Las primeras voladuras se enfocan en la comprobación de desempeño de la mezcla explosiva gasificada sin variar los parámetros actuales de perforación y voladura. En estas primeras voladuras se pone énfasis en la observación de como la mezcla explosiva gasificada, durante su detonación, interactúa con el macizo rocoso.

##### 3.6.1.1. Antes del proceso de carguío de taladros

- Realizar calibración de camión mezclador según procedimiento estándar.
- Realizar la inspección de los taladros según el procedimiento estándar de voladura vigente en la operación.
- Disponer el instrumento para medir la VOD en al menos 2 taladros.

##### 3.6.1.2. Durante el proceso de carguío de taladros y detonación

- Fijar la densidad de copa en el rango [1.00-1.15] g/cm<sup>3</sup>
- Comprobar el esponjamiento de la columna explosiva dentro del taladro, 5%-10% de la longitud inicial.
- Con los datos de densidad y esponjamiento, establecer una tabla de correspondencia entre la densidad y el esponjamiento medidos en campo.
- Instalar un sismógrafo para registrar los niveles de vibración. Aplicar criterio de daño vigente en la operación.
- Grabar en video el proceso de detonación.

#### 3.6.2. Segunda etapa

En función a los resultados de la primera prueba, presentados al cliente y debidamente documentados, ya se debe aplicar un criterio de optimización para comprobar los beneficios técnicos de la mezcla explosiva Gasificada.

##### 3.6.2.1. Antes del proceso de carguío de taladros

- Proponer un diseño de carga alternativa, que optimice el uso de la mezcla explosiva Gasificada. O una ampliación del patrón de perforación.
- Realizar calibración de camión mezclador e inspección de los taladros según los procedimientos estándares.



- Revisar las longitudes de taco y el material de tapado, con el fin de lograr una optimización del proceso de voladura.
- Disponer y preparar la medición de la VOD y niveles de vibración.

### 3.6.2.2. Durante el proceso de carguío de taladros y detonación

- Fijar la densidad de copa en el rango [1.00-1.15] g/cm<sup>3</sup> y Comprobar el esponjamiento de la columna explosiva dentro del taladro, 5%-10% de la longitud inicial.
- Instalar un medidor de VOD en un taladro donde se haya cargado con la densidad de prueba fuera del rango. Instalar un sismógrafo para registrar los niveles de vibración. Aplicar criterio de daño vigente en la operación.
- Grabar en video el proceso de detonación.

### 3.6.3. Tercera etapa

La tercera etapa de pruebas se puede considerar a las ultimas voladuras, y tienen el objetivo demostrar las ventajas técnicas que optimizan todo el proceso de fragmentación en forma sostenible. Los principales aspectos que se evalúan son:

- Comprobar la reducción de los niveles de vibración.
- Evaluar los consumos de energía en chancado y molienda.
- Evaluar la reducción de riesgos operacionales
- Comprobar la reducción de impactos ambientales
- Comprobar la reducción de daño o impacto a la estabilidad de taludes.
- Recopilación, procesamiento y análisis de la información registrada durante el proceso de carguío de taladros y post voladura.
- Comparación de costos obtenidos durante el proceso de la investigación y después de las pruebas realizadas.
- Redacción final del proyecto de tesis.

En esta etapa se pueden determinar objetivos específicos que son de interés para el cliente.

## 3.7. MATERIAL DE INVESTIGACIÓN

### 3.7.1. Instrumentos de investigación

Se utilizó los siguientes instrumentos para realizar el trabajo de tesis.

- Formatos de control de densidad de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



- Reporte del consumo de la mezcla explosiva gasificada y accesorios por voladura.
- Reporte del consumo mensual de explosivos y accesorios.
- Reporte del material volado mensual.
- Tablas de características de los agentes y accesorios.
- Tabla de características de la mezcla explosiva gasificada.
- Registro de la velocidad de detonación, presión de detonación, velocidad pico partícula, fragmentación (P80), monitoreo de gases y monitoreo de ruido por voladura.
- Características geo-mecánicas de los proyectos de voladura.
- Equipo de carguío de taladros (Camión Mezclador).
- Equipo de tapado de taladros (Mini cargador).
- Software de análisis de fragmentación sistema Split DESKTOP.
- Kit de calibración del camión mezclador.
- Kit de medición de densidad de explosivos en campo (balanza analítica, regla de aluminio, vasos de aluminio calibrados, calculadora, cronometro, lupa, trapo industrial).
- Instrumento de pesaje (Balanza Analítica).
- Instrumentación para medir la VOD (MICROTRAP).
- Instrumentación para medir las vibraciones (Instantel Minimate Plus).
- Instrumento detector multigás.
- Instrumentación electrónica para el proceso de amarre y control de fuga.
- Cámara fotográfica y de video
- Software de diseño y sistema de iniciación electrónica (VIEW SHOT – DIGISHOT PLUS)

Para el procesamiento de análisis de datos se recurrirá a la presentación de tablas en formatos y uso de programas informáticos y estadísticos.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta parte se determinaran los resultados obtenidos en campo y gabinete en cálculos y diseños matemáticos de los parámetros de voladura y la utilización de Software para el diseño de carguío y el sistema de iniciación electrónica. Para ello se darán a conocer todos los elementos que intervienen en ellos con la finalidad de realizar un análisis detallado de la mezcla explosiva gasificada dentro del proceso de voladura en los diferentes proyectos asignados.

##### 4.1.1. MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (HEAVY ANFO GASIFICADO)

Para lograr una adecuada mezcla explosiva gasificada se tiene que realizar los controles en laboratorio y campo empezando con la calibración de los camiones fábrica, control de densidades inicial y final, diseño de carga acorde a las características geo mecánicas del macizo rocoso.

##### 4.1.1.1. Características del diseño de carga con mezcla explosiva gasificada (HA-G)

Para lograr el diseño de carga correcto se comienza con evaluar las características del macizo rocoso, densidad del material, propiedades de los explosivos y agentes a utilizar y luego realizar el análisis en gabinete logrando un diseño adecuado. Se emplearan los modelos matemáticos enmarcados en el capítulo II.

##### 4.1.1.2. Cálculo y control de densidad en gabinete

Las mediciones de densidad en gabinete de la mezcla explosiva gasificada, se realizaron tomando muestras directo de los silos N° 01 y 02 ubicados en la cancha de nitrato, con capacidad de 80 toneladas de emulsión gasificable.

El cuadro N° 08, contiene las especificaciones de peso del vaso de calibración.

**Cuadro N° 08:** Especificaciones del kit de medición de densidades.

Peso del vaso Calibrado (gr)	Volumen del Vaso Calibrado (cc)
635	1000

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación se procedió a realizar el pesado de la mezcla explosiva gasificada en la balanza analítica de las dos muestras, que a continuación se detalla en el cuadro N° 09.



**Cuadro N° 09:** Peso de las muestras de la mezcla explosiva gasificada.

Muestra	Wvlleno (gr)	WHA-73G
1	1995	1360
2	1998	1358

**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el cálculo en gabinete de la densidad de las dos muestras de mezcla explosiva gasificada en los diferentes tiempos de gasificación de acuerdo a los resultados obtenidos en el Cuadro N° 09, y comparados con los parámetros obtenidos en la Tabla N° 24 pág. 67.

**Para la primera muestra:**

- Densidad a los 0 min:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{1360}{1000} = 1.360 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 5 min:

$$\rho = \frac{1225}{1000} = 1.225 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 10 min:

$$\rho = \frac{1165}{1000} = 1.165 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 15 min.

$$\rho = \frac{1132}{1000} = 1.132 \text{ gr/cc}$$

- Densidad al 20 min.

$$\rho = \frac{1120}{1000} = 1.120gr/cc$$

**Para la segunda muestra:**

- Densidad a los 0 min.

$$\rho = \frac{1358}{1000} = 1.358gr/cc$$

- Densidad a los 5 min.

$$\rho = \frac{1223}{1000} = 1.223gr/cc$$

- Densidad a los 10 min.

$$\rho = \frac{1162}{1000} = 1.162gr/cc$$

- Densidad a los 15 min.

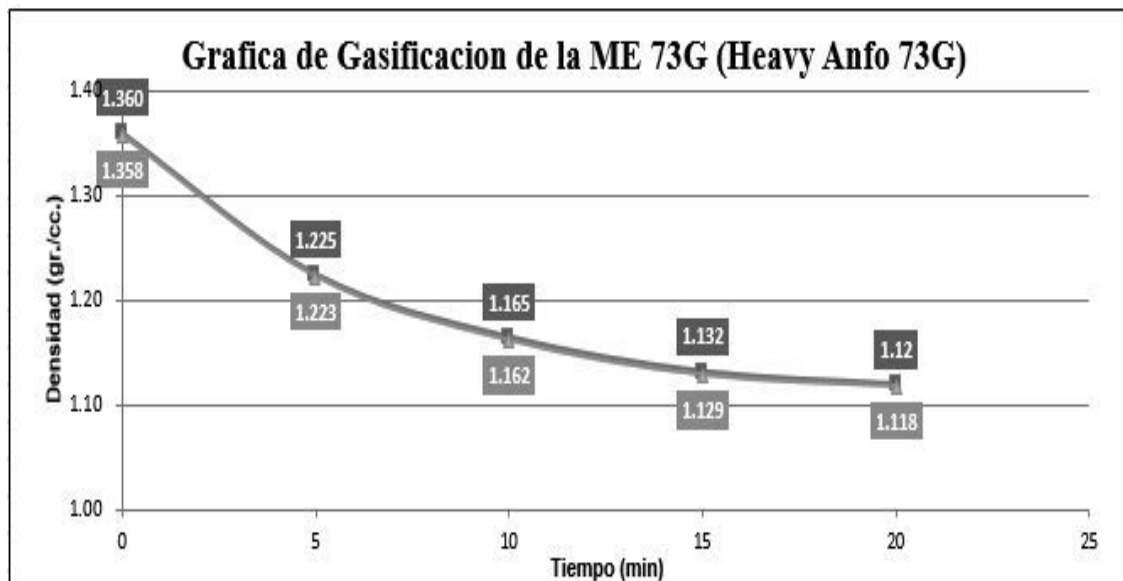
$$\rho = \frac{1129}{1000} = 1.129gr/cc$$

- Densidad a los 20 min.

$$\rho = \frac{1118}{1000} = 1.118gr/cc$$

En el siguiente gráfico N° 06, se muestra el comportamiento de gasificación en diferentes tiempos de las dos muestras de mezcla explosiva gasificada (Heavy Anfo Gasificado).

Gráfico N° 06: Comportamiento de gasificación de las dos muestras tomadas en Gabinete.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.3. Control de nitrito de sodio en solución – reactivo limitante

##### 4.1.1.3.1. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.10% de solución gasificante

Se tiene por ficha técnica que la densidad de la solución G es 1.15gr/cc, según la tabla N° 23 pág. 67 y la densidad del combustible (Aceite + Petróleo) es 0.852gr/cc.

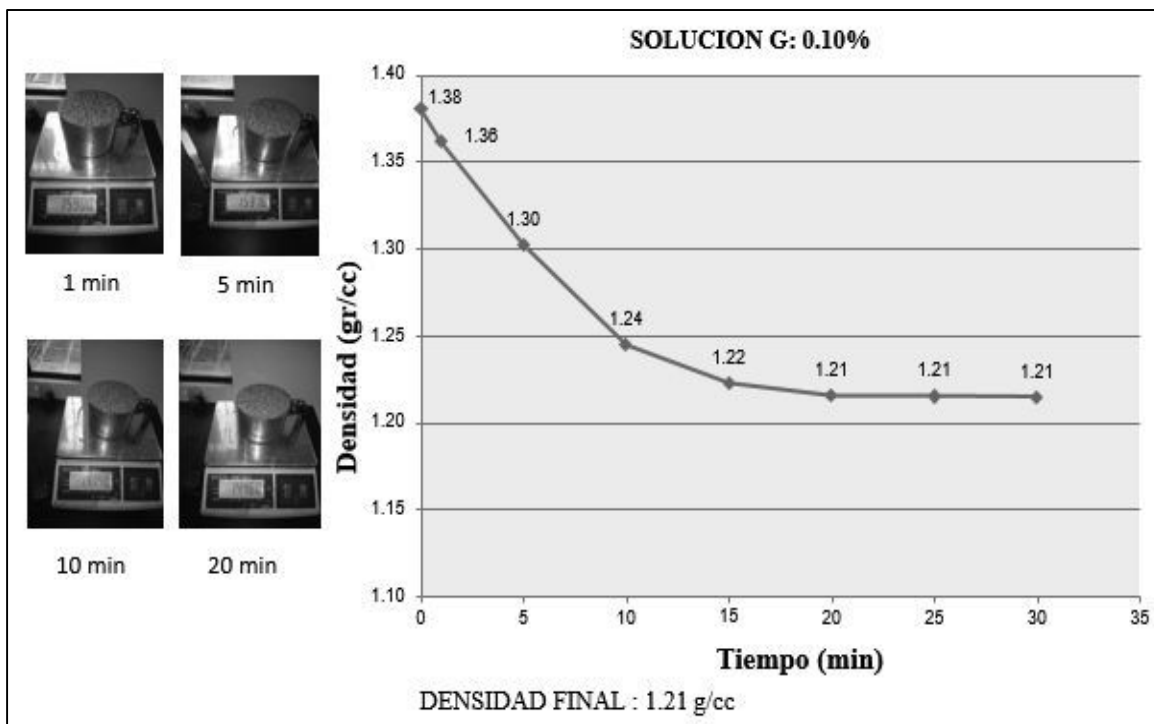
El siguiente cuadro N° 10, contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.10%. de solución G.

Cuadro N° 10: Densidades tomadas en gabinete con 0.10% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.3
10	1,24
15	1.22
20	1.21
<b>Densidad Final</b>	1.21

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 07, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.10% de solución G.

**Gráfico N° 07:** Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.10% de Solución G.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.3.2. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.12% de solución gasificante

El siguiente cuadro N° 11, contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.12%. de solución G.

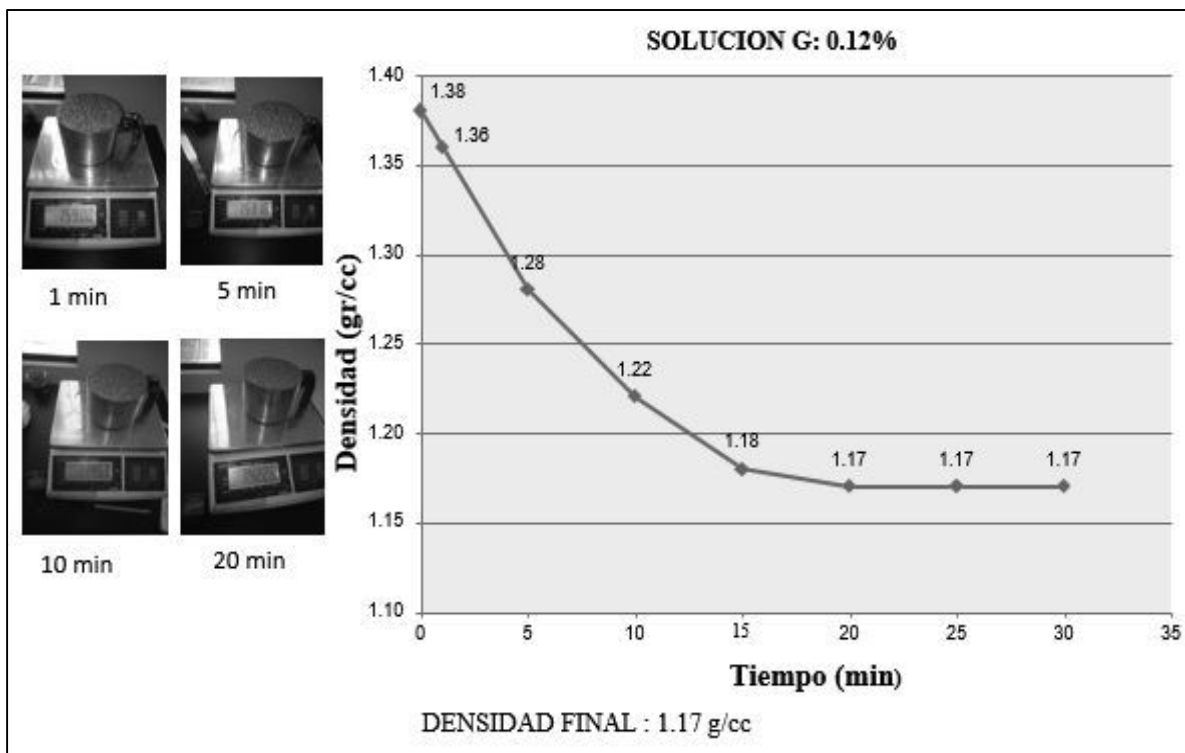
**Cuadro N° 11:** Densidades en gabinete con 0.12% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.28
10	1.22
15	1.18
20	1.17
<b>Densidad Final</b>	1.17

**Fuente:** Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 08, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.12% de solución G.

Gráfico N° 08: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.12% de Solución G.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.4.3. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.14% de solución gasificante

El siguiente cuadro N° 12, contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.14% de solución G.

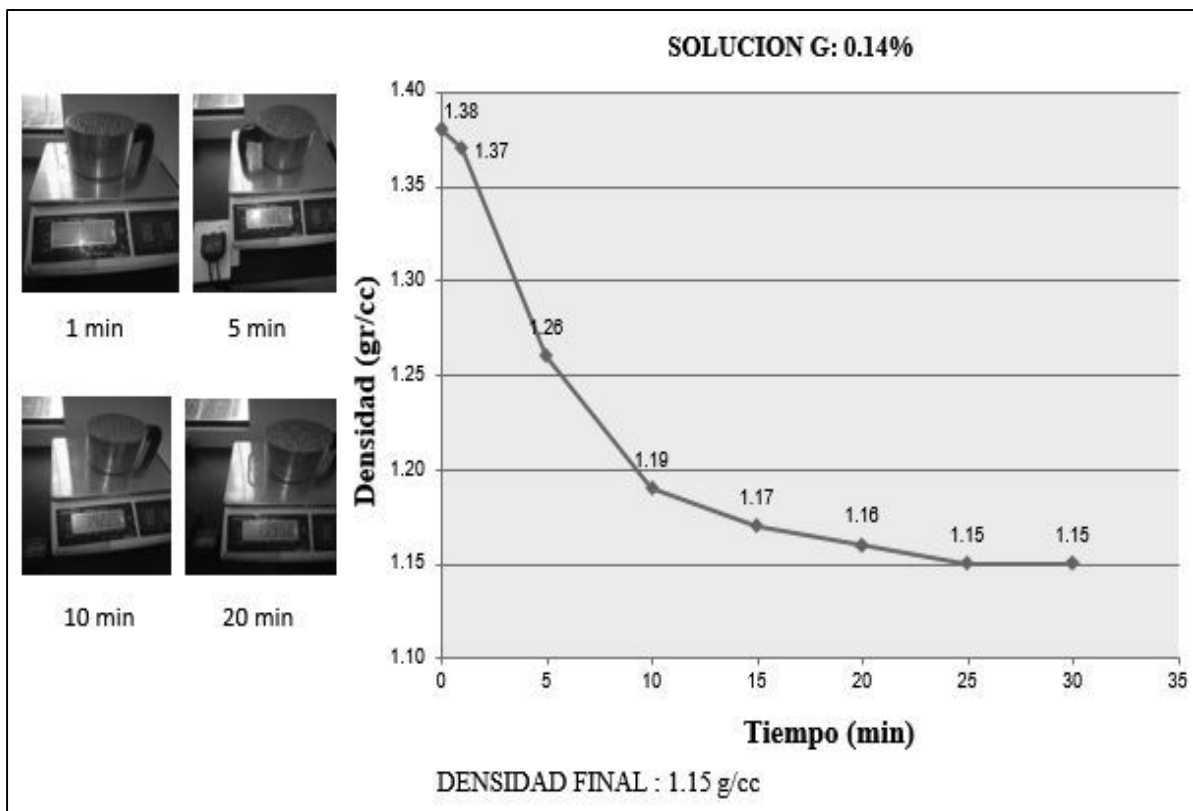
Cuadro N° 12: Densidades en gabinete con 0.14% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.26
10	1.19
15	1.17
20	1.16
Densidad Final	1.16

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 09, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.14% de solución G.

Gráfico N° 09: Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.14% de Solución G.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.4.4. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.16% de solución gasificante

El siguiente cuadro N° 13 contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.14%. de solución G.

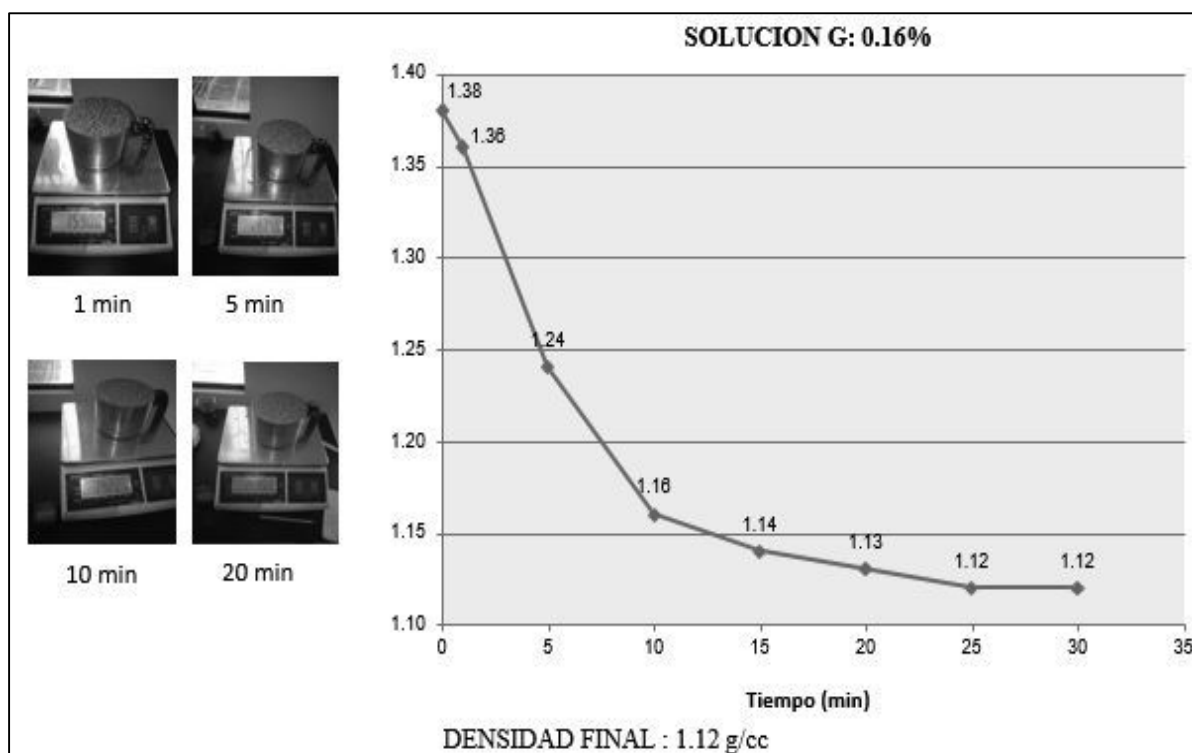
Cuadro N° 13: Densidades en gabinete con 0.16% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.24
10	1.16
15	1.14
20	1.13
<b>Densidad Final</b>	1.13

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 10, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.16% de solución G.

**Gráfico N° 10:** Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.16% de Solución G.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.4.5. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.20% de solución gasificante

El siguiente cuadro N° 14, contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.20%. de solución G.

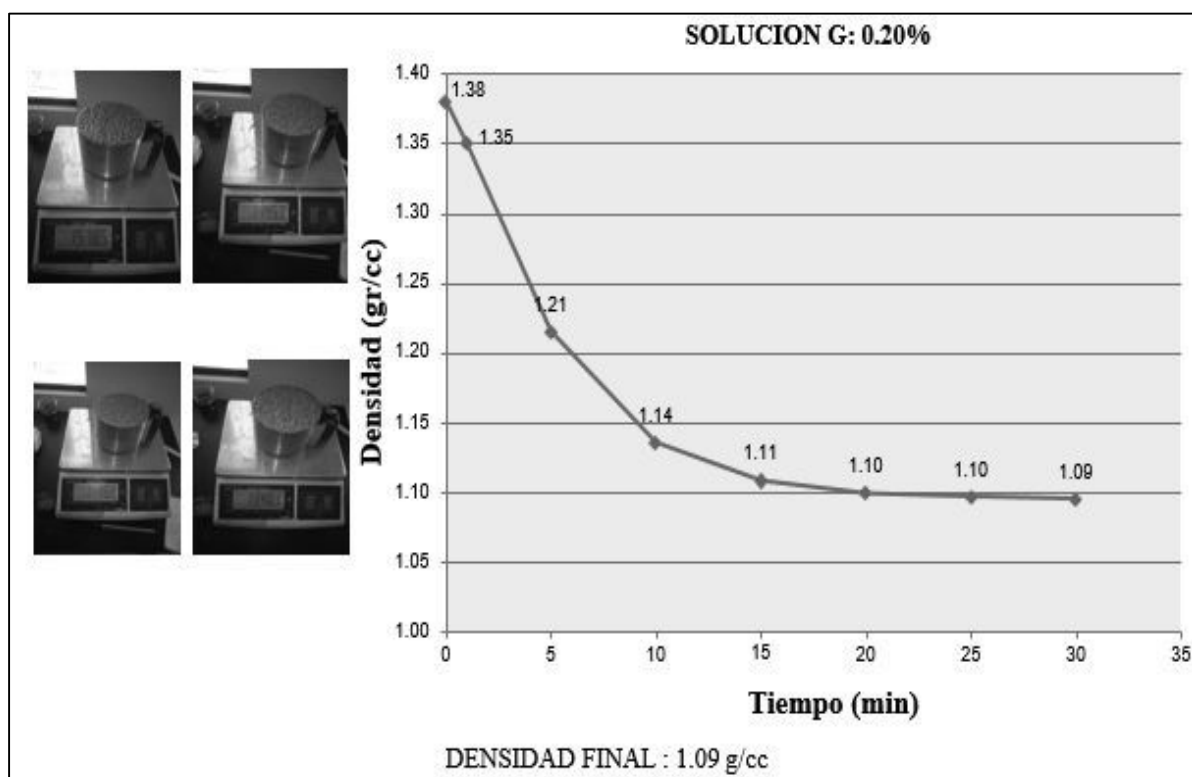
**Cuadro N° 14:** Densidades en gabinete con 0.20% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.21
10	1.14
15	1.11
20	1.1
<b>Densidad Final</b>	1.1

**Fuente:** Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 11, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.20% de solución G.

**Gráfico N° 11:** Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.20% de Solución G.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.4.6. Densidad de la ME-73G (HA-Gasificado) con 0.30% de solución gasificante

El siguiente cuadro N° 15, contiene el tiempo de gasificación y las densidades de copa alcanzadas, al 0.30%. de solución G.

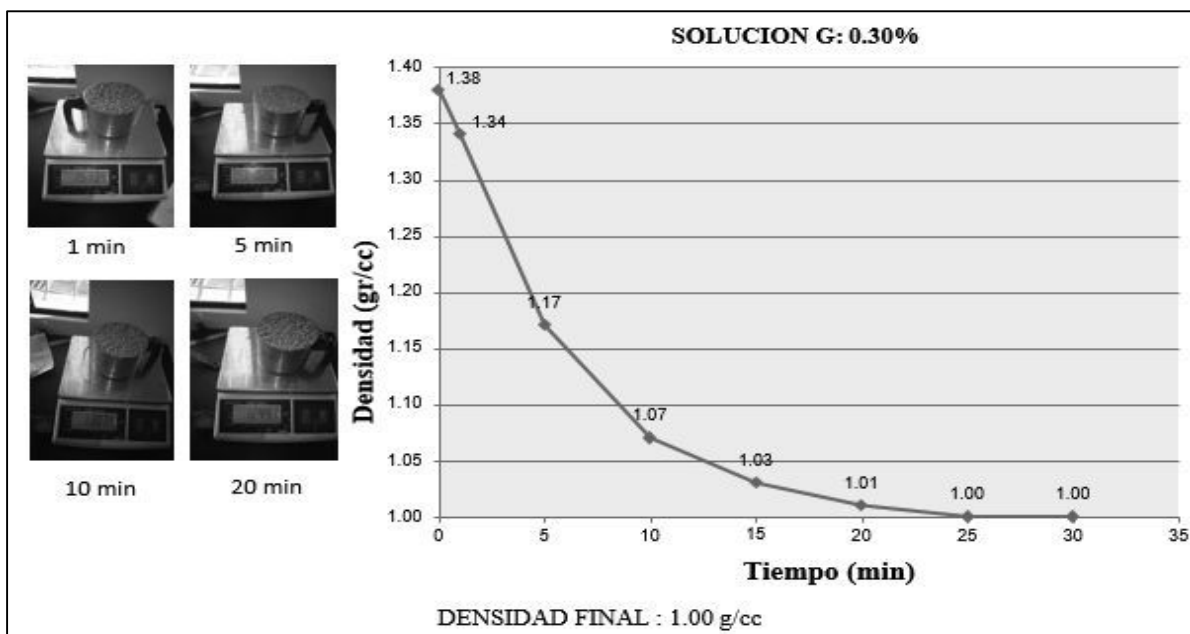
**Cuadro N° 15:** Densidades en gabinete con 0.30% de solución G.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
0	1.38
5	1.17
10	1.07
15	1.03
20	1.01
<b>Densidad Final</b>	1.01

**Fuente:** Elaboración propia.

En el siguiente gráfico N° 12, se muestra el comportamiento de gasificación de la mezcla explosiva gasificada al 0.20% de solución G.

**Gráfico N° 12:** Comportamiento de la mezcla explosiva gasificada al 0.30% de Solución G.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.4. CALIBRACIÓN DEL CAMION MESCLADOR MOD 030

Se realizó la calibración del **Camión Fabrica MOD O30** en campo, de todos los agentes de voladura que intervienen en la fabricación de la mezcla explosiva gasificada.

##### 4.1.1.4.1. Calibración para el nitrato de amonio

**Primero.** Factor Original de Tacómetro. **5.758** (Camión Mesclador).

Se realizó el pesaje y cálculo del nitrato de amonio con el factor inicial como se observa en el cuadro N° 16.

**Cuadro N° 16:** Cálculo del nuevo factor promedio del tacómetro.

Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
30	36.4	1.21	5.758	6.967
30	35.9	1.2	5.758	6.910
30	35.55	1.19	5.758	6.852
30	35.56	1.19	5.758	6.852
Nuevo Factor Promedio				6.895

**Fuente:** Elaboración propia.

**Segundo.** Factor Corregido del Tacómetro **6.895 (Promedio).**

Se realizó el segundo pesaje del nitrato de amonio grado Anfo y el cálculo del nuevo factor con el factor corregido del tacómetro promedio como se muestra en el cuadro N° 17.

**Cuadro N° 17:** Cálculo del nuevo factor corregido del tacómetro.

Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
31	29.16	0.94	6.895	6.481
31	29.36	0.95	6.895	6.550
31	29.68	0.96	6.895	6.619
31	29.22	0.94	6.895	6.481
Nuevo Factor Promedio				6.533

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tercero.-** Factor Corregido del Tacómetro **6.533 (Promedio)**

Se realizó el tercer pesaje del nitrato de amonio grado Anfo y el cálculo del nuevo factor final con el factor corregido del tacómetro promedio (6.533) como se muestra en el cuadro N° 18.

**Cuadro N° 18:** Cálculo del nuevo factor final corregido del tacómetro.

Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
30	29.33	0.98	6.533	6.402
30	29.69	0.99	6.533	6.468
30	30.1	1	6.533	6.533
30	30.2	1.01	6.533	6.598
Nuevo Factor Promedio				6.500

**Fuente:** Elaboración propia.

El tacómetro Adecuando para el Camión Mezclador es de **6.533 Factor**, con el cual sea tenido un promedio de 30 Gr Aprox. de **Nitrato de Amonio** de diferencia entre valor equipo vs valor conocido.



#### 4.1.1.4.2. Calibración para el Slurrex G (emulsión G)

**Primero.** Factor Original de Tacómetro. **9.217** (Camión Mesclador).

A continuación se realizó el pesaje y cálculo del nitrato de amonio con el factor inicial como se observa en el cuadro N° 19.

**Cuadro N° 19:** Cálculo del nuevo factor promedio del tacómetro.

Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
50	55.22	1.1	9.217	10.139
50	54.69	1.09	9.217	10.047
50	55.78	1.12	9.217	10.323
50	55.66	1.11	9.217	10.231
Nuevo Factor Promedio				10.185

**Fuente:** Elaboración propia.

**Segundo.** Factor Corregido del Tacómetro **10.185 (Promedio)**

Se realizó el segundo pesaje del nitrato de amonio grado Anfo y el cálculo del nuevo factor con el factor corregido del tacómetro promedio como se muestra en el cuadro N° 20.

**Cuadro N° 20:** Cálculo del nuevo factor corregido del tacómetro.

Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
51	49.21	0.97	10.185	9.879
51	49.68	0.97	10.185	9.879
51	49.73	0.98	10.185	9.981
51	49.15	0.96	10.185	9.778
Nuevo Factor Promedio				9.879

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tercero.-** Factor Corregido del Tacómetro **9.879 (Promedio)**

Se realizó el tercer pesaje del nitrato de amonio grado Anfo y el cálculo del nuevo factor final con el factor corregido del tacómetro promedio (9.879) como se muestra en el cuadro N° 21.

**Cuadro N° 21:** Cálculo del nuevo factor final corregido del tacómetro.

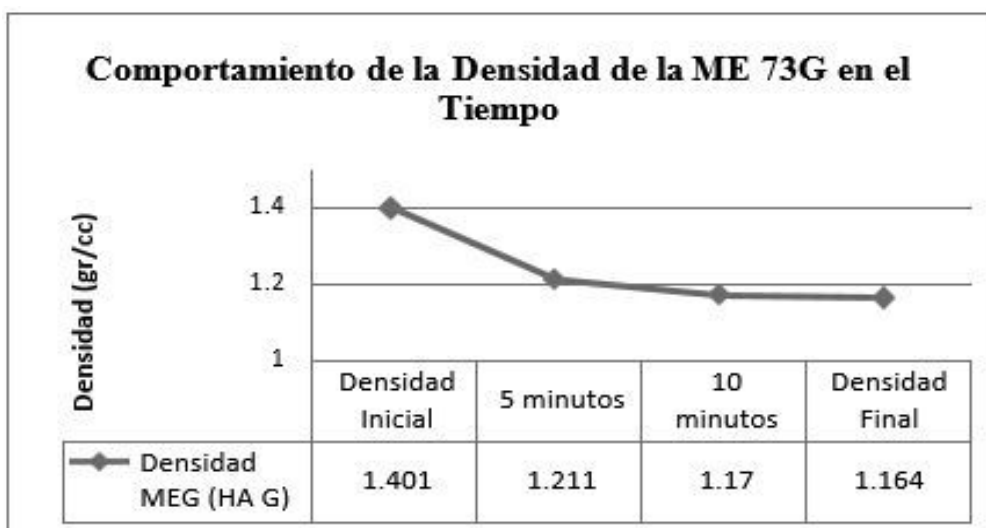
Tacómetro (Kg.)	Balanza (Kg.)	Pesado Tacómetro (kg.)	Factor Original Tacómetro	Nuevo Factor
(A)	(B)	$C = (B) / (A)$	(D)	$E = C \times D$
50	49.43	0.99	9.879	9.780
50	50.12	1	9.879	9.879
50	49.54	0.99	9.879	9.780
50	50.15	1	9.879	9.879
Nuevo Factor Promedio				9.830

**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó los controles de seguimiento de la medición los cuales no tuvieron cambios algunos manteniéndose así el factor nuevo calculado que es de **9.879** Factor. Teniendo una variación de aprox. 60 gr.

#### 4.1.1.5. CONTROL DE DENSIDADES EN CAMPO CON CAMIÓN MEZCLADOR

Para el control de densidades realizadas en campo durante la calibración de los camiones mezcladores se obtuvo lo siguiente como se muestra en el gráfico N° 13.

**Gráfico N° 13:** Comportamiento de la densidad para sistema vaciable.

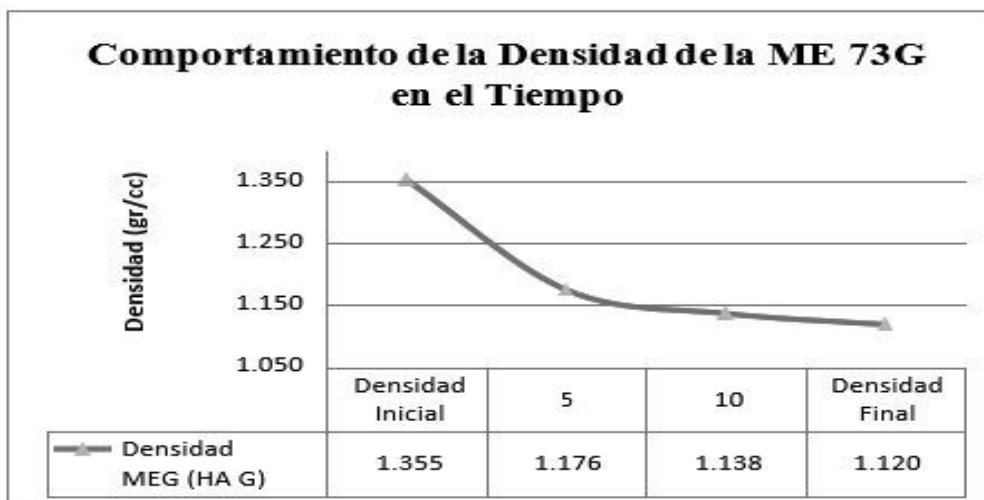
**Fuente:** Elaboración propia.

Se obtuvo que la densidad inicial de la ME 73G (HA 73G) en sistema vaciable se mantiene en  $1.40 \pm 0.1$  gr/cc y su densidad final entre  $1.16 \pm 0.02$  gr/cc, siendo está la densidad óptima para terreno de dureza media a dura como se ha presentado en la zona de Jahuapaylla Alta.

Se obtuvo que la densidad inicial de la ME-73G en sistema bombeable se mantiene en  $1.360 \pm 0.02$

gr/cc y su densidad final entre  $1.11 \pm 0.02$  gr/cc, como se muestra en el gráfico N° 14.

**Gráfico N° 14:** Comportamiento de la densidad para sistema bombeable.



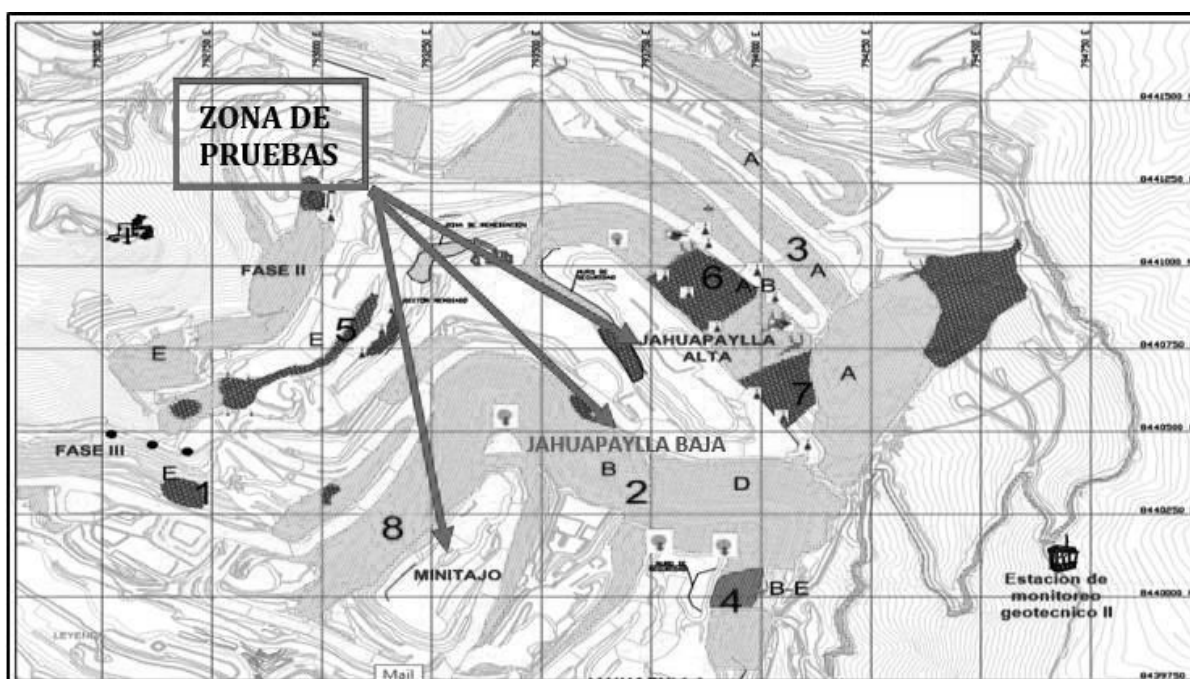
**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2. DESARROLLO DE PRUEBAS EN LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS

Se realizó una serie de pruebas en el zona de Jahuapaylla Baja, Mini Tajo y Jahuapaylla Alta del Tajo Ferrobamba, para evaluar, calcular, diseñar, analizar y comparar los resultados obtenidos en campo usando una mezcla explosiva gasificada y el Anfo pesado (Heavy Anfo).

Las pruebas se ejecutaron en zonas críticas de la mina en cuanto a las estructuras geológicas, zonas altamente competentes y con presencia de agua del 80% aproximadamente.

**Figura N° 54:** Plano de las zonas seleccionadas para las pruebas de voladura Tajo Ferrobamba.

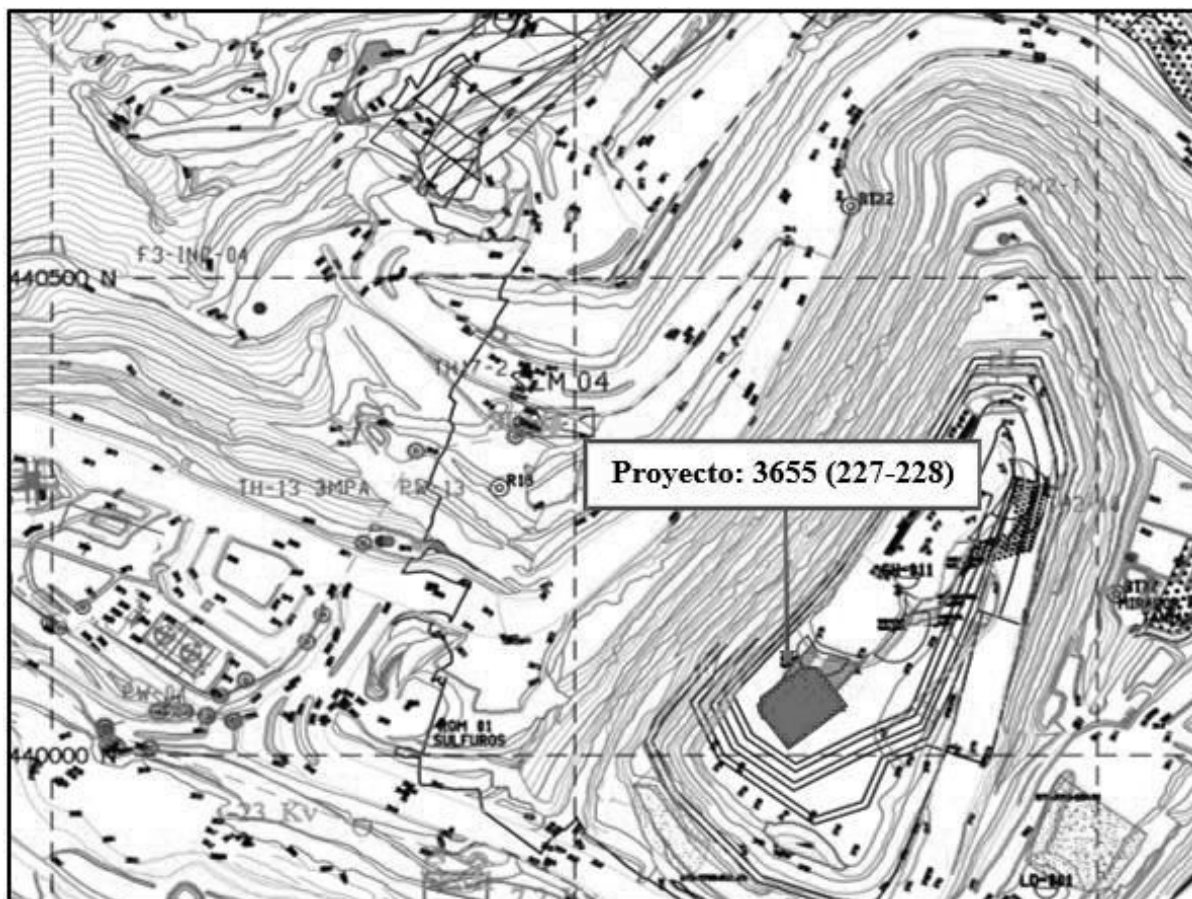


**Fuente:** Departamento de planeamiento Mina Las Bambas.

#### 4.1.2.1. PRUEBA DE VOLADURA 01: PROYECTO (227) - NIVEL 3655 (ME-73G)

Se tiene la ubicación del proyecto de voladura en la zona de Mini Tajo del tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas con coordenadas UTM: N 8440045 y E 793206.

**Figura N° 55:** Plano de ubicación del proyecto de voladura 3655-227 (Tajo Ferrobamba).



**Fuente:** Área de perforación y voladura de la Unidad Minera Las Bambas

##### 4.1.2.1.1. Clasificación del macizo rocoso en la zona de Mini Tajo

Para realizar los diseños de perforación y voladura es importante conocer la clasificación geomecánica y caracterización del macizo rocoso de la zona de prueba del proyecto de voladura asignado, se hará la evaluación de la zona de Mini Tajo del tajo Ferrobamba como se muestra en el cuadro N° 22.

**Cuadro N° 22:** Caracterización del macizo rocoso en la zona de Mini Tajo.

Tipo de Roca	Resistencia a la Compresión Simple (Mpa)	Clasificación	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
Skarn con Sulfuros	75	Dura	2.8

**Fuente:** Área de Perforación y Voladura Las Bambas.

#### 4.1.2.1.2. Parámetros de perforación del proyecto de voladura 3655-227

Se tiene como parámetros de perforación los siguientes datos como se muestra en el cuadro N° 23.

**Cuadro N° 23:** Parámetros de perforación del proyecto de voladura 3655-227.

PARÁMETROS DE PERFORACIÓN		
Altura de Banco	m.	15
Sub Drilling	m.	1.5
Diámetro de Broca	Pulg.	12 1/4
Malla		Triangular
Espaciamiento	m.	7.0
Burden	m.	6.0
Altura de Taladro	m.	16.5
Altura de Agua	m.	0.0
Taco	m.	7.0

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.3. Control de densidades en campo del proyecto de voladura 3655-227

Las mediciones de densidad en campo se realizan obteniendo una muestra de explosivo gasificado directo del camión mezclador FOD-860 (Q-16) al momento que éste realiza el carguío de los taladros. Inmediatamente se toma el tiempo para determinar si en los 20 min. requeridos, el explosivo llega a la densidad deseada y esponje lo suficiente para cubrir la longitud de carga como se observa en la Figura N° 56.

**Figura N° 56:** Esponjamiento de la ME -73G (HA 73G) a los 20 min.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizaron pruebas en campo en el proyecto 3655 – 227 para determinar el comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva gasificada (Heavy Anfo 73G).

Se realizó el pesado de la mezcla explosiva gasificada de la muestra, que a continuación se muestra en el cuadro N° 24.

**Cuadro N° 24:** Peso de muestra de la mezcla explosiva gasificada (HA 73G) proyecto 3655-227.

Muestra	Peso del vaso Calibrado (gr)	Volumen del Vaso Calibrado (cc)	Wvlleno (gr)	W ME 73 G (gr)
1	635	1000	2000	1365

**Fuente:** Elaboración propia.

Se calculó la densidad del explosivo en los diferentes tiempos de gasificación, utilizando la fórmula de densidad de un producto masa sobre volumen.

- Densidad al 0 min:

$$\rho = \frac{1365}{1000} = 1.365 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 5 min:

$$\rho = \frac{1230}{1000} = 1.230 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 10 min:

$$\rho = \frac{1165}{1000} = 1.165 \text{ gr/cc}$$

- Densidad al 15 min.

$$\rho = \frac{1140}{1000} = 1.140 \text{ gr/cc}$$

- Densidad al 20 min.

$$\rho = \frac{1136}{1000} = 1.136 \text{ gr/cc}$$

Se tiene el cuadro N° 25, el resumen del comportamiento de densidades en diferentes tiempos de gasificación.

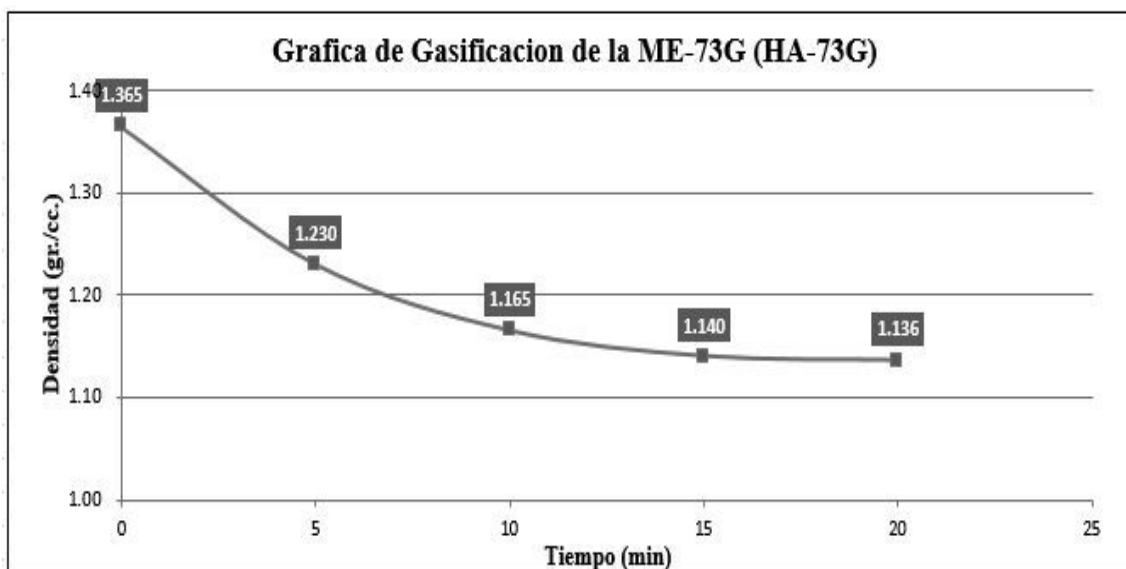
**Cuadro N° 25:** Control de gasificación de la muestra (ME-73G) proyecto 3655-227.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
1	1.365
5	1.230
10	1.165
15	1.140
20	1.136
<b>Densidad Final</b>	1.136

**Fuente:** Elaboración propia.

Se muestra en el gráfico N° 15 el proceso gasificación de la mezcla explosiva gasificada realizada (HA-73G) en campo.

**Gráfico N° 15:** Proceso de gasificación en diferentes tiempos de la ME-73G proyecto 3655-227.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.4. Densidad de carga lineal (kg/m) del proyecto de voladura 3655-227

La densidad lineal es la cantidad de carga que sube en un metro para un diámetro determinado, se obtiene con la Ecuación (21) pág. 49.

$$DCL = 0.507 * D^2 * \rho_e \quad (\text{Kg/m})$$

**Datos:**

Densidad de ME-73G (HA-73G) : 1.365g/cc

Ø tal. : 12 ¼

$$\text{DLC (ME-73G)} = 0.507 * (12.25)^2 * 1.365$$

$$\text{DLC (ME-73G)} = 103.852 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**4.1.2.1.5. Longitud total del taladro ( $L_T$ ) del proyecto de voladura 3655-227**

Tenemos que la longitud total del taladro es la sumatoria de la altura de banco más la sobre perforación del taladro perforado, se procede a calcular de la siguiente manera:

$$L_T = H_b + S_p$$

$$L_T = 15\text{m} + 1.5\text{m} = 16.5\text{m}$$

**4.1.2.1.6. Volumen roto por taladro del proyecto de voladura 3655-227**

Se calculó el volumen de material roto con los parámetros de perforación como se muestra en el cuadro, se obtiene con la Ecuación (13) pág. 47.

$$\text{VR} = \text{B} * \text{E} * \text{H}_{\text{ta}}$$

$$\text{VR} = 6\text{m} * 7\text{m} * 16.5\text{m} = 693 \text{ m}^3$$

**4.1.2.1.7. Longitud de carga total por taladro ( $L_{CT}$ ) del proyecto de voladura 3655-227**

Este valor es calculado tomando los datos del cuadro N° 23 pág. 105.

$$\text{L}_{CT} = \text{L} - \text{T} = 16.5 - 7 = 9.5\text{m}$$

La altura obtenida es la requerida para taladros de 16.5m para el carguío con mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



#### 4.1.2.1.8. Factor de esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) para el proyecto de voladura 3655-227

Determinar cuánto va a esponjar el explosivo con el que trabajamos es muy importante para determinar cuánto va a ser la longitud de carga inicial. Se necesita determinar el factor de esponjamiento teórico y de campo, con las siguientes formulas:

##### 4.1.2.1.8.1. Factor de esponjamiento teórico proyecto de voladura 3655-227

Se necesita determinar el factor de esponjamiento teórico, se utilizó la Ecuación (27) pág. 68.

$$Fe_{\text{teórico}} = \frac{\rho_i}{\rho_f} = \frac{\text{Densidad inicial}}{\text{Densidad final promedio campo}}$$

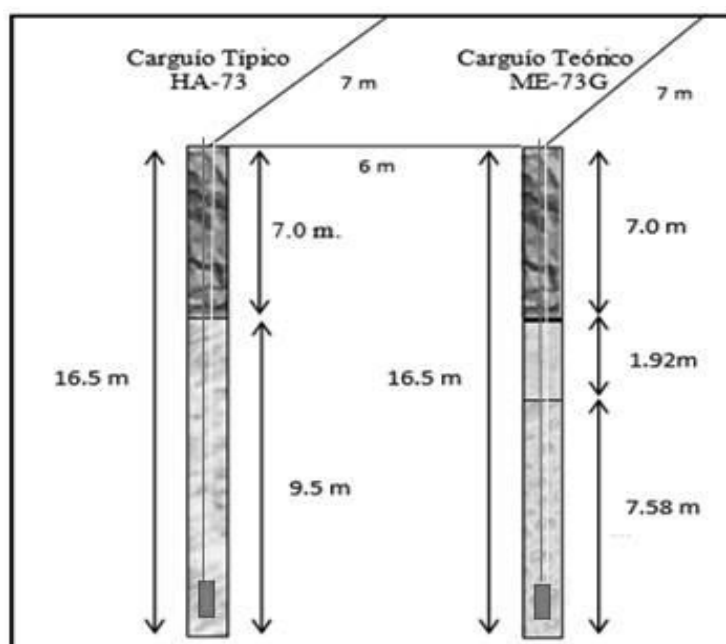
$$Fe_{\text{teórico}} = \frac{1.365}{1.136} = 1.202$$

Este factor teórico nos indica que por cada metro de explosivo que se cargue en el taladro, éste esponjará aproximadamente 0.202 metros.

Es decir, que para poder cumplir los 9.5 metros de longitud de carga necesarios para cada taladro necesitamos cargar, en base al factor teórico, aproximadamente 7.58 metros, esperando que el explosivo esponje 1.92 metros.

En la gráfico N° 16, se muestra el comparativo de carguío entre el Anfo Pesado (HA-73) y la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).

**Gráfico N° 16:** Comparativo inicial de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3655-227.



Fuente: Elaboración propia.

**4.1.2.1.8.2. Factor de esponjamiento proveniente de datos de campo proyecto 3655-227**

Realizando las mediciones en campo se observó que el factor de esponjamiento teórico calculado no se cumplía y que los 7.58m. de explosivo cargado solo llegaban a los 8.60m, de promedio, faltando compensar 0.95m, para lo cual se realizó el cálculo del factor de esponjamiento en campo como se muestra a continuación, se utilizó la Ecuación (28) pág. 69.

$$F_{e_{\text{campo}}} = \frac{\text{Long.Carga Final en Campo}}{\text{Long.Carga Inicial en Campo}}$$

$$F_{e_{\text{campo}}} = \frac{8.60}{7.58} = 1.128$$

**4.1.2.1.8.3. Cálculo de la eficiencia de esponjamiento en campo (K) proyecto 3655-227**

Comparando ambos factores, determinamos la eficiencia del último respecto al primero con la Ecuación (29) pag. 69.

$$F_{e_{\text{teórico}}} K = F_{e_{\text{campo}}}$$

$$K = \frac{F_{e_{\text{campo}}}}{F_{e_{\text{teórico}}}} \% = \frac{1.128}{1.202} = 0.9384 = 93.84\%$$

Es decir, que el factor de campo solo representa el 93.84% del factor teórico el cual, ajustando en la ecuación con la eficiencia encontrada, tenemos un factor de esponjamiento efectivo que se cumple en campo tal como sigue:

**4.1.2.1.8.4. Factor de esponjamiento efectivo ( $F_{e_{\text{efectivo}}}$ ) proyecto 3655-227**

Ajustando en la ecuación anterior del factor de esponjamiento teórico con la eficiencia encontrada, tenemos un factor de esponjamiento efectivo que se cumple en campo y es calculado con la Ecuación (30) pag. 69.

$$F_{e_{\text{efectivo}}} = \frac{\rho_i}{\rho_f} * K$$

$$F_{e_{\text{efectivo}}} = \frac{1.365}{1.136} * 93.84\% \approx 1.128$$

#### 4.1.2.1.8.5. Cálculo de longitudes variables de carga según k calculado proyecto 3655-227

Para una longitud de carga de 9.5m, se utilizo la Ecuacion (31) pag. 69

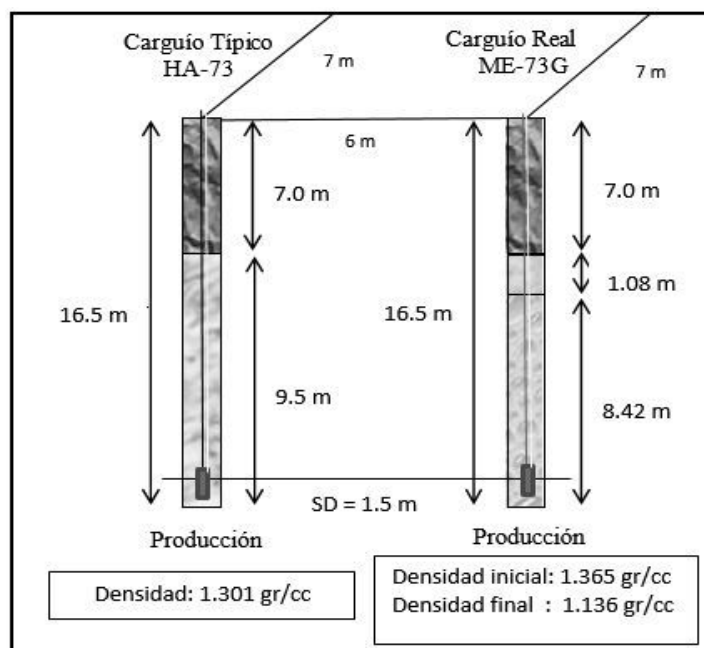
$$\text{Long. Carga Gasificable} = \frac{\text{Long.Carga Requerido en Diseño}}{\text{Fe. Real}}$$

$$\text{Long. Carga Gasificable} = \frac{9.5}{1.128} = 8.42 \text{ m}$$

Es decir, que para poder cumplir los 9.5 metros de longitud de carga necesarios para cada taladro necesitamos cargar, en base al factor, aproximadamente 8.42 metros, para que al cabo de 20 minutos el explosivo esponje 1.08 metros completando la longitud de carga diseñada de 9.5 metros.

Se observa en el gráfico N° 17, el comparativo final, despues de realizar los calculos de corrección del factor de esponjamiento inicial.

**Gráfico N° 17:** Comparativo final de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3655-227.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.9. Carga total por taladro (Qc) del proyecto de voladura 3655-227

Se tomó los datos calculados de la longitud de carga gasificable y la densidad de carga lineal para determinar la carga total por taladro, como se muestra a continuación.

$$Q_c = DCL * L_c = 103.852 \frac{kg}{m} * 8.42 m = 874.434 kg$$

#### 4.1.2.1.10. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura 3655-227

$$CT_{Proyecto} = 874.434 kg * 48 = 41,972.832 kg$$

#### 4.1.2.1.11. Volumen total arrancado del proyecto de voladura 3655-227

Se calculó utilizando datos del parámetro de perforación del cuadro N° 23, altura promedio del proyecto y la cantidad de taladros total.

$$VR_{Total} = B * E * H_{Promedio} = 6m * 7m * 16.5m = 693 m^3 * 48 = 33,264 m^3$$

#### 4.1.2.1.12. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura 3655-227

Se procede a calcular el factor de carga del proyecto de voladura 3655-227, se obtiene con la Ecuación (15) pag. 47 tomando datos de la carga total de explosivo (ME-73G) y el volumen total arrancado del proyecto.

$$FC = \frac{We}{V} = \frac{41,972.832 kg}{33,264 m^3} = 1.262 kg/m^3$$

#### 4.1.2.1.13. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura 3655-227

El cálculo se obtiene con la Ecuación (16) pág. 48 utilizando los datos que se muestran a continuación:

Datos:

- Carga Total de Explosivo por Taladro (kg) : 874.434 kg
- Densidad de Roca : 2.8 Tn/m<sup>3</sup>
- Burden : 6m
- Espaciamiento : 7m
- Altura de Banco : 15m

- Volumen de Roca Arrancado por Taladro :  $693\text{m}^3$

$$\text{Ton.Roca} = 693\text{m}^3 * 2.8 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} = 1,940.4 \text{ Tn}$$

Ecuación (17) pág. 48.

Entonces:

$$\text{FP} = \frac{\text{Kg.Explosivo}}{\text{Tonelada de Roca}} = \frac{874.434}{1,940.4} = 0.451 \frac{\text{Kg.EXP.}}{\text{Tn.Roca}}$$

#### 4.1.2.1.14. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto 3655-227

Determinamos la cantidad de los agentes de voladura utilizados por taladro en el proyecto de voladura 3655-227.

**Datos:**

- 1 galón mezcla : 3.25 kg
- Mezcla explosiva 73G : 874.434 kg

**Primero:** Calculamos la cantidad de Emulsión G.

$$874.434 \text{ kg} * 70\% = 612.104 \text{ kg}$$

**Segundo:** Calculamos la cantidad de Nitrato de Amonio que viene hacer la suma del nitrato de amonio y combustible (aceite + petroleo).

$$874.434 \text{ kg} - 612.104 \text{ kg} = 262.33 \text{ kg}$$

**Tercero:** Calculamos la cantidad de petroleo utilizado para 263.33 kg de nitrato de amonio grado Anfo.

$$263.33 \text{ kg} * 6\% = 15.739 \text{ kg D-2}$$

**Cuarto:** Calculamos la cantidad de nitrato de amonio total por taladro.

$$263.33 \text{ kg} - 15.739 \text{ kg D-2} = 247.591 \text{ kg}$$



Finalmente realizamos la conversión de los kg D-2 utilizado en galones.

$$\frac{15,739 \text{ kgD2}}{3.25 \text{ kg}} = 4.843 \text{ Gls D-2}$$

#### 4.1.2.1.15. Porcentaje y cantidad de nitrato de sodio utilizado para el proyecto 3655-227

Para el proyecto 3655-227, se utilizó el 0.16 % de solución G de acuerdo a la densidad inicial y final requerida para el carguío de taladros con mezcla explosiva gasificada (HA-73G), como se muestra en el Grafico N° 04 pág. 96 y en la Tabla N° 24. pág. 67.

##### 4.1.2.1.15.1. Cantidad de nitrato de sodio utilizado para el Proyecto 3655-227

Para determinar la cantidad de nitrato se utilizó los cálculos obtenidos de la cantidad total de carga explosiva (ME-73G) pág. 112 para el proyecto de voladura.

**Tenemos:**

$$41,972.832 \text{ kg} * 0.16 \% = 67.157 \text{ kg}$$

Convertimos a galones los kg de nitrato conociendo como dato en la pág. 113 que 1galon equivale a 3.25 kg.

$$\frac{67.157 \text{ kg}}{3.25 \text{ kg}} = 20.664 \text{ gal.}$$

#### 4.1.2.1.16. REPORTE DE VOLADURA ELECTRÓNICA (DigiShot Plus) PROYECTO 3655-227

**Datos Generales de la voladura primaria:**

- Mina : Las bambas
- Banco: 3655
- Proyecto: 227 – 228 – Mini Tajo (Tajo Ferrobamba)
- N° de taladros: 64
  - 48 taladros cargados con ME-73G (HA-73G) – Exsa S.A.
  - 16 taladros cargados con AP-73 (HA-73) – Empresa encargada de la voladura.
- Tiempo taladros::
  - Entre taladros: 4 ms



- Entre filas: 127 ms
- N° de equipo : BS4-1030002D8

Comentarios:

- Se realizó la voladura con un total de 64 taladros, todos cargados con una prima.
- La secuencia de salida fue en “V”, destinando el desplazamiento del material a la cara libre ubicada en el proyecto anterior disparado.
- Se utilizaron detonadores electrónicos para la conexión de los taladros; y la iniciación se realizó con 1 detonador Digishot.
- El total de detonadores utilizados es de 65.

En el cuadro N° 26 se muestra el resumen del consumo de explosivos y accesorios utilizados en el carguío de taladros del proyecto de voladura.

**Cuadro N° 26:** Consumo de explosivos y accesorios en el proyecto 3655-227.

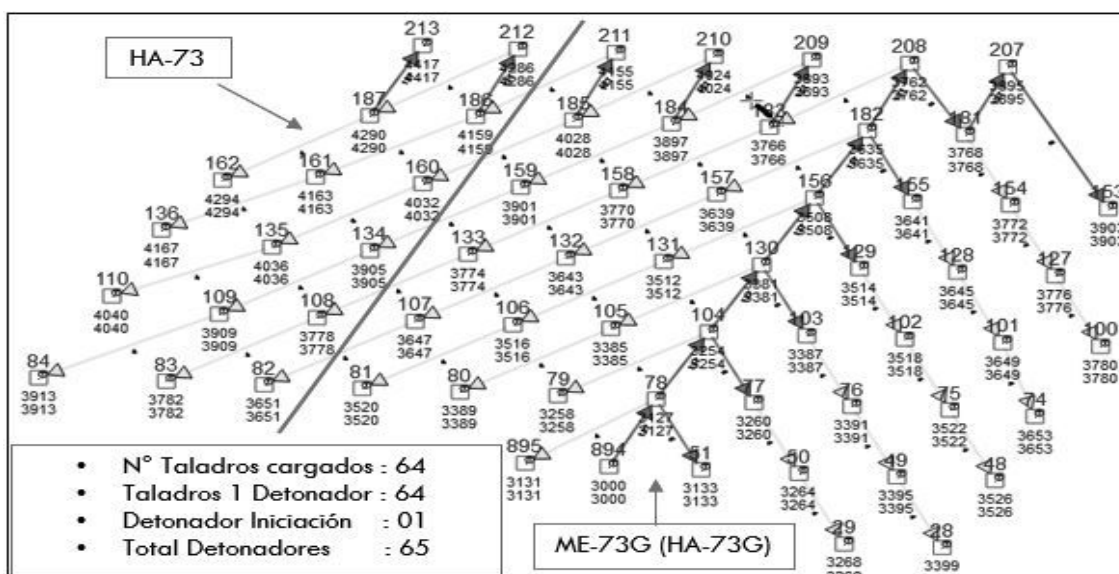
Proy.	N° Tal.	Total ME-73G (HA-73G) kg.	Emul. G. KG.	Nitrato kg.	Nitrito kg.	FO (gal.)	Booster 2 Lb	Digishot	Exanel 18.0m
3655-227	48	41,972.832	29,380.982	12,591.85	20.664	232.465	48	49	48

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.16.1. Diseño de Secuencia Electrónica proyecto de voladura primaria 3655: 227-228

En el siguiente gráfico N° 18, se ilustra el diseño de secuencia en el Software ViewShot habiendo obtenido los datos del diseño de la malla.

**Gráfico N° 18:** Diseño de malla y la posición en el diseño de amarre proyecto: 227-228.

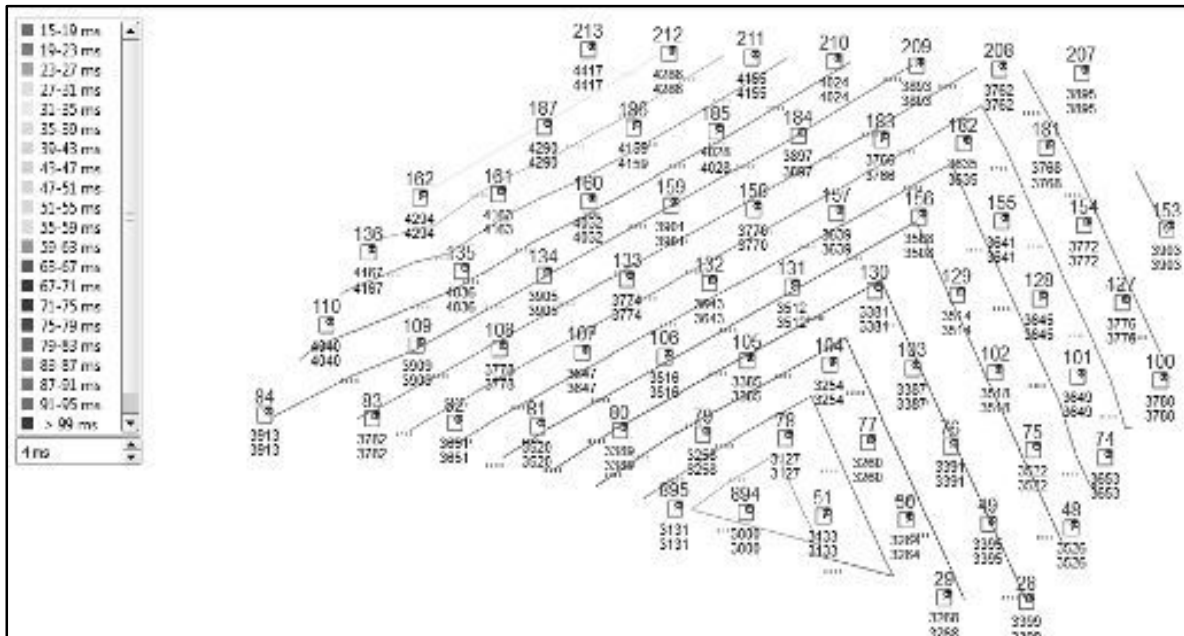


Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.1.16.2. Línea de Iso-Tiempos proyecto de voladura primaria 3655: 227-228

Se procedió a realizar el análisis en el Software ViewShot para comprobar y ver que taladros tienen tiempos iguales o no, como se muestra en el gráfico N° 19.

**Gráfico N° 19:** Línea de Iso-Tiempos en el diseño de malla del proyecto de voladura. 227-228.

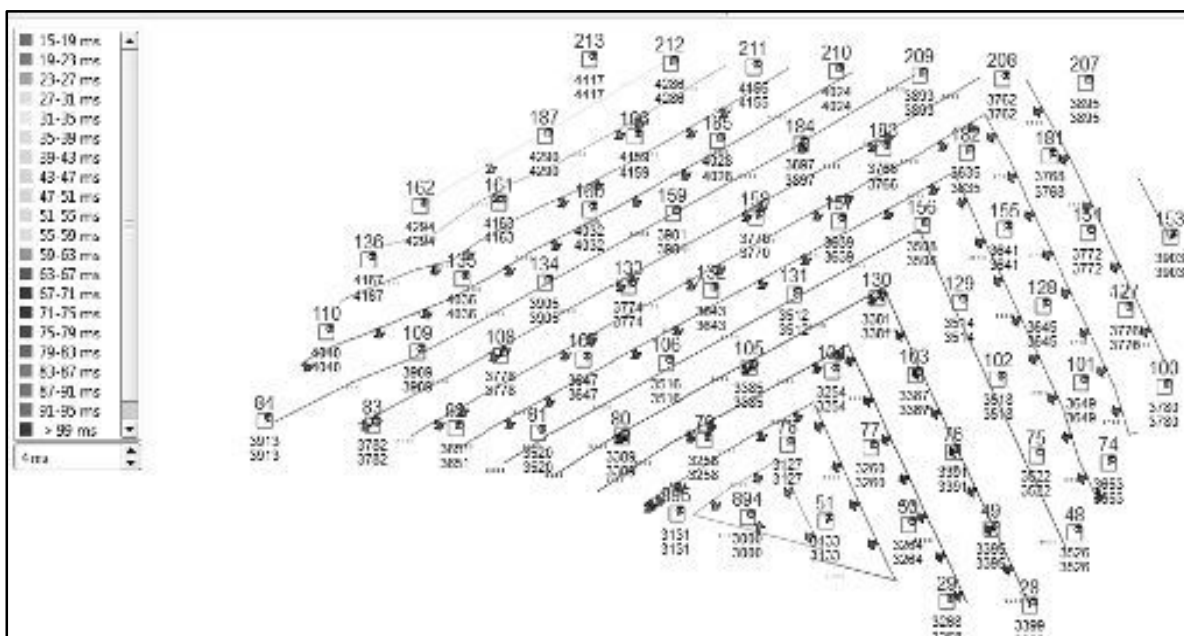


**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.1.16.3. Desplazamiento de Material proyecto de voladura primaria 3655: 227-228

En el gráfico N° 20, se observa el desplazamiento y la dirección de acumulación del material.

**Gráfico N° 20:** Desplazamiento de material volado del proyecto de voladura 227-228.

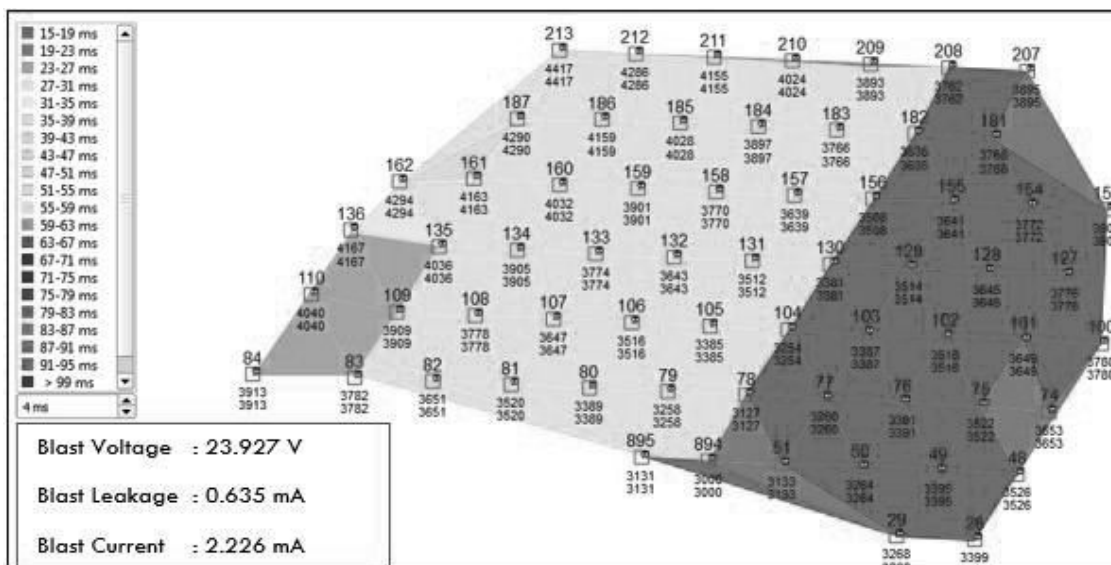


**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.1.16.4. Burden – Relief proyecto de voladura primaria 3655: 227-228

En el gráfico N° 21, se observa zonas de alivio que determinaran una adecuada fragmentación.

**Gráfico N° 21:** Zonas de alivio en el proyecto de voladura 227-228.

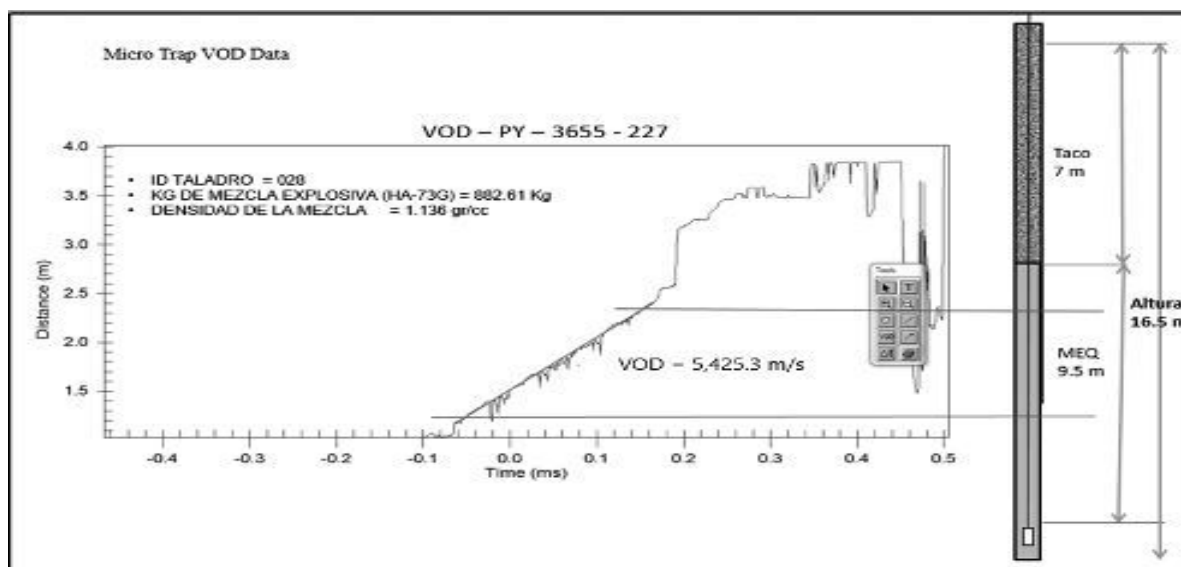


**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.1.16. REPORTE DE VELOCIDAD DE DETONACIÓN PROYECTO 3655-227

- El registro de la VOD se realizó en el taladro con ID 028, de profundidad 16.5 m, con una carga de explosivo de 882.61 kg de ME-73G (HA-73G) en el taladro, la mezcla analizada es de 232.27 kg, la densidad final de la mezcla fue de 1.136 gr/cc.
- El registro midió 2.5 m. de mezcla.
- La velocidad de detonación de la mezcla ME-73G en el tramo superior fue de 5425.3 m/s como se muestra en el gráfico N° 22.

**Gráfico N° 22:** Registro de VOD en el taladro N° 028 del proyecto de voladura 3655-227.



**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

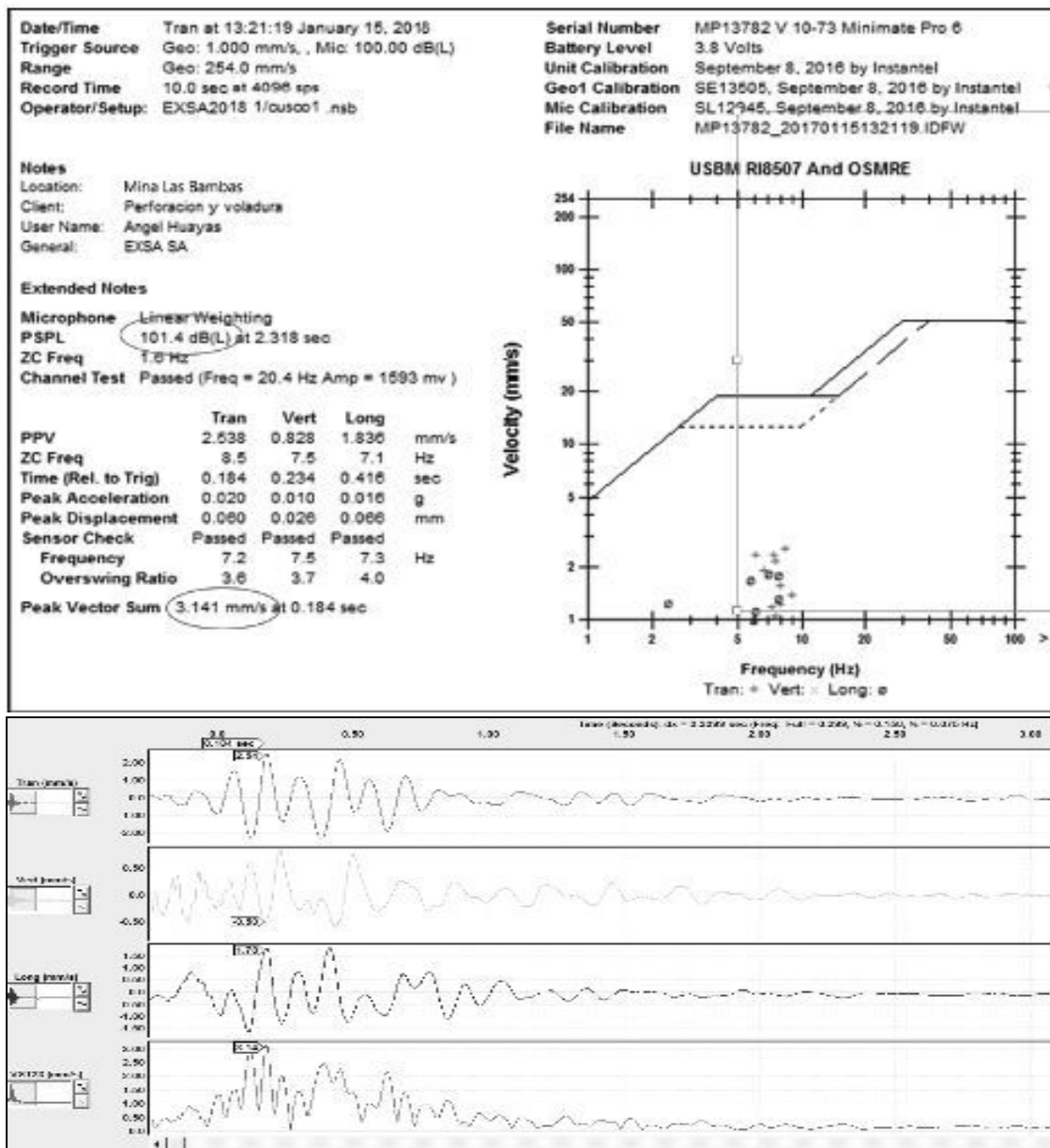
**4.1.2.1.17. REGISTRO DE VIBRACIONES (SISMOGRAFO PY. 3655 – 227)**

Para realizar el control de daños hacia el talud de contorno se aplican voladuras controladas desde los diseños de perforación y voladura aplicando técnicas como el precorte y líneas de perforación amortiguamiento conocido como taladros Buffer, estos se diseñan de acuerdo al tipo de dureza de la roca, para luego calcular el diseño de carga explosiva, estos se contrastan con los monitoreos de vibraciones en los taludes.

Ubicación del Sismógrafo en la comunidad de Taquiruta N:8439239 por el E:793418 y del Proyecto por el N: 8440046 y E: 793208. La instalación del sismógrafo se realizó en dirección de la comunidad ubicada al sur del tajo, a una distancia de 950.5 metros del proyecto 3655-227 (punto verde) en comunidad polvorín.

El registro determina un ppv de 5.636 mm/s. y 106.5 db de ruido como se muestra en el gráfico N° 23.

**Gráfico N° 23:** Registro de Vibraciones del proyecto de voladura 3655-227.



Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.



Según la norma Norteamericana USBM RI8507 se encuentra por debajo del límite para estructuras y edificaciones.

#### 4.1.2.1.18. ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN PROYECTO 3655-227

El presente reporte describe el análisis de fragmentación del día 15 de enero del 2018 en el frente de la pala 05 eléctrica CAT, proyecto 3655-227 zona de mineral.

En el cuadro N° 27, se observa un resumen de datos del proyecto de voladura.

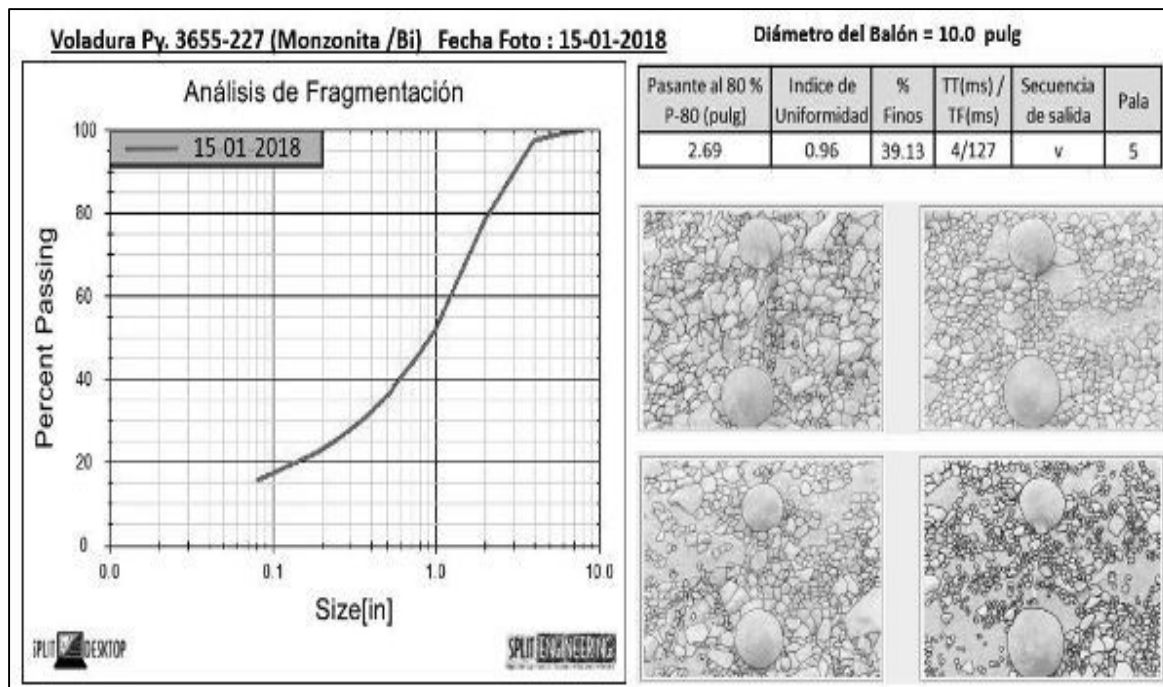
**Cuadro N° 27: Datos de análisis de fragmentación proyecto 3655-227 – Mineral.**

Fecha de Disparo	Toma de Fotos	Banco	Proy.	Tipo de Roca	Material	Densidad Final ME-73G (HA-73G)	Factor Potencia (kg/ton)
15/01/2018	15/01/2018	3655	227	MZ/Bi	Mineral	1.136	0.472

**Fuente:** Elaboración propia.

El frente de la pala 05 arrojó un P80 2.69 pulg. y un porcentaje de finos de 39.13 % como se observa en el gráfico N° 24.

**Gráfico N° 24: Análisis del P80 del proyecto de voladura 3655 - 227.**



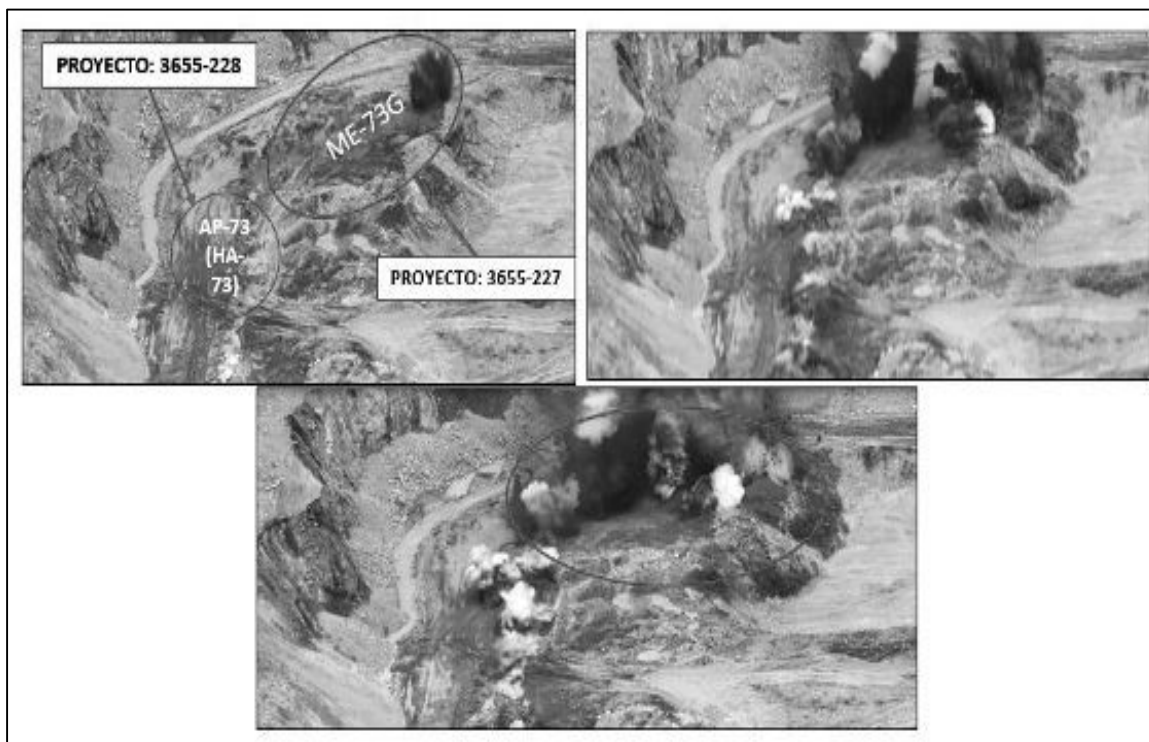
**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.1.19. MEDICIÓN DE GASES PROYECTO 3655-227

Al ingresar al proyecto 3655-227 post voladura se procedió al monitoreo de gases nitrosos para luego analizarlos y determinar el nivel de contaminación que estos puedan ocasionar al medio ambiente.

En la figura N° 57, se observa la generación de un adecuado balance de oxígeno y control de la densidad.

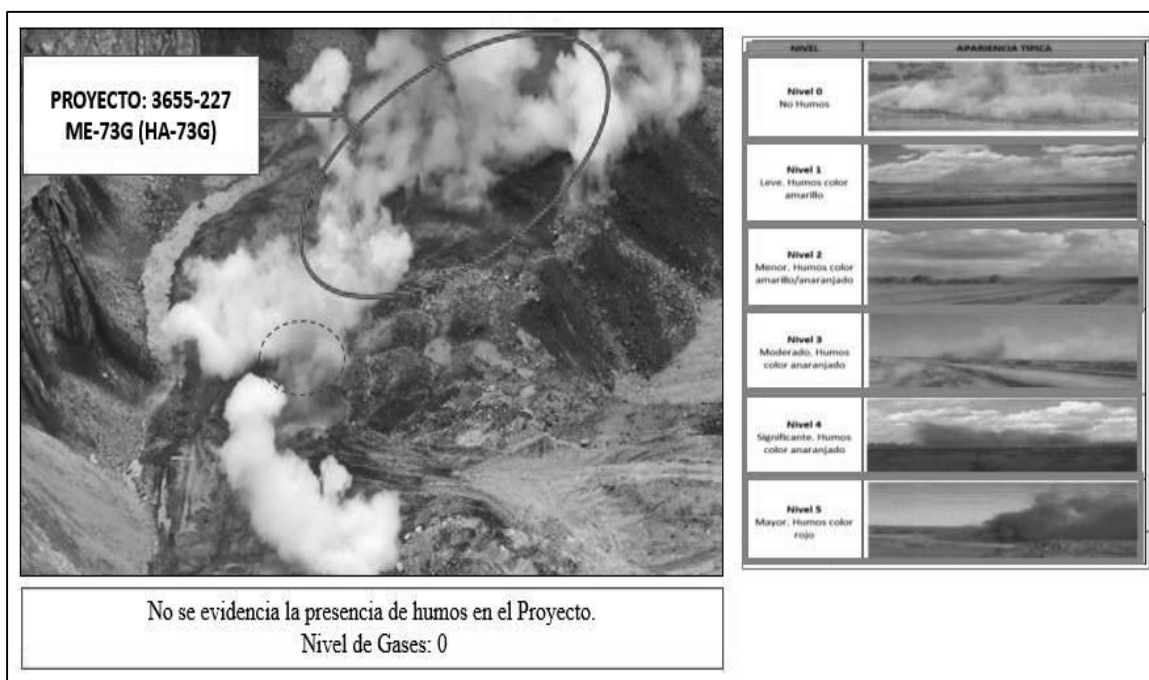
**Figura N° 57:** Análisis de gases del proyecto de voladura 3655 - 227.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el comparativo del nivel de gases nitrosos con el cuadro de la escala de niveles de gases obteniendo un Nivel 0 con un 0.0% promedio de gases nitrosos debido a la disipación y proporción de estos, se encuentran dentro del rango como límite permisible como se observa en la figura N° 58.

**Figura N° 58:** Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3655-227.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.2. PROYECTO (228) - NIVEL 3655 AP-73 (HA73)

Se realizó el carguío de taladros continuo al proyecto de voladura 3655 – 227 (Exsa S.A) en la zona de Mini Tajo con mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA73), el explosivo utilizado fue de la Empresa encargada de la voladura que viene realizando operaciones unitarias de voladura, obteniendo resultados en VOD, fragmentación y generación de humos nitrosos de fecha 15 de enero del 2018.

##### 4.1.2.2.1. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3655-228

Se realizaron pruebas en campo en el proyecto 3655 – 228 para determinar la densidad de la mezcla explosiva sin gasificar Anfo Pesado 73 (HA-73) de la empresa encargada de la voladura.

Las mediciones de densidad en campo directo del camión mezclador C6F-842 (Q-18) al momento que éste realiza el carguío de los taladros.

**Cuadro N° 28:** Peso de muestra de la mezcla explosiva sin gasificar (HA-73) proyecto 3655-228.

Muestra	Peso del vaso Calibrado (gr)	Volumen del Vaso Calibrado (cc)	Wvlleno (gr)	WHA-73 (gr)
1	635	1000	1938	1303
2	635	1000	1936	1301
3	635	1000	1937	1302
4	635	1000	1934	1299
Densidad Teórica: 1.29 - 1.31 gr/cc				

**Fuente:** Elaboración propia.

Se calculó la densidad del explosivo, utilizando la ecuación general de densidad masa sobre volumen y los datos obtenidos en el cuadro N° 28.

- Densidad para la primera muestra:

$$\rho = \frac{1303}{1000} = 1.303 \text{ gr/cc}$$

- Densidad para la segunda muestra:

$$\rho = \frac{1301}{1000} = 1.301 \text{ gr/cc}$$

- Densidad para la tercera muestra:

$$\rho = \frac{1302}{1000} = 1.302 \text{ gr/cc}$$

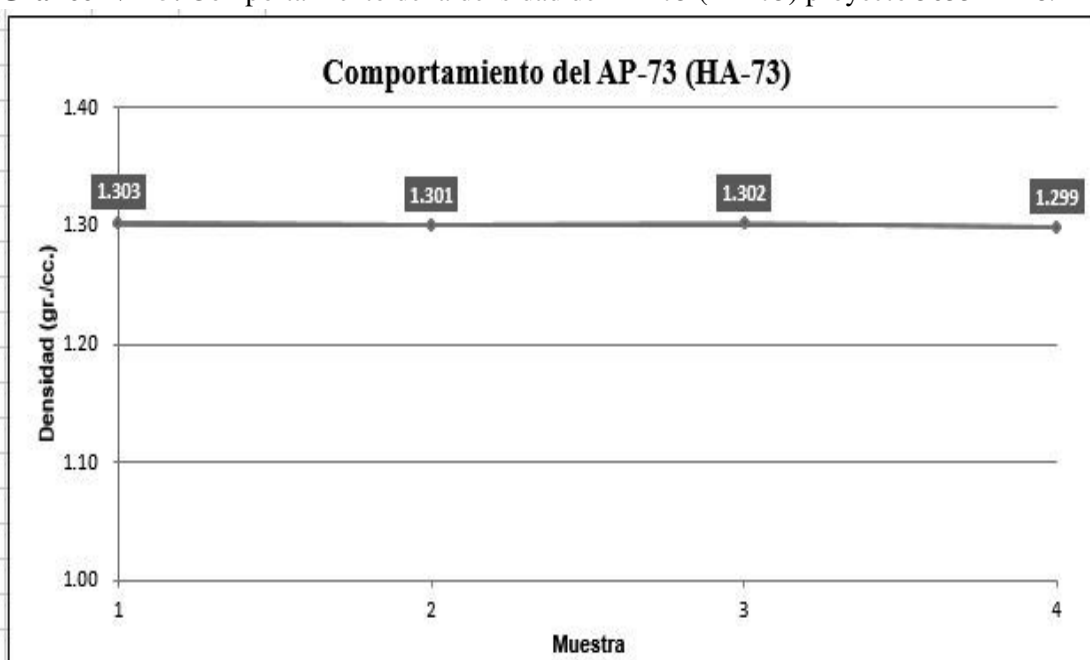
- Densidad para la cuarta muestra:

$$\rho = \frac{1299}{1000} = 1.299 \text{ gr/cc}$$

Se tiene una densidad promedio de 1.301 gr/cc de las cuatro muestras tomadas en campo durante el proceso de carguío de taladros en el proyecto 228.

El gráfico N° 25, muestra el comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73) realizada en campo.

**Gráfico N° 25:** Comportamiento de la densidad del AP-73 (HA-73) proyecto 3655 – 228.



**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro N° 29, se detalla los datos del carguío de taladros con la mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73).

**Cuadro N° 29:** Datos de campo del proyecto de voladura 3655 – 228.

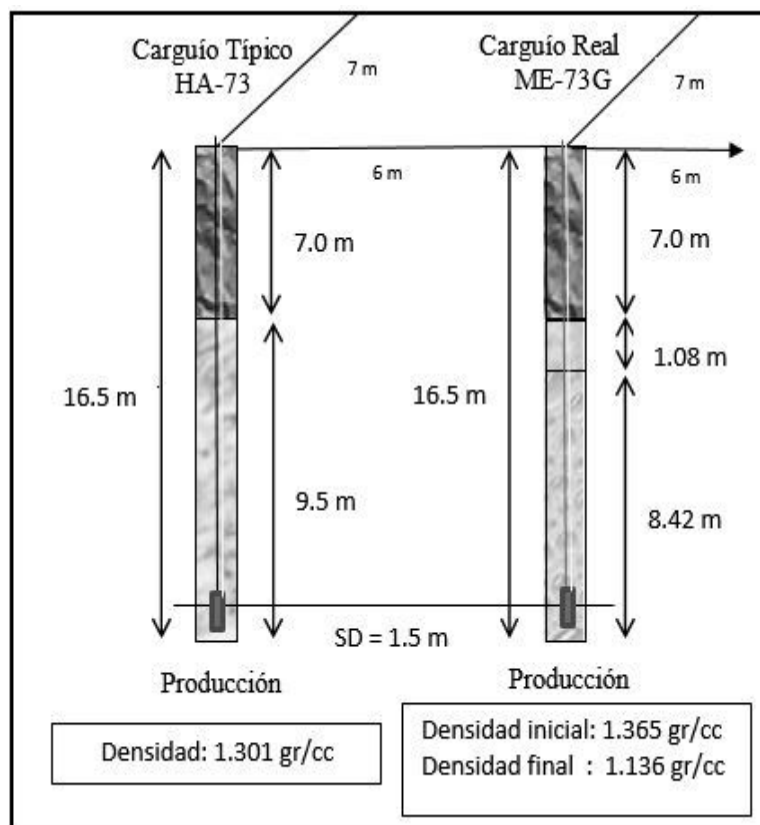
Fecha	Camión	Lugar	Nivel	Proy.	ID° tal.	Operador	Alt. Diseño (m)	Alt. Real (m)	Taco (m)
15-Ene-18	Q-18	Jahuapaylla baja	3655	228	162	Rupay	16.5	16.5	7

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.1.2.2.2. Diseño de carga del proyecto de voladura primaria 3655-228

Se realizó el diseño de carga con AP-73(HA-73) para los 16 taladros asignados en el proyecto de voladura 3655-228 La conexión del proyecto se realizó con sistema electrónico como se observa en el gráfico N° 21.

**Gráfico N° 26:** Diseño de carga con AP-73 (HA-73) proyecto 3655 – 228.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.2.3. Longitud de carga total por taladro ( $L_{CT}$ ) del proyecto de voladura primaria 3655-228

Este valor es calculado tomando los datos del cuadro N° 23 pág. 105.

$$L_{CT} = L - T = 16.5 - 7 = 9.5\text{m}$$

#### 4.1.2.2.4. Densidad de carga lineal del proyecto de voladura primaria 3655-228

Para obtener la cantidad de explosivo por metro lineal de AP-73 (HA-73) se realizó el cálculo con la Ecuación (21) pág. 49, tomando los datos de la densidad promedio pág. 122.

$$DLC (HA-73) = 0.507 * (12.25)^2 * 1.301$$

$$\text{DLC (HA-73)} = 98.982 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

#### 4.1.2.2.5. Carga total por taladro del proyecto de voladura primaria 3655-228

Conocida la densidad de carga lineal y la longitud de carga total por taladro se calculó la carga total por taladro, como se muestra a continuación.

$$Q_c = \text{DCL} * L_c = 98.982 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 9.5 \text{ m} = 940.329 \text{ kg}$$

#### 4.1.2.2.6. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura primaria 3655-228

Se calculó la cantidad total de explosivo AP-73 (HA-73) tomando el dato de la carga total por taladro y la cantidad de taladros total.

$$CT_{\text{Proyecto}} = 940.329 \text{ kg} * 16 = 15,045.264$$

#### 4.1.2.2.7. Volumen total arrancado por proyecto del proyecto de voladura 3655-228

Se calculó utilizando datos del parámetro de perforación del cuadro N° 23 pág. 105. altura promedio y la cantidad de taladros total, se calcula utilizando la Ecuación (13) pág. 47.

$$VR_{\text{Total}} = B * E * H_{\text{Promedio}} = 6\text{m} * 7\text{m} * 16.5\text{m} = 693 \text{ m}^3 * 16 = 11,088 \text{ m}^3$$

#### 4.1.2.2.8. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3655-228

Se procede a calcular el factor de carga del proyecto de voladura 3655-228, se obtiene con los datos obtenidos de la carga total de explosivo y el volumen total arrancado, se calcula con la Ecuación (15) pag. 47.

$$FC = \frac{We}{V} = \frac{15,045.264 \text{ kg}}{11,088 \text{ m}^3} = 1.357 \text{ kg/m}^3$$

#### 4.1.2.2.9. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3655-228

El cálculo se obtiene con la Ecuación (16) pág. 48, utilizando los datos que se muestran a continuación:



Datos:

- Carga Total de Explosivo por Taladro (kg) : 940.329 kg
- Densidad de Roca : 2.8 Tn/m<sup>3</sup>
- Burden : 6m
- Espaciamiento : 7m
- Altura de Banco : 15m
- Volumen de Roca Arrancado por Taladro : 693m<sup>3</sup>

$$\text{Ton.Roca} = 693\text{m}^3 * 2.8 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} = 1,940.4 \text{ Tn}$$

Entonces:

$$\text{FP} = \frac{\text{Kg.Explosivo}}{\text{Tonelada de Roca}} = \frac{940.329}{1,940.4} = 0.485 \frac{\text{Kg.EXP.}}{\text{Tn.Roca}}$$

#### 4.1.2.2.10. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto de voladura primaria 3655-228

Determinamos la cantidad de los agentes de voladura utilizados por taladro del proyecto de voladura 3655-228.

Datos:

- 1 galón mezcla : 3.25kg
- Mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73) : 940.329 kg

**Primero:** Calculamos la cantidad de emulsión matriz alternativo.

$$940.329 \text{ kg} * 70\% = 658.230 \text{ kg}$$

**Segundo:** Calculamos la cantidad de Nitrato de Amonio que viene hacer la suma del nitrato de amonio y combustible (petroleo).

$$940.329 \text{ kg} - 658.230 \text{ kg} = 282.099 \text{ kg}$$

**Tercero:** Calculamos la cantidad de petróleo utilizado para 282.099 kg de nitrato de amonio.

$$282.099 \text{ kg} * 6\% = 16.926 \text{ kg D-2}$$

**Cuarto:** Calculamos la cantidad de nitrato de amonio total por taladro.

$$282.099 \text{ kg} - 16.926 \text{ kg D-2} = 265.173$$

**Finalmente:** Realizamos la conversión de los kg D-2 utilizado en galones.

$$\frac{16.926 \text{ kgD2}}{3.25 \text{ kg}} = 5.208 \text{ Gls D-2}$$

#### 4.1.2.2.11. Consumos de agentes y accesorios proyecto de voladura primaria 3655-228

Se muestra el consumo de explosivos y accesorios utilizados en el carguío de taladros del proyecto de voladura primaria en el cuadro N° 30.

**Cuadro N| 30:** Consumo de explosivos y accesorios del proyecto de voladura primaria 3655-228.

Proy.	N° Tal.	Total ME-73G (HA-73G) kg.	Emul. G. KG.	Nitrato kg.	FO (gal.)	Booster 2 Lb	Digishot	Exanel 18.0m
3655-228	16	15,045.264	10,531.685	4,513.579	270.815	16	16	16

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2.2.12. REGISTRO DE VOD DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3655-228

**Parámetros para la medición del VOD:**

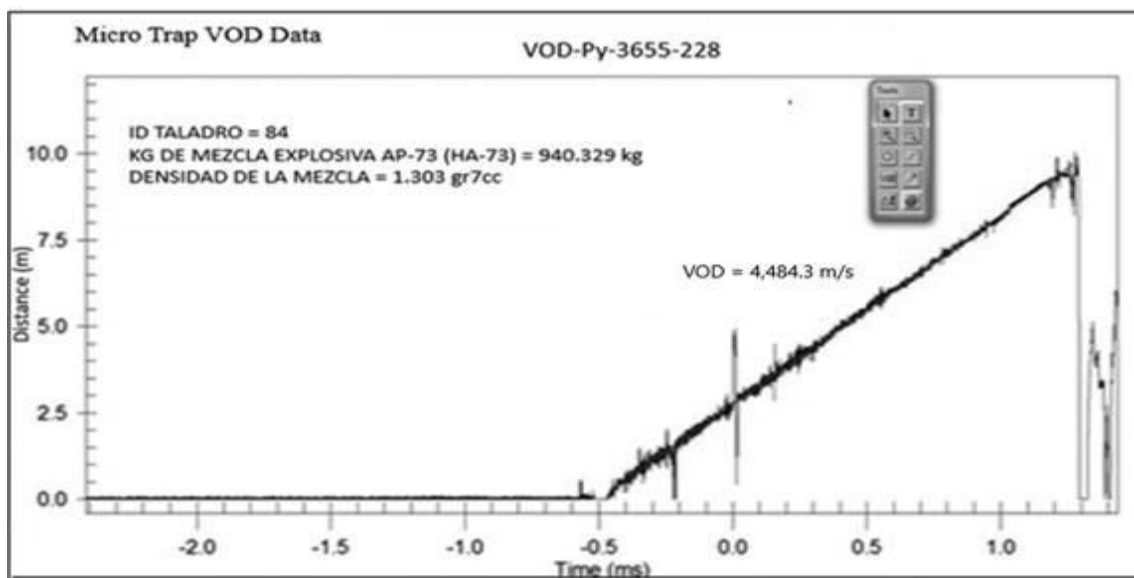
- Explosivo: AP-73 (HA-73).
- Lugar: Mini Tajo (Tajo Ferrobamba).
- Camión mezclador: C6F-842 (Q-18).
- ID Taladro: 84.
- Diámetro: 12 ¼”.
- Densidad inicial promedio: 1.301 hg/cc.
- Altura de Taladro: 16.5 m.
- Longitud de carga: 9.5 m.



- Taco: 7.0 m.

En el siguiente gráfico N° 27, se muestra los resultados obtenidos de VOD en el proyecto de voladura 3655-228.

**Gráfico N° 27:** Registro de VOD en el taladro N° 84 del proyecto de voladura 3655 - 228.



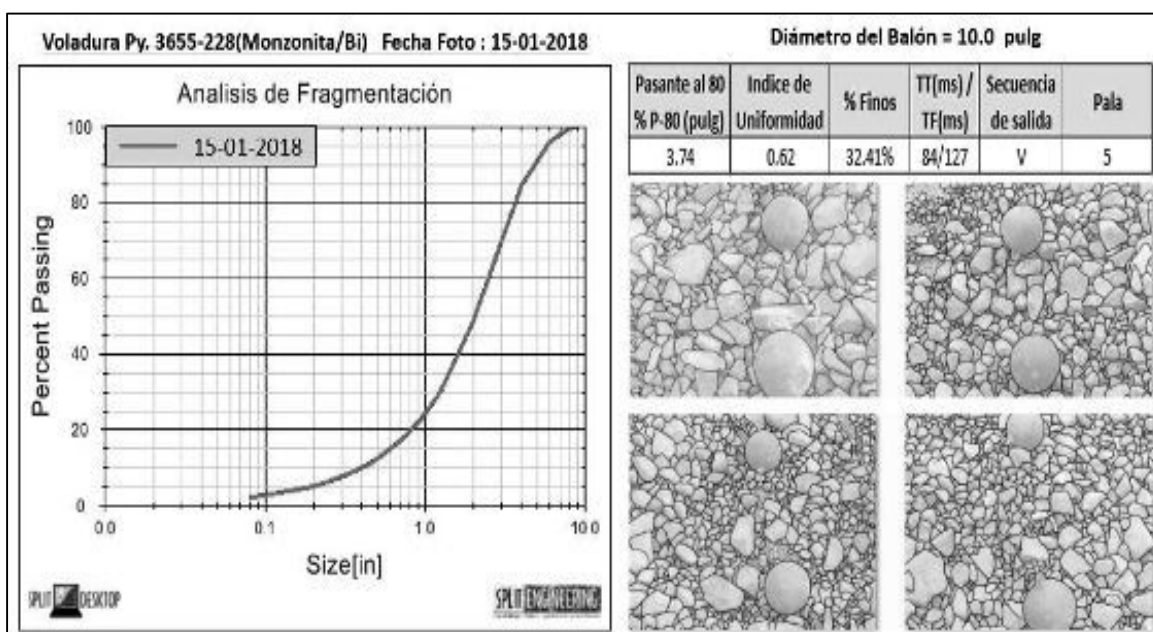
**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.2.13. ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN DEL PROYECTO DE VOLADURA 3655-228

El presente reporte describe el análisis de fragmentación del día 15 de enero del frente de la pala 05.

El frente de la pala 05 arrojó un P80 de 3.74 pulg. y un porcentaje de finos de 32.41 % como se muestra en el gráfico N° 28.

**Gráfico N° 28:** Análisis de granulometría P-80 del proyecto de voladura 3655 - 228.



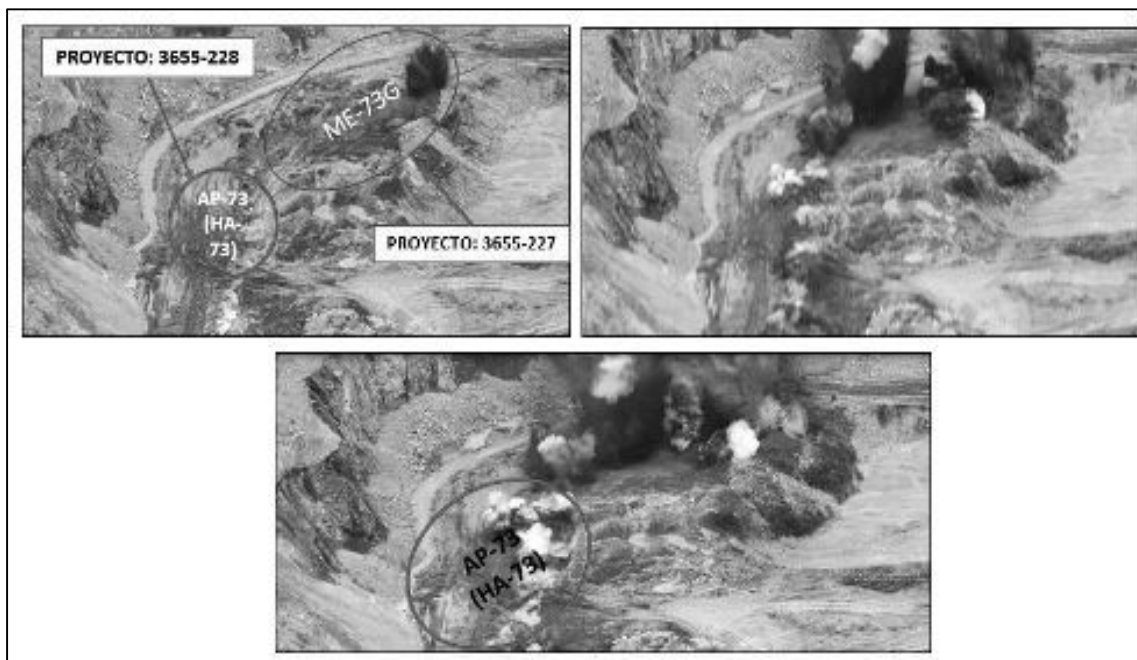
**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.2.2.14. MEDICIÓN DE GASES DEL PROYECTO DE VOLADURA 3655-228

Se realizó la medición de gases post voladura procediendo al monitoreo para determinar el nivel de contaminación al medio ambiente.

En la figura N° 59, se observa la generación de humos naranja.

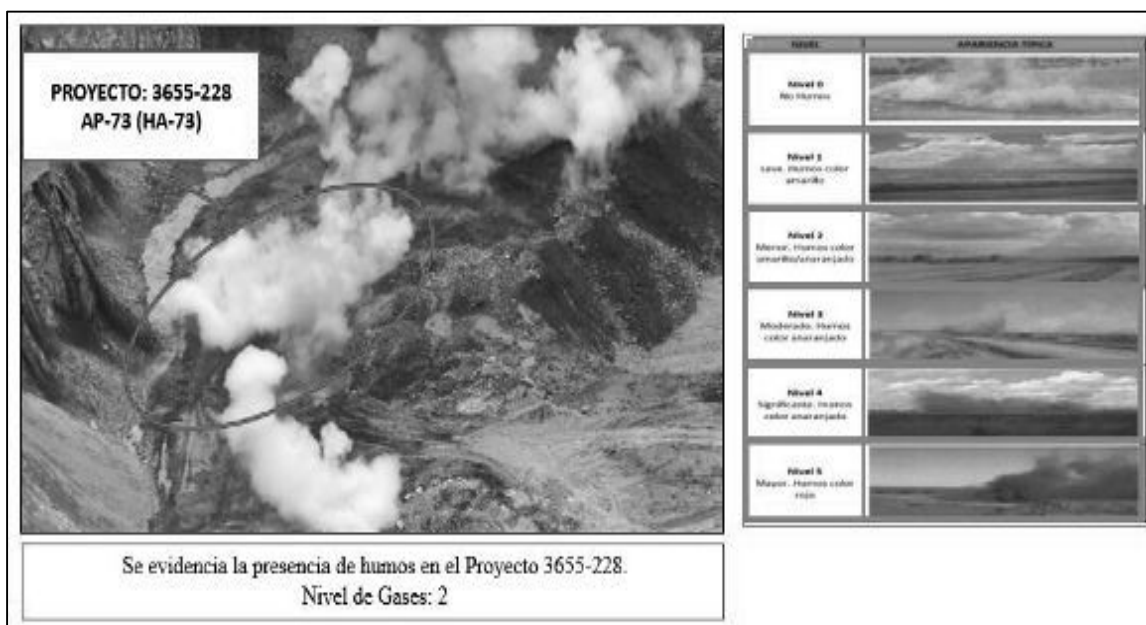
**Figura N° 59:** Análisis de gases del proyecto de voladura 3655 - 228.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el comparativo del nivel de gases nitrosos con el cuadro de la escala de niveles de gases, observándose humos naranja Nivel 2 como se observa en la figura N° 60.

**Figura N° 60:** Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3655-228.

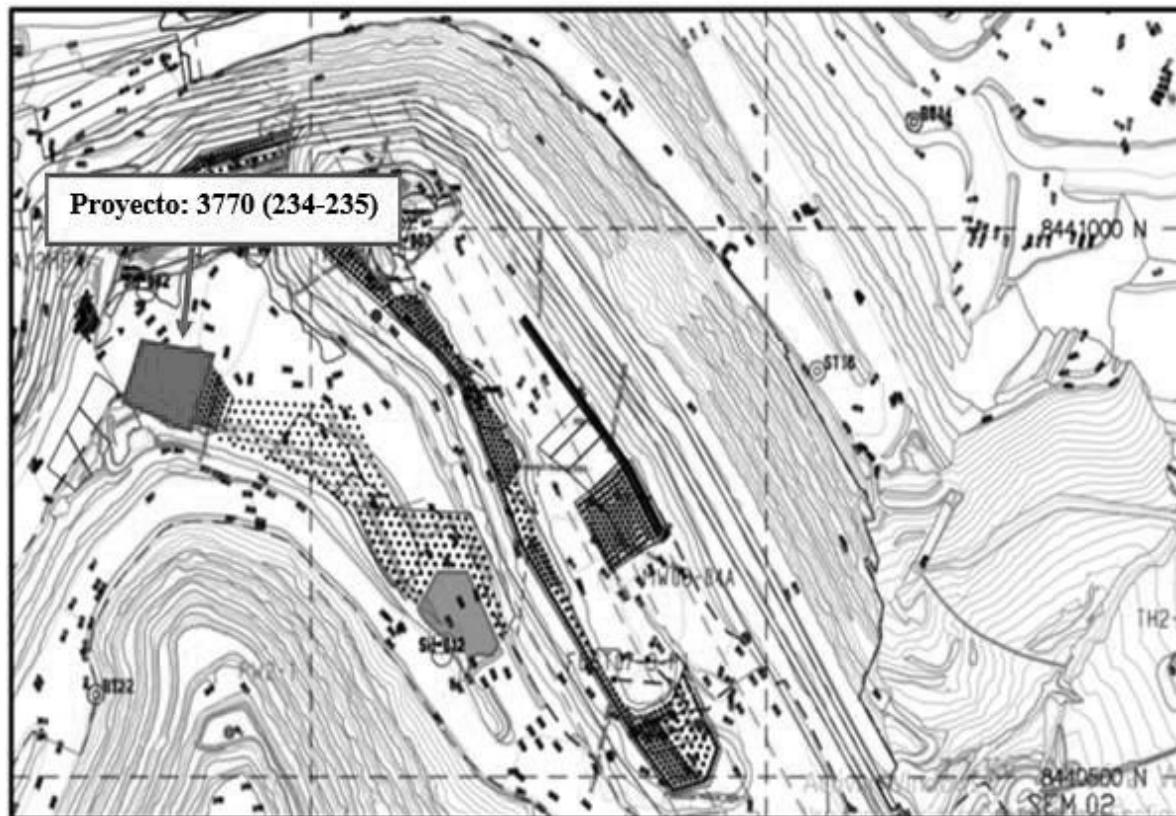


**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3.3. PRUEBA DE VOLADURA 02: PROYECTO 234 - NIVEL 3770 (ME-73G)

Se tiene la ubicación del proyecto de voladura en la zona de Jahuapaylla Baja del tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas con coordenadas UTM: N 8440874 y E 793352.

**Figura N° 61:** Plano de ubicación del proyecto de voladura 3770-234 y 235.



**Fuente:** Área de perforación y voladura de la Unidad Minera Las Bambas

##### 4.1.3.3.1. Clasificación del macizo rocoso en la zona de Jahuapaylla Baja

Es importante conocer la clasificación geomecánica y caracterización del macizo rocoso de la zona de prueba del proyecto de voladura asignado, se hará la evaluación de la zona de Jahuapaylla Baja del Tajo Ferrobamba como se muestra en el cuadro N° 31.

**Cuadro N° 31:** Caracterización del macizo rocoso en la zona de Jahuapaylla Baja.

Tipo de Roca	Resistencia a la Compresión Simple (Mpa)	Clasificación	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
Monzonita Bi / Hb	51	Dura	2.7
Endoskarn	55	Dura	2.7

**Fuente:** Elaboración propia.

##### 4.1.3.3.2. Parámetros de perforación del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se tiene los siguientes datos del proyecto de voladura, como se muestra en el cuadro N° 32.

**Cuadro N° 32:** Parámetros de perforación del proyecto de voladura 3770-234.

<b>PARÁMETROS DE PERFORACIÓN</b>		
Altura de Banco	m.	15
Sub Drilling	m.	1.5
Diámetro de Broca	Pulg.	12 1/4
Malla		Triangular
Espaciamiento	m.	7.0
Burden	m.	6.0
Altura de Taladro	m.	16.2
Altura de Agua	m.	0.50
Taco	m.	7.0
Cantidad de Taladros		87

**Fuente:** Área de Perforación y Voladura Las Bambas.

#### 4.1.3.3.3. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se realizaron pruebas en campo en la zona de Jahuapaylla Baja del Tajo Ferrobamba en el proyecto 3770 – 234 (Exsa S.A) para determinar el comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) – Exsa S.A.

Se tiene en el cuadro N° 33 los datos técnicos del proyecto de voladura 3770-234.

**Cuadro N° 33:** Datos técnicos del proyecto de voladura 3770-234.

Fecha	Camión	Lugar	Nivel	Proy.	ID° tal.	Operador	Alt. Real	Alt. Diseño
21/01/2018	FOD-860 (Q-16)	Tajo Ferrobamba	3770	234	2796	Palomino	16.2	16.5

**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el pesado de la mezcla explosiva gasificada de la muestra, utilizando la balanza analítica que a continuación se muestra en el cuadro N°34.

El control de densidad en campo de la mezcla explosiva gasificada, se realizó directo del camión mezclador al momento del carguío de taladros.

**Cuadro N° 34:** Peso de muestra de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) proyecto 3770-234.

Muestra	Peso del vaso Calibrado (gr)	Volumen del Vaso Calibrado (cc)	Wvlleno (gr)	W ME 73 G (gr)
1	635	1000	1995	1360

**Fuente:** Elaboración propia.

Se calculó a continuación la densidad del explosivo en los diferentes tiempos de gasificación con la fórmula de densidad de un producto y comparando con la Tabla N° 24 pág. 67.

- Densidad al 0 min:

$$\rho = \frac{1360}{1000} = 1.360 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 5 min:

$$\rho = \frac{1222}{1000} = 1.222 \text{ gr/cc}$$

- Densidad a los 10 min:

$$\rho = \frac{1160}{1000} = 1.160 \text{ gr/cc}$$

- Densidad al 15 min.

$$\rho = \frac{1128}{1000} = 1.128 \text{ gr/cc}$$

- Densidad al 20 min.

$$\rho = \frac{1118}{1000} = 1.118 \text{ gr/cc}$$

Se tiene en el cuadro N° 35, el resumen del comportamiento de densidades en los diferentes tiempos de gasificación de la mezcla explosiva gasificada.

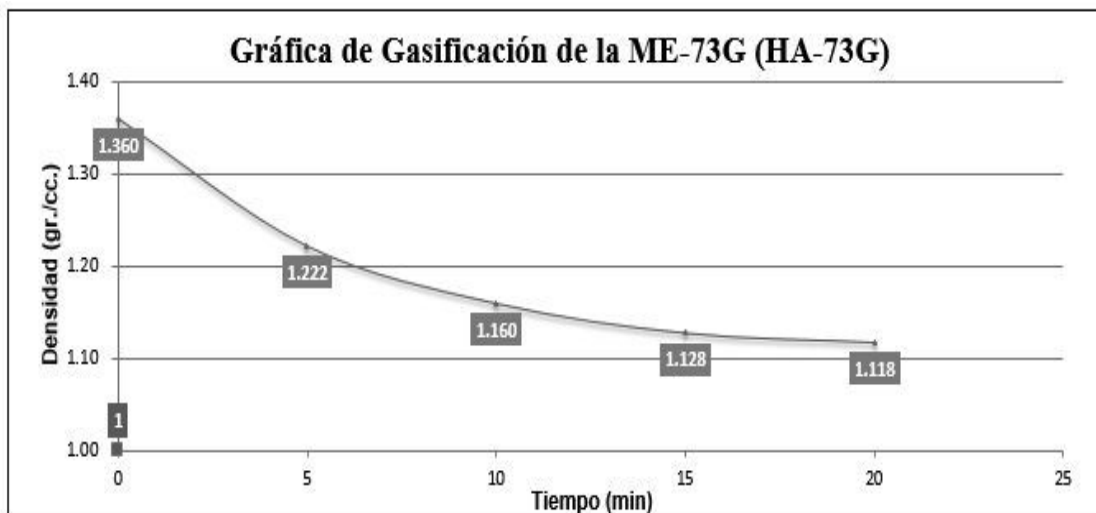
**Cuadro N° 35:** Control de gasificación de la muestra ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234.

Tiempo de Gasificación (min)	Densidad (gr/cc)
1	1.360
5	1.222
10	1.160
15	1.128
20	1.118
Densidad Final	1.118

**Fuente:** Elaboración propia.

Se muestra en el gráfico N° 29, el proceso de gasificación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) realizada en campo el 21 de enero del 2018.

**Gráfico N° 29:** Proceso de gasificación en diferentes tiempos de la ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3.3.4. Densidad de carga lineal (Kg/m) del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se calculó la densidad lineal de carga que sube en un metro para un diámetro determinado, se obtiene con la Ecuación (21) pág. 49.

##### Datos:

Densidad de ME-73G (HA-73G): 1.360 g/cc

Ø tal. : 12 ¼

$$\text{DLC (ME-73G)} = 0.507 * (12.25)^2 * 1.360$$

$$\text{DLC (ME-73G)} = 103.471 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

#### 4.1.3.3.5. Longitud total del taladro (L<sub>T</sub>) del proyecto de voladura primaria 3770-234

Tenemos que la longitud total del taladro es la sumatoria de la altura de banco más la sobre perforación del taladro perforado, se procede a calcular de la siguiente manera.

$$L_T = H_b + S_p = 15\text{m} + 1.5\text{m} = 16.5\text{m}$$

#### 4.1.3.3.6. Volumen roto por taladro del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se calculó el volumen de material roto con los parámetros de perforación como se muestra en la cuadro N° 32 pág. 130.

$$VR = B * E * H_{Tal.} = 6m * 7m * 16.2m = 680.4m^3$$

#### 4.1.3.3.7. Longitud de carga total por taladro ( $L_{CT}$ ) del proyecto de voladura primaria 3770-234

Este valor es calculado con la siguiente ecuación, tomando los datos del cuadro N° 32 pág. 130.

$$L_{CT} = L - T = 16.2m - 7m = 9.2m$$

#### 4.1.3.3.8. Factor de esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) del proyecto de voladura primaria 3770-234

Determinar cuánto va a esponjar el explosivo con el que trabajamos en el carguío de taladros del proyecto de voladura 3770-234, es muy importante para determinar cuánto va a ser la longitud de carga inicial. Se necesita determinar el factor de esponjamiento teórico y de campo, con las siguientes formulas:

##### 4.1.3.3.8.1. Factor de esponjamiento teórico proyecto de voladura primaria 3770-234

Se necesita determinar el factor de esponjamiento teórico, se utilizó la Ecuación (27) pág. 68.

$$Fe_{teórico} = \frac{\rho_i}{\rho_f} = \frac{\text{Densidad inicial}}{\text{Densidad final promedio campo}}$$

$$Fe_{teórico} = \frac{1.360}{1.118} = 1.217$$

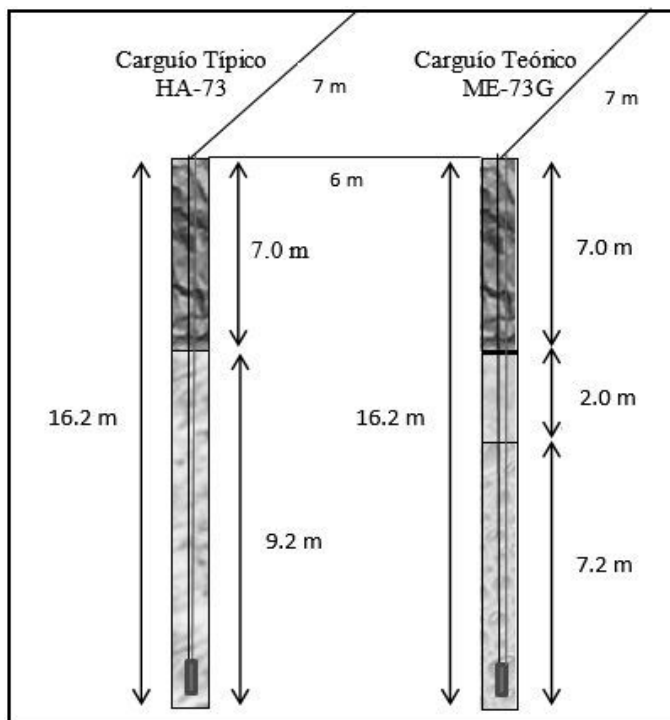
Este factor teórico nos indica que por cada metro de explosivo que se cargue en el taladro, éste esponjará aproximadamente 0.217 metros.

Es decir, que para poder cumplir los 9.20 metros de longitud de carga necesarios para cada taladro necesitamos cargar, en base al factor teórico, aproximadamente 7.20 metros, esperando que el explosivo esponje 2.0 metros.

En el gráfico N° 30, se muestra el comparativo de carguío entre el Anfo Pesado (HA-73) y la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



Gráfico N° 30: Diseño inicial de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3.3.8.2. Factor de esponjamiento proveniente de datos de campo proyecto de voladura primaria 3770-234

Realizando las mediciones en campo se observó que el factor de esponjamiento teórico calculado no se cumplía y que los 7.20 m. de explosivo cargado solo llegaban a los 8.40m, de promedio, faltando compensar 0.80 m, para lo cual se realizó el cálculo del factor de esponjamiento en campo como se muestra a continuación, se utilizó la Ecuación (28) pág. 69.

$$Fe_{teórico} = \frac{\rho_i}{\rho_f} = \frac{\text{Densidad inicial}}{\text{Densidad final promedio campo}}$$

$$Fe_{campo} = \frac{8.10}{7.20} = 1.125$$

#### 4.1.3.3.8.3. Cálculo de la eficiencia de esponjamiento en campo (K) proyecto 3770-234

Comparando ambos factores, determinamos la eficiencia del último respecto al primero con la Ecuación (29) pag. 69.

$$K = \frac{Fe_{campo}}{Fe_{teórico}} \% = \frac{1.125}{1.217} = 0.9244 = 92.44\%$$

Es decir, que el factor de campo solo representa el 92.44% del factor teórico el cual, ajustando en la ecuación con la eficiencia encontrada, tenemos un factor de esponjamiento efectivo que se cumple en campo tal como sigue:

#### 4.1.3.3.8.4. Factor de esponjamiento efectivo ( $F_{\text{efectivo}}$ ) proyecto de voladura primaria 3770-234

Ajustando en la ecuación anterior del factor de esponjamiento teórico con la eficiencia encontrada, tenemos un factor de esponjamiento efectivo que se cumple en campo tal como sigue y es calculado con la Ecuación (30) pag. 69.

$$F_{\text{efectivo}} = \frac{\rho_i}{\rho_f} * K$$

$$F_{\text{efectivo}} = \frac{1.360}{1.118} * 92.44\% = 1.1245 \approx 1.125$$

#### 4.1.3.3.8.5. Cálculo de longitudes variables de carga según k calculado proyecto 3770-234

Para una longitud de carga de 9.2 m, se utilizó la Ecuación (31) pag. 69.

$$\text{Long. Carga Gasificable} = \frac{\text{Long. Carga Requerido en Diseño}}{F_{\text{e. Real}}}$$

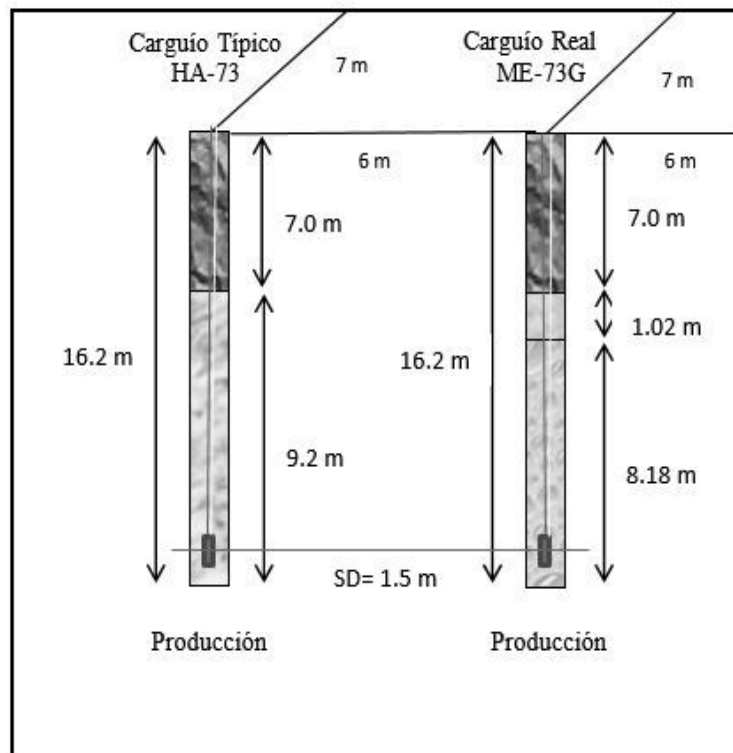
$$\text{Long. Carga Gasificable} = \frac{9.2}{1.125} = 8.18 \text{ m}$$

Es decir, que para poder cumplir los 9.20 metros de longitud de carga necesarios para cada taladro necesitamos cargar, en base al factor, aproximadamente 8.18 metros, para que al cabo de 20 minutos el explosivo esponje 1.02 metros completando la longitud de carga diseñada de 9.20 metros.

El diseño de carguío final con mezcla explosiva gasificada, servirá para realizar un trabajo controlado de cuanto es la cantidad exacta de explosivo para el tipo de dureza de la roca, para la zona de Jahuapaylla Baja

Se observa en el gráfico N° 31, el comparativo final, después de realizar los cálculos de corrección del factor de esponjamiento inicial y el diseño final de carguío en el proyecto de voladura primaria 3770-234, en la zona de Jahuapaylla Baja.

Gráfico N° 31: Diseño final de carguío del HA-73 Vs ME-73G (HA-73G) proyecto 3770-234



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3.3.9. Carga total por taladro del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se tomó los datos calculados de la longitud de carga gasificable y la densidad de carga lineal para determinar la carga total por taladro, como se muestra a continuación.

$$Q_c = DCL * L_c = 103.471 \frac{kg}{m} * 8.18 m = 846.393 kg$$

#### 4.1.3.3.10. Carga Total de Explosivo del proyecto de voladura primaria 3770-234

$$CT_{Proyecto} = 846.393 kg * 63 = 53,322.759 kg$$

#### 4.1.3.3.11. Volumen total arrancado del proyecto de voladura primaria 3770-234

Se calculó utilizando datos del parámetro de perforación, altura promedio del proyecto y la cantidad de taladros total. Se calcula con la Ecuación (13) pág. 47.

$$VR_{Total} = B * E * H_{Promedio} = 6m * 7m * 16.2m = 680.4 m^3 * 63 = 42,865.20 m^3$$

**4.1.3.3.12. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3770-234**

Se procede a calcular el factor de carga del proyecto de voladura 3770-234, se obtiene con la Ecuación (15) pag. 47 tomando datos de la carga total de explosivo (ME-73G) y el volumen total arrancado del proyecto pag. 136.

$$FC = \frac{We}{V} = \frac{53,322.759 \text{ kg}}{42,865.20 \text{ m}^3} = 1.244 \text{ kg/m}^3$$

**4.1.3.3.13. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3770-234**

El cálculo se obtiene con la Ecuación (16) pág. 48, utilizando los datos que se muestran a continuación:

Datos:

- Carga Total de Explosivo por Taladro (kg) : 846.393 kg
- Densidad de Roca : 2.7 Tn/m<sup>3</sup>
- Burden : 6m
- Espaciamiento : 7m
- Altura de Banco : 15m
- Volumen de Roca Arrancado por Taladro : 680.40 m<sup>3</sup>

$$\text{Ton. Roca} = 680.40 \text{ m}^3 * 2.7 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} = 1,837.08 \text{ Tn}$$

Entonces:

$$FP = \frac{\text{Kg. Explosivo}}{\text{Tonelada de Roca}} = \frac{846.393}{1,837.08} = 0.461 \frac{\text{Kg. EXP.}}{\text{Tn. Roca}}$$

**4.1.3.3.14. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado en el proyecto de voladura primaria 3770-234**

Determinamos la cantidad de los agentes de voladura utilizados por taladro en el proyecto de voladura 3770-234.

Datos:

- 1 galón mezcla : 3.25 kg
- Mezcla explosiva 73G : 846.393 kg

**Primero:** Calculamos la cantidad de emulsión G.

$$846.393 \text{ kg} * 70\% = 592.475 \text{ kg}$$

**Segundo:** Calculamos la cantidad de Nitrato de Amonio que viene hacer la suma del nitrato de amonio y combustible (aceite + petroleo).

$$846.393 \text{ kg} - 592.475 \text{ kg} = 253.918 \text{ kg}$$

**Tercero:** Calculamos la cantidad de petroleo utilizado para 253.918 kg de nitrato de amonio grado Anfo.

$$253.918 \text{ kg} * 6\% = 15.235 \text{ kg D-2}$$

**Cuarto:** Calculamos la cantidad de nitrato de amonio total por taladro.

$$253.918 \text{ kg} - 15.235 \text{ kg D-2} = 238.683 \text{ kg}$$

**Finalmente:** Realizamos la conversion de los kg D-2 utilizado en galones.

$$\frac{15,235 \text{ kg D2}}{3.25 \text{ kg}} = 4.688 \text{ Gls D-2}$$

#### 4.1.3.3.15. Porcentaje y cantidad de nitrito de sodio utilizado del proyecto de voladura 3770-234

Para el proyecto 3770-234 se utilizó el 0.20 % de acuerdo a la densidad inicial y final requerida para el carguío de taladros con ME-73G (HA-73G) como se muestra en el gráfico N° 06 pág. 98.

##### 4.1.3.3.15.1. Cantidad de Nitrito Utilizado para el Proyecto 3770-234

Para determinar la cantidad de nitrito se utilizó los cálculos obtenidos de la cantidad total de carga explosiva (ME-73G) pág.138 para el proyecto de voladura.

**Tenemos:**

$$53,322.759 \text{ kg} * 0.20 \% = 106.646 \text{ kg}$$

Convertimos a galones los kg de nitrito conociendo como dato en la pág. 137 que 1galon equivale a 3.25 kg.



$$\frac{106.646 \text{ kg}}{3.25 \text{ kg}} = 32.814 \text{ gal.}$$

#### 4.1.3.3.16. REPORTE DE VOLADURA ELECTRONICA (DigiShot Plus) PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-234

##### Datos Generales del proyecto de voladura primaria:

- Mina : Las Bambas
- Banco: 3770
- Proyecto: 234 – 335 – Jahuapaylla Baja (Tajo Ferrobamba)
- N° de Taladros: 87
  - 63 taladros cargados con ME-73G (HA-73G) – Exsa S.A.
  - 24 taladros cargados con AP-73 (HA-73) – Empresa encargada de la voladura.
- Tiempo de taladros:
  - Entre taladros: 8 ms
  - Entre filas: 100 ms
- N° de equipo : BB3-1030002EC

##### COMENTARIOS:

- Se realizó la voladura con un total de 87 taladros, todos cargados con una prima.
- La secuencia de salida fue en “V”, destinando el desplazamiento del material a la cara libre ubicada en el proyecto anterior disparado.
- Se utilizaron detonadores electrónicos para la conexión de los taladros; y la iniciación se realizó con 1 detonador Digishot.
- El total de detonadores utilizados es de 88.

En el cuadro N° 36, se muestra el resumen del consumo de explosivos y accesorios utilizados en el carguío de taladros del proyecto de voladura.

**Cuadro N° 36:** Consumo de explosivos y accesorios en el proyecto 3770-234.

Proy.	N° Tal.	Total ME-73G (HA-73G) kg.	Emul. G. KG.	Nitrato kg.	Nitrito (gal.)	FO (gal.)	Booster 2 Lb	Digishot	Exanel 18.0m
3770-234	63	53,322.759	37,325.931	15,996.828	32.814	295.326	63	63	64

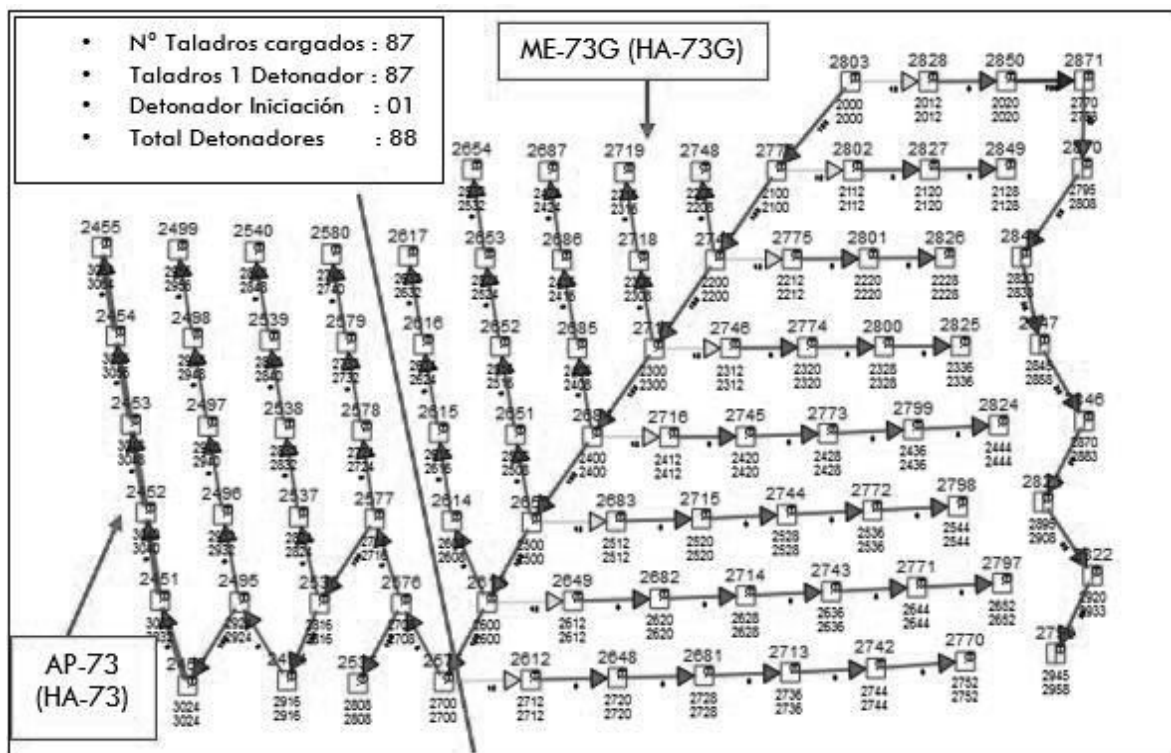
**Fuente:** Elaboración propia.

##### 4.1.3.3.16.1. Diseño de Secuencia Electrónica proyecto de voladura primaria 3770: 234-235

En el siguiente gráfico N° 32, se ilustra el diseño de secuencia en el Software ViewShot habiendo obtenido los datos del diseño de la malla.



Gráfico N° 32: Diseño de malla y la posición en el diseño de amarre proyecto 3770: 234-235.

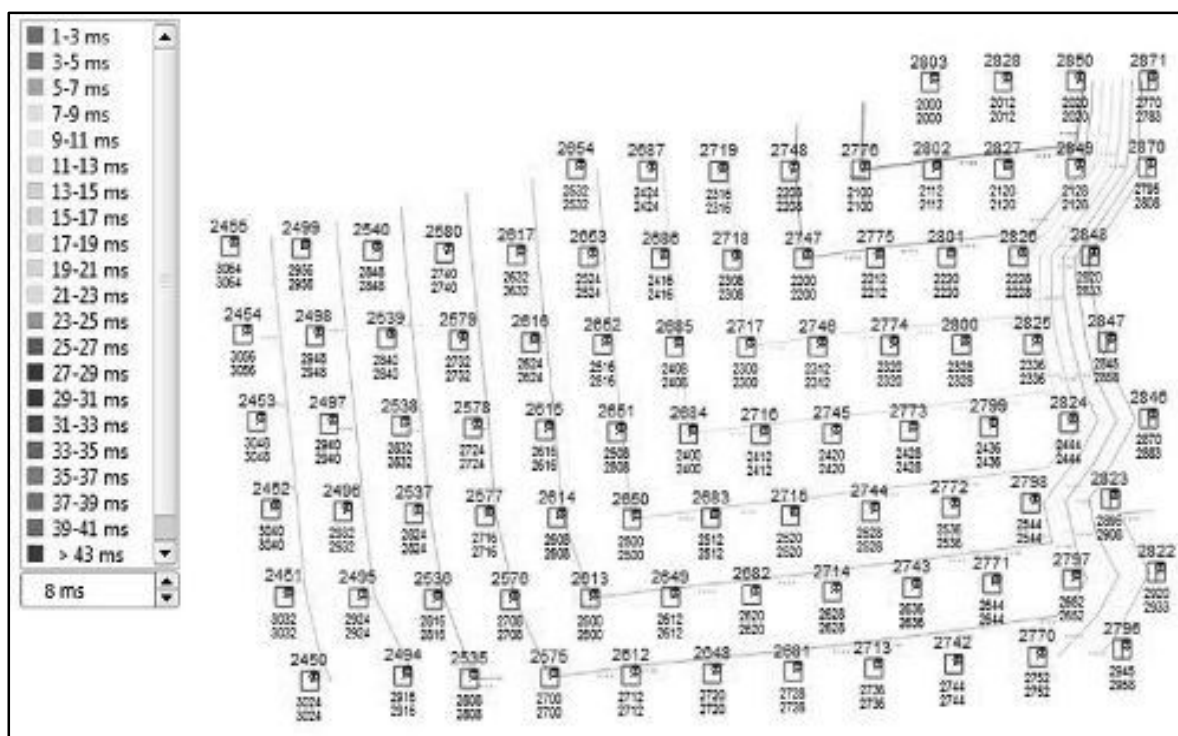


Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.16.2. Línea de Iso-Tiempos del proyecto de voladura primaria 3770: 234-235

Se procedió a realizar el análisis en el Software ViewShot para comprobar y ver que taladros tienen tiempos iguales o no, como se muestra en el gráfico N° 33.

Gráfico N° 33: Línea de Iso-Tiempos en el diseño de malla del proyecto de voladura 3770: 234-235.

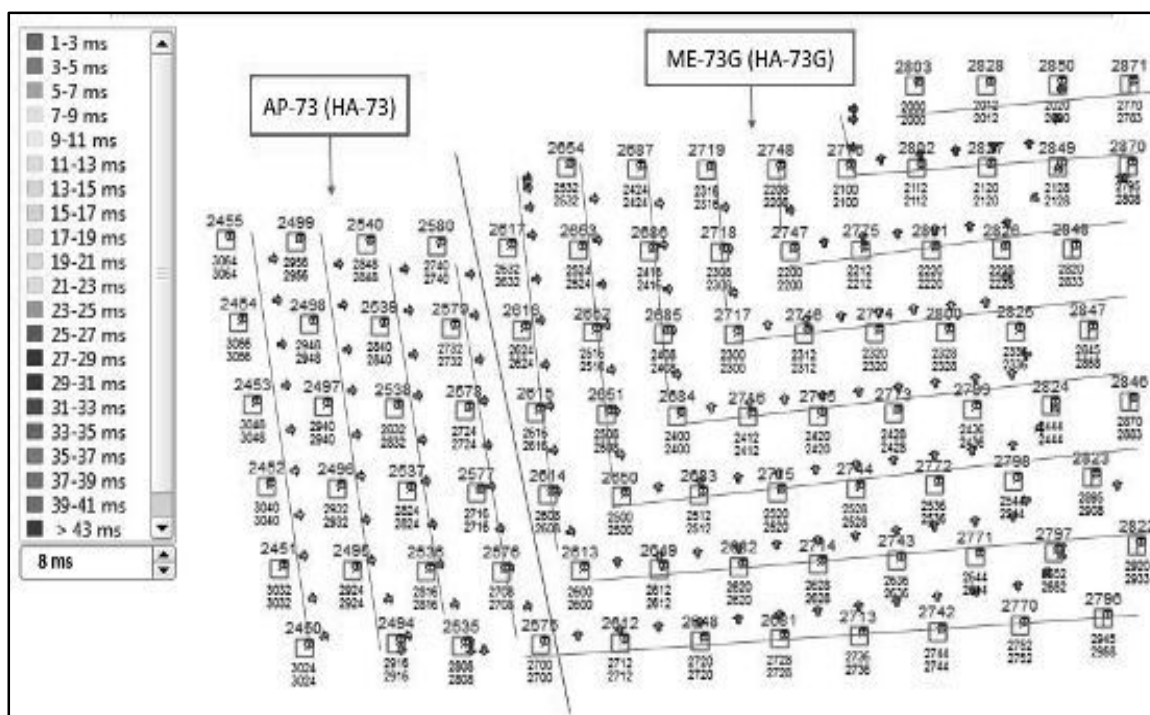


Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.16.3. Desplazamiento de Material del proyecto de voladura primaria 3770: 234-235

En el gráfico N° 34, se observa el desplazamiento y la dirección de acumulación del material.

**Gráfico N° 34:** Desplazamiento de material volado en el proyecto de voladura 3770: 234-235.

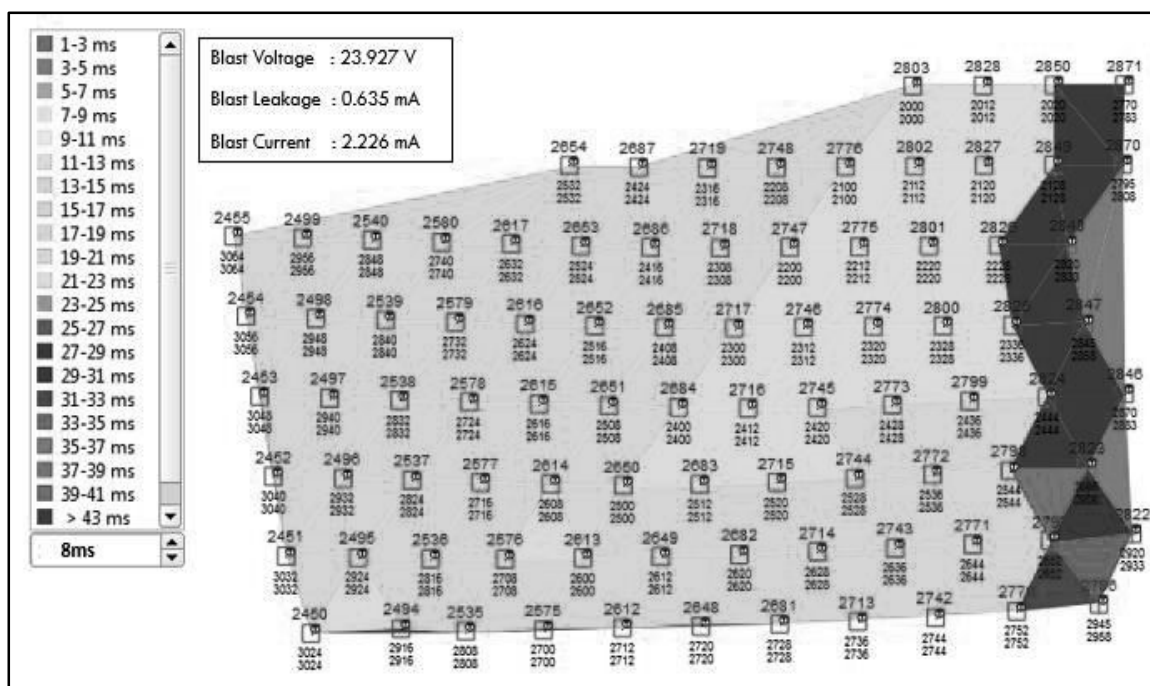


Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.16.4. Burden – Relief proyecto 3770: 234-235

En el gráfico N° 35, se observa zonas de alivio que determinarían una adecuada fragmentación.

**Gráfico N° 35:** Zonas de alivio en el proyecto de voladura 3770: 234-235.

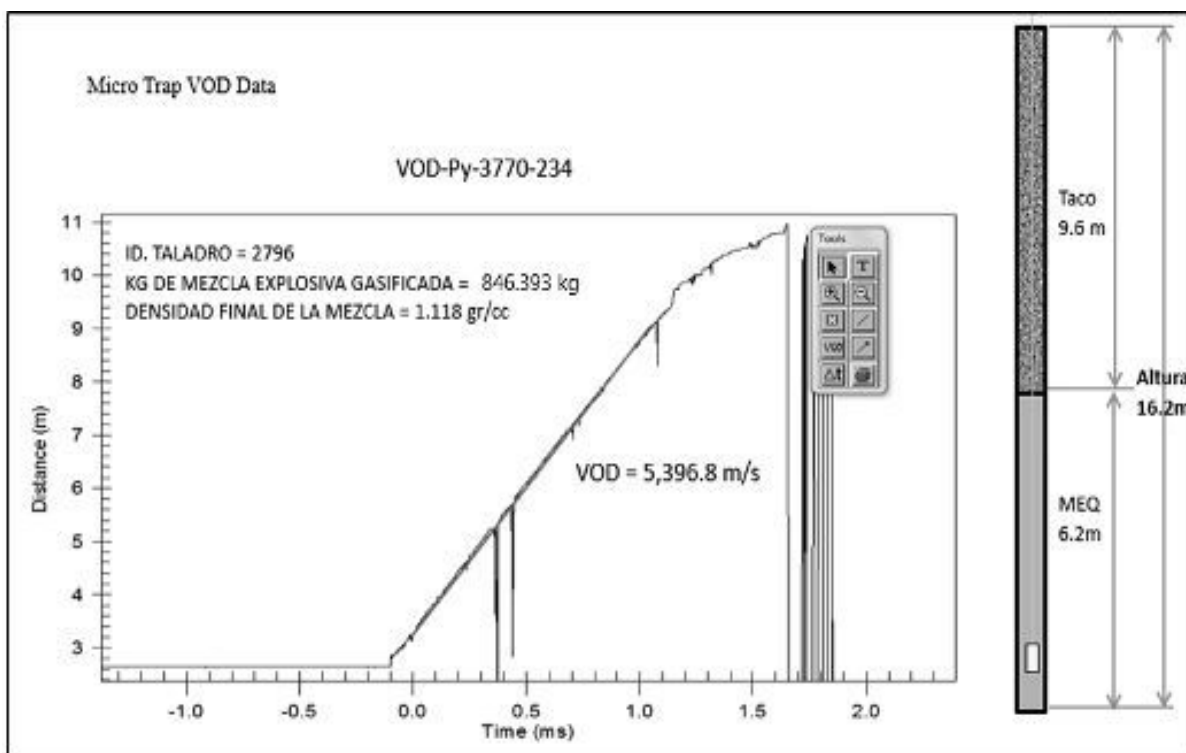


Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.17. REPORTE DE VELOCIDAD DE DETONACIÓN PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-234

- La ubicación del equipo Micro Trap se dio a una distancia aproximada de 400 m en el mismo nivel 3770 y proyecto 234.
- El registro de la VOD se realizó en el taladro con ID-2796, de profundidad 16.2 m, con una carga de explosivo de 816.386 kg de ME-73G (HA-73G) en el taladro, la mezcla analizada es de 846.393 kg, la densidad final de la mezcla fue de 1.118 gr/cc.
- El registro midió 9.20 m. de mezcla.
- La velocidad de detonación de la mezcla ME-73G en el tramo superior fue de 5,396.8 m/s como se muestra en el gráfico N° 36.

**Gráfico N° 36:** Registro de VOD en el taladro N° 2796 del proyecto de voladura 3770 - 234.



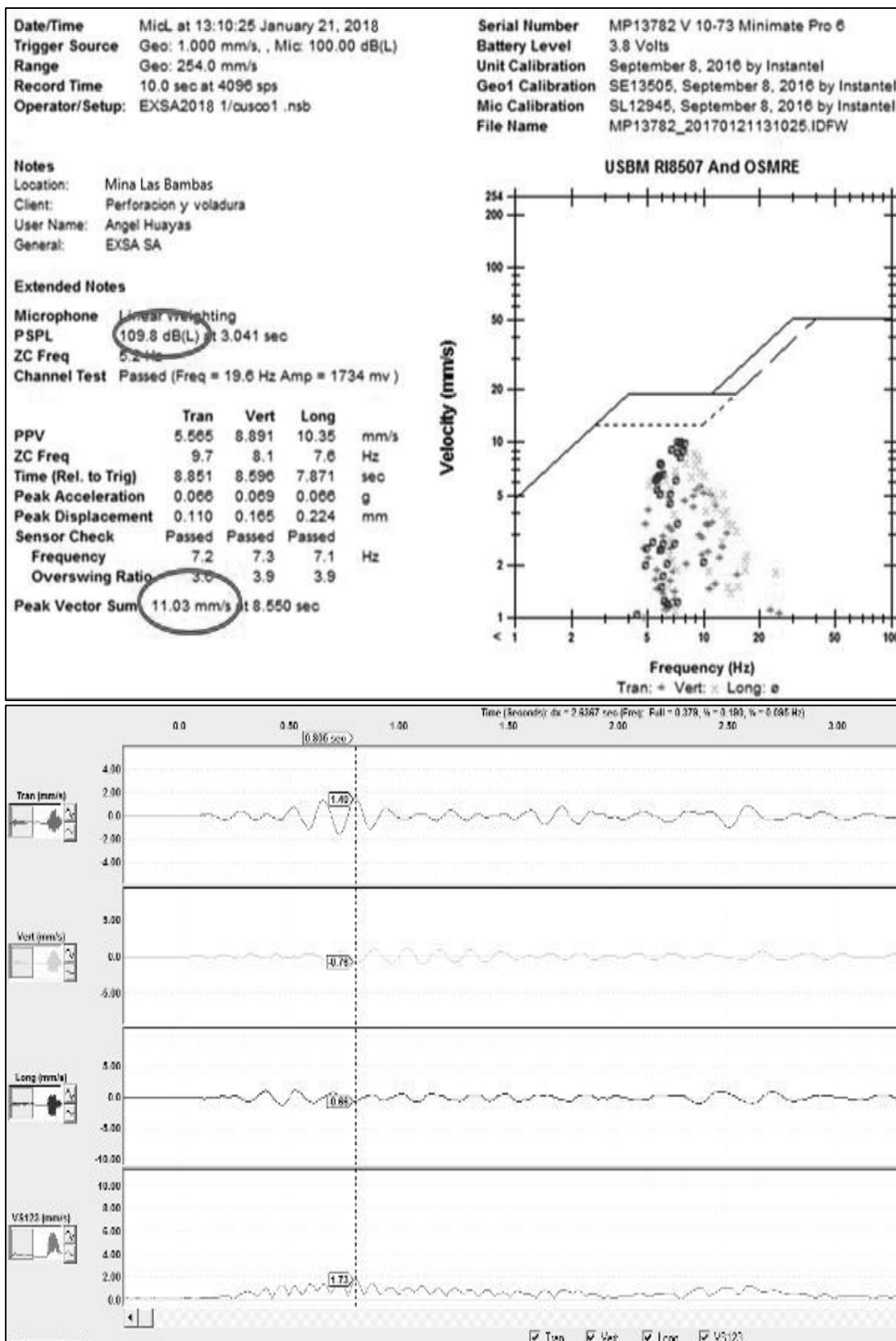
**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.18. REGISTRO DE VIBRACIONES (SISMOGRAFO PY. 3770 : 234)

Se realizó la ubicación del Sismógrafo en la comunidad de Taquiruta N:8439242 por el E:793422 y del Proyecto por el N: 8440875 y por el E:793353 , a una distancia del proyecto de 836 m.

El registro determina un PPV de 11.03 mm/s, 109.8 db de ruido y una frecuencia de 7.3 HZ que está dentro de los parámetros normales, establecidos por la Norma Norteamericana USBM RI8507, como se muestra en el gráfico N° 37.

Gráfico N° 37: Registro de Vibraciones del proyecto de voladura 3770-234.



**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

Según la norma Norteamericana USBM RI8507 se encuentra por debajo del límite para estructuras y edificaciones.

#### 4.1.3.3.19. ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-234

El presente reporte describe el análisis de fragmentación del día 21 de enero del 2018 en el frente de la pala 07 eléctrica CAT Mini Tajo, proyecto 3770-234 zona de mineral.

En el cuadro N° 37 se observa un resumen de datos del proyecto de voladura.

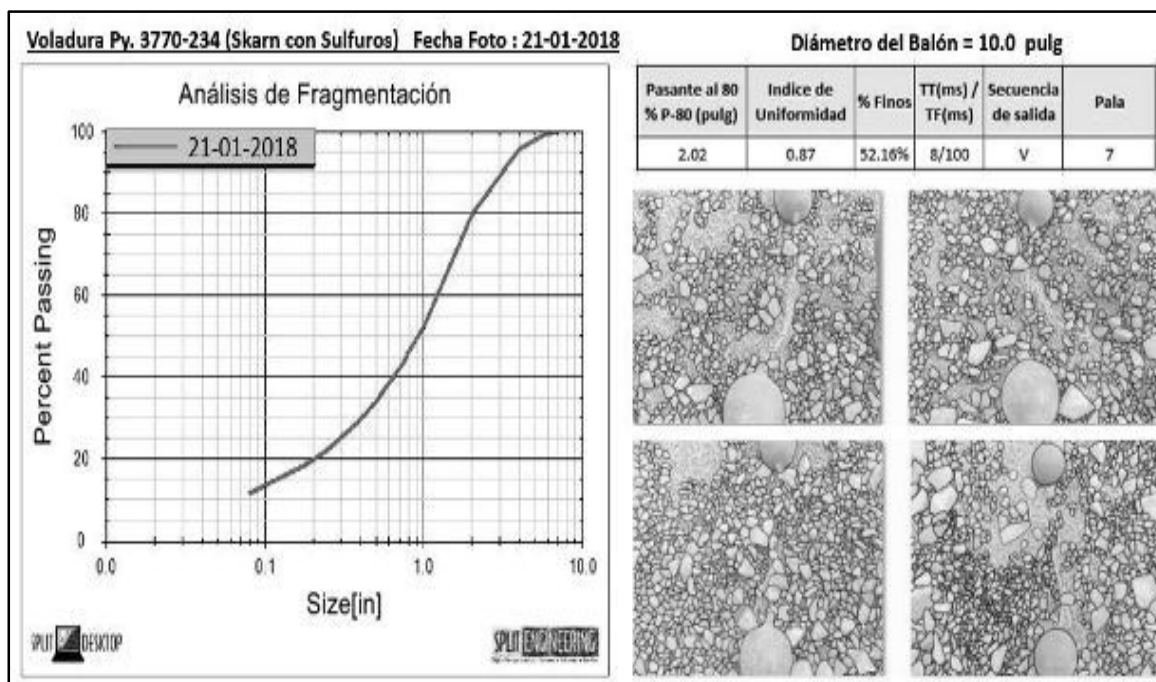
**Cuadro N° 37:** Datos de análisis de fragmentación proyecto 3770-234 – Mineral.

Fecha de Disparo	Toma de Fotos	Banco	Proy.	Tipo de Roca	Material	Densidad Final ME-73G (HA-73G)	Factor Potencia (kg/ton)
21/01/2018	21/01/2018	3770	234	Skarn con sulfuros	Mineral	1.118	0.429

**Fuente:** Elaboración propia.

El frente de la pala 07 arrojó un P80 2.02 pulg. y un porcentaje de finos de 52.16 % como se observa en el gráfico N° 38.

**Gráfico N° 38:** Análisis del P80 del proyecto de voladura 3770 - 234.



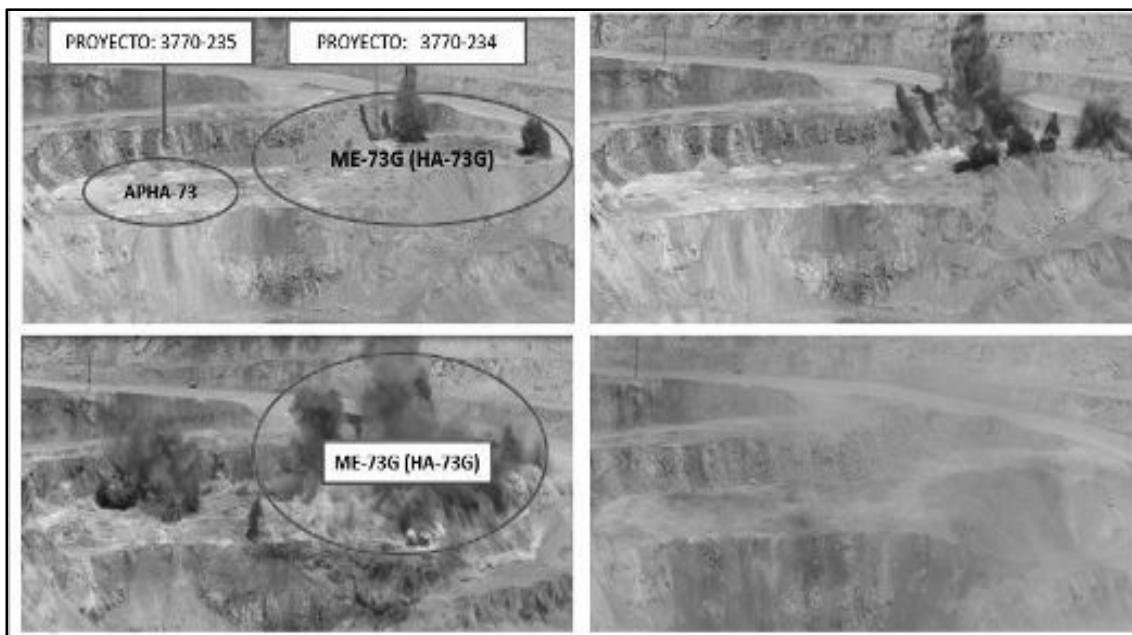
**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

#### 4.1.3.3.20. MEDICIÓN DE GASES DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-234

Al ingresar al proyecto 3770-234 post voladura se procede al monitoreo teniendo como resultado promedio de Nivel 0, con un 0.0% promedio de gases nitrosos debido a la disipación y proporción de estos.

En la figura N° 62, se observa la generación de un adecuado balance de oxígeno y control de la densidad.

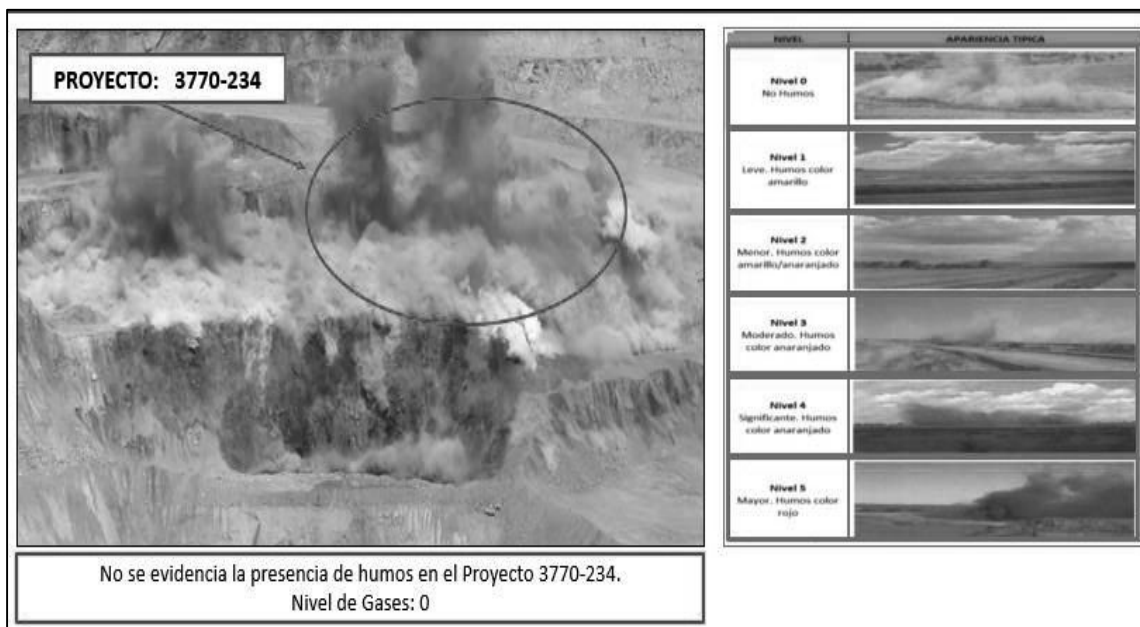
**Figura N° 62:** Análisis de gases del proyecto de voladura 3770 - 234.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el comparativo del nivel de gases nitrosos con el cuadro de la escala de niveles de gases, se encuentran dentro del rango como límite permisible como se observa en la figura N° 63.

**Figura N° 63:** Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3770-234.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3.4. PROYECTO (235) - NIVEL 3770 AP-73 (HA73)

Se realizó el carguío de taladros continuo al proyecto de voladura 3770 – 234 en la zona Jahuapaylla Baja con mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA73) de la empresa encargada de la voladura, obteniendo resultados en VOD, fragmentación y generación de humos nitrosos de fecha 15 de enero del 2018.

#### 4.1.3.4.1. Control de densidades en campo del proyecto de voladura primaria 3770-235

Se realizaron pruebas en campo en el proyecto 3770 – 235 de la empresa encargada de la voladura para determinar la densidad de la mezcla explosiva sin gasificar Anfo Pesado 73 (HA-73).

Las mediciones de densidad en campo directo del camión mezclador al momento que éste realiza el carguío de los taladros, se muestra en el cuadro N° 38.

**Cuadro N° 38:** Peso de muestra de la mezcla explosiva sin gasificar (HA-73) proyecto 3770-235.

Muestra	Peso del vaso Calibrado (gr)	Volumen del Vaso Calibrado (cc)	Wvlleno (gr)	WHA-73 (gr)
1	635	1000	1937	1302
2	635	1000	1939	1304
3	635	1000	1936	1301
4	635	1000	1935	1300
Densidad Teórica: 1.29 - 1.31 gr/cc				

**Fuente:** Elaboración propia.

Se calculó la densidad del explosivo, utilizando la fórmula de densidad general de un producto masa sobre volumen y los datos del cuadro N° 38.

- Densidad para la primera muestra:

$$\rho = \frac{1302}{1000} = 1.302 \text{ gr/cc}$$

- Densidad para la segunda muestra:

$$\rho = \frac{1304}{1000} = 1.304 \text{ gr/cc}$$

- Densidad para la tercera muestra:

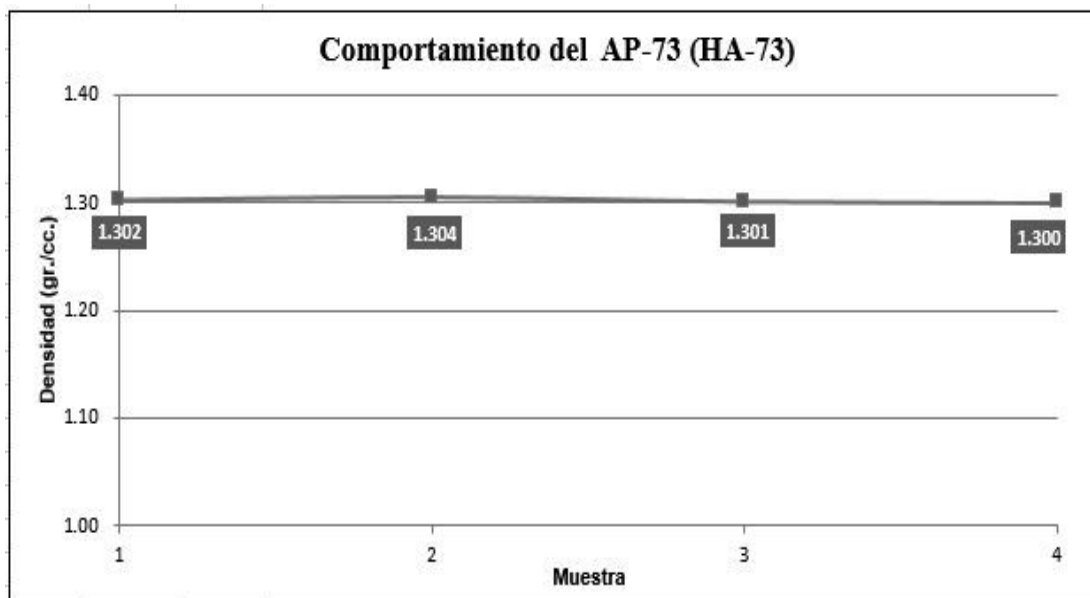
$$\rho = \frac{1301}{1000} = 1.301 \text{ gr/cc}$$

- Densidad para la cuarta muestra:

$$\rho = \frac{1300}{1000} = 1.30 \text{ gr/cc}$$

Se tiene una densidad promedio de 1.302 gr/cc de las cuatro muestras tomadas en campo durante el proceso de carguío de taladros en el proyecto 3770-235 (Proyecto de la empresa encarda de la voladura). El gráfico N°39 muestra el comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73) realizada en campo.

**Gráfico N° 39:** Comportamiento de la densidad del AP-73 (HA-73) proyecto 3770-235.



**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro N° 39 se detalla los datos del carguío de taladros con la mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73).

**Cuadro N° 39:** Datos de campo del proyecto de voladura 3770 – 235.

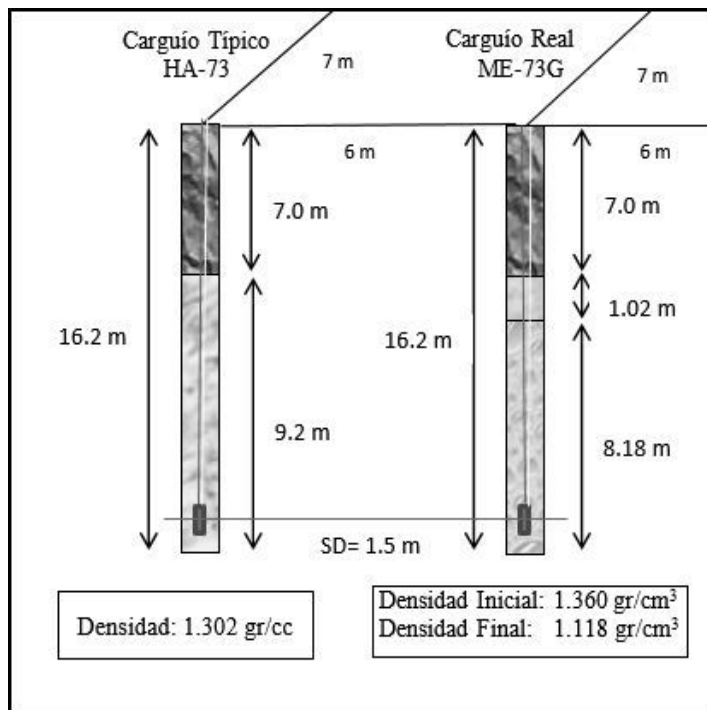
Fecha	Camión	Lugar	Nivel	Proy.	ID° tal.	Operador	Alt. Diseño (m)	Alt. Real (m)	Taco (m)
21-Ene-18	C6F-842 Q-18	Jahuapaylla baja	3770	235	2450	Palomino	16.5	16.2	7

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3.4.2. Diseño de carga del proyecto de voladura primaria 3770-235

Se realizó el diseño de carga con AP-73(HA-73) para los 24 taladros de producción asignados en el proyecto de voladura 36770-235, el proceso de carguío fue en simultaneo con la empresa proveedora que actualmente realiza las voladuras, la conexión del proyecto se realizó con sistema electrónico como se observa en el gráfico N° 40.

Gráfico N° 40: Diseño de carga con AP-73 (HA-73) proyecto 3770-235.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3.4.3. Longitud de carga total por taladro del proyecto de voladura primaria 3770-235

El valor de la longitud de carga es calculado con la ecuación que se muestra a continuación, tomando los datos del cuadro N° 32 pág. 130.

$$Lc_T = L - T = 16.2 - 7 = 9.2 \text{ m}$$

#### 4.1.3.4.4. Densidad de carga lineal del proyecto de voladura primaria 3770-235

Para obtener la cantidad de explosivo por metro lineal de AP-73 (HA-73) se realizó el cálculo con la Ecuación (21) pág. 49, tomando los datos de la densidad promedio pág. 147.

$$DCL = 0.507 * D^2 * \rho_e \text{ (Kg/m)}$$

$$DLC \text{ (HA-73)} = 0.507 * (12.25)^2 * 1.302$$

$$DLC \text{ (HA-73)} = 99.058 \frac{kg}{m}$$

**4.1.3.4.5. Carga total por taladro (qc) del proyecto de voladura primaria 3770-235**

Conocida la densidad de carga lineal y la longitud de carga total por taladro se calculó la carga total por taladro, como se muestra a continuación.

$$Q_c = DCL * L_c = 99.058 \frac{kg}{m} * 9.2 \text{ m} = 911.334 \text{ kg}$$

**4.1.3.4.6. Carga Total de Explosivo del Proyecto de Voladura primaria 3770-235**

Se calculó la cantidad total de explosivo AP-73 (HA-73) tomando el dato de la carga total por taladro y la cantidad de taladros total.

$$CT_{\text{Proyecto}} = 911.334 \text{ kg} * 24 = 21,872.016 \text{ kg}$$

**4.1.3.4.7. Volumen total arrancado del proyecto de voladura primaria 3770-235**

Se calculó utilizando datos del parámetro de perforación del Cuadro N° 32 pág. 130, altura promedio y la cantidad de taladros total, Se calculó con la Ecuación (13) pág. 47.

$$VR_{\text{Total}} = B * E * H_{\text{Promedio}} = 6 \text{ m} * 7 \text{ m} * 16.2 \text{ m} = 680.4 \text{ m}^3 * 24 = 16,329.6 \text{ m}^3$$

**4.1.3.4.8. Factor de carga (FC) del proyecto de voladura primaria 3770-235**

Se procede a calcular el factor de carga del proyecto de voladura con los datos obtenidos de la carga total de explosivo y el volumen total arrancado del proyecto con la Ecuación (15) pag. 47.

$$FC = \frac{We}{V} = \frac{21,872.016 \text{ kg}}{16,329.6 \text{ m}^3} = 1.339 \text{ kg/m}^3$$

**4.1.3.4.9. Factor de potencia (FP) del proyecto de voladura primaria 3770-235**

El cálculo se obtiene con la Ecuación (16) pág. 48, utilizando los datos que se muestran a continuación:

Datos:

- Carga Total de Explosivo por Taladro (kg) : 911.334 kg
- Densidad de Roca : 2.7 Tn/m<sup>3</sup>



- Burden : 6m
- Espaciamiento : 7 m
- Altura de Banco : 15 m
- Volumen de Roca Arrancado por Taladro : 680.4 m<sup>3</sup>

$$\text{Ton.Roca} = 680.4 \text{ m}^3 * 2.7 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} = 1,837.08 \text{ Tn}$$

Entonces:

$$\text{FP} = \frac{\text{Kg.Explosivo}}{\text{Tonelada de Roca}} = \frac{911.334}{1,837.08} = 0.496 \frac{\text{Kg.EXP.}}{\text{Tn.Roca}}$$

#### 4.1.3.4.10. Cantidad de emulsión, nitrato de amonio y petróleo utilizado proyecto de voladura primaria 3770-235

Determinamos la cantidad de los agentes de voladura utilizados por taladro en el proyecto de voladura 3770-235.

Datos:

- 1 galón mezcla : 3.25kg
- Mezcla explosiva sin gasificar AP-73 (HA-73) : 911.334 kg

**Primero:** Calculamos la cantidad de emulsión matriz alternativo.

$$911.334 * 70\% = 637.934 \text{ kg}$$

**Segundo:** Calculamos la cantidad de Nitrato de Amonio que viene hacer la suma del nitrato de amonio y combustible (petroleo).

$$911.334 \text{ kg} - 637.934 \text{ kg} = 273.4 \text{ kg}$$

**Tercero:** Calculamos la cantidad de petroleo utilizado para 273.4 kg de nitrato de amonio.

$$273.4 \text{ kg} * 6\% = 16.404 \text{ kg D-2}$$

**Cuarto:** Calculamos la cantidad de nitrato de amonio total por taladro.

$$273.4 \text{ kg} - 16.404 \text{ kg D-2} = 256.996 \text{ kg}$$

**Finalmente:** Realizamos la conversion de los kg D-2 utilizado en galones.

$$\frac{16.404 \text{ kg D2}}{3.25 \text{ kg}} = 5.047 \text{ Gls D-2}$$

#### 4.1.3.4.11. Consumos de agentes y accesorios proyecto de voladura primaria 3770-235

Se muestra el consumo de explosivos y accesorios utilizados en el carguío de taladros del proyecto de voladura 3770-235 en el cuadro N° 40.

**Cuadro N° 40:** Datos de campo del proyecto de voladura 3770 – 235.

Proy.	N° Tal.	Total ME-73G (HA-73G) kg.	Emul. G. KG.	Nitrato kg.	FO (gal.)	Booster 2 Lb	Digishot	Exanel 18.0m
3770-235	24	21,872.016	15,310.41 1	6,561.60 5	121.137	24	24	24

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3.4.12. REGISTRO DE VOD DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-235

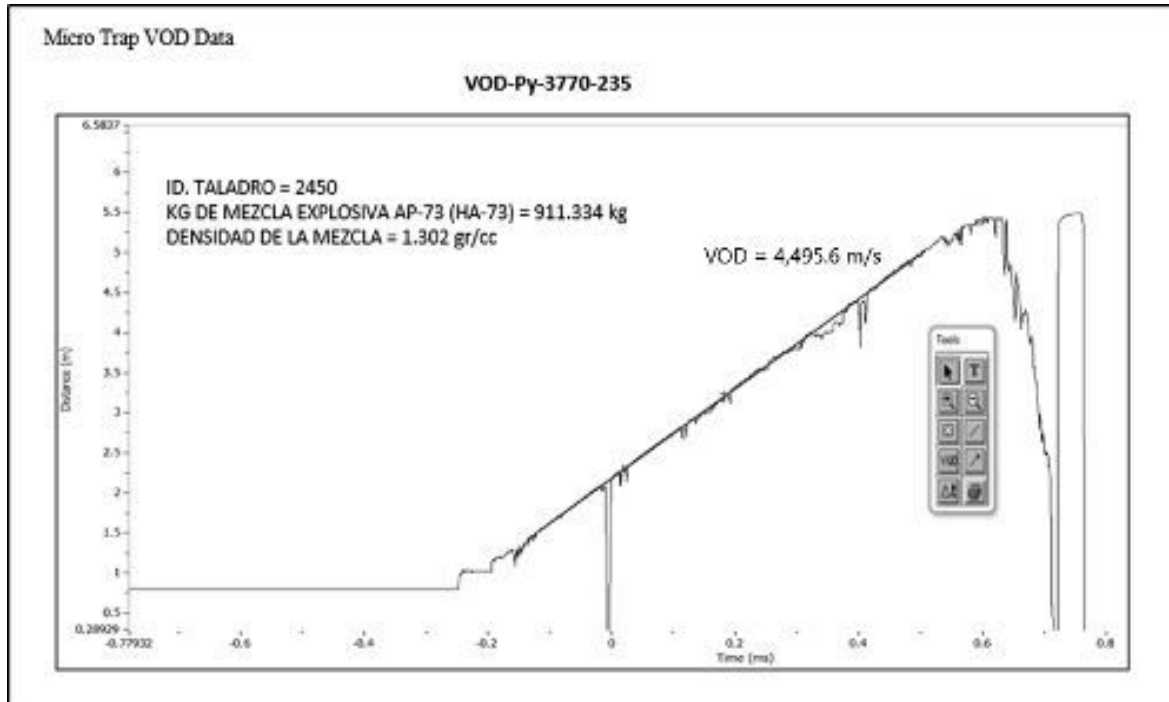
Se realizó la ubicación e instalación del Microtrap en el nivel 3770-235, donde se tuvieron los siguientes parámetros para la medición del VOD:

- Explosivo: AP – 73 (HA-73)
- Lugar: Jahuapaylla Baja – Tajo Ferrobamba Las Bambas
- Camión Mezclador: C6F-842 (Q-18)
- ID Taladro: 2450
- Diámetro: 12 ¼"
- Densidad Promedio: 1.302 gr/cm<sup>3</sup>
- Altura de Taladro: 16.2 m.
- Longitud de Carga: 9.2 m.
- Taco: 7.0 m

En el siguiente gráfico N° 41, se muestra los resultados obtenidos de a VOD en el proyecto de voladura 3770 -235, cargado con AP-73 (HA-73 sin gasificar).



**Gráfico N° 41:** Registro de VOD en el taladro N° 2450 del proyecto de voladura 3770 - 235.

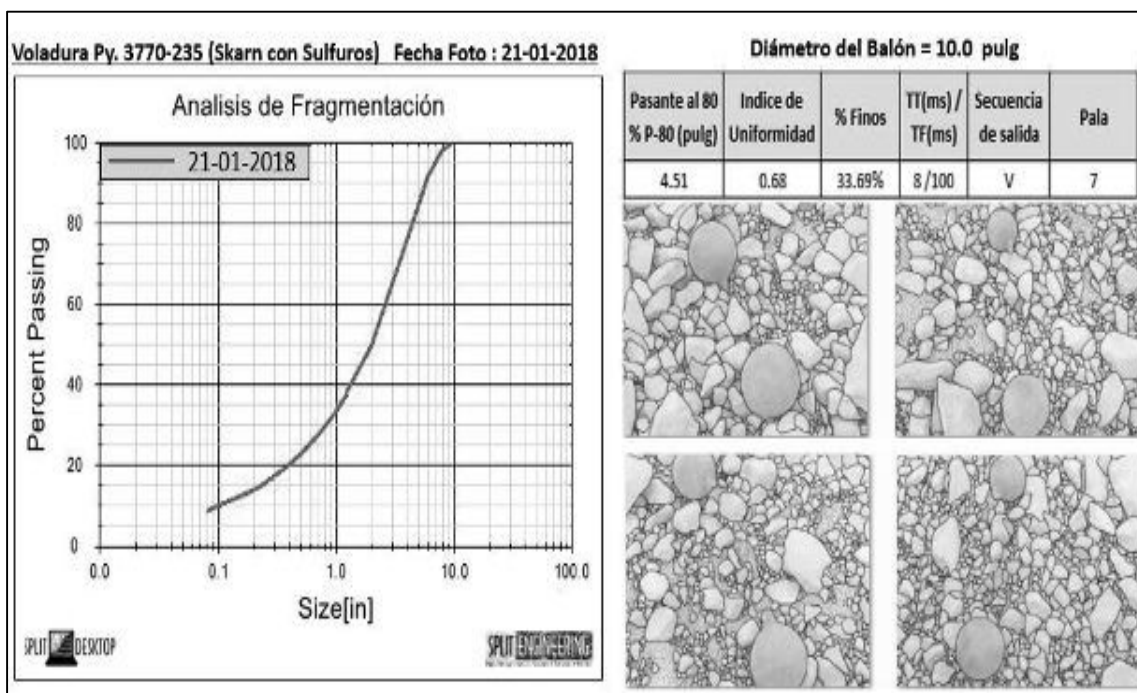


**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

**4.1.3.4.13. ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-235**

El presente reporte describe el análisis de fragmentación del día 21 de enero del frente de la pala 07. El frente de la pala 07 arrojó un P80 de 4.51 pulg. y un porcentaje de finos de 33.69 % como se muestra en el gráfico N° 42.

**Gráfico N° 42:** Análisis de granulometría P-80 del proyecto de voladura 3770 - 235.



**Fuente:** Asistencia Técnica EXSA S.A Las Bambas.

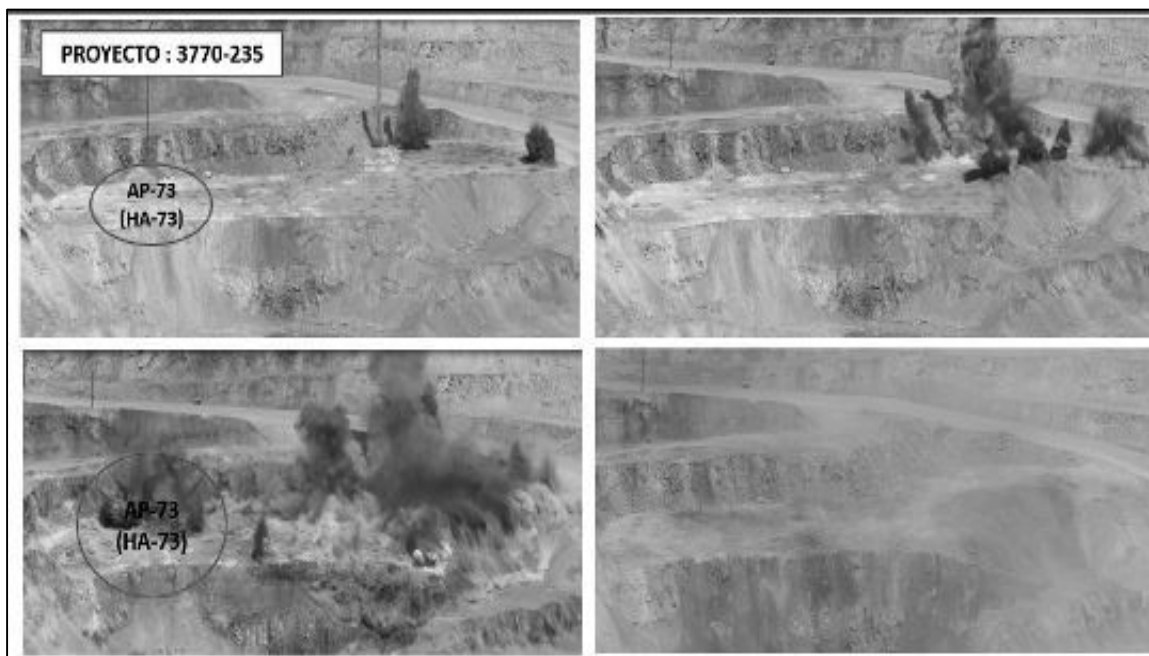


#### 4.1.3.2.14. MEDICIÓN DE GASES DEL PROYECTO DE VOLADURA PRIMARIA 3770-23

Es importante determinar el nivel de gases nitrosos generados durante el proceso de post voladura en el proyecto 3770-235.

En la figura N° 64, se observa la generación de humos de color amarillo.

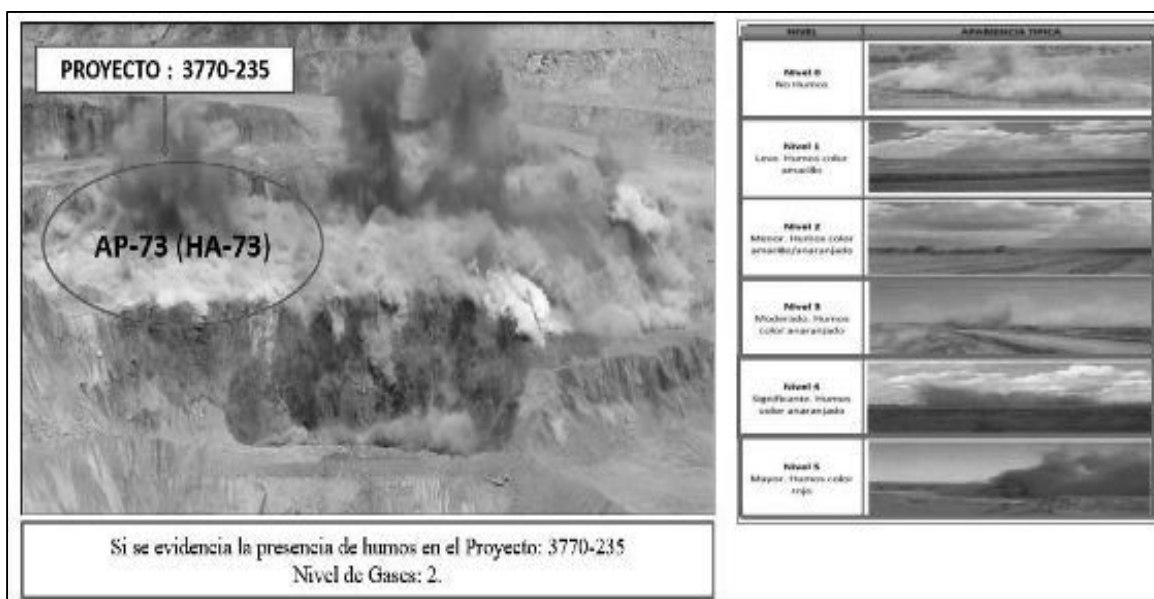
**Figura N° 64:** Análisis de gases del proyecto de voladura 3770 - 235.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó la medición y el comparativo del nivel de los gases nitrosos post voladura con el cuadro de la escala de niveles de gases, teniendo como resultado promedio de Nivel 2 como se observa en la figura N° 65.

**Figura N° 65:** Análisis de gases nitrosos con la escala de niveles proyecto 3770-235.



**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

### 4.2.1. Hipótesis estadística

#### 4.2.1.1. Hipótesis estadística (nulas y alternas)

##### Hipótesis general:

Ho: El uso de la mezcla explosiva gasificada no influye en la optimización de la operación unitaria de voladura primaria del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas.

H1: El uso de la mezcla explosiva gasificada, influye en la optimización de la operación unitaria de voladura primaria del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas.

##### Hipótesis subsidiarias:

Ho: El uso de la mezcla explosiva gasificada en el tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas no influye en la fragmentación (P80) y generación de gases nitrosos.

H1: EL uso de la mezcla explosiva gasificada en el tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas, influye en la fragmentación y generación de gases nitrosos.

Ho: La optimización de la operación unitaria de voladura primaria del tajo Ferrobamba, no influye en los costos de la unidad minera Las Bambas.

H1: La optimización de la operación unitaria de voladura primaria del tajo Ferrobamba, influye en los costos de la unidad minera Las Bambas.

## 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.3.1. RESULTADOS EN FRAGMENTACIÓN

Para la evaluación de la fragmentación de las durante la etapa de pruebas del 2018 se analizaron los reportes diarios de fragmentación del sistema Split Desktop, a tiempo real se monitorea la fragmentación que mina las palas eléctricas en los diferentes frentes después de las post voladuras, tomando registros por día, lo cual garantiza resultados confiables, y de acuerdo a los reportes del mineral que se envía a la chancadora se ha alcanzado mejoras en fragmentación, con la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) en comparación con el ANFO Pesado 73 (HA-73) como se detalla anteriormente en las pruebas.

Se tiene en el siguiente cuadro N° 41 los resultados en fragmentación obtenidos desde el mes de octubre del 2017 a marzo del 2018 y se representa en el gráfico N° 43.

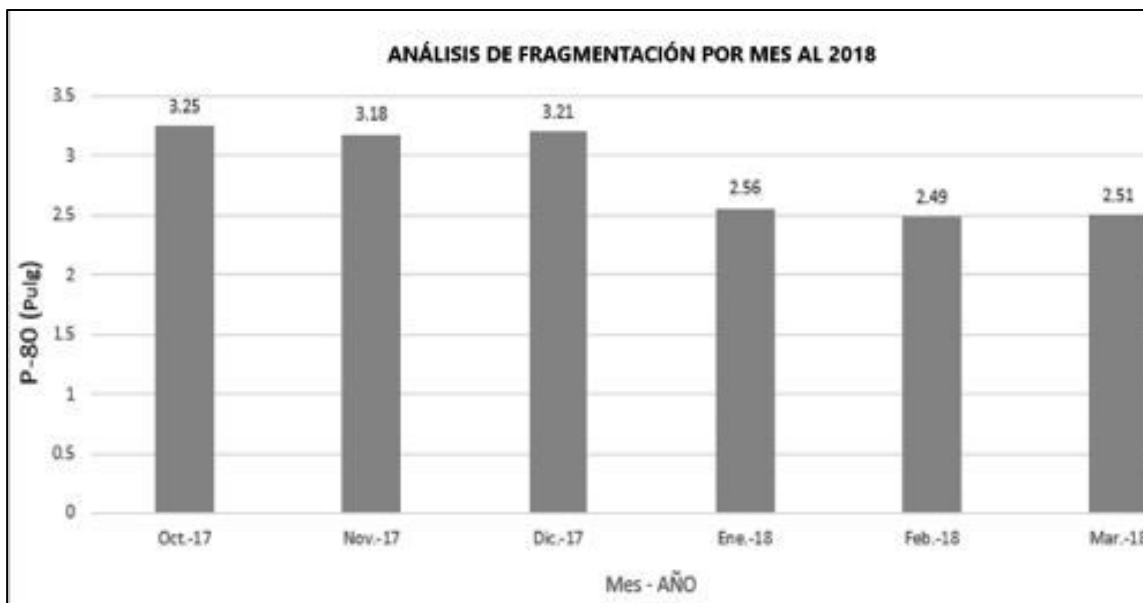
**Cuadro 41: Reporte de Fragmentación al mes de marzo del 2018.**

Mes-Año	Fragmentación P80 (Pulg.)
Octubre 2017	3.25
Noviembre 2017	3.18
Diciembre 2017	3.21
Enero 2018	2.56
Febrero 2018	2.49
Marzo 2018	2.51

**Fuente:** Área de perforación y voladura Las Bambas.



Gráfico N° 43: Mejora en la fragmentación de las pruebas realizadas.



Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la fragmentación en rango con la Ecuación (32) pág. 70 donde indica las dimensiones de roca volada deseadas (igual o inferior a 30 cm), se tiene el siguiente cuadro donde indica los valores para calcular el índice de fragmentación en rango.

Tenemos el siguiente Cuadro N° 42, con las toneladas de roca volada en los tres meses de prueba:

Cuadro 42: Toneladas de roca volada de los tres meses de pruebas 2018.

(*)Tonelada de roca volada ( TM )	(**) Toneladas de roca volada con dimensión ≤ a 30 cm	(***) Toneladas de roca volada con dimensión inaceptable ≥ a 100 cm
7,677,945.904	7,661,035.08	0

(\*) Dato obtenido del Anexo 01.

(\*\*) (\*\*\*) Dato del área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los valores obtenidos en el Cuadro N° 42 se calculó el índice de fragmentación en rango:

$$FR = \frac{RVCD}{RV} = \frac{7,661,035.08}{7,677,945.904} = 0.9978 \times 100 = 99.78\%$$

Finalmente se calculó el índice de fragmentación fuera de rango con la Ecuación (33) pág. 70 y el dato del Cuadro N° 42, de las toneladas de roca volada con dimensión inaceptable mayor o igual a 100 cm.

$$FFR = \frac{RVCD}{RV} = \frac{0}{7,677,945.904} = 0.00\% \times 100 = 0.0\%$$

Los resultados globales de fragmentación obtenidos de los meses de enero a marzo del 2018 corresponden a porcentajes para tamaños menores o iguales a 0.30 m. en un 99.78% del total de material disparado y 0.22 % con tamaños no mayores a 1.0 m. El 100% del total de material es igual o inferior a una malla de 0.3 m.

El 100% del total del material de minado es inferior a una malla de 1.0m como se observa en el gráfico N° 44.

**Gráfico N° 44:** Indicadores e índice de la fragmentación en rango.



**Fuente:** Elaboración propia.

Los valores promedio del P80 (pulg) para Monzonita, Skarn con Sulfuros y Endo Skarn fue de 2.52 pulg. Este valor se encuentra dentro del rango de KPI de fragmentación, el cual varía de [5.3 – 6.0] pulg.

#### 4.1.2. RENDIMIENTO DE EQUIPOS DE CARGUÍO

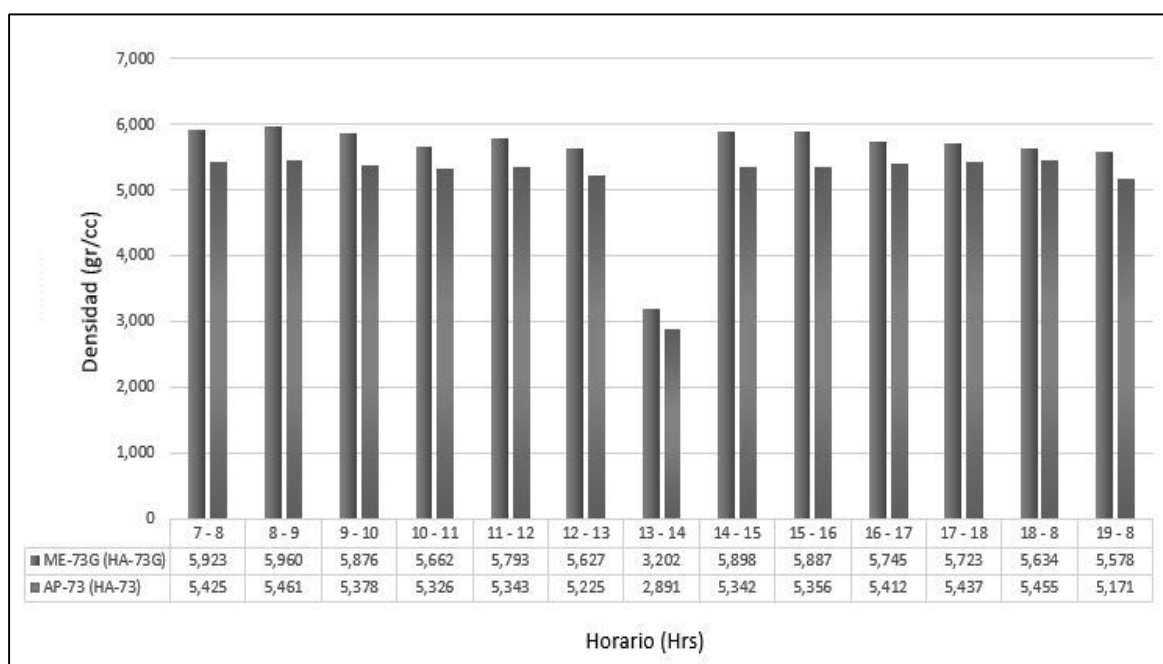
La optimización de la fragmentación es reflejado en el rendimiento de los equipos de carguío palas eléctricas y cargadores frontales, que alcanzaron un incremento del 7.87 % afectado por las pruebas realizadas con la “Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G)” durante los meses de enero a marzo del 2018, donde se realizaron voladuras en 34 proyectos en las zonas de Jahuapayla Alta, Jahuapaylla Baja y Mini Tajo del tajo Ferrobamba, manteniéndose en un valor promedio de 5,578 tons/hr. Esto fue comprobado por medio de la información brindada por el Área de Dispatch de la unidad minera Las Bambas como se muestra en el cuadro N° 43.

**Cuadro N° 43:** Mejora en el rendimiento de los equipos de carguío.

RENDIMIENTO PROMEDIO DE CARGUÍO ENERO - MARZO 2018 (Ton/HR)		
Horario (Hr)	ME-73G (HA-73G)	Explosivo Alternativo AP-73 (HA-73)
7 - 8	5,923	5,425
8 - 9	5,960	5,461
9 - 10	5,876	5,378
10 - 11	5,662	5,326
11 - 12	5,793	5,343
12 - 13	5,627	5,225
13 - 14	3,202	2,891
14 - 15	5,898	5,342
15 - 16	5,887	5,356
16 - 17	5,745	5,412
17 - 18	5,723	5,437
18 - 19	5,634	5,455
<b>Promedio</b>	<b>5,578</b>	<b>5,171</b>

**Fuente:** Área de Dispatch Las Bambas.

En el gráfico N° 45, se ilustra un crecimiento en el rendimiento de los equipos de carguío en función a la optimización de la fragmentación con la utilización de la mezcla explosiva gasificada (HA-73).

**Gráfico N° 45:** Crecimiento en el rendimiento de los equipos de carguío al 2018.

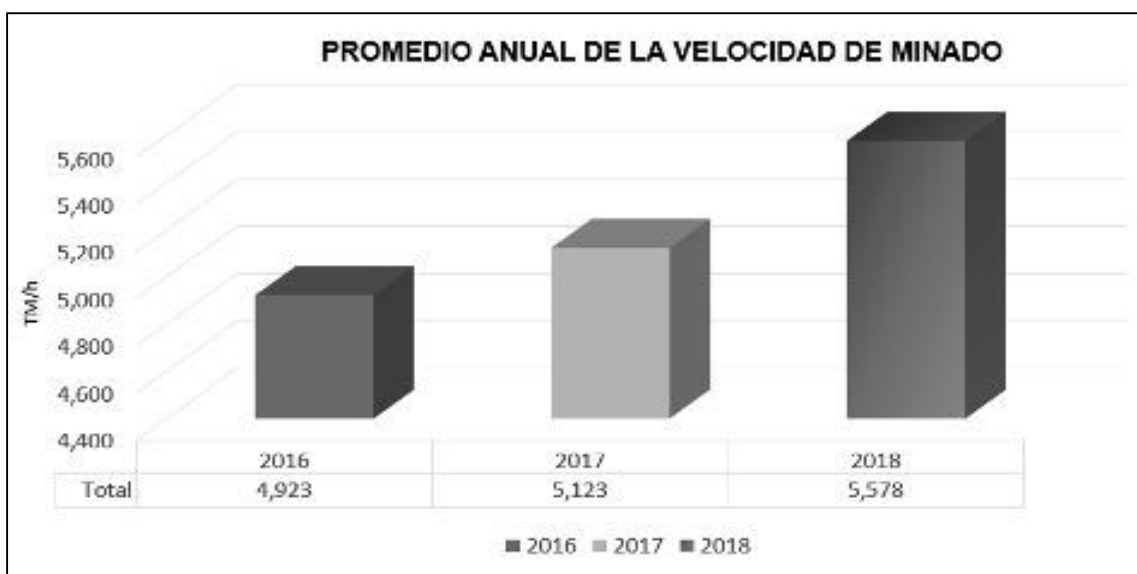
**Fuente:** Elaboración propia.

La velocidad de minado promedio con HA-73 es 5,171 TM/h; y la velocidad de minado promedio con ME-73G (HA-73G) es de 5,578 TM/h.

#### 4.1.3. RESULTADOS EN VELOCIDAD DE EXCAVACIÓN

En las pruebas realizadas se aprecia una mejora en los rendimientos de excavación de los equipos de carguío de velocidad de producción anual en un orden de 13 % respecto al año 2016 como se muestra en el gráfico N° 46.

**Gráfico N° 46:** Mejora de la velocidad de minado en el tajo Ferrobamba 2018.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.4. EVALUACIÓN DE VELOCIDAD DE DETONACIÓN

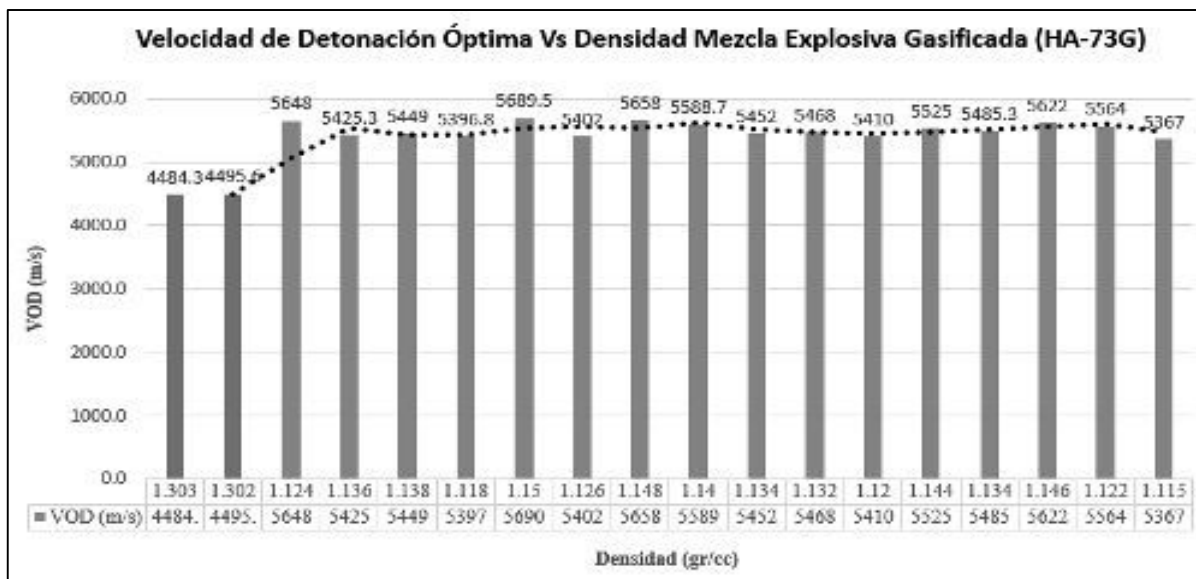
La velocidad de detonación (VOD) es proporcional a la potencia cedida por la detonación del explosivo. Por esta razón se llevaron 18 registros de VOD de los cuales 2 registros fueron realizados con AP.73 (HA.73) de la empresa encargada de la voladura, se realizaron los registros para controlar la impedancia y la energía entregada por el explosivo durante la detonación de un taladro durante las pruebas realizadas del mes de enero a marzo del 2018

A mayor densidad mayor es la velocidad de onda detonación (VOD) por confinamiento, mayor carga por taladro, menor esponjamiento de columna y menor sensibilidad en el fondo.

A menor densidad menor carga por taladro, mayor sensibilidad en el fondo, mayor esponjamiento en la columna menor VOD por confinamiento.

Probar el desempeño de los explosivos en comparación con los estándares de control de calidad establecidos.

En el gráfico N° 47, se muestra el rendimiento óptimo de la velocidad de detonación en función a un control adecuado de la densidad durante las pruebas realizadas con mezcla explosiva gasificada (HA-73G) en el Tajo Ferrobamba de la Mina Las Bambas Tabla N°24 pág. 67 (Ver Anexo IV).

**Gráfico N° 47:** Velocidad de detonación variable de acuerdo a la densidad de campo.

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo al gráfico N° 47, se puede observar que la mayor velocidad de onda detonación (VOD) en la mezcla explosiva gasificada HA-73G durante las pruebas realizadas se da en la densidad de copa de 1,15gr/cc con 5,689.5 m/s y en comparación con el AP-73 (HA-73) se observa una velocidad de detonación que no alcanza los niveles exigidos.

#### 4.1.4.1 RESULTADOS EN VELOCIDAD DE DETONACIÓN

Los resultados obtenidos desde la implementación de la mezcla explosiva gasificada ME-73G en las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018, se aprecia una mejora en la VOD del explosivo, incrementando el rendimiento del explosivo dentro del taladro en diferentes frentes de trabajo donde se realizaron las voladuras, lo cual se ve evidenciado en las mejoras de fragmentación y rendimiento de los equipos de carguío, mostrados anteriormente en la gráfico N° 47.

Se tiene los valores proporcionados por la unidad minera Las Bambas de los promedios obtenidos por año de la velocidad de detonaciones como se muestra en el siguiente cuadro N° 44.

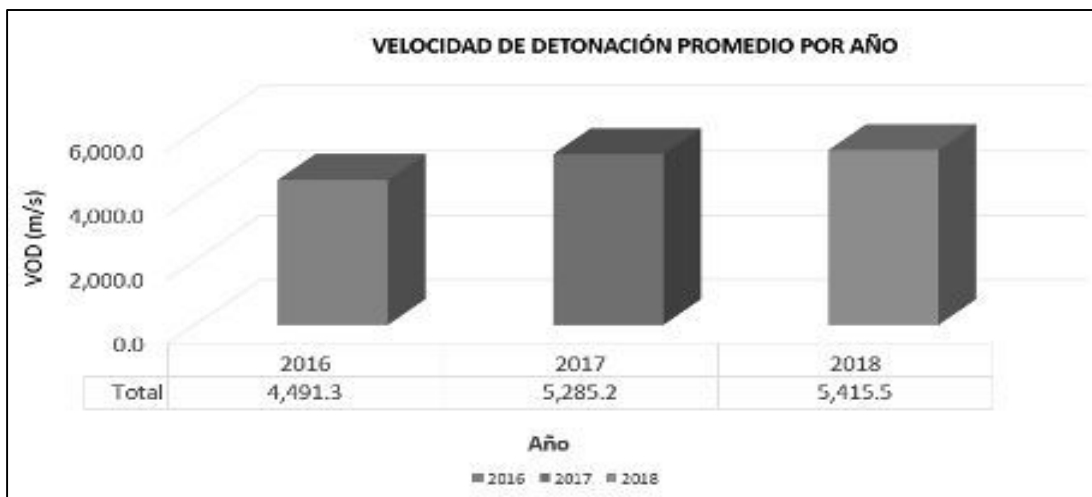
**Cuadro N° 44: Valores promedio de VOD por año.**

Año de registro VOD	Velocidad de Detonación (m/s)
(*) 2016	4,491.30
(*) 2017	5,285.20
2018	5,415.50

(\*) Dato proporcionado por el área de perforación y voladura Las Bambas.

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

Se puede observar en el gráfico N° 48, mejora en la velocidad de detonación durante los tres años de explotación de la Mina Las Bambas.

**Gráfico N° 48:** Mejora de la velocidad de detonación por año en el tajo Ferrobamba.

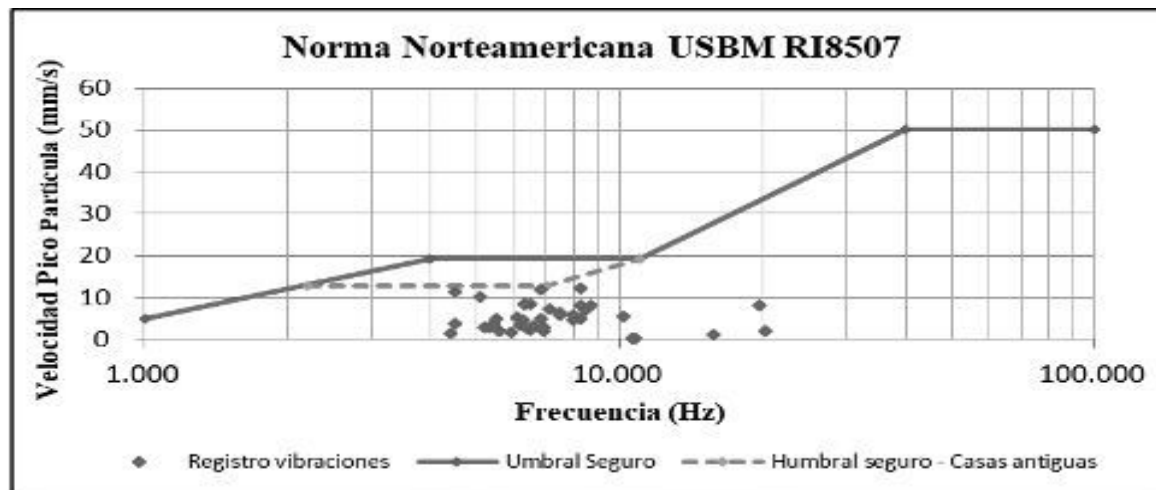
**Fuente:** Elaboración propia.

El rango de densidad donde se tiene las Velocidades Óptimas de Detonación (VOD) del explosivo durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018 varía entre (1.115 a 1,15) gr/cc, aplicadas en Mina Las Bambas de acuerdo a la evaluación geomecánica del macizo rocoso que tienen durezas que varían de 3 a 5 alcanzaron rendimientos significativos en el proceso de minado.

#### 4.1.5. RESULTADOS DEL MONITOREO DE VIBRACIONES

Importante tener control del monitoreo de vibraciones para saber cuánto daño estamos causando a los taludes o zonas de riesgo, asimismo en áreas cercanas a las construcciones de las comunidades aledañas de la mina.

De acuerdo a la norma Norteamericana USBM RI8507 y OSMRE (USA) Tabla N° 07 pág. 40, los registros de las velocidades Pico Partícula (VPP) realizadas en las pruebas de los meses de enero a marzo del 2018 (Ver Anexo V), se encuentran fuera del umbral de daño así como podemos observar en el gráfico N° 49.

**Gráfico N° 49:** Puntos de monitoreo dentro de la Norma USBM RI8507.

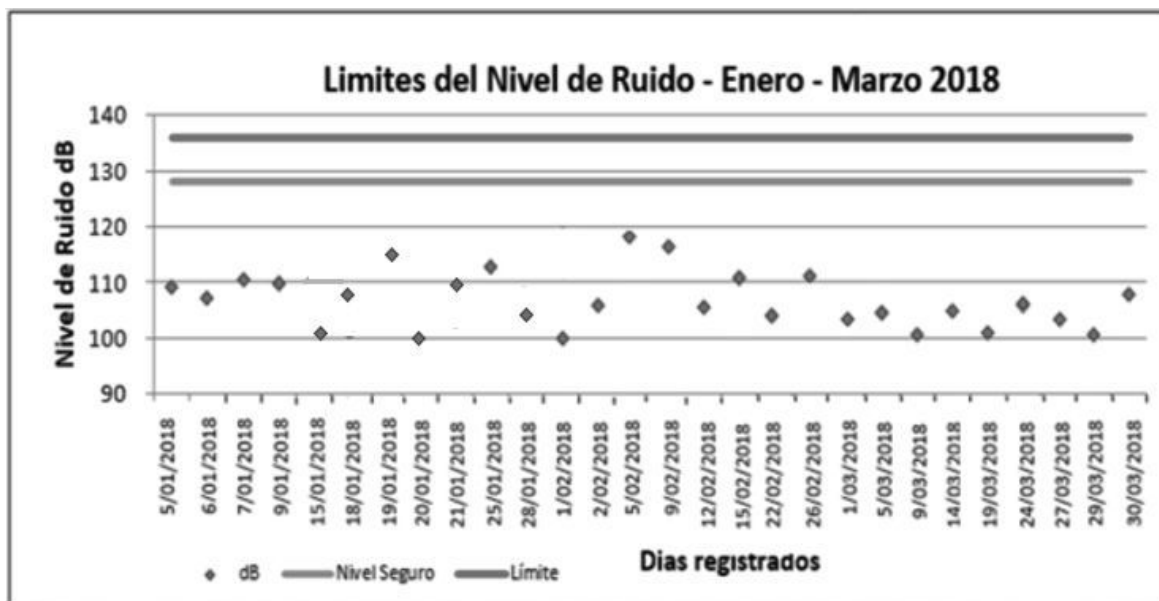
**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

#### 4.1.5.1. RESULTADOS MEDICIÓN DE RUIDO

Se realizaron un total de 28 mediciones de ruido (Ver Anexo VI), durante las pruebas de voladura durante los meses de enero a marzo del 2018.

De acuerdo a los monitoreo de ruido, las voladuras no sobrepasaron el umbral de daño por ruido según el criterio propuesto por SISKIND y SUMMERS (1974) Tabla N° 03 pág. 34 tal como podemos observar en el siguiente gráfico N° 50.

**Gráfico N° 50:** Registro del límite de ruido en el tajo Ferrobamba.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

#### 4.1.6. EVALUACIÓN MEDICIÓN DE GASES

En el cuadro N° 45, se aprecia la cantidad de proyectos disparados y la cantidad de taladros disparados por mes y el porcentaje de taladros que emanaron gases nitrosos (Ver Anexo VIII).

**Cuadro N° 45:** Registro de voladuras y la cantidad de taladros por mes.

Tipo de Explosivo	N° de Disparos	N° Taladros / Mes			(*) % Taladros / Mes que Emanaron Gases Nitrosos		
		Enero	Febrero	Marzo	Enero	Febrero	Marzo
ME-73 (HA-73)	34	1,320	1,286	1,333	0.18	0.11	0.10
AP-73 (HA-73)	42	1,961	1,918	1,985	10.15	10.21	10.18

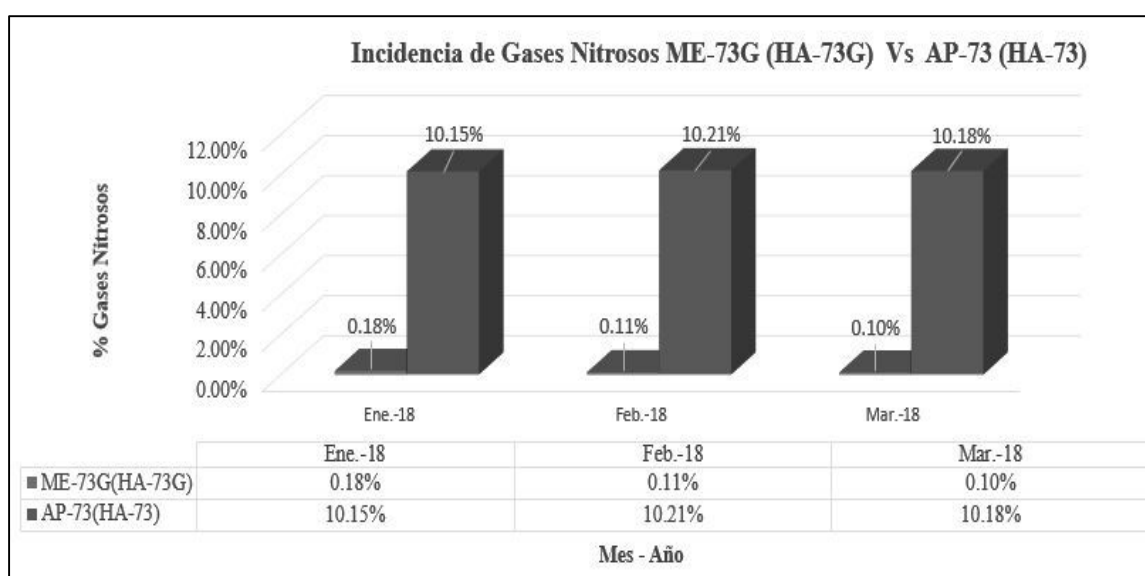
(\*) Datos del Área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas.

**Fuente:** Elaboración propia.

El cuadro N° 45, indica el número de taladros y voladuras realizadas durante las pruebas en los meses de enero a marzo del 2018 de 5,864 taladros de los 42 proyectos disparados con AP (Heavy ANFO) por la empresa encargada de la voladura en un 30.54 % se generaron Gases nitrosos en exceso nivel 1 y 2, sin embargo desde el consumo de la mezcla explosiva gasificada ME-73G durante las pruebas en 3,939 taladros de 34 proyectos disparos solo en un 0.39 % se presenciaron gases nitrosos de nivel 1.

En el gráfico N° 51, se observa el comparativo del porcentaje de gases nitrosos generados entre la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) y el AP-73 (HA-73) en los disparos realizados, obteniendo indicadores óptimos en la disminución de gases nitrosos en función a un adecuado diseño, control y comportamiento de la mezcla explosiva gasificada durante el proceso de voladura.

**Gráfico N° 51:** Porcentaje de disparos por mes con presencia de gases nitrosos.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se monitoreo 16 proyectos durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018, al ingresar al proyecto Post voladura se procede al monitoreo con el equipo detector multigás teniendo como resultado promedio de Nivel 0, debido a la disipación y proporción de estos.

En el cuadro N° 46, se tienen valores promedio de los gases de toda las voladuras monitoreadas con el equipo detector multigás (Ver Anexo VII).

**Cuadro N° 46:** Promedio de gases post voladura 2018.

OXY (%) Max.	H2S (ppm) (Avg)	H2S (ppm) (Max.)	NO2 (ppm) (Avg)	NO2 (ppm) (Max.)	CO2 (ppm) (Avg)	CO2 (ppm) (Max)	Distancia del Equipo (m)
20.9	0.00	0.21	0.00	0.07	274.38	274.38	54.94

**Fuente:** Elaboración propia.

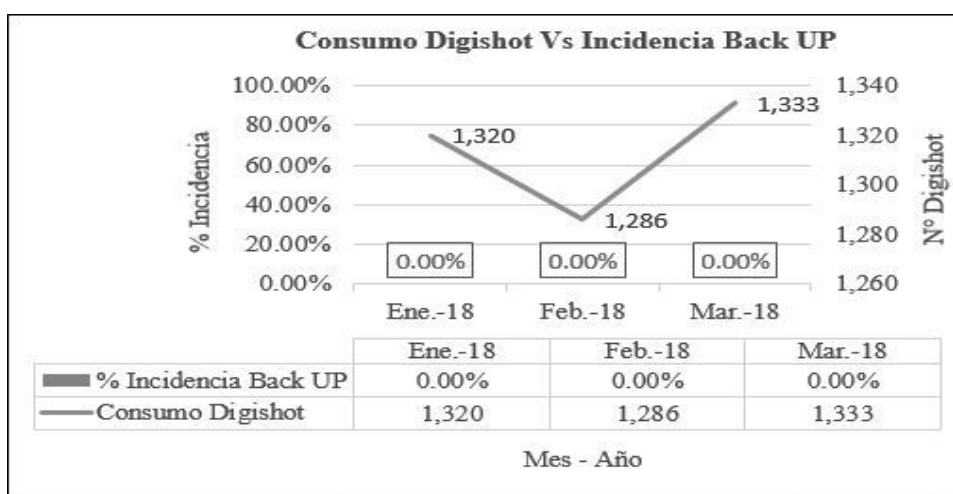
Se observa en el cuadro N° 46, los valores promedio de los gases post voladura que se monitorearon y que se encuentran dentro del rango establecido como límite permisible en el Anexo 15 del DS. N° 024-2016-EM, como se observa en la Tabla 25, pág. 71.

#### 4.1.7. EVALUACIÓN INCIDENCIA BACK UP

Durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018 tuvimos cero Back UP con la utilización de la mezcla explosiva gasificada, esta cantidad de Back Up nos indica un porcentaje de incidencia de 0.0% (Ver Anexo II).

En el gráfico N° 52, se observa una incidencia óptima de Back Ups resultado del cuidado en el carguío de taladros, tapado de taladros (uso de rejilla y tubo PVC de 6m).

**Gráfico 52:** Incidencia Back UP Vs Consumo DigiShot Enero – Marzo 2018.



**Fuente:** Elaboración propia.

Los back Up usados en el mes de febrero en el proyecto 3635-247 cargado con AP-73 (HA-73) se debieron específicamente al corte de la línea descendente evitando la comunicación con la placa de circuitos electrónica en los detonadores.

Los back up usados en el mes de marzo en los proyectos 3745-268 y 3720-272 fueron producto del daño que recibió el cable descendente dentro de los taladros generándose la fuga alta.

Se tiene en el siguiente cuadro N° 47, la cantidad de detonadores electrónicos y la incidencia Back UP, durante los meses de prueba del 2018.

**Cuadro 47:** Consumo e Incidencia Back UP de los detonadores electrónicos alternativo por mes.

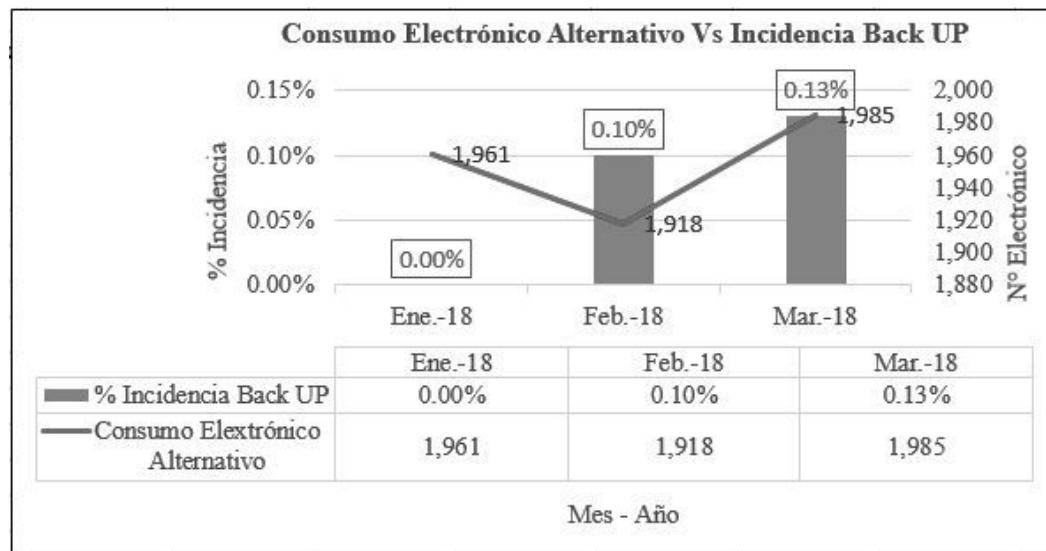
Mes -Año	(*) % Incidencia Back UP	(*) Consumo Electrónico Alternativo
Enero 2018	0.00%	1,961
Febrero 2018	0.10%	1,918
Marzo 2018	0.13%	1,985

(\*) Datos proporcionados por el Área de perforación y voladura Las Bambas.

**Fuente:** Elaboración propia.

La cantidad de BackUp generados durante el carguío de talados con AP-73 (HA-73) nos indica un porcentaje de incidencia de 0.23% en los meses de febrero y marzo del 2018 como se muestra en el gráfico N° 53.

**Gráfico N° 53:** Incidencia Back UP Vs Consumo Electrónico Alternativo Enero – Marzo 2018.

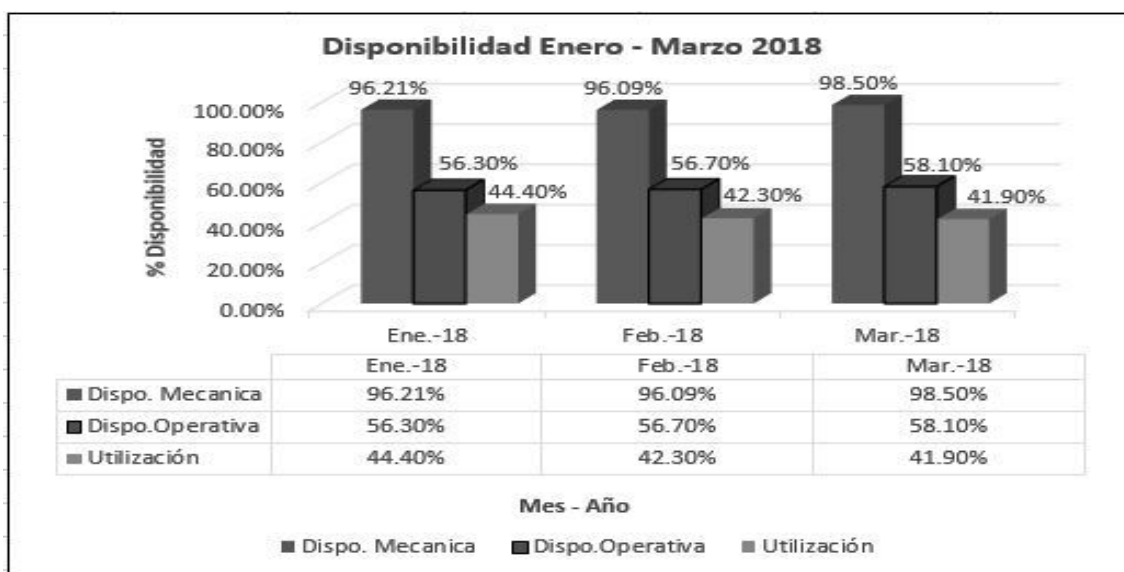


**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.8. EVALUACIÓN DISPONIBILIDAD MECANICA, OPERATIVA Y UTILIZACIÓN DE LOS CAMIONES MEZCLADORES

En el gráfico N° 54, en el mes de marzo se obtuvo 98.50 % de disponibilidad mecánica de los camiones mezcladores y una utilización de 41.90 % optimizando tiempos operativos durante el proceso de carguío de taladros con la aplicación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73).

**Gráfico N° 54:** Disponibilidad mecánica de los camiones mezcladores Enero – Marzo 2018.



**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa .S.A Las Bambas).

#### 4.1.9. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el siguiente cuadro N° 48, se muestra la comparación de costos en voladura por consumos de agentes explosivos de la comparación de un AP-73 (HA-73) con la mezcla explosiva gasificada ME-73G durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018, se aprecia una notable diferencia entre ambos.

**Cuadro N° 48:** Costo por mezcla explosiva HA-73 y HA-73G.

Mezcla Explosiva	(*) Costos de mezcla
Heavy ANFO (HA-73)	0.610 US\$/kg
Mezcla Explosiva Gasificada (ME-73G)	0.616 US\$/kg

(\*) Datos del Área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas.

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación se presenta los costos de acuerdo a los parámetros de voladura obtenidos en campo que representa el empleo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G) en comparación del Heavy ANFO (HA-73) como se muestra en el cuadro N° 49.

**Cuadro N° 49:** Ahorro por consumo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G).

PARÁMETROS DE VOLADURA	Mezcla Explosiva	
	ME-73G (HA-73G)	AP-73 (HA-73)
Longitud de carga (m)	8.7	9.5
Esponjamiento	0.8	0
Taco final	7	7
Densidad final del explosivo (gr/cc)	1.146	1.29
DCL (KG/m)	103.852	98.145
Kilos por taladro (kg)	903.512	932.378
Tonelaje teórico ( TM )	1,940.40	1,940.40
Factor de Potencia (kg/TM)	0.448	0.490
ANÁLISIS DE COSTO		
Costo por kg de mezcla explosiva (US\$/kg)	0.616	0.610
Costo de explosivo por taladro (US\$)	556.564	568.751
Costo de explosivo por tonelada (US\$/TM)	0.287	0.298

**Fuente:** Elaboración propia.



En el cuadro N° 49, para el costo de aplicación se ha considerado una densidad final de copa 1.146 gr/cc aplicable en las zonas más competentes de la mina, Mini Tajo y Jahuapaylla Alta.

Se reduce la longitud de carga, producto del esponjamiento de la Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73). El ahorro por taladro y tonelada métrica cargado con la mezcla explosiva gasificada durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018 es el siguiente como se observa en el Cuadro N° 50.

**Cuadro 50: Ahorro por taladro y tonelada métrica.**

Mezcla Explosiva	Costo (USD/Tal)	Ahorro (USD/Tal)	Costo (USD/TM)	Ahorro (USD/TM)
AP-73 (Heavy ANFO (HA-73))	568.751	12.187	0.293	0.006
Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G)	556.564		0.287	

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación se presenta en el cuadro N° 51, el ahorro del costo total por tonelaje roto mensual (Ver Anexo I), que representa el empleo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G) en comparación de Heavy ANFO (HA-73) (Ver Anexo I).

**Cuadro N° 51: Ahorro por tonelaje roto mensual y total.**

Mes -Año	Enero - 2018	Febrero - 2018	Marzo - 2018
(*) Tonelaje roto mensual ( TM )	4,819,354.470	5,152,122.524	5,384,414.814
(*) Tonelaje roto con mezcla explosiva gasificada (HA-73G) ( TM )	2,409,677.235	2,576,061.262	2,692,207.407
(*) Tonelaje roto con AP-73 (HA-73) ( TM )	2,409,677.235	2,576,061.262	2,692,207.407
Costo por tonelaje roto total con mezcla explosiva gasificada HA-73G (\$)	691,577.366	739,329.582	772,663.526
Costo por tonelaje roto total con AP-73 (HA-73) (\$)	718,083.816	767,666.256	802,277.807
<b>Ahorro ME-73G comparando AP-73 (HA-73) (U\$)</b>	<b>26,506.450</b>	<b>28,336.674</b>	<b>29,614.281</b>

(\*) El tonelaje roto mensual (Dato del Área de Perforación y Voladura).

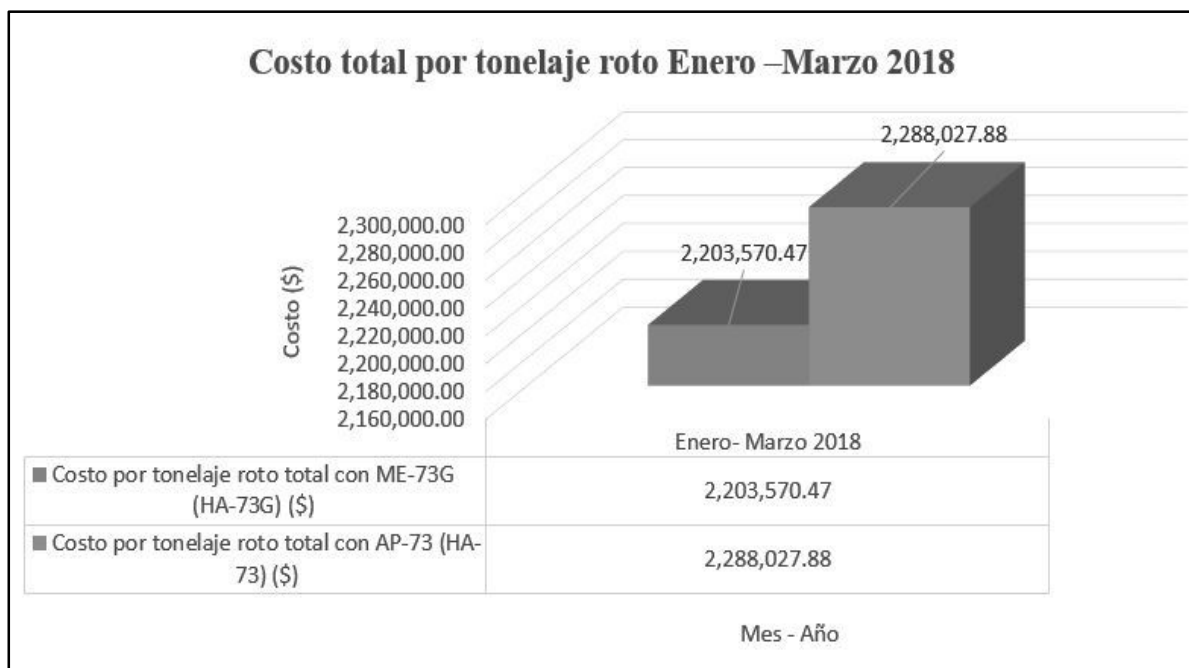
**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo al cuadro N° 51, el ahorro total por tonelaje roto total en los tres meses de enero a marzo del 2018 es de \$ 84,457.405.

En el siguiente gráfico N° 55, se observa el ahorro generado por el uso de la mezcla explosiva gasificada (HA-73), en comparación al AP-73 de acuerdo a los datos obtenidos en el cuadro N° 51.



Gráfico N° 55: Costo total por tonelaje roto Enero-Marzo 2018.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se presenta en el cuadro N° 52, el ahorro total por consumo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G) en comparación al AP-73 (HA-73) en los tres meses de voladura (Ver Anexo I).

**Cuadro N° 52:** Ahorro por consumo de explosivo mensual y total.

Mes -Año	Enero - 2018	Febrero - 2018	Marzo - 2018
(*) Consumo de mezcla explosiva ( TM )	2,423.375	2,360.954	2,447.241
(*) Consumo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G) ( TM )	1,192.636	1,161.916	1,204.382
(*) Consumo de AP-73 (HA-73) ( TM )	1,230.739	1,199.038	1,242.859
Costo por consumo de mezcla explosiva gasificada HA-73 (\$)	734,663.776	715,740.256	741,899.312
Costo por consumo de AP-73 (HA-73) (\$)	750,750.790	731,413.180	758,143.990
<b>Ahorro ME-73G comparando AP-73 (HA-73) (U\$\$)</b>	<b>16,087.014</b>	<b>15,672.924</b>	<b>16,244.678</b>

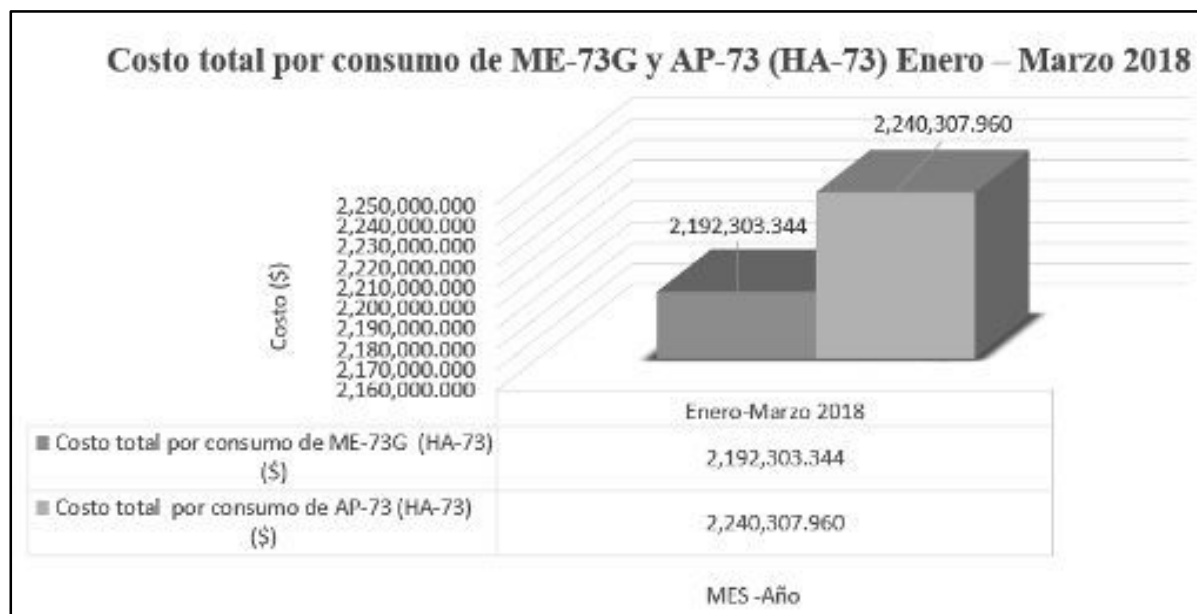
(\*) Consumo de mezcla explosiva mensual (Dato del Área de Perforación y Voladura).

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo al cuadro N° 52, el ahorro por el uso de Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G) es: \$ 48,004.616, en los tres primeros meses de enero a marzo del 2018.

Durante la etapa de pruebas en los meses de enero a marzo del 2018 con la mezcla explosiva gasificada (HA-73G), la inversión incluye el servicio integral de voladura a un costo cero, lo cual implica un ahorro de 50,000 USD/mes.

**Gráfico N° 56:** Costo total por consumo de mezcla explosiva gasificada Enero-Marzo 2018.



En el cuadro N° 53, se observa resultados en el consumo de combustible y nitrato de amonio por taladro en los proyectos cargados con mezcla explosiva gasificada (HA-73G) y AP-73 (HA-73), obteniéndose un ahorro del 7% menos (Ver Anexo I).

**Cuadro N° 53:** Ahorro de combustible y nitrato por taladro entre los dos tipos de mezclas explosivas.

Mezcla explosiva	Altura de taladro (m)	Proyecto	Consumo de nitrato de amonio / taladro (kg)	Consumo de combustible / taladro (gal.)	Ahorro combustible / taladro
Heavy ANFO (HA-73)	16.5	3655-228	282.099	5.208	7%
Mezcla explosiva gasificada (HA-73G)	16.5	3655-227	263.330	4.843	
Heavy ANFO (HA-73)	16.2	3770-235	273.400	5.047	7%
Mezcla explosiva gasificada (HA-73G)	16.2	3770-234	253.918	4.688	

**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados analizados del consumo y ahorro de nitrato de amonio y combustible entre los dos tipos de mezclas explosivas AP-73 (HA-73) y ME-73G (HA-73G), fueron determinados en los dos proyectos de voladuras primarias comparadas en la parte de la descripción de resultados.

Se tiene en el cuadro N° 54, los datos de consumo de los dos tipos de mezclas explosivas por taladro, observándose un ahorro del 7% en los dos proyectos de voladura analizados de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) frente al AP-73 (HA-73).

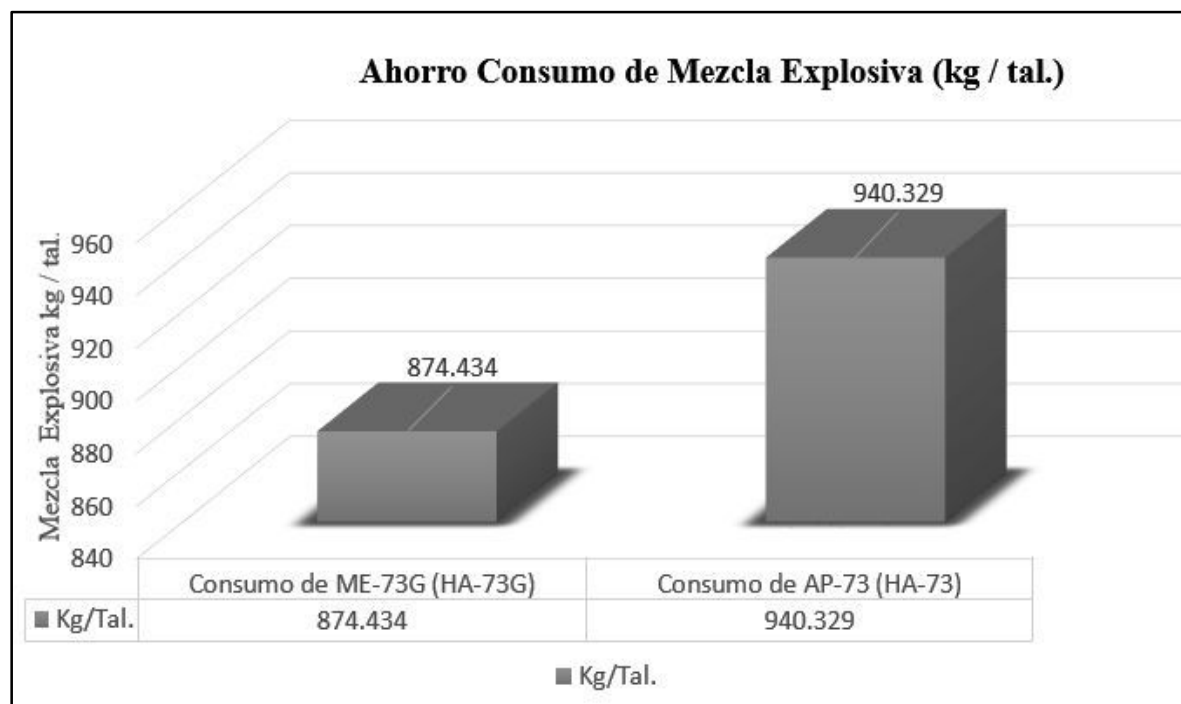
**Cuadro N° 54:** Ahorro consumo de mezcla explosiva por taladro.

Mezcla explosiva	Altura de taladro (m)	Proyecto	Consumo de mezcla explosiva kg / taladro	Ahorro mezcla explosiva kg / taladro
Heavy ANFO (HA-73)	16.5	3655-228	940.329	7%
Mezcla explosiva gasificada (HA-73G)	16.5	3655-227	874.434	
Heavy ANFO (HA-73)	16.2	3770-235	911.334	7%
Mezcla explosiva gasificada (HA-73G)	16.2	3770-234	846.393	

**Fuente:** Elaboración propia.

Se tiene en el gráfico N° 57, el análisis de ahorro por taladro cargado con mezcla explosiva gasificada (HA-73G) frente al AP-73 (HA-73) en los dos proyectos de voladura 3655: 227-228 pág. 104,121 y 3770: 234-235 pág. 129 y 145.

**Gráfico N° 57:** Ahorro Consumo de Mezcla Explosiva (kg / tal.) 2018.



**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

Tras realizar la obtención, estudio y comprensión de los resultados finales obtenidos en campo y gabinete de la optimización de la voladura primaria aplicando la mezcla explosiva gasificada, se llega a las siguientes conclusiones:

- Con la aplicación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G), se obtuvieron mejores resultados en la optimización del diseño de voladura primaria en términos de fragmentación y uniformidad, el P80 disminuyó en un 22.79 % comparado con los resultados de los análisis obtenidos en los meses de octubre, noviembre y diciembre del 2017 y en comparación a la mezcla AP-73 (HA-73) durante los meses de enero a marzo se obtuvieron una disminución del 28.075%. Además en proporción directa a la mejora de fragmentación también se optimizó la velocidad de minado de los equipos de carguío en las tres zonas designadas en un 13%.
- Con el uso de Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G) se logró un ahorro de: \$ 48,004.616 en el consumo de dicha mezcla, en los tres primeros meses de enero a marzo del 2018 respecto al costo total que genera el uso del explosivo del proveedor actual.
- Se realizaron monitoreo de vibraciones en campo lejano a 200m y 300m de las comunidades. La vibración máxima fue de 12.05mm/s, lo que determina que no hubo daños a las viviendas de las comunidades estando el índice dentro de los límites permisibles.
- La optimización de la fragmentación es reflejado en el rendimiento de los equipos de carguío que alcanzaron un incremento del 7.87 % afectado por las pruebas realizadas con la “Mezcla Explosiva Gasificada (HA-73G)” durante los meses de enero a marzo del 2018, manteniéndose en un valor promedio de 5,578 tons/hr.
- La fragmentación promedio del P80 para zonas de mineral es de 2.43 pulgadas y para zonas de desmonte es de 4.41 pulgadas, las cuales se encuentran dentro de los KPIs exigidos por mina.
- El mejor performance de la velocidad de detonación aplicando la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) se da en densidad de 1,15gr/cc donde las burbujas de nitrógeno que sensibilizan al explosivo son más estables, por ende en esta densidad se logra la mayor energía de presión en el explosivo. Con respecto a Heavy ANFO (HA-73) la mezcla explosiva gasificada tiene en un 21 % mayor velocidad de detonación.
- Los resultados obtenidos de la frecuencia de vibraciones de toda las voladuras realizadas en la etapa de pruebas se encuentran dentro del rango permisible de acuerdo a la norma USBM RI8507, alcanzando un valor máximo de 20.030 HZ a una distancia de 923 m , obteniendo un valor de la velocidad pico partícula de 398 mm/s.



- Los niveles de intensidad de ruido se mantienen en el nivel de Precaución (<128 db a 136 db), generado ocasionalmente por los disparos secundarios por el uso de cordón detonante.
- Durante las pruebas realizadas en los meses de enero a marzo del 2018 de 10,064 taladros de los proyectos disparados con AP (HA-73) en un 27.54 % se generaron Gases nitrosos en exceso, sin embargo desde el consumo de la mezcla explosiva gasificada ME-73G durante las pruebas en 8,139 taladros de los proyectos disparos solo en un 2.08 % se presenciaron gases nitrosos.
- Los gases nitrosos promedio, producto de las voladuras fue 0%, durante los tres meses usando la mezcla explosiva gasificada, es debido al control de densidad de la mezcla explosiva gasificada y que en su formulación química el nitrógeno presente en la mezcla pasa a ser nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) siendo este estable y no generando los óxidos nitrosos ni carbonosos, los valores obtenidos con el equipo detector multigás para los tres tipos de gases se encuentran dentro del rango establecido como límite permisible.
- Se obtuvo 98.50 % de disponibilidad mecánica de los camiones mezcladores y una utilización de 41.90 % optimizando tiempos operativos durante el proceso de carguío de taladros con la aplicación de la mezcla explosiva gasificada (HA-73).
- Durante las pruebas realizadas tuvimos cero Back UP con la utilización de la mezcla explosiva gasificada, esta cantidad de Back Up nos indica un porcentaje de incidencia de 0.0%.
- El consumo de mezcla explosiva gasificada (HA-73G) por taladro en comparación al AP-73 (HA-73) es menor en un 7%.
- El ahorro por taladro cargado con mezcla explosiva gasificada (HA-73G) fue de \$ 12.187 y 0,006 \$/TM de tonelaje roto.
- El ahorro total por tonelaje roto en los tres meses de pruebas enero a marzo del 2018 es de \$ 84,457.405.
- Se generó un ahorro de combustible con la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) del 7% menos en comparación al Heavy ANFO (HA-73).
- No se registró incidentes de trabajo durante los meses de enero a marzo del 2018 durante las pruebas realizadas.



## RECOMENDACIONES

Implementando el uso de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G) como alternativa y que garantiza la optimización de las operaciones unitarias de perforación y voladura dentro de la Unidad Minera Las Bambas, se procede a recomendar lo siguiente:

- Se debe estandarizar el uso de la mezcla explosiva gasificada después de haber realizado las pruebas para obtener buenos resultados en fragmentación; y de esta manera optimizar los rendimientos de carguío, acarreo, operaciones unitarias de perforación y voladura y minimizar costos generando la rentabilidad de la empresa minera.
- Antes de realizar el diseño de carguío con mezcla explosiva gasificada para voladuras primarias y controladas se debe conocer la caracterización geo-mecánica del macizo rocoso; ya que en el tajo Ferrobamba se cuenta con cinco tipos de dureza de rocas.
- Se debe determinar en gabinete y campo las densidades a utilizar de acuerdo a la información proporcionada por el área de geotecnia y geo-mecánica sobre las condiciones insitu del proyecto de voladura.
- Replantear en campo en situaciones críticas el carguío de taladros en cresta o contorno y evitar la generación de fly rock.
- Realizar periódicamente el control adecuando de la calibración de los camiones mezcladores en campo de todo los agentes que componen la mezcla explosiva, para garantizar que no exista un desbalance de oxígeno pudiendo generar la aparición de gases nitrosos.
- Revisar el contador de petróleo y calcular el % de diésel.
- Sacar la densidad en el 2do o 3er taladro.
- Una vez cargado los taladros con mezcla explosiva gasificada esperar 20 minutos antes de tapar el taladro y así generar la contaminación de dicha mezcla.
- Durante el tapado de taladros con material de taco (grava), continuar con la utilización del tubo pvc de 6m para garantizar de que no se generen Back UP.



## BIBLIOGRAFÍA

- DYNO CONSULT. 2009. "Curso de Vibraciones". Lima - PERU : s.n., Mayo de 2009, Entrenamiento del Valor Agregado Compañía Minera Manto de Oro.
- INGEMMET. 2009. "Mapa Metalogénico del Peru". Lima : s.n., 2009, Instituto Geologico Minero y Metalurgico INGEMMET, pág. 6.
- AGREDA URIARTE, Carlos. 2013. "Análisis y Control de Vibraciones en Voladura". Lima : s.n., 2013.
- AGREDA URIARTE, Carlos. 1993. "Curso de Modelamiento Matemático de la voladura de rocas". Lima : s.n., 1993.
- AGREDA URIARTE, Carlos. 2001. "Voladura Controlada Teorías y Aplicaciones". Lima - Perú : s.n., 2001.
- ARANIVAR, Jaime. 2014. MANUAL DE APLICACIÓN DE EXPLOSIVOS GASIFICABLES - EXSA S.A. Lima. Lima - Perú : s.n., 2014. pág. 18, Técnico.
- BENÍTEZ GONZALES, Norma Angélica . 2011. TESIS "Medición y análisis de señales de vibraciones mecánicas y su efecto en la salud y el confort" - Instituto Politécnico Nacional. Diciembre de 2011.
- BERNAOLA Alonso, Jose, GOMEZ, Jorge CASTILLA y Herbert, Juan HERRERA. 2013. Perforacion y Voladura de Rocas en Minería- Universidad Politecnica de Madrid, Departamento de Explotacion de Recursos Minerales y Obras Subterranas. Madrid : s.n., 2013.
- CAMPOS PUCUHUANCA, Gregory. 2016. "Curso de Explosivos y Voladura CHINALCO": ORICA MINIG SERVICES. "Curso de Explosivos y Voladura CHINALCO": <https://dokumen.tips/documents/curso-de-explosivos-y-voladura-chinalco.html>.
- CARAZO, Nicolas. 2012. NC Arquitectura. 14 de Marzo de 2012. <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>.
- CINTEX. 2006. "Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento". Lima : s.n., 2006.
- CONTRERAS PÉREZ, Willy José. 2009. Tesis "SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO ADECUADO Y CARGA MÁXIMA POR RETARDO USANDO EL MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES" - "Aplicación en minas Ares". Tesis "SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO ADECUADO Y CARGA MÁXIMA POR RETARDO USANDO EL MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES" - "Aplicación en minas Ares". 2009. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/663>.
- D & E Desarrollo y Ecología S.A.C. 2006. MODIFICACIÓN DEL PROYECTO DE EXPLORACIÓN LAS BAMBAS. Enero de 2006.
- DetNet. 2007. "MANUAL DE ENTRENAMIENTO PARA USUARIOS", DigiShot Plus. South Africa : s.n., 2007.
- ENAEX. 2018. Iniciador APD Booster. Iniciador APD Booster. [https://www.enaex.com/wp-content/uploads/2018/02/Folleto-APD-Booster\\_Original-FINAL.pdf](https://www.enaex.com/wp-content/uploads/2018/02/Folleto-APD-Booster_Original-FINAL.pdf).
- ESCOBAR SÁNCHEZ, Jair Elvis. 2013. "Normativa Internacional Aplicada a las Vibraciones", EXSA S.A. Yanacocha - Cajamarca : s.n., 2013.
- EXSA S.A. 2011. Manual Practico de Voladura. Lima : Especial, 2011.
- EXSA S.A. 2016. "Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro". 02. Lima : s.n., 2016.
- EXSA S.A. 2017. Productos de Exsa. 2017. <https://www.exsa.net/es/productos/slurrex-g>.
- HONEYWELL. 2018. Detector Multigás - GasAlertMicro 5. Detector Multigás - GasAlertMicro 5.. <https://www.honeywellanalytics.com/en/products/GasAlertMicro-5-Series>.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. 2004. "Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería" / Estudios y Proyectos Mineros, S.A. . Madrid : Gráficas Chile, S.A.L., 2004. 84-7840-019-2.
- KONYA J, Calvin y ALBARRÁN N., Enrique. 1998. Diseño de Voladuras. Madrid : Cuicatl, 1998. pág. 253. 9709207601, 9789709207606.



- LAS BAMBAS. 2018. Hstoria las Bambas. Hstoria las Bambas. <http://www.lasbambas.com/historia>.
- LAS BAMBAS MMG LIMITED. 2018. Conociendo Las Bambas. <http://www.lasbambas.com/conociendo-las-bambas>.
- LLACMA LLALLACACHI, Oscar Magno Jesus. 2017. "Evaluación Técnico Económica con el Uso de Emulsión Gasificada en Voladura Mina Cuajone", Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa : s.n., 2017.
- LOPEZ JIMENO, Carlos, LOPEZ JIMENO, Emilio y GARCIA BERMUDEZ, Pilar. 2003. MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS. MADRID : CARLOS LOPEZ JIMENO, 2003. pág. 778. 9788496140035.
- Melieh, Mahmut, Adnan, I, Y, K. 2009. Evaluación del efecto de vibración del suelo de las operaciones de voladura en una mina de magnesita. Dinámica de Suelos y Engines de Terremotos. Turquía. 2009.
- MINE CLASS - Educación Online. 2019. Minería Cielo Abierto - Mine Class.com. <https://mine-class.com/course/mineria-cielo-abierto/>.
- MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. 2016. D.S.N°024-2016-EM-MINEM. D.S.N°024-2016-EM-MINEM. [http://www.minem.gob.pe/\\_detalle.php?idSector=1&idTitular=7483](http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=7483).
- MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. 1995. GUIA AMBIENTAL PARA LA PERFORACIÓN Y VOLADURA EN OPERACIONES MINERAS - Dirección General de Asuntos Ambientales. GUIA AMBIENTAL PARA LA PERFORACIÓN Y VOLADURA EN OPERACIONES MINERAS - Dirección General de Asuntos Ambientales. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/compendio-perfora.pdf>.
- MREL GROUP OF COMPANIES LIMITED. 2013. MICROTRAP VOD/DATA RECORDER - Manual de Operaciones. MICROTRAP VOD/DATA RECORDER - Manual de Operaciones. [http://mrel.com/blasting\\_instrumentation/files/manuals/MicroTrap\\_Operations\\_Manual\\_Spanish.pdf](http://mrel.com/blasting_instrumentation/files/manuals/MicroTrap_Operations_Manual_Spanish.pdf).
- NUÑEZ FLORES, María Isabel. 2007. Investigacion Educativa. Las Variables: Estructura y Función en la Hipótesis. Lima-Perú : s.n., 2007. Vol. vol.11, N° 20, Pag. 163-179.
- ORIHUELA CASTILLO, Stefanie Marybell. 2009. "Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de Vibraciones en una Mina Modelo". Lima : s.n., 2009.
- PANTOJA MAYTA, Luis Alberto. 2013. "EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN TAJO ABIERTO Y LA PRODUCTIVIDAD EN CASTROVIRREYNA. [https://www.google.com.pe/search?dcr=0&biw=1366&bih=613&ei=nWs5WtT\\_C8qQmQHX\\_4O4CA&q=como+se+efectuan+las+operaciones+en+una+mina+a+tajo+abierto&oq=como+se+efectuan+las+operaciones+en+una+mina+a+tajo+abierto&gs\\_l=psy-ab.3...10028.48679.0.49080.63.49.1.10.1](https://www.google.com.pe/search?dcr=0&biw=1366&bih=613&ei=nWs5WtT_C8qQmQHX_4O4CA&q=como+se+efectuan+las+operaciones+en+una+mina+a+tajo+abierto&oq=como+se+efectuan+las+operaciones+en+una+mina+a+tajo+abierto&gs_l=psy-ab.3...10028.48679.0.49080.63.49.1.10.1).
- REYES JIMÉNEZ, Héctor Augusto. 2011. Tesis de Grado "ESTUDIO Y PLAN DE MITIGACIÓN DEL NIVEL DE RUIDO AMBIENTAL EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE PUYO" - Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Facultad de Ciencias - Riobamba - Ecuador. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2009/1/236T0064.pdf>.
- RIVERA, Luis. 2015. Las Bambas: PERUMIN 32 CONVENCION MINERA - TOP MINING IN PERÚ. Arequipa : s.n., 2015.
- SENCICO. 2016. "MODELO MATEMATICO E INFORME DE VULNERABILIDAD SISMICA EN EL MARCO DEL PROYECTO DE INVERSIN PUBLICA: "INSTALACION DEL LABORATORIO DE ESTRUCTURAS - SENCICO, EN LOS DISTRITOS DE SANTA MARIA DEL MAR Y PUCUSANA, PROVINCIA DE LIMA , DEPARTAMENTO DE LIMA". SENCICO. Lima : s.n., 2016. Técnico.
- SPLIT ENGINEERING. 2018. Split-Desktop Download. <https://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/>.
- VILELA SANGAY, Wilson Paúl . 2014. "ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ANFO PESADO A BASE DE EMULSIÓN GASIFICABLE EN MINERA YANACOA": Tesis PUCP. "ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ANFO



PESADO A BASE DE EMULSIÓN GASIFICABLE EN MINERA YANACOCHA": Tesis PUCCP. Diciembre de 2014.[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5950/VILELA\\_WILSON\\_ANALISIS\\_DE\\_FACTIBILIDAD\\_PARA\\_EL\\_USO\\_DE\\_ANFO\\_PESADO.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5950/VILELA_WILSON_ANALISIS_DE_FACTIBILIDAD_PARA_EL_USO_DE_ANFO_PESADO.pdf?sequence=1).

- VILLEGAS CORDOVA, May Donovan. 2016. "IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA YO ASEGURO BASADO EN EL COMPORTAMINETO HUMANO PARA LA REDUCCIÓN DE ACCIDENTES - ALS PERÚ - LAS BAMBAS. Arequipa : s.n., 2016.
- WIKIPEDIA. 2018. Mineral - Wikipedia, la enciclopedia libre. Mineral - Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Mineral>.
- WIKIPEDIA. 2018. Software - Wikipedia, la enciclopedia libre. Software - Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Software>.



# ANEXOS



## ANEXOS

## ANEXO. I: CONSUMO DE EXPLOSIVO, AGENTES DE VOLADURA Y TONELAJE ROTO.

N°	Fecha Disparo	Proyecto /Nivel	(*) Consumos					(*) Factores	
			ME-73G (HA-73) (kg)	Slurrex G (kg)	Nitrato de Amonio (kg)	Combustible (Petróleo) (kg)	Solución Gasificante (Nitrito) (gal)	Factor de Potencia (kg/Ton)	Toneladas Rotas
1	05-En-18	3610 - 212	121,070.608	84,749.426	34,141.911	2,179.271	59.604	0.483	250,727.400
2	06-En-18	3640 - 214	113,580.855	79,506.599	32,029.802	2,044.455	55.917	0.415	273,648.375
3	07-En-18	3785 - 221	114,054.400	79,838.080	32,163.341	2,052.979	56.149	0.476	239,500.800
4	09-En-18	3595- 222	118,166.928	82,716.849	33,323.073	2,127.005	58.174	0.478	246,985.200
5	15-En-18	3655 - 227	41,972.832	29,380.983	11,836.338	755.511	20.664	0.451	33,264.000
6	18-En-18	3655 - 229	130,853.380	91,597.366	36,900.653	2,355.361	64.420	0.479	273,180.600
7	19-En-18	3670 - 231	140,222.876	98,156.013	39,545.851	2,524.012	69.032	0.477	293,762.700
8	20-En-18	3595- 233	124,468.559	87,127.991	35,100.134	2,240.434	61.277	0.472	260,627.220
9	21-En-18	3770 - 234	53,322.759	37,325.931	15,037.018	959.810	32.814	0.461	42,865.200
10	25-En-18	3800 - 238	112,769.682	78,938.777	31,801.051	2,029.854	55.517	0.480	234,749.340
11	28-En-18	3655- 242	122,153.121	85,507.185	34,447.179	2,198.756	60.137	0.469	260,366.400
12	01-Feb-18	3625 - 243	114,320.256	80,024.179	32,238.312	2,057.765	56.281	0.414	276,307.200
13	02-Feb-18	3825 - 251	112,272.300	78,590.610	31,661.729	2,020.961	55.273	0.459	244,490.400
14	05-Feb-18	3640 - 253	121,059.982	84,711.987	34,138.915	2,179.079	59.599	0.419	287,100.450
15	07-Feb-18	3610 - 257	117,950.597	82,565.418	33,262.068	2,123.111	58.068	0.466	252,252.000
16	09-Feb-18	3785 - 264	111,917.958	78,342.571	31,560.864	2,014.523	55.098	0.468	237,222.720
17	10-Feb-18	3815 - 266	123,905.591	86,733.914	34,941.376	2,230.301	60.999	0.467	263,894.400
18	12-Feb-18	3770 - 268	101,431.975	71,002.383	28,603.818	1,825.776	49.936	0.465	217,324.800
19	15-Feb-18	3755 - 271	126,757.294	88,730.106	35,745.557	2,281.631	62.404	0.422	298,222.012
20	22-Feb-18	3640 - 272	126,953.676	88,867.573	35,800.937	2,285.166	62.500	0.471	270,280.080
21	26-Feb-18	3655 - 275	105,346.371	73,742.460	29,707.676	1,896.235	51.863	0.460	228,967.200
22	01-Mar-18	3610 - 277	88,505.450	61,953.815	24,958.537	1,593.098	43.572	0.482	183,367.800
23	02-Mar-18	3845 - 278	94,076.970	65,853.879	26,529.706	1,693.385	52.104	0.421	223,130.752
24	05-Mar-18	3785 - 280	81,465.502	57,025.851	22,973.272	1,466.379	45.119	0.466	174,636.000
25	07-Mar-18	3625 - 283	102,868.613	72,008.028	29,008.949	1,851.635	56.973	0.485	212,012.640
26	09-Mar-18	3610 - 285	95,832.981	67,083.086	27,024.900	1,724.994	53.077	0.488	195,932.520
27	11-Mar-18	3595 - 287	84,878.380	59,414.866	23,935.703	1,527.811	47.010	0.417	203,036.898
28	14-Mar-18	3595- 288	99,165.733	69,416.012	27,964.737	1,784.983	54.923	0.427	237,451.500
29	15-Mar-18	3640 - 290	85,685.863	59,980.104	24,163.414	1,542.346	47.457	0.464	184,338.000
30	19-Mar-18	3785 - 294	98,322.722	68,825.905	27,726.207	1,769.809	54.456	0.420	233,858.192
31	24-Mar-18	3875 - 297	82,302.559	57,611.791	23,209.321	1,481.446	45.583	0.472	174,436.080
32	27-Mar-18	3580- 300	102,264.552	71,585.186	28,838.603	1,840.762	56.639	0.418	243,927.450
33	29-Mar-18	3640 - 302	92,331.611	64,632.127	26,037.514	1,661.969	51.138	0.416	197,920.800
34	30-Mar-18	3595- 305	96,681.064	67,676.744	27,264.060	1,740.259	53.546	0.423	228,158.775
<b>Total Enero-Marzo 2018</b>			<b>3,558,934.000</b>	<b>2,402,356.22</b>	<b>1,003,622.526</b>	<b>64,060.872</b>	<b>1,827.323</b>	<b>0.454</b>	<b>7,677,945.904</b>

(\*) Consumo de mezcla explosiva mensual (Dato del Área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO. II: CONSUMO DE ACCESORIOS DE VOLADURA.

(*) Datos de la Malla - Proyectos de Voladura				(*) Consumo de Accesorios			(*) Consumo Mezcla Explosiva
Fecha de Disparo	Proyecto / Nivel	Taladros Disparados	Malla (BxE)	Detonador Exanel (unidad)	Booster 2 Lb (unidad)	Detonador Electrónico Digishot (unidad)	ME-73G (HA-73G) (kg)
05-En-18	3610 - 212	134	6 x 7	134	134	134	121,070.608
06-En-18	3640 - 214	126	6.5 x 7.5	126	126	127	113,580.855
07-En-18	3785 - 221	128	6 x 7	128	128	130	114,054.400
09-En-18	3595 - 222	132	6 x 7	132	132	133	118,166.928
15-En-18	3655 - 227	48	6 x 7	48	48	49	41,972.832
18-En-18	3655 - 229	146	6.5 x 7.5	146	146	147	130,853.380
19-En-18	3670 - 231	157	6 x 7	157	157	158	140,222.876
20-En-18	3595 - 233	141	6 x 7	141	141	142	124,468.559
21-En-18	3770 - 234	63	6 X 7	63	63	64	53,322.759
25-En-18	3800 - 238	127	6 X 7	254	254	256	112,769.682
28-En-18	3655 - 242	140	6 X 7	140	140	142	122,153.121
01-Feb-18	3625 - 243	128	6.5 x 7.5	128	128	130	114,320.256
02-Feb-18	3825 - 251	126	6 x 7	126	126	127	112,272.300
05-Feb-18	3640 - 253	133	6.5 x 7.5	133	133	134	121,059.982
07-Feb-18	3610 - 257	130	6 x 7	130	130	131	117,950.597
09-Feb-18	3785 - 264	123	6 X 7	123	123	124	111,917.958
10-Feb-18	3815 - 266	136	6 X 7	272	272	273	123,905.591
12-Feb-18	3770 - 268	112	6.5 x 7.5	112	112	113	101,431.975
15-Feb-18	3755 - 271	139	6.5 x 7.5	139	139	140	126,757.294
22-Feb-18	3640 - 272	141	6 X 7	141	141	142	126,953.676
26-Feb-18	3655 - 275	118	6 x 7	118	118	119	105,346.371
01-Mar-18	3610 - 277	98	6 x 7	98	98	100	88,505.450
02-Mar-18	3845 - 278	104	6.5 x 7.5	208	208	209	94,076.970
05-Mar-18	3785 - 280	90	6 X 7	90	90	91	81,465.502
07-Mar-18	3625 - 283	114	6 X 7	114	114	114	102,868.613
09-Mar-18	3610 - 285	106	6 X 7	106	106	107	95,832.981
11-Mar-18	3595 - 287	94	6.5 x 7.5	94	94	95	84,878.380
14-Mar-18	3595 - 288	110	6.5 x 7.5	110	110	111	99,165.733
15-Mar-18	3640 - 290	95	6 X 7	95	95	96	85,685.863
19-Mar-18	3785 - 294	109	6.5 x 7.5	109	109	110	98,322.722
24-Mar-18	3875 - 297	91	6 x 7	91	91	92	82,302.559
27-Mar-18	3580 - 300	113	6.5 x 7.5	113	113	115	102,264.552
29-Mar-18	3640 - 302	102	6.5 x 7.5	102	102	103	92,331.611
30-Mar-18	3595 - 305	107	6.5 x 7.5	107	107	109	96,681.064
<b>Total</b>		<b>3961</b>		<b>4,328</b>	<b>4,328</b>	<b>4367</b>	<b>3,558,934.000</b>

(\*) Consumo de Accesorios de voladura (Datos del Área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

Fuente: Elaboración propia.



**ANEXO. III: CONTROL DE DENSIDAD EN CAMPO DE LOS PROYECTOS DE VOLADURA.**

N°	Fecha de Voladura	Banco /Proyecto	Tipo de Roca	ME-73G (HA-73G) (kg)	Densidad Final Explosivo (gr/cc)
1	05-En-18	3610 - 212	MZ/EDSK	121,070.608	1.124
2	06-En-18	3640 - 214	MZ/EDSK	113,580.855	1.120
3	07-En-18	3785 - 221	MZ/EDSK	114,054.400	1.118
4	09-En-18	3595- 222	SKARN/S	118,166.928	1.127
5	15-En-18	3655 - 227	SKARN/S	41,972.832	1.136
6	18-En-18	3655 - 229	SKARN/S	130,853.380	1.125
7	19-En-18	3670 - 231	SKARN/S	140,222.876	1.138
8	20-En-18	3595- 233	SKARN/S	124,468.559	1.126
9	21-En-18	3770 - 234	MZ/EDSK	53,322.759	1.118
10	25-En-18	3800 - 238	M/MZ-MF-EDSK	112,769.682	1.150
11	28-En-18	3655- 242	SKARN/S	122,153.121	1.131
12	1-Feb-18	3625 - 243	SKARN/S	114,320.256	1.126
13	2-Feb-18	3825 - 251	M/MZ-MF-EDSK	112,272.300	1.148
14	5-Feb-18	3640 - 253	SKARN/S	121,059.982	1.132
15	7-Feb-18	3610 - 257	SKARN/S	117,950.597	1.123
16	9-Feb-18	3785 - 264	MZ/EDSK	111,917.958	1.140
17	10-Feb-18	3815 - 266	M/MZ-MF-EDSK	123,905.591	1.150
18	12-Feb-18	3770 - 268	MZ/EDSK	101,431.975	1.134
19	15-Feb-18	3755 - 271	MZ/EDSK	126,757.294	1.142
20	22-Feb-18	3640 - 272	SKARN/S	126,953.676	1.126
21	26-Feb-18	3655 - 275	SKARN/S	105,346.371	1.132
22	1-Mar-18	3610 - 277	SKARN/S	88,505.450	1.120
23	2-Mar-18	3845 - 278	M/MZ-MF-EDSK	94,076.970	1.150
24	5-Mar-18	3785 - 280	MZ/EDSK	81,465.502	1.134
25	7-Mar-18	3625 - 283	SKARN/S	102,868.613	1.144
26	9-Mar-18	3610 - 285	SKARN/S	95,832.981	1.132
27	11-Mar-18	3595 - 287	SKARN/S	84,878.380	1.126
28	14-Mar-18	3595- 288	SKARN/S	99,165.733	1.134
29	15-Mar-18	3640 - 290	SKARN/S	85,685.863	1.126
30	19-Mar-18	3785 - 294	MZ/EDSK	98,322.722	1.140
31	24-Mar-18	3875 - 297	M/MZ-MF-EDSK	82,302.559	1.146
32	27-Mar-18	3580- 300	SKARN/S	102,264.552	1.126
33	29-Mar-18	3640 - 302	SKARN/S	92,331.611	1.122
34	30-Mar-18	3595- 305	SKARN/S	96,681.064	1.115

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas)

## ANEXO. IV: REPORTE VELOCIDAD DE DETONACIÓN Y PRESIÓN DE DETONACIÓN.

Fecha	Zona	Proyecto / Nivel	ID Taladro	Explosivo	Densidad Final (gr/cc)	Profundidad (m)	Long. Carga (m)	Long. Taco (m)	(*)VOD (m/s)	(*) Presión de Detonación (Mpa)
05-En-18	Jahuapaylla Baja	3610 - 212	845	ME-73G	1.124	16.5	9.5	7	5648	7975
15-En-18	Jahuapaylla Baja	3655 - 227	28	ME-73G	1.136	16.5	9.5	7	5425.3	7354
19-En-18	Jahuapaylla Baja	3670 - 231	1356	ME-73G	1.138	16.3	9.3	7	5449	7423
21-En-18	Mini Tajo	3770 - 234	2796	ME-73G	1.118	16.2	9.2	7	5396.8	7323
25-En-18	Jahuapaylla Alta	3800 - 238	615	ME-73G	1.150	16.5	9.5	7	5689.5	9032
1-Feb-18	Jahuapaylla Baja	3625 - 243	912	ME-73G	1.126	16.4	9.4	7	5402	7517
2-Feb-18	Jahuapaylla Alta	3825 - 251	1041	ME-73G	1.148	16.7	9.5	7.2	5658	8993
9-Feb-18	Mini Tajo	3785 - 264	1287	ME-73G	1.140	16.5	9.5	7	5588.7	8734
12-Feb-18	Mini Tajo	3770 - 268	1395	ME-73G	1.134	16.4	9.4	7	5452	7468
26-Feb-18	Jahuapaylla Baja	3655 - 275	1456	ME-73G	1.132	16.6	9.6	7	5468	7692
1-Mar-18	Jahuapaylla Baja	3610 - 277	1677	ME-73G	1.120	16.5	9.5	7	5410	7341
7-Mar-18	Jahuapaylla Baja	3625 - 283	1823	ME-73G	1.144	16.2	9.2	7	5525	8678
14-Mar-18	Jahuapaylla Baja	3595- 288	2084	ME-73G	1.134	16.5	9.5	7	5485.3	7726
24-Mar-18	Jahuapaylla Alta	3875 - 297	2245	ME-73G	1.146	16.5	9.5	7	5622	8785
29-Mar-18	Jahuapaylla Baja	3640 - 302	2478	ME-73G	1.122	16.6	9.6	7	5564	7963
30-Mar-18	Jahuapaylla Baja	3595- 305	2644	ME-73G	1.115	16.5	9.5	7	5367	7306

(\*) Datos del Área de Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas.

Fuente: Elaboración propia.



**ANEXO. V: REGISTRO DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA Y FRECUENCIA DE VIBRACIONES.**

Fecha	Banco /Proy.	N° Tal .	Frecuencia Dominante (HZ)	Distancia (m)	Carga Operante (kg)	Registro PPV (mm/s)	VPP a 500m (mm/s)		Punto de Monitoreo
							Dupont	Exsa	
05-En-18	3610 - 212	134	5.500	872	903.512	4.85	10.6	10.3	Camp. Pionero
06-En-18	3640 - 214	126	5.200	713	901.435	6.14	10.3	10.1	Camp. Pionero
07-En-18	3785 - 221	128	6.400	1,068	895.204	2.40	9.5	9.5	Comund. Taquiruta
09-En-18	3595- 222	132	4.500	950	891.050	3.67	10.5	10.3	Camp. Pionero
15-En-18	3655 - 227	48	7.500	980.5	874.434	3.141	11.3	10.9	Comund. Taquiruta
18-En-18	3655 - 229	146	6.500	812	896.243	8.32	11.3	10.9	Tramo I
19-En-18	3670 - 231	157	8.000	902	893.127	4.67	10.4	10.2	Comund. Taquiruta
20-En-18	3595- 233	141	8.300	868	882.742	4.78	10.7	10.4	Camp. Pionero
21-En-18	3770 - 234	63	7.300	836	846.393	11.03	11.4	10.6	Comund. Taquiruta
25-En-18	3800 - 238	127	5.900	1,002	887.935	5.7	9.2	9.2	Comund. Taquiruta
28-En-18	3655- 242	140	12.160	807	872.357	5.43	10.6	10.3	Camp. Pionero
1-Feb-18	3625 - 243	128	4.400	1,427	893.202	1.2	11	10.6	Comund. Taquiruta
2-Feb-18	3825 - 251	126	6.100	940	891.342	5.22	10.6	10.3	Tramo I
5-Feb-18	3640 - 253	133	7.125	862	901.235	6.13	10.6	10.3	Camp. Pionero
7-Feb-18	3610 - 257	130	19.980	1,035	898.319	7.04	10.6	10.3	Comund. Taquiruta
9-Feb-18	3785 - 264	123	20.030	923	900.397	2.07	10.4	10.2	Camp. Pionero
10-Feb-18	3815 - 266	136	16.650	1,247	902.474	1.3	10.3	10.1	Comund. Taquiruta
12-Feb-18	3770 - 268	112	12.194	1,068	895.204	1.45	11.3	10.9	Comund. Taquiruta
15-Feb-18	3755 - 271	139	5.313	894	903.423	2.75	9.8	9.7	Camp. Pionero
22-Feb-18	3640 - 272	141	8.250	1,145	892.089	3.21	10.4	10.2	Camp. Pionero
26-Feb-18	3655 - 275	118	6.380	905	885.858	2.79	9.5	9.5	Tramo I
1-Mar-18	3610 - 277	98	10.510	1,413	902.456	1.17	9.2	9.2	Comund. Taquiruta
2-Mar-18	3845 - 278	104	5.100	1,048	903.129	8.37	10.4	10.2	Comund. Taquiruta
5-Mar-18	3785 - 280	90	6.800	1,024	903.486	1.89	10.4	10.2	Camp. Pionero
7-Mar-18	3625 - 283	114	6.938	844	901.025	2.77	9.6	9.6	Tramo I
9-Mar-18	3610 - 285	106	6.300	1,086	902.653	8.23	10.6	10.3	Camp. Pionero
11-Mar-18	3595 - 287	94	5.330	1,523	901.347	2.88	8.3	8.5	Comund. Taquiruta
14-Mar-18	3595- 288	110	4.730	1,590	900.127	4.67	10.5	10.3	Comund. Taquiruta
15-Mar-18	3640 - 290	95	4.450	1,459	900.360	3.55	9.4	9.4	Comund. Taquiruta
19-Mar-18	3785 - 294	109	5.600	1,423	900.651	1.80	9.8	9.7	Comund. Taquiruta
24-Mar-18	3875 - 297	91	6.250	937	902.757	4.42	11.1	10.7	Tramo I
27-Mar-18	3580- 300	113	6.563	846	903.358	3.18	10.4	10.2	Tramo I
29-Mar-18	3640 - 302	102	6.300	1,085	903.542	8.13	10.6	10.3	Comund. Taquiruta
30-Mar-18	3595- 305	107	7.980	914	902.143	5.61	10.4	10.2	Comund. Taquiruta

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

## ANEXO. VI: REGISTRO MONITOREO DE RUIDO POR VOLADURA.

Fecha	Banco /Proy.	Distancia (m)	Carga Operante (kg)	AIR BLAST	Limite Permissible	Limite	Punto de Monitoreo
				dB(L)	dB	dB	
05-En-18	3610 - 212	872	903.512	109.5	128	136	Camp. Pionero
06-En-18	3640 - 214	713	901.435	107.4	128	136	Camp. Pionero
07-En-18	3785 - 221	1,068	895.204	110.1	128	136	Comunidad. Taquiruta
09-En-18	3595- 222	950	891.050	109.6	128	136	Camp. Pionero
15-En-18	3655 - 227	980.5	874.434	101.4	128	136	Comunidad. Taquiruta
18-En-18	3655 - 229	812	896.243	108.2	128	136	Tramo I
19-En-18	3670 - 231	902	893.127	115.7	128	136	Comunidad. Taquiruta
20-En-18	3595- 233	868	882.742	110.9	128	136	Camp. Pionero
21-En-18	3770 - 234	836	846.393	109.8	128	136	Comunidad. Taquiruta
25-En-18	3800 - 238	1,002	887.935	113.9	128	136	Comunidad. Taquiruta
28-En-18	3655- 242	807	872.357	104.3	128	136	Camp. Pionero
1-Feb-18	3625 - 243	1,427	893.202	100	128	136	Comunidad. Taquiruta
2-Feb-18	3825 - 251	940	891.342	106.2	128	136	Tramo I
5-Feb-18	3640 - 253	862	901.235	118.4	128	136	Camp. Pionero
9-Feb-18	3785 - 264	923	900.397	116.9	128	136	Camp. Pionero
12-Feb-18	3770 - 268	1,068	895.204	115.8	128	136	Comunidad. Taquiruta
15-Feb-18	3755 - 271	894	903.423	110.5	128	136	Camp. Pionero
22-Feb-18	3640 - 272	1,145	892.089	104.7	128	136	Camp. Pionero
26-Feb-18	3655 - 275	905	885.858	110.9	128	136	Tramo I
1-Mar-18	3610 - 277	1,413	902.456	103.8	128	136	Comunidad. Taquiruta
5-Mar-18	3785 - 280	1,024	903.486	114.1	128	136	Camp. Pionero
9-Mar-18	3610 - 285	1,086	902.653	110.4	128	136	Camp. Pionero
14-Mar-18	3595- 288	1,590	900.127	115.2	128	136	Comunidad. Taquiruta
19-Mar-18	3785 - 294	1,423	900.651	111.1	128	136	Comunidad. Taquiruta
24-Mar-18	3875 - 297	937	902.757	117.3	128	136	Tramo I
27-Mar-18	3580- 300	846	903.358	113.6	128	136	Tramo I
29-Mar-18	3640 - 302	1,085	903.542	110.8	128	136	Comunidad. Taquiruta
30-Mar-18	3595- 305	914	902.143	107.9	128	136	Comunidad. Taquiruta

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

## ANEXO. VII: MONITOREO DE GASES CON EL EQUIPO DETECTOR MULTIGÁS.

Fecha Disparo	Proyecto /Nivel	Tipo de Roca	ME-73G (HA-73G) (kg)	OXY (%) Min.	OXY (%) Max.	H2S (ppm) (Avg)	H2S (ppm) (Max.)	NO2 (ppm) (Avg)	NO2 (ppm) (Max.)	CO2 (ppm) (Avg)	CO2 (ppm) (Max)	Distancia del Equipo (m)
05-En-18	3610 - 212	MZ/EDSK	121,070.608	20.9	20.9	0	0.4	0.0	0.05	180.00	310	80
09-En-18	3595- 222	SKARN/S	118,166.928	20.8	20.8	0	0.1	0.0	0.09	220.00	280	60
15-En-18	3655 - 227	SKARN/S	41,972.832	20.9	20.9	0	0.5	0.0	0.07	190.00	250	50
21-En-18	3770 - 234	MZ/EDSK	53,322.759	21	21.0	0	0.2	0.0	0.08	165.00	310	55
25-En-18	3800 - 238	M/MZ-MF-EDSK	112,769.682	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.04	240.00	310	60
28-En-18	3655- 242	SKARN/S	122,153.121	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.05	290.00	220	53
01-Feb-18	3625 - 243	SKARN/S	114,320.256	20.9	20.9	0	0.2	0.0	0.07	270.00	270	65
05-Feb-18	3640 - 253	SKARN/S	121,059.982	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.10	180.00	220	55
12-Feb-18	3770 - 268	MZ/EDSK	101,431.975	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.05	220.00	270	43
15-Feb-18	3755 - 271	MZ/EDSK	126,757.294	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.15	190.00	290	49
26-Feb-18	3655 - 275	SKARN/S	105,346.371	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.08	165.00	340	43
01-Mar-18	3610 - 277	SKARN/S	88,505.450	20.9	20.9	0	0.2	0.0	0.07	270.00	210	55
11-Mar-18	3595 - 287	SKARN/S	84,878.380	20.9	20.9	0	0.2	0.0	0.09	180.00	250	65
19-Mar-18	3785 - 294	MZ/EDSK	98,322.722	20.9	20.9	0	0.1	0.0	0.03	220.00	320	54
24-Mar-18	3875 - 297	M/MZ-MF-EDSK	82,302.559	20.9	20.9	0	0.7	0.0	0.07	190.00	230	47
30-Mar-18	3595- 305	SKARN/S	96,681.064	20.9	20.9	0	0.2	0.0	0.05	165.00	310	45

Fuente: Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).



## ANEXO. VIII: REGISTRO DE MONITOREO DE GASES NITROSOS POR VOLADURA.

Fecha	Banco /Proy.	N° Tal.	Tipo de Roca	N° Taladros Genera Humos	Nivel de Gases	Porcentaje de Humos	Observaciones
05-En-18	3610 - 212	134	MZ/EDSK	2	1	0.18%	Gases puntuales
06-En-18	3640 - 214	126	MZ/EDSK	0	1	0%	No se generó gases
07-En-18	3785 - 221	128	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
09-En-18	3595- 222	132	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
15-En-18	3655 - 227	48	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
18-En-18	3655 - 229	146	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
19-En-18	3670 - 231	157	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
20-En-18	3595- 233	141	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
21-En-18	3770 - 234	63	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
25-En-18	3800 - 238	127	M/MZ-MF-EDSK	0	0	0%	No se generó gases
28-En-18	3655- 242	140	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
1-Feb-18	3625 - 243	128	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
2-Feb-18	3825 - 251	126	M/MZ-MF-EDSK	0	0	0%	No se generó gases
5-Feb-18	3640 - 253	133	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
7-Feb-18	3610 - 257	130	SKARN/S	1	2	0.11%	Gases puntuales
9-Feb-18	3785 - 264	123	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
10-Feb-18	3815 - 266	136	M/MZ-MF-EDSK	0	0	0%	No se generó gases
12-Feb-18	3770 - 268	112	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
15-Feb-18	3755 - 271	139	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
22-Feb-18	3640 - 272	141	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
26-Feb-18	3655 - 275	118	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
1-Mar-18	3610 - 277	98	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
2-Mar-18	3845 - 278	104	M/MZ-MF-EDSK	0	0	0%	No se generó gases
5-Mar-18	3785 - 280	90	MZ/EDSK	1	1	0.10%	Gases puntuales
7-Mar-18	3625 - 283	114	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
9-Mar-18	3610 - 285	106	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
11-Mar-18	3595 - 287	94	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
14-Mar-18	3595- 288	110	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
15-Mar-18	3640 - 290	95	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
19-Mar-18	3785 - 294	109	MZ/EDSK	0	0	0%	No se generó gases
24-Mar-18	3875 - 297	91	M/MZ-MF-EDSK	0	0	0%	No se generó gases
27-Mar-18	3580- 300	113	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
29-Mar-18	3640 - 302	102	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases
30-Mar-18	3595- 305	107	SKARN/S	0	0	0%	No se generó gases

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).

## ANEXO. IX: REGISTRO DEL ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN POR VOLADURA.

Fecha de Voladura	Banco /Proyecto	Tipo de Roca	Material	Densidad Final Explosivo (gr/cc)	Pasante al 80% P-80(pulg)	Índice de Uniformidad	% Finos	TT(ms) / TF(ms)	Secuencia de Salida	Pala
05-En-18	3610 - 212	MZ/EDSK	Mineral	1.124	2.08	0.81	52.98	8/120	V	Cargador LD001
06-En-18	3640 - 214	MZ/EDSK	Mineral	1.12	2.22	0.91	48.72	7/100	V	Pala 02
07-En-18	3785 - 221	MZ/EDSK	Mineral	1.118	2.14	1.08	45.27	8/120	V	Pala 06
09-En-18	3595- 222	SKARN/S	Mineral	1.127	2.45	0.93	45.40	8/120	V	Pala 01
15-En-18	3655 - 227	SKARN/S	Mineral	1.136	2.69	0.96	39.13	4/127	V	Pala 05
18-En-18	3655 - 229	SKARN/S	Mineral	1.125	2.3	0.79	51.25	7/100	V	Pala 05
19-En-18	3670 - 231	SKARN/S	Mineral	1.138	2.18	1.04	45.93	8/120	V	Pala 03
20-En-18	3595- 233	SKARN/S	Mineral	1.126	2.04	0.89	51.46	7/100	V	Pala 01
21-En-18	3770 - 234	MZ/EDSK	Mineral	1.118	2.02	0.87	52.16	8/100	V	Pala 07
25-En-18	3800 - 238	M/MZ-MF-EDSK	Mineral	1.15	2.46	0.58	59.19	8/101	V	Pala 04
28-En-18	3655- 242	SKARN/S	Mineral	1.131	3.04	1.02	31.78	5/120	V	Pala 05
1-Feb-18	3625 - 243	SKARN/S	Mineral	1.126	2.54	0.69	59.25	7/100	V	Pala 01
2-Feb-18	3825 - 251	M/MZ-MF-EDSK	Mineral	1.148	2.36	1.14	30.44	5/100	V	Pala 04
5-Feb-18	3640 - 253	SKARN/S	Mineral	1.132	2.58	1.05	38.91	7/100	V	Pala 05
7-Feb-18	3610 - 257	SKARN/S	Mineral	1.123	2.52	0.81	46.5	7/100	V	Pala 01
9-Feb-18	3785 - 264	MZ/EDSK	Mineral	1.14	2.32	0.73	64.18	11/120	V	Pala 07
10-Feb-18	3815 - 266	M/MZ-MF-EDSK	Mineral	1.15	2.89	0.88	56.2	8/100	V	Pala 04

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).



Fecha de Voladura	Banco /Proyecto	Tipo de Roca	Material	Densidad Final Explosivo (gr/cc)	Pasante al 80% P-80(pulg)	Índice de Uniformidad	% Finos	TT(ms) / TF(ms)	Secuencia de Salida	Pala
12-Feb-18	3770 - 268	MZ/EDSK	Mineral	1.134	2.91	0.72	43.85	7/120	V	Pala 07
15-Feb-18	3755 - 271	MZ/EDSK	Mineral	1.142	2.18	0.83	54.84	8/120	V	Pala 06
22-Feb-18	3640 - 272	SKARN/S	Mineral	1.126	2.29	1.09	39.32	5/120	V	Pala 05
26-Feb-18	3655 - 275	SKARN/S	Mineral	1.132	2.72	0.84	41.12	8/100	V	Pala 05
1-Mar-18	3610 - 277	SKARN/S	Mineral	1.12	2.28	1.26	45.72	8/101	V	Pala 01
2-Mar-18	3845 - 278	M/MZ-MF-EDSK	Mineral	1.15	3.12	0.88	44.5	5/120	V	Pala 04
5-Mar-18	3785 - 280	MZ/EDSK	Mineral	1.134	2.82	0.95	37.89	7/120	V	Pala 07
7-Mar-18	3625 - 283	SKARN/S	Mineral	1.144	2.25	0.68	39.45	7/100	V	Pala 01
9-Mar-18	3610 - 285	SKARN/S	Mineral	1.132	2.87	0.91	44.87	8/100	V	Pala 01
11-Mar-18	3595 - 287	SKARN/S	Mineral	1.126	2.13	0.77	53.32	7/120	V	Pala 01
14-Mar-18	3595- 288	SKARN/S	Mineral	1.134	2.41	1.03	44.9	8/120	V	Pala 01
15-Mar-18	3640 - 290	SKARN/S	Mineral	1.126	2.28	0.69	54.79	8/120	V	Pala 05
19-Mar-18	3785 - 294	MZ/EDSK	Mineral	1.14	2.36	0.85	49.19	8/120	V	Pala 07
24-Mar-18	3875 - 297	M/MZ-MF-EDSK	Mineral	1.146	3.24	0.82	37.69	5/120	V	Pala 04
27-Mar-18	3580- 300	SKARN/S	Mineral	1.126	2.46	0.67	43.88	7/120	V	Pala 01
29-Mar-18	3640 - 302	SKARN/S	Mineral	1.122	2.15	0.98	48.12	8/120	V	Pala 05
30-Mar-18	3595- 305	SKARN/S	Mineral	1.115	2.08	0.8	54.25	7/100	V	Pala 01

**Fuente:** Elaboración propia (Asistencia Técnica Exsa S.A Las Bambas).



**ANEXO. X: FOTOS DE JAHUAPAYLLA ALTA, MINI TAJO Y JAHUAPAYLLABAJA DEL TAJO FERROBAMBA.**



**FOTO N° 01:** Zona Jahuapaylla Alta del Tajo Ferrobamba Las Bambas.



**FOTO N° 02:** Zona Mini Tajo del Tajo Ferrobamba Las Bambas.



**FOTO N° 03:** Zona Jahuapaylla del Tajo Ferrobamba Las Bambas.

#### **ANEXO. XI: MEDICIÓN DE LA MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (HA-73G) EN GABINETE**



**FOTO N° 04:** Elaboracion de la herramienta de gestion en seguridad (AST).

## ANEXO. XII: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CABLE DE DISPARO DIGIPRO

Tabla. I. Características del cable de disparo para iniciación electrónica.

Características del cable de disparo DIGIPRO	
Aplicación	Para sistemas de Detonación
Longitud	200 mts
Resistencia Eléctrica	53.16 Ohms/km
Diámetro del conductor	0.64 mm
Temperatura operativa	-25 A 80°C
Conductor	Cobre
Aislamiento	PVC Antiestático

Fuente: Electro conductores peruanos S.A.C (Dyno Nobel).

## ANEXO. XIII: FOTOS DEL CICLO DE CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA GASIFICADA (HA-73G).

FOTO N° 05: Elaboracion de la herramienta de gestion en seguridad (AST).



**FOTO N° 06:** Calibracion del camion fabrica con los agentes de voladura.



**FOTO N° 07:** Abastecimiento de agentes de voladura en la cancha de nitrato.



**FOTO N° 08:** Primado de taladro con accesorios de voladura.



**FOTO N° 09:** Control de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



**FOTO N° 10:** Esponjamiento de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



**FOTO N° 11:** Medición y control de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).

Perú  
Pala 4  
Taru 7, 8

**XETSA**

**MEDICIÓN DE DENS**

Peso de vaso: 637g C-09  
 Volumen de vaso: 992.5  
 Camión mezclador: B.9.A - 934  
 Operador: Juan Langua

Tiempo de gasificación (min)	Muestras			
	1	2	3	4
1	1.325			
5	1.219			
10	1.178			
15	1.153			
30	1.115			
Densidad final				

Peso de vaso: .....  
 Volumen de vaso: .....  
 Camión mezclador: .....  
 Operador: .....

Tiempo de gasificación (min)	Muestras			
	1	2	3	4
1				
5				
10				
15				
30				
Densidad final				

Peso de vaso: .....  
 Volumen de vaso: .....

FOTO N° 12: Registro de la mezcla explosiva gasificada (HA-73G).



FOTO N° 13: Carguo de taladros con mezcla explosiva gasificada.



FOTO N° 14: Tapado de taladros con material inerte (gravilla).

#### ANEXO. XIV: AMARRE CON EL SISTEMA DE INICIACION ELECTRÓNICA.



FOTO N° 15: Cable de disparo sistema electrónico.

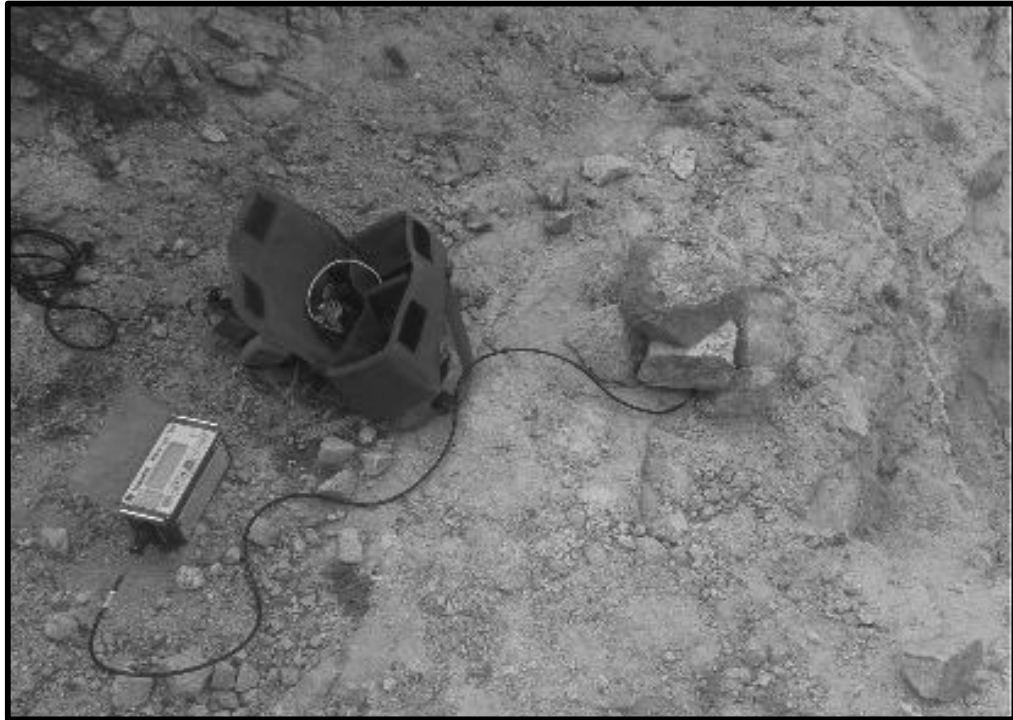


**FOTO N° 16:** Realizando el amarre del proyecto de voladura en el sistema electrónico.



**FOTO N° 17:** Amarre correcto entre el digishot y el cable eléctrico de cobre.





**FOTO N° 20:** Ubicación del sismografo INSTANTEL para el registro de vibraciones.



**FOTO N° 21:** Testeo de fuga y verificación de la malla.



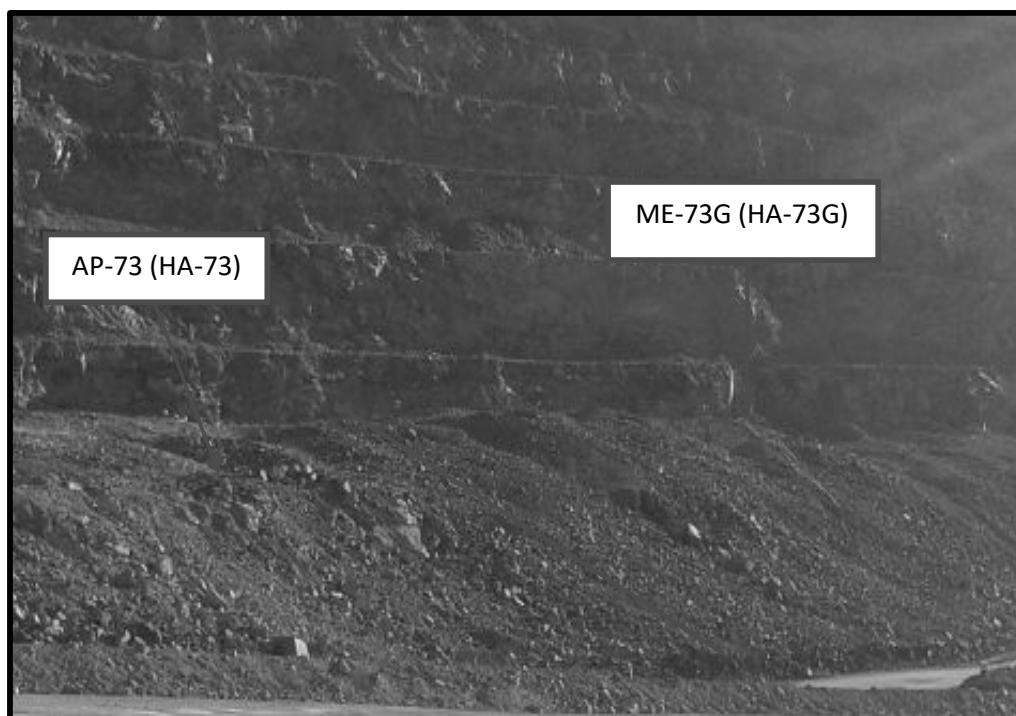
FOTO N° 22: Instalacion del base station.



FOTO N° 23: Ejecución de voladura.



**FOTO N° 24:** Detonacion del proyecto de voladura en el Mini Tajo.



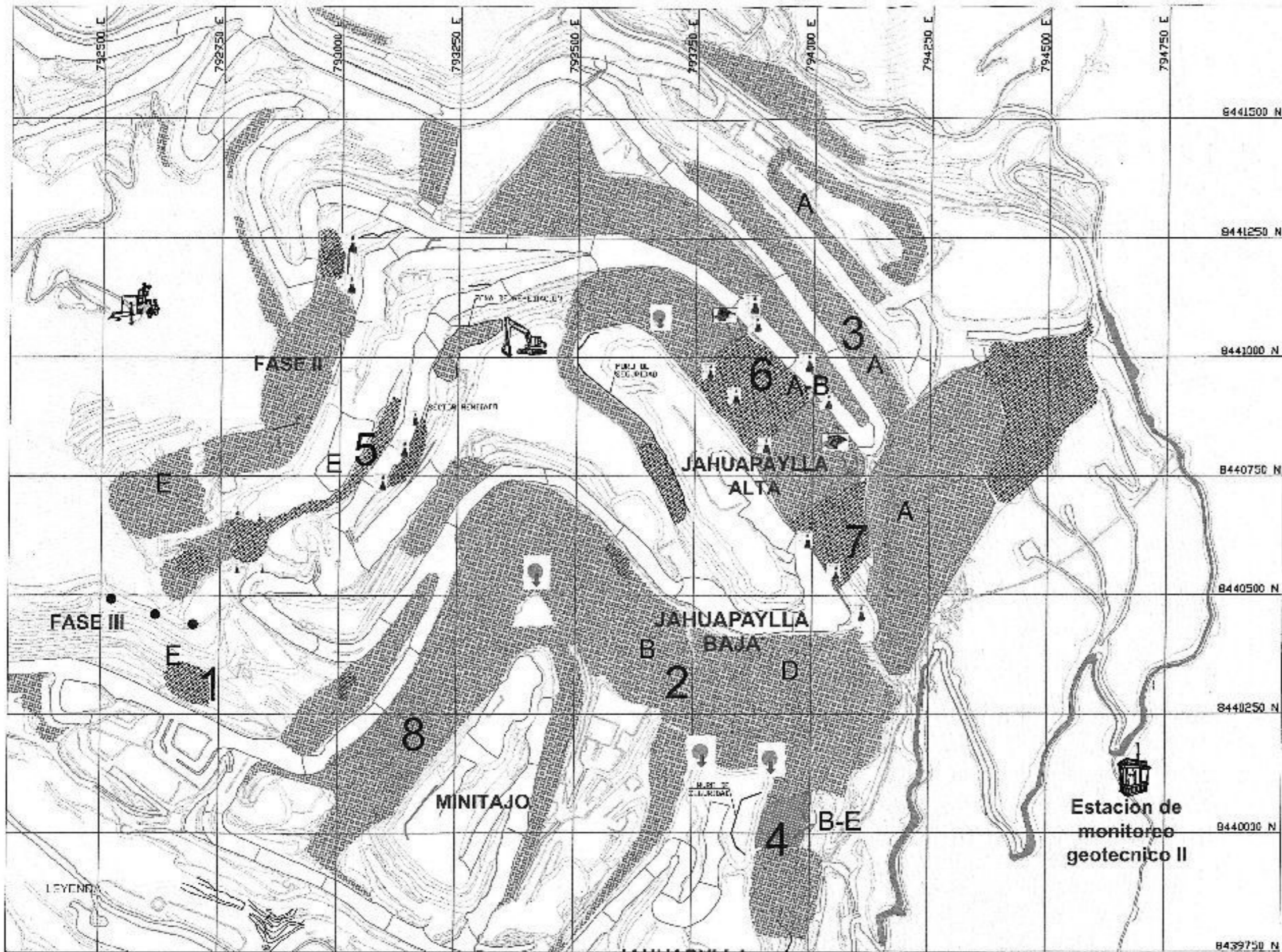
**FOTO N° 25:** Fragmentacion post voladura.



FOTO N° 26: Acarreo del material volado.



FOTO N° 27: Equipo técnico de trabajo de las pruebas de voladura.



- 1 15-01-Circular-Fase3-Chancador: Presencia de intrusivo alterado en el sector, presentando como último registro de monitoreo una velocidad de 0.467 mm/h, con Tendencia progresiva a partir del día 17-12-2017.
- 2 16-02-Cuña no aflorante-Rampa Comeroxacca: Los taludes de este sector presenta una deformación de 0.013 mm/h, con Tendencia Lineal.
- 3 16-03-Planar-Jahuapaylla Alta Talud N: Actualmente el sector se encuentra remediado. Al presente el monitoreo de Radar registra un desplazamiento a razón de 0.033 mm/h, Tendencia Lineal.
- 4 17-04-Cuña Aflorante-Jahuapaylla Intermedia Talud E: A partir el día 17 - 12- 2017 los taludes entre los niveles 3780 a 3810 han presentado incremento de velocidad a razón de 3.776 mm/h. Se observo presencia de agrietamiento a nivel de cresta.
- 5 26-11-Fase II W: El monitoreo de radar tipo FM II registra un desplazamiento a razón de 1.798 mm/h, con tendencia progresiva. Se encuentra restringido por conos geotécnicos (azules).
- 6 17-06-Cuña Jahuapaylla Alta: El día 04/09/2017 se registró un asentamiento de estructura planar que involucró 5 bancos, se mantiene un muro de contención en su base, el asentamiento tiene velocidad de deformación de 0.063mm/h con tendencia lineal.
- 7 17-07 Estructura Planar sector Este Jahuapaylla Alta: Se recomienda mejorar la altura de muro seguridad Nv. 3945, El monitoreo del radar registra un desplazamiento a razón de 0.549 mm/h, con tendencia progresiva. Se recomienda iniciar remediación el talud. En nivel 3945 se dejó una banquetta de exclusión de 25 m.
- 8 Cuña Interrampa Minitajo - Tramo 03: Se observa estructuras persistentes formando Cuñas a nivel de 7 bancos que comprometen la rampa de tramo 03., El monitoreo del radar a momento no registra deformación progresiva (0.081 mm/h).

CONDICIÓN GEOTÉCNICA DE RIESGO EVALUADO (*)	
	<b>ZONA CON RIESGO DE DESLIZAMIENTO</b> Trabajos con supervisión permanente, acceso restringido
	<b>ZONA CON DESPLAZAMIENTOS</b> Zona de riesgo medio
	<b>ZONA CON PROBABILIDAD DE CAÍDA DE ROCAS</b> Evitar o evaluar trabajos hacia el talud

(\*) LA CONDICIÓN GEOTÉCNICA ESTÁ REFERIDA A LA ESTABILIDAD ACTUAL QUE PRESENTAN LOS TALUDES Y A LA POSIBILIDAD DE GENERAR DAÑOS A LAS PERSONAS Y/O PRODUCIR INTERFERENCIA EN LA OPERACIÓN MINERA, PRODUCTO DE EVENTUALES INESTABILIDADES O FALLAMIENTOS.

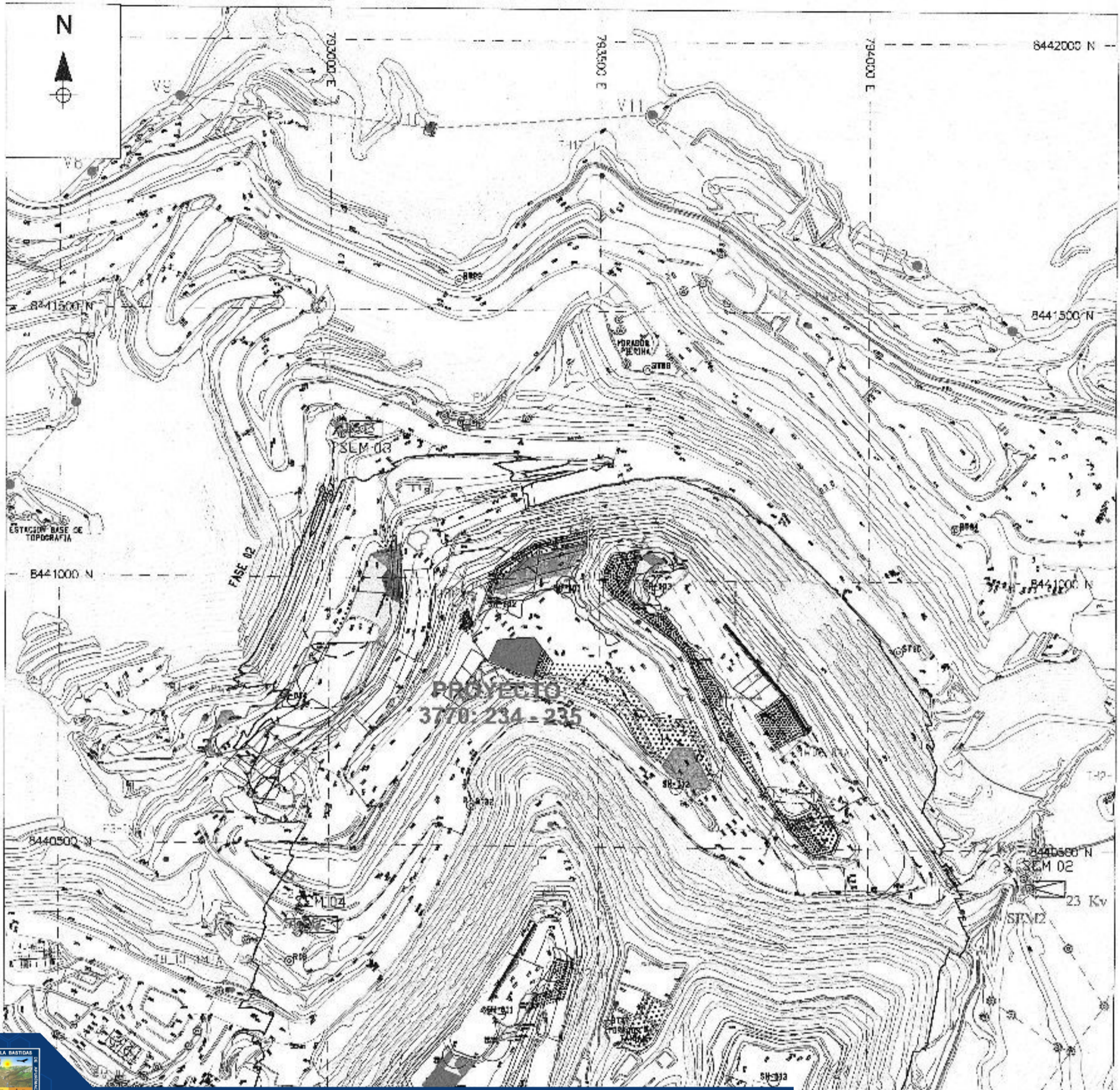
RECOMENDACIONES DE TRANSITO MINA	
	TRAMO CON RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS DESDE LA PARED.
	TRAMO CON RIESGO DE AGRIETAMIENTO DEL BORDE DE LA RAMPA.

AL OBSERVAR CAÍDA DE ROCAS HACIA LA RAMPA O OBJETOS EN EL BORDE, INFORMAR AL GEOTÉCNICO DE TURNO O AL JEFE DE TURNO MINA.

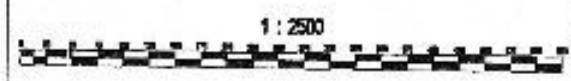
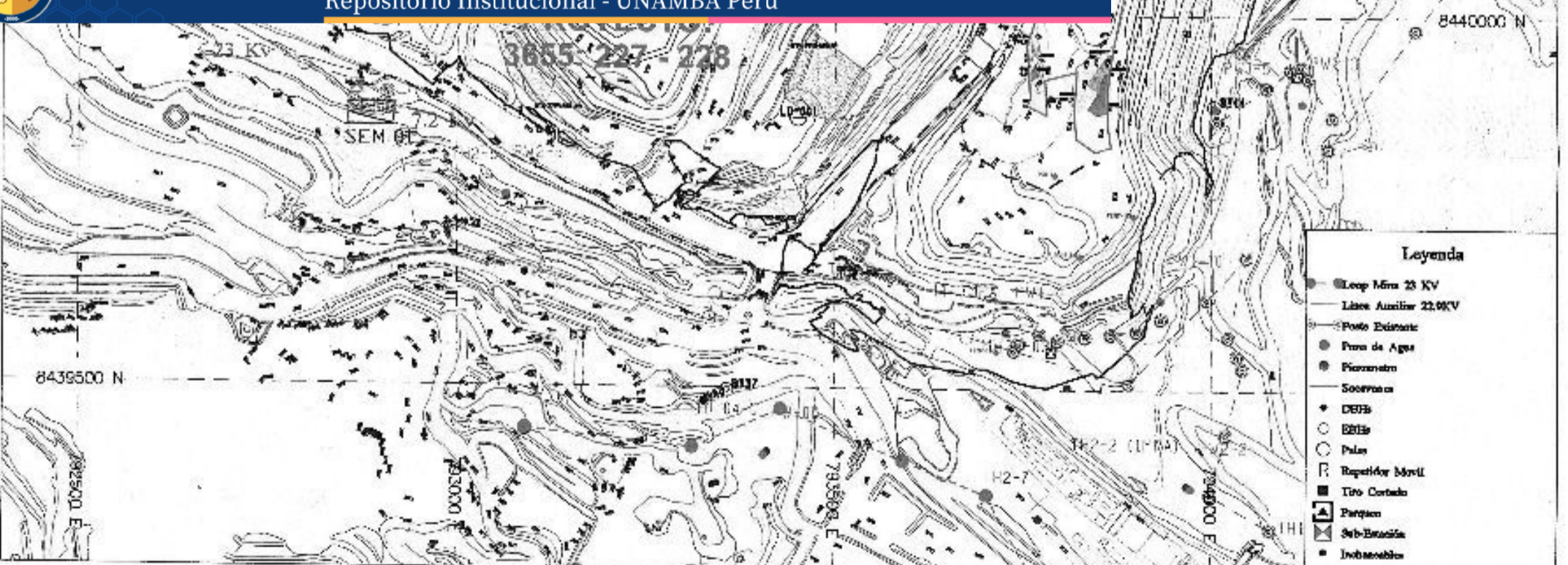
SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO	
EL SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO CUENTA CON:	
- 3 RADARES.	
- 3 CARPETAS DE MONITOREO GEOMÉTROS Y MBMBAS.	
- EXTENSÍMETROS ELECTRÓNICOS Y MECÁNICOS.	
- INCLINÓMETROS.	
EL CONTROL GEOTÉCNICO SE REALIZA EN TERRENO POR PARTE DEL GEOTÉCNICO DE TURNO.	

SIMBOLOGÍA	
	ESTACION DE MONITOREO
	ESTACION DE MONITOREO GEOTÉCNICO
	PUNTO DE MONITOREO
	LÍNEA DE MONITOREO
	CONO GEOTÉCNICO
	ESTRUCTURA PLANAR
	MURO DE CONTENCIÓN
	BANQUETA DE EXCLUSIÓN

GERENCIA DE SERVICIOS TÉCNICOS		<b>MMG LAS BAMBAS</b>	
SUPERINTENDENCIA DE		<b>PLANO DE RIESGOS TAJO FERROBAMABA</b>	
PROYECTO: A. COENCHA	FECHA: 13 DE ENERO 2018	ESCALA: 1:1	FECHA DE ELABORACIÓN: 13 DE ENERO 2018
REVISADO: M. J. J. J.	APROBADO: L. S. J. J.	ELABORADO: M. J. J. J.	REVISADO: M. J. J. J.



Repositorio Institucional - UNAMBA Perú



Planeamiento Mina		
UM Las Bambas		
Cajón Porotombamba		
Fecha	Escala	Proyecto
15 FEB 2018	1:2500	LAS BAMBAS

