

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



TESIS

**“ANALISIS DEL USO DE EMULSION GASIFICABLE SAN-G APU
PARA OPTIMIZAR LA FRAGMENTACION DE VOLADURAS
PRIMARIAS – COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA S.A - HUARAZ”**

PRESENTADO POR:

BACH. ALEX NESTOR BERTO ZAMORA

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

ING. MAXIMO VICTOR MAYTA LINO

CUSCO-PERU

2019

Dedicatoria

*A Dios, que siempre guía e ilumina mi camino.
A mis queridos padres, quienes con su esfuerzo y dedicación me dieron todo para mi
desarrollo personal y profesional.*

*A mis hermanos, por su apoyo y cariño.
Y en especial a dos personas que marcaron mi vida mi esposa e hija.*

Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por permitir mi formación profesional en sus aulas; así como a los docentes y compañeros por todos los conocimientos impartidos durante el tiempo compartido.

A la empresa Famesa Explosivos S.A.C., por permitirme hacer esta investigación y a todas las personas que participaron de este estudio.

Agradecer de manera especial al Ingeniero Máximo Víctor Mayta Lino por la ayuda y el asesoramiento en esta tesis.

Gracias a Dios por que cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar al lado de las personas que más amo, gracias a la vida por este nuevo triunfo.

Resumen

En las operaciones mineras la deficiente fragmentación de material y consecuentemente la aplicación de voladuras secundarias son problemas permanentes que resolver. El uso de un explosivo a base de emulsión gasificable SANG APU ofrece una solución frente a esta problemática.

En compañía minera Antamina, en voladuras primarias de producción se usa el ANFO pesado 73 gasificable para diámetros de taladro de 12 ¼". En base a las voladuras con esta mezcla explosiva se elaborará un histórico como línea base para hacer un comparativo con los resultados obtenidos de las pruebas con la aplicación de emulsión gasificable SANG APU.

En la fase 09 del tajo se realizaron 03 voladuras primarias tipo prueba, las mallas de disparo mantuvieron los mismos parámetros de perforación y voladura sobre material estéril lo cual nos da un comparativo más adecuado entre las mezclas explosivas.

En el análisis correspondiente, la emulsión gasificable SANG APU desarrolla una velocidad de detonación (VOD) promedio de 5829,4 m/s lo cual es un 3.1% mayor respecto al promedio del ANFO pesado 73 gasificado, esto se vio reflejado en el resultado de la fragmentación de material volado, con el cual se obtuvo una disminución del P80 de 27.4 cm a 18.91 cm. El factor de potencia teórico se redujo en 3.5%. La eliminación del costo de fabricación del ANFO y el menor costo por tonelada de la emulsión gasificable con lo cual se obtiene una reducción del 8.42% del costo por tonelada fragmentada. Post-voladura no se obtuvo presencia de gases nitrosos, debido a la no utilización de ANFO en la mezcla explosiva y consiguientemente el buen balance de oxígeno propio de la mezcla a base de emulsión pura.

Palabras Clave: Emulsión gasificable, Fragmentación, Velocidad de detonación.

Abstract

In the mining operations, poor material fragmentation and consequently the application of secondary blasting are permanent problems to solve. The use of a SANG APU gasifiable emulsion based explosive offers a solution to this problem.

In Antamina mining company in primary production blasting, gasifiable heavy ANFO 73 is used for 12 ¼ ”drill diameters. Based on the blasting with this explosive mixture, a history will be developed as a baseline to make a comparison with the results obtained from the tests with the application of SANG APU gasifiable emulsion.

In phase 09 of the pit, 03 primary blasting of the test type was carried out, the firing meshes maintained the same drilling and blasting parameters on sterile material which gives us a more adequate comparison.

In the corresponding analysis, the SANG APU gasifiable emulsion develops an average detonation rate (VOD) of 5829.4 m / s which is 3.1% higher than the average of the gassed heavy ANFO 73, this was reflected in the result of the fragmentation which obtained a decrease of P80 from 27.4 cm to 18.91 cm. The theoretical power factor was reduced by 3.5%, the elimination of the manufacturing cost of the ANFO and the lower cost per ton of the gasifiable emulsion, a reduction of 8.42% of the cost per fragmented ton was obtained. Post-blasting no presence of nitrous gases was obtained, due to the non-use of ANFO and the good oxygen balance that is generated with the pure emulsion-based mixture.

Keywords: Gasifiable emulsion, Fragmentation, Detonation speed.

Introducción

La operación unitaria de voladura, para el análisis de optimizaciones en su proceso, requiere de la comparación de resultados obtenidos usando diferentes mezclas explosivas para diferentes parámetros dentro de sus operaciones, siendo éstas en mallas de mineral o desmonte.

Para tal efecto se requiere un análisis profundo de las variables relacionadas a la operación unitaria de voladura, siendo conscientes de que el éxito de este proceso depende del correcto manejo de los mismos. Siendo conscientes que la fragmentación de roca por voladura es un indicador que se usa para evaluar el resultado de las voladuras.

En la unidad minera Antamina se viene utilizando la mezcla explosiva ANFO pesado 73 gasificable, la deficiente fragmentación de material y consecuentemente la aplicación de voladuras secundarias son problemas permanentes que resolver. El uso de un explosivo a base de emulsión gasificable SANG APU ofrece una solución frente a esta problemática debido a su alto poder energético y versatilidad de manejo con diferentes densidades de copa según la necesidad de la operación. Para tal efecto la presente tesis se ha dividido en seis capítulos:

En el primer capítulo se hace mención del planteamiento del problema, objetivos de la investigación, justificación, hipótesis, variables e indicadores.

En el segundo capítulo se detalla el marco teórico.

En el tercer capítulo se detalla la metodología de investigación.

En el cuarto capítulo se describe el análisis y discusión de resultados.

Índice

1. Dedicatoria	I
2. Agradecimientos.....	II
3. Resumen	III
4. Abstract	IV
5. Introducción	V
1. CAPITULO I.....	1
1. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.	1
1.1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION.	2
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.	2
1.2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.	3
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION.....	3
1.3.1. JUSIFICACION	3
1.3.2. IMPORTANCIA.	4
1.3.3. LIMITACIONES.	4

1.4. HIPOTESIS	4
1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.	4
1.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO.	4
1.5. VARIABLES E INDICADORES	5
1.5.1. VARIABLES.	5
1.5.2. INDICADORES.....	5
2. CAPITULO II	6
2. MARCO TEORICO	6
2.1. ANTECEDENTES.....	6
2.1.1. ANTECEDENTES A NIVEL REGIONAL Y NACIONALES.	6
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	8
2.2.1. UBICACIÓN.....	8
2.2.2. ACCESIBILIDAD.	9
2.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	10
2.3.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	10
2.3.2. GEOLOGÍA LOCAL.....	15
2.3.3. GEOLOGÍA ECONÓMICA.....	18
2.4. OPERACIONES MINERAS	19
2.4.1. OPERACIONES MINA.....	19
2.4.2. LA CONCENTRADORA.....	27

2.4.3. EL MINERODUCTO.	30
2.5. BASES TEÓRICAS.....	32
2.5.1. EXPLOSIVOS COMERCIALES.	32
2.5.2. CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DE LOS EXPLOSIVOS.	33
2.5.3. AGENTES DE VOLADURA.....	37
2.5.4. EMULSIÓN GASIFICABLE.	41
2.5.5. VARIABLES EN EL PROCESO DE TRITURACION DE ROCAS.....	47
2.5.6. FRAGMENTACIÓN DE ROCA POR VOLADURA.	50
2.5.7. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN.	54
2.5.8. DEFINICIÓN DE TERMINOS.	66
3. CAPITULO III.....	68
3. METODOLOGIA DE INVESTIGACION.....	68
3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACION.....	68
3.2. POBLACION Y MUESTRA.....	68
3.2.1. POBLACION.....	68
3.2.2. MUESTRA.....	69
3.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCION DE DATOS.	69
3.3.1. VELOCIDAD DE DETONACION (VOD).....	69
3.3.2. FRAGMENTACIÓN.....	71

3.3.3. FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA.....	72
4. CAPITULO IV	74
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
4.1. CONSIDERACIONES GENERALES	74
4.2. LINEA BASE HISTÓRICA - USO DE ANFO PESADO 73 GASIFICABLE	75
4.2.1. RESULTADOS DE VELOCIDAD DE DETONACION.....	77
4.2.2. RESULTADOS DE FRAGMENTACION.....	78
4.2.3. CALCULO DE FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA.....	79
4.3. PRUEBAS UTILIZANDO SANG GASIFICABLE APU	81
4.3.1. DISPARO DEL PROYECTO 9-NP-4628-04 FASE 09 ANTAMINA.....	82
4.3.2. DISPARO DEL PROYECTO 9-4613-01 FASE 09 ANTAMINA.....	86
4.3.3. DISPARO DEL PROYECTO 9-4613-03 FASE 09 ANTAMINA.....	89
4.4. ANALISIS DE RESULTADOS	93
4.4.1. ANALISIS DE VELOCIDAD DE DETONACION	93
4.4.2. ANALISIS DE FRAGMENTACIÓN.....	94
4.4.3. ANALISIS DE FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA	95
4.4.4. ANALISIS ECONOMICO	96
5. CONCLUSIONES	98
6. RECOMENDACIONES	99
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	100

8. ANEXOS.....	101
----------------	-----

Índice de tablas

Tabla 1 Rutas de acceso a U.M. Antamina	10
Tabla 2. Parámetros de perforación	22
Tabla 3. Parámetros de voladura.....	24
Tabla 4. Equipos de carguío.....	25
Tabla 5. Equipos de acarreo	26
Tabla 6. Densidades según tipo de explosivo	37
Tabla 7. Principales propiedades de mezclas explosivas	39
Tabla 8. Tamaño de partícula de los explosivos.	40
Tabla 9. Características técnicas de la emulsión SANG APU	42
Tabla 10. Características de la solución gasificante.....	44
Tabla 12. Comportamiento de “n”	64
Tabla 13. Factor “A” de Cunningham.....	65
Tabla 14. Características técnicas de mezclas explosivas.....	74
Tabla 15. Parámetros de perforación y voladura Fase 09	75
Tabla 16. Velocidad de detonación con HA 73 Gasificado	77
Tabla 17. Fragmentación con HA 73 gasificado.....	78
Tabla 18. Parámetros de perforación y voladura para material estéril Fase 09	80
Tabla 19. Velocidad de detonación HA 73 gasificado vs SANG APU	94

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la U.M. Antamina	9
Figura 2. Geología Regional.	12
Figura 3. Geología Regional SW- NE.....	13
Figura 4. Columna estratigráfica regional.....	14
Figura 5. Tipo de roca U.M Antamina	17
Figura 6. Zonamiento del skarn del depósito de Antamina	19
Figura 7. Vista panorámica del tajo abierto.	20
Figura 8. Vista panorámica de Fase 08.	20
Figura 9. Perforación de taladros.	21
Figura 10. Carguío de taladros en malla.	23
Figura 11. Vista de la pala eléctrica P&H.....	25
Figura 12. Carguío con la pala hidráulica Hitachi.	26
Figura 13. Camiones Komatsu 930E	27
Figura 14. Vista de la chancadora primaria en el tajo.....	28
Figura 15. Vista de la planta concentradora y los stoke's pile.....	29
Figura 16. Recorrido del mineroducto	31
Figura 17. Clasificación de los explosivos industriales	32
Figura 18. Variación de la potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión ...	33
Figura 19. Influencia del diámetro sobre el VOD	35
Figura 20. Categoría de gases nocivos post voladura	36
Figura 21. Estructura del ANFO pesado	38
Figura 22. Características de diferentes mezclas de ANFO Pesado	39

Figura 23. Diseño de carga con ANFO pesado y emulsión gasificable	41
Figura 24. Reacción de gasificación de la emulsión gasificable	43
Figura 25. Presentación de solución gasificante	44
Figura 26. Fabricación de emulsión gasificable en camión Fábrica	45
Figura 27. Proceso de fabricación de ANFO pesado 73 Gasificable	46
Figura 28. Propagación de la onda de choque.....	50
Figura 42. Curva de fragmentaciónr	62
Figura 43. Medición de velocidad de detonación.	70
Figura 44. Registro de velocidad de detonación	70
Figura 45. Portametrics.	71
Figura 46. Análisis de fragmentación con Portametrics.	72
Figura 47. Curva de gasificación del ANFO pesado 73 gasificado	76
Figura 48. Diseño de banco.....	76
Figura 49. Medición de velocidad de detonación PY_9-NP-4628-12.....	77
Figura 50. Fotos analizadas del proyecto 9-NP-4643-17.....	78
Figura 51. Resultado de análisis de fragmentación del proyecto 9-NP-4643-17	79
Figura 52. Curva de gasificación de emulsión gasificable SANG APU	81
Figura 53. Muestra de SANG APU en campo y laboratorio	82
Figura 54. Diseño de carga de taladros de producción SANG APU	83
Figura 55. Disparo fase 09 proyecto 9-NP-4628-04	83
Figura 56. Secuencia de salida proyecto 9-NP-4628-04.....	84
Figura 57. Fotografías post voladura proyecto 9-NP-4628-04.	84
Figura 58. Medición de VOD 9-NP-4628-04.	85

Figura 59. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4628-04	85
Figura 60. Reporte de fragmentación	86
Figura 61. Fragmentación 9-NP-4628-04	86
Figura 62. Delimitación de proyecto de voladura 9-NP-4613-01.	87
Figura 63. Secuencia de salida proyecto 9-N-4613-01.	87
Figura 64. Medición de VOD 9-NP-4613-01.	88
Figura 65. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4613-01.	88
Figura 66. Reporte de fragmentación.	89
Figura 67. Fragmentación proyecto 9-NP-4613-01.	89
Figura 68. Polígono proyecto 9-NP-4613-03.	90
Figura 69. Secuencia de salida proyecto 9-NP-4613-03	90
Figura 70. Medición de VOD proyecto 9-NP-4613-03	91
Figura 71. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4613-03.	91
Figura 72. Reporte de fragmentación	92
Figura 73. Fragmentación proyecto 9-NP-4613-03	92
Figura 74. Fragmentación HA 73 gasificado vs SANG APU	94
Figura 75. Análisis granulométrico de SANG APU y Factor de potencia	95
Figura 76. Análisis económico de HA 73 gasificado	96
Figura 77. Análisis económico de SANG APU	97

CAPITULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.

La variabilidad del macizo rocoso, existencia de aguas subterráneas y el uso inadecuado del explosivo en condición de ANFO pesado con mal aprovechamiento de la energía en la detonación de voladuras primarias en Compañía Minera Antamina S.A. ocasionan una voladura deficiente con fragmentos grandes de roca que causan demoras en el carguío y acarreo de material.

Por otra parte la deficiente mezcla de los agentes de voladura para obtener el ANFO pesado proveniente de la preparación en los camiones fábrica, que no es de acuerdo a las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, da como resultado un explosivo inadecuado para la fragmentación de rocas en voladuras primarias.

Por lo que se requiere un explosivo adecuado para mejorar la fragmentación del material estéril en la fase 09 de Compañía Minera Antamina S.A.

Por lo que una de las alternativas es el uso de un explosivo a base de emulsión gasificable al 100%, que contiene mayor poder energético que el ANFO pesado 73 gasificable, mezcla explosiva usada en voladuras primarias. Ésta alternativa permitirá una mejor fragmentación del material a menores costos puesto que se eliminará el consumo de nitrato de amonio y combustible para la fabricación de ANFO.

1.1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION.

1.1.2.1. Problema General.

- ¿De qué manera influye el uso de un explosivo a base de emulsión gasificable SAN-G APU en la optimización de la fragmentación de voladuras primarias en Compañía Minera Antamina S.A.?

1.1.2.2. Problemas Específicos.

- ¿Cuál es el explosivo adecuado para optimizar la fragmentación de voladuras primarias en la Compañía Minera Antamina S.A.?
- ¿Cuáles son los factores que intervienen en la utilización del explosivo elegido?
- ¿De qué manera influye la evaluación económica del uso de emulsión gasificable SAN-G APU en la optimización de la fragmentación de voladuras primarias en Compañía Minera Antamina S.A.?

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar el uso del explosivo adecuado para optimizar la fragmentación de voladuras primarias en Compañía minera Antamina.

1.2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.

- Determinar el explosivo adecuado para optimizar la fragmentación de voladura en la Compañía Minera Antamina S.A.
- Determinar los factores que intervienen en la utilización del explosivo elegido.
- Determinar los costos de las voladuras primarias en compañía minera Antamina.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION

1.3.1. JUSIFICACION.

El siguiente estudio tiene una justificación técnica y económica.

1.3.1.1. Técnica.

Según la evaluación de las variables no controlables de los macizos rocosos se elegirá el material explosivo a utilizar, se seguirá el monitoreo de resultados con equipos de medición como: contador de VOD (Velocidad de Detonación), software de análisis granulométrico, sismógrafo, software de diseño de voladuras, cámara de alta velocidad.

El registro de estas variables nos servirá como oportunidad de mejora en voladuras posteriores hasta alcanzar los parámetros correctos.

1.3.1.2. Económica.

Ya que orientado al hecho que la voladura compone la única operación unitaria en el proceso de conminución a tajo abierto, y siendo la energía química del explosivo la energía más barata para obtener mejoramiento en la fragmentación del macizo rocoso, disminución del porcentaje de gases de voladura, reducción de niveles de vibración, golpes de aire, control en paredes finales, etc. En Proyectos de Voladura Primarios conduce a obtener de la manera más rentable la meta de prestar una mejor calidad en el servicio integral de voladura que se refleja en mineral fragmentado

con una mejor distribución y uniformidad lo cual influye directamente para lograr obtener los mejores índices de recuperaciones de los contenidos metálicos.

1.3.2. IMPORTANCIA.

Conseguir y conservar la distribución uniforme de la fragmentación, asimismo disminuir el tamaño de pasante P80 para mejorar los procesos de carguío, transporte y molienda. Además, producir un ahorro en costos de voladura que generen rentabilidad a la compañía.

1.3.3. LIMITACIONES.

Abarca a la zona de extracción de material estéril de fase 09 del tajo, no se tomó en consideración la zona de extracción de mineral.

1.4. HIPOTESIS

1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.

La emulsión gasificable SAN-G APU es un explosivo adecuado para optimizar la fragmentación de voladuras primarias en compañía minera Antamina.

1.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO.

- Existe un explosivo adecuado a base de emulsión gasificable SAN-G APU para optimizar la fragmentación de voladura en la Compañía Minera Antamina S.A.
- El análisis de los factores que intervienen en la utilización del explosivo a base de emulsión gasificable SAN-G APU están relacionados a la optimización de la fragmentación en compañía minera Antamina.
- Existe una disminución del costo de voladuras primarias con el uso de la emulsión gasificable SAN-G APU en compañía minera Antamina.

1.5. VARIABLES E INDICADORES

1.5.1. VARIABLES.

1.5.1.1. Variables Independientes.

- Propiedades geomecánicas del macizo rocoso (RQD, RMR, Q)
- Propiedades y características de emulsión gasificable SAN-G APU (densidad, viscosidad, gasificación).

1.5.1.2. Variables Dependientes.

- Diseño de carga explosiva (kg/m).

1.5.2. INDICADORES.

- Fragmentación de Roca (P80).
- Velocidad de detonación (m/s).
- Factor de carga, factor de potencia (Kg/m³, Kg/TM)
- Costos (\$/TM).

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. ANTECEDENTES A NIVEL REGIONAL Y NACIONALES.

- a) Alcázar, P. (2017). *Optimización del proceso de voladura implementando emulsión gasificable en mina de hierro*. Tesis para optar título profesional de Ingeniero de Minas. Tacna – Perú: UNJBG.

RESUMEN:

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la viabilidad técnica, económica y operativa de un nuevo tipo de emulsión. Se elaboró línea base para luego poder trazar los objetivos y empezar con las pruebas. Después de desarrollar las pruebas se realizó el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista económico y operativo. Ventajas económicas el precio de introducción que presenta este nuevo producto y por su mayor energía específica a emulsiones anteriores ha permitido incrementar parámetros en malla de perforación

generando ahorro económico para la compañía minera, El uso del Anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable demostró ser más eficiente en términos operativos y económicos sobre el Anfo pesado 55 en base a emulsión matriz, para terreno suave (CG, FG), se incrementó los parámetros de perforación de 4,8 x 5,5 m. a 5,0 x 5,8 m. (malla triangular), consiguiendo un ahorro para terreno suave de \$ 40 093 por cada 1 000 000 toneladas producidas, para una producción anual de 12 000 000 toneladas se tendrá un ahorro anual de \$ 481 116.

- b) Tenorio, E. (2019). *Influencia de la emulsión gasificable SAN-G y HA 73g en la fragmentación de la roca en Chaviña, Ayacucho – 2018*. Tesis para optar título profesional de Ingeniero de Minas. Cajamarca – Perú. UPN.

RESUMEN:

Se estudió la influencia de la emulsión gasificable SAN-G y HA 73G en la fragmentación de la roca por voladura en minería a tajo abierto en una mina de Chaviña-Ayacucho; la cual se inició con la revisión bibliográfica de la emulsión gasificable SAN-G y se definió la zona de pruebas para la aplicación de este explosivo y compararlo con el HA 73G que se utiliza actualmente en mina. El desarrollo de estas pruebas se realizó en 11 proyectos de voladura de producción que representa un total de 2922 taladros cargados. Se concluye que todos los disparos realizados con SAN-G tuvieron menor Factor de Potencia (0.42 a 0.55 kg/Tm), obteniéndose a pesar de ello un p80 promedio con granulometría de 3.76” mayor de lo requerido (2.50”); mientras que todos los disparos realizados con HA 73G tuvieron un Factor de potencia de 0.48 a 0.61 kg/Tm, obteniéndose un p80 promedio de 2.84”. La VOD que presento el SAN-G está en el intervalo de 4958 m/s a 5343 con un promedio de 5143 m/s utilizando una densidad promedio de 1.05 gr/cm³. La VOD que presento el HA 73G está en el intervalo de 5082 m/s a 5215 con un promedio de 5148.50 m/s utilizando una densidad promedio de 1.08 gr/cm³. Estos explosivos presentan un

íntimo contacto entre el oxidante y el combustible, permitiendo que la reacción de óxido reducción sea veloz, lo que genera una mejor calidad de gases de voladura y un color de humos gris claro cómo se percibió en los 11 disparos realizados. El costo de voladura promedio obtenido con Emulsión Gasificable SAN- G está en 0.22 \$/Tm por debajo del costo de voladura de HA 73G que está en 0.24 \$/Tm esto representa una disminución de 7.22 %. Teniendo en cuenta las condiciones litológicas propias del terreno; la mezcla con que se obtuvo buenos resultados es el HA 73G (Heavy ANFO 73 gasificable). Palabras clave: Emulsión gasificable, fragmentación, p80, taladro.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.2.1. UBICACIÓN.

La unidad minera Antamina es un complejo minero polimetálico que produce concentrados de cobre, zinc, molibdeno, plata y plomo, se ubicada en el distrito de San Marcos de la provincia de Huari en el departamento de Ancash y a una altitud promedio de 4,300 msnm. Coordenadas ubicación U.M. Antamina.

	ESTE	NORTE	ZONA
Coordenadas UTM	274 000	8 945 000	18L

Fuente: Google earth.



Figura 1. Ubicación geográfica de la U.M. Antamina - Revista desarrollo sostenible de Antamina

2.2.2. ACCESIBILIDAD.

El acceso a la Unidad Minera Antamina se realiza por vía terrestre a través de carretera asfaltada y vía aérea. Las distancias aproximadas recorridas desde las principales ciudades se detallan a continuación:

Tabla 1
Rutas de acceso a U.M. Antamina

RUTA	TRAMO	VIA	DISTANCIA (Km)	TIEMPO (Hr)
1	Lima-Conococha- Unidad Minera Antamina	Terrestre (asfaltada)	440	8
2	Huaraz-Unidad Minera Antamina	Terrestre (asfaltada)	150	2
3	Lima-Aeropuerto Huaraz-Unidad Minera Antamina	Aérea	350	3

Fuente: Área de Mina – Antamina

2.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

2.3.1. GEOLOGÍA REGIONAL.

El depósito de Antamina se localiza en la cadena de los Andes peruanos, en el margen del Pacífico de América del Sur. La placa oceánica de Nazca se introduce debajo de la Placa Sudamericana en el proceso de subducción. La colisión y subducción de placas generó el plegamiento, callamiento y levantamiento de montañas, vulcanismo, plutonismo y la mayoría de los depósitos minerales de los Andes. La zona central-norte donde Antamina se localiza, es un área sísmicamente activa pero no tiene ningún volcán activo actualmente.

Los Andes central-norte del Perú se comprimieron de Oeste a Este, se observa la zona costera (el desierto), la cordillera Occidental y la cordillera Oriental. Antamina queda en la parte oriental de la cordillera Occidental.

La cordillera Occidental tiene dos cadenas de montañas principales. La cordillera Negra en el oeste está separada por el valle del río Santa (el valle de Huaraz) de la cordillera Blanca en el este.

Antamina se sitúa al este de la cordillera Blanca entre esta y el valle del río Marañón. El río Marañón separa la cordillera Occidental de la cordillera Oriental. Entre Antamina y el océano Pacífico está la zona costera y la cordillera Negra.

El depósito de Antamina se forma cerca del contacto de la formación de Jumasha y la formación de Celendín más joven, ambas formaciones están hechas de calizas, lutitas y se sitúa en la parte oriental de la cordillera Occidental.

Esta cuenca se limitó al este por un basamento (Geoanticlinal Marañón) formado de esquistos, filitas del Precámbrico Tardío y pizarras (Complejo Marañón). Al este, una secuencia Mesozoica de areniscas y carbonatos que se depositó en la cuenca o Geosinclinal peruano Oriental. (Compañía Minera Antamina S.A, 2006)

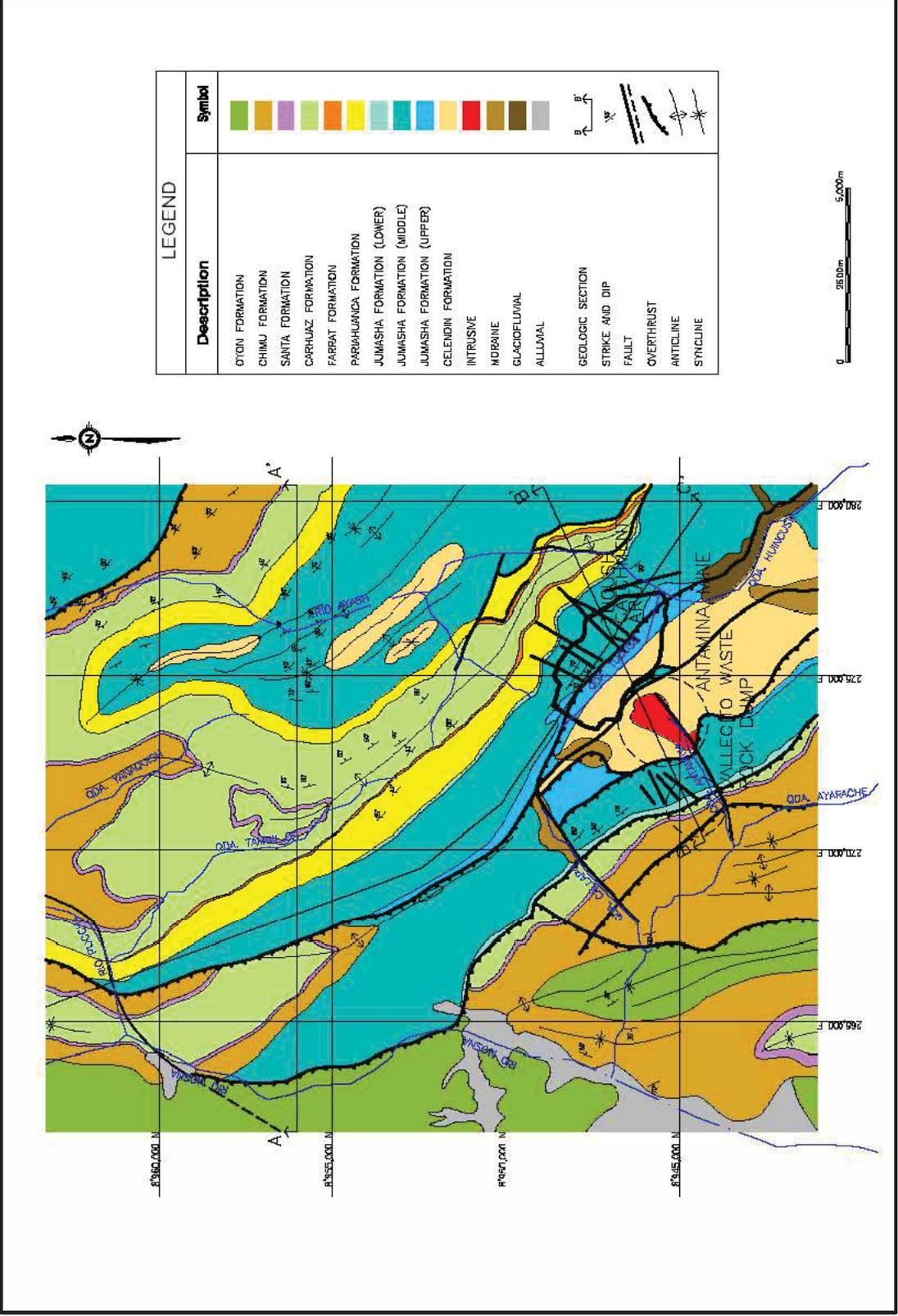


Figura 2. Geología Regional – (Geología Antamina).

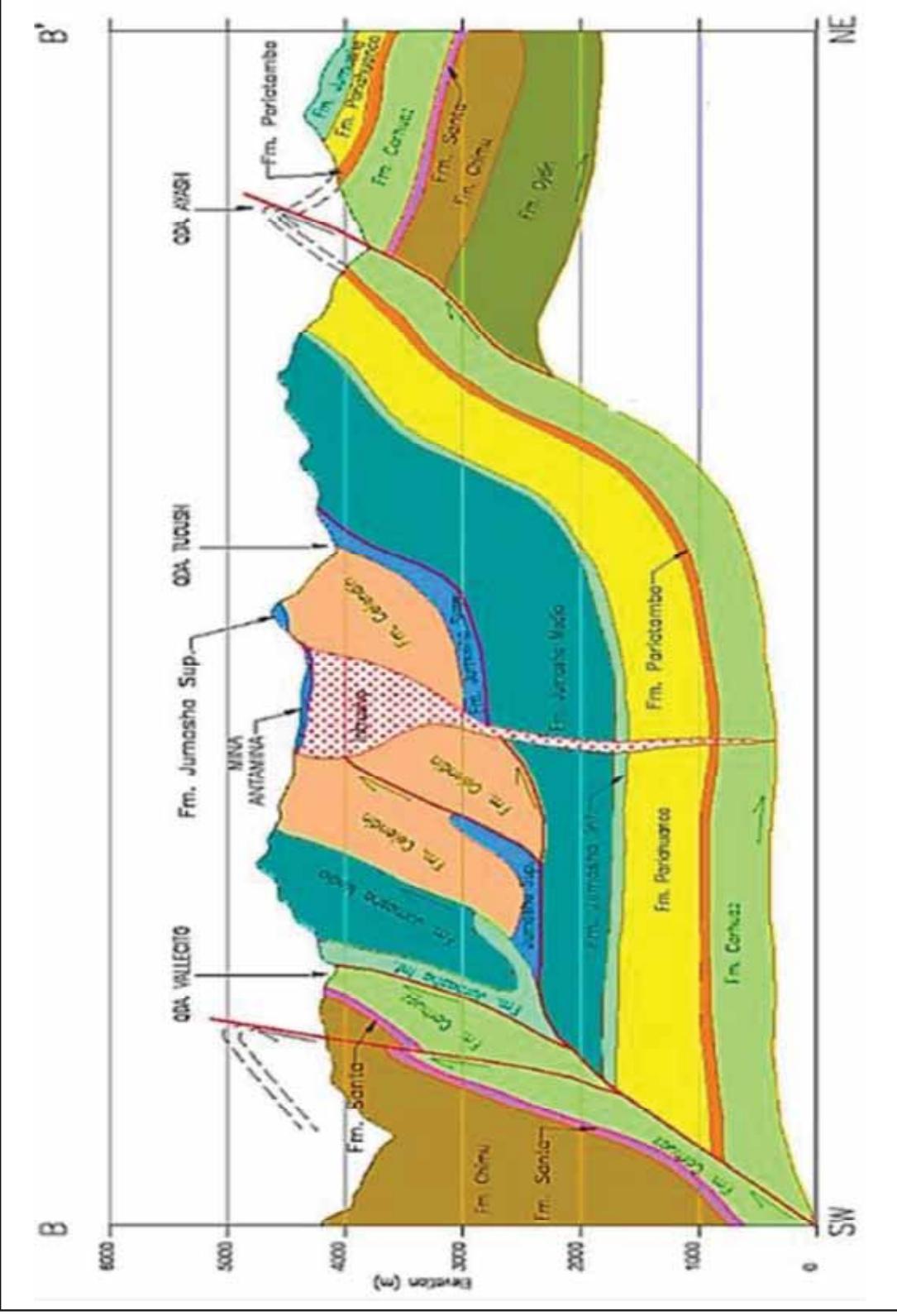


Figura 3. Geología Regional SW- NE – (Geología Antamina)

2.3.1.1. Mineralogía regional.

Se pueden mencionar los siguientes:

- Formación Santa (ki-s).
- Formación Carhuaz (ki-ca).
- Formación Celendín (ks-ce).
- Formación Jumasha (ks-j).
- Formación Pariatambo (ki-pt).
- Formación Pariahunaco (ki-ph).



Figura 4. Columna estratigráfica regional – (Geología Antamina)

2.3.2. GEOLOGÍA LOCAL.

2.3.2.1. *Formación Jumasha (ks-j).*

Topográficamente prominente, caliza gris clara, masiva, estratos potentes >1 m 20% caliza y dolomita con fragmentos de fósiles (fragmentos molidos de conchas no identificables en calcita y dolomita de grano fino a medio; 30% caliza y dolomita pelletal, 25% caliza y dolomita de grano fino (grano fino 30 um, textura uniforme, nulo en pellets y conchas, estratos medianos <1m, dolomita de intemperismo amarillo y caliza de intemperismo gris claro); 25% intermedios. Escasas limolitas calcáreas.

Comúnmente caliza bioclastica, la bioturbación probablemente rompió las conchas. Las estructuras sedimentarias no son comunes. Relativamente de mar somero y muy poco aporte terrígeno. En Uchuchaccua 100 km al S: Inferior (miembro 1); Medio (miembro 2) caliza gris masiva cubierta por 40m de caliza margosa; Superior (miembros 3, 4) caliza con intercalaciones rítmicas, caliza gris masiva, algo de caliza bituminosa, caliza margosa y calcilutita.

El límite inferior concordante es caliza de estratos medianos e intemperismo leve suprayaciendo calizas oscuras de estratos delgados y lutitas de la formación Pariatambo. (Compañía Minera Antamina S.A, 2006)

2.3.2.2. *Transición Celendín/Jumasha (ks-jce).*

El límite inferior de la formación Celendín está compuesta de lutitas y calizas de estratos delgados pasan concordantemente hacia abajo a calizas de bancos medios a potentes de la formación Jumasha. Esta es una zona de transición de hasta centenas de metros de espesor. El contacto es oficialmente colocado donde las margas contienen la fauna de la formación Celendín. (Compañía Minera Antamina S.A, 2006)

2.3.2.3. Formación Celendín (ks-ce).

Lutita gris y amarillenta, limonitas y calizas (localmente nodulares), dolomíticas y calcáreas, de grano fino, cantidades variables de calizas, margas, caliza nodular, estratos delgados fosilíferos. (Las margas son lodos calcáreos, depósitos calcáreos de arcilla o limo, los cuales son generalmente de color más claro.

Las margas varían considerablemente de acuerdo al ambiente de posicional. Algunas margas contienen una gran cantidad de conchas y caracoles mientras que otros no contienen conchas y pequeños cristales de calcita. La marga se puede metamorfizar a hornfels de calcosilicato o pelitas calcáreas). Estratos de mar somero localmente incluyendo evaporitas cerca al tope. El tope está marcado por el cambio de color de crema a rojo, a través de un contacto que varía de paralelo a una disconformidad ligeramente angular con formación Pocabamba (o Casapalca). (Compañía Minera Antamina S.A, 2006)

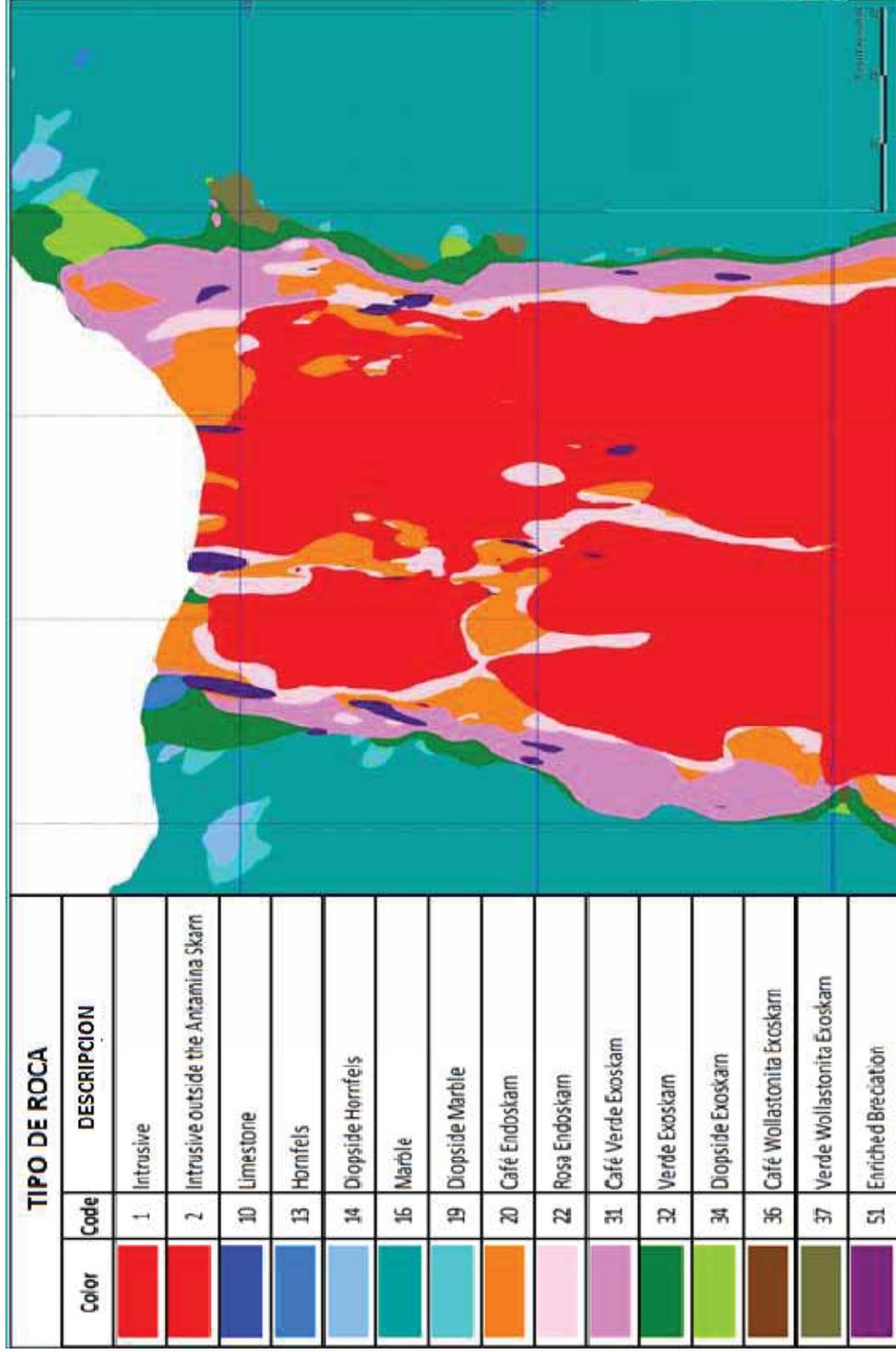


Figura 5. Tipo de roca U.M. Antamina – (Geología Antamina)

2.3.3. GEOLOGÍA ECONÓMICA.

Antamina es uno de los skarn de cobre-zinc más grande del mundo conocidos en la actualidad, contiene a la fecha un total de 559 MT de reservas minables con 1.23% de Cu, 1.03% de Zn, 13.7 g/t de Ag y 0.029% de Mo.

Se distinguen dos zonas mineralizadas. Los dos tercios centrales adyacentes al cuerpo intrusivo se caracterizan por la aparición de calcopirita, pirita y molibdenita. Una capa externa, que representa la tercera parte del depósito, contiene esfalerita, calcopirita, pirita y galena. La calcopirita representa el 92 % de cobre en el depósito mientras que la bornita mayormente restringida a una parte del yacimiento representa el 8 %. El zinc ocurre como esfalerita en diseminaciones, manchas y pequeños cuerpos masivos.

Las formaciones principales de roca usadas para la clasificación de la mena y de la roca de desmonte son las siguientes:

- Mena: consistente principalmente en mena de cobre (skarn de granate marrón) y menas de cobre/zinc (skarn de granate verde) en proporciones aproximadamente iguales, con algo de intrusivos mineralizados y mármol.
- Caliza: consistente en caliza no mineralizada, que constituye cerca del 75% de la roca de desmonte de mina. Algunas formaciones de mármol ocurren cerca del contacto con el skarn;
- Intrusivos: principalmente monzonita cuarcífera con escasa mineralización, constituyendo cerca del 15% de la roca de desmonte;
- Skarn de baja ley: skarn con bajos valores de mineralización, que constituye cerca del 10% de la roca de desmonte. (Compañía Minera Antamina S.A, 2006)

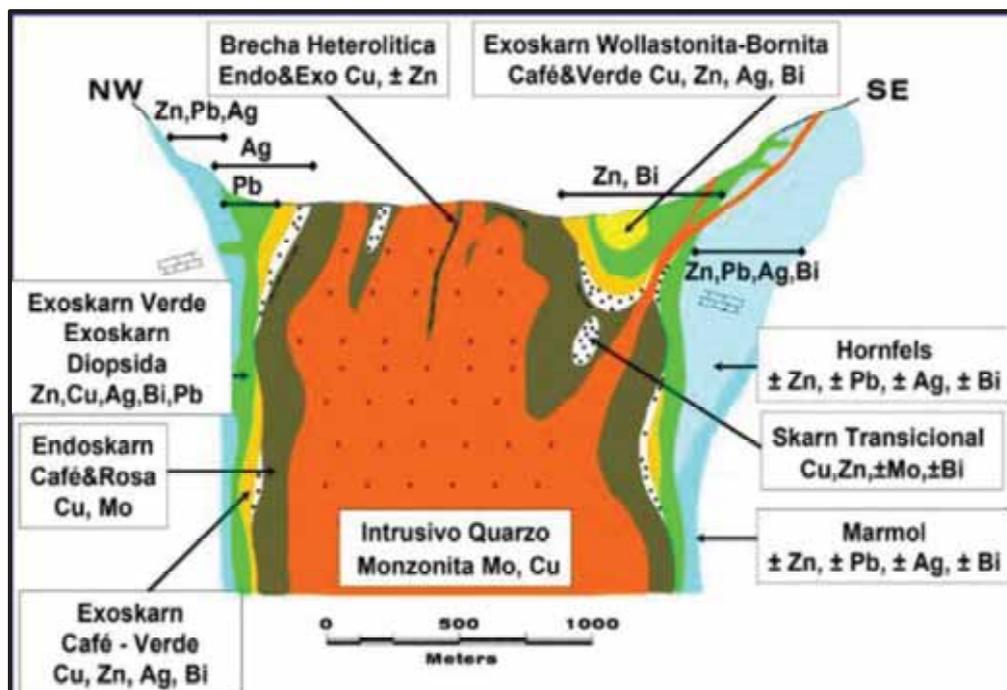


Figura 6. Zonamiento del skarn del depósito de Antamina – (Geología Antamina).

2.4. OPERACIONES MINERAS

Las operaciones mineras de Antamina para obtener su producto final, consiste básicamente en operaciones mina propiamente dichas para extraer el mineral, después es procesado en una planta concentradora cuyo producto de concentrados es transportado a través de un mineroducto hasta un puerto para su exportación. Los residuos del proceso metalúrgico son depositados en una presa de relaves.

2.4.1. OPERACIONES MINA.

Unidad Minera Antamina es una operación a tajo abierto y su ciclo de minado consiste en perforación, voladura, carguío y acarreo. Actualmente el tajo abierto tiene una profundidad de 800 metros aproximadamente, 3.20 km de largo y 2.8 km de ancho.

Para la explotación del mineral, el tajo abierto fue dividido en 12 fases. A la fecha se viene explotando las fases 8 y 9 que son de material estéril y la fase 6 de mineral.



Figura 7. Vista panorámica del tajo abierto – (Área de operaciones mina).



Figura 8. Vista panorámica de Fase 08 – (Área de operaciones mina).

2.4.1.1. Perforación.

Los trabajos de perforación son realizados con perforadoras eléctricas marca Bucyrus, Caterpillar y P&H, con diámetro de perforación de taladros de 12 ¼’’ y con longitud de hasta 17.0 m de perforación. Asimismo, con perforadoras autónomas (Diesel) Marca Sandvik con diámetro de perforación de taladros de 9 7/8’’, la longitud del taladro varía de 10.0 m a 17.0 m.

Para los cuidados de las paredes finales, utilizan voladura controlada con pre-cortes en bancos simples y dobles, para la perforación de pre-cortes utilizan perforadoras marca Atlas Copco con diámetro de perforación de 5’’.



Figura 9. Perforación de taladros – (Voladura Antamina).

Los diámetros de los taladros a varían según el tipo de taladro a perforar, siendo estos de la siguiente manera:

- Taladros de pre-corte: diámetro de 5”.
- Taladros Buffer: diámetro de 9 7/8”.
- Taladros de producción: diámetro de 12 ¼”.

Los parámetros de burden y espaciamiento varían de acuerdo al tipo de material que se perfora si es mineral o estéril y con variaciones dependiendo la dureza del mismo.

Tabla 2.
Parámetros de perforación

PARAMETRO	UNIDAD	MINERAL	DESMONTE
Burden	Metros	7.5	9.5
Espaciamiento	Metros	8.5	11
Altura de banco	Metros	15	15
Sobreperforacion	Metros	2	2
Densidad material	ton/m ³	2.9	2.7

Fuente: Voladura Antamina

2.4.1.2. Voladura.

El departamento de voladura se sub-divide en dos áreas: en diseño y en trabajo de campo. El primer grupo encargado de diseñar las mallas y las cargas de acuerdo a los parámetros de la roca, el segundo grupo se dedica a supervisar el carguío de los taladros con el explosivo y los accesorios de voladura.

El carguío de los taladros de perforación es realizada por la empresa Famesa Explosivos S.A.C., a través de camiones fábrica, los cuales tiene las siguientes capacidades:

- 10 toneladas de nitrato de amonio.
- 15 toneladas de emulsión.
- 30 galones de petróleo o aceite residual.

Los camiones fábrica están diseñados para hacer dos tipos de carguío según la necesidad y las condiciones del taladro, los cuales son:

- Sistema bombeable: se carga los taladros desde el fondo hasta la altura de carga deseada. Este sistema se aplica en taladros con presencia de agua y que tengan una altura mayor a 1m.
- Sistema vaciable: se carga los taladros por gravedad desde la boca del taladro, a través del brazo del camión y una manga. Este sistema se aplica en taladros secos.



Figura 10. Carguío de taladros en malla - (Voladura Antamina).

Para las voladuras primarias utilizan agentes de voladuras a base de emulsiones y ANFO. El ANFO es preparado con petróleo o aceite residual. Para las voladuras secundarias y voladuras de pre-corte, utilizan emulsiones encartuchadas y cordón detonante.

Los accesorios que usan son el booster de 1 lb y 2 lb y el uso del 100% de detonadores electrónicos, que les permite diseñar voladuras controladas; como medida de seguridad usan los detonadores no eléctricos de 18.0 m con 800 milisegundos de retardo de fondo.

El taco es de 6.5 m para zonas de mineral y 7.0 m para zonas de desmonte. El factor de potencia resultante de la distribución de carga es 0.30 - 0.34 kg/tn aproximadamente.

Tabla 3.
Parámetros de voladura

TIPO DE TALADRO	MEZCLA EXPLOSIVA	ACCESORIOS
Pre-corte Buffer	Emulsión encartuchada	Cordón detonante
Producción	HA 64	Booster 1 lb, detonador electrónico
Secundario	HA 73 gasificado	Booster 2 lb, detonador electrónico

Fuente: Área de voladura

2.4.1.3. Carguío y Acarreo.

El carguío del material fragmentado de los diferentes frentes de minado es realizado mediante las palas eléctricas P&H y Bucyrus, palas hidráulicas Hitachi y cargadores frontales LeTourneau y CAT. Los frentes de carguío se encuentran delimitados de acuerdo a los tipos de materiales mediante polígonos de minado. Estos polígonos también se encuentran en el sistema de despacho de mina.



Figura 11. Vista de la pala eléctrica P&H – (Operaciones mina).

Tabla 4.
Equipos de carguío

EQUIPO	CANTIDAD	CAPACIDAD
Pala eléctrica, P&H 4100 AC	4	77 yd ³
Pala eléctrica, P&H 4100 XAC	3	77 yd ³
Pala eléctrica, Bucyrus 495BI	2	70 yd ³
Pala hidráulica Hitachi EX5600	4	38 yd ³
Cargador LeTourneau L2350	1	29 yd ³

Fuente: Área de operaciones mina



Figura 12. Carguío con la pala hidráulica Hitachi – (Operaciones mina).

El acarreo es realizado mediante camiones Caterpillar CAT 777 D1 de 90 toneladas, Caterpillar CAT 793 de las series D/F de 240 toneladas y Komatsu 930E de 320 toneladas de capacidad.

Tabla 5.
Equipos de acarreo

EQUIPO	CANTIDAD	CAPACIDAD
Camión, CAT 777D1	3	90 TN
Camión, CAT 793D	7	240 TN
Camión, CAT 793F	18	240 TN
Camión, KOMATSU 930E-4SE	92	320 TN
Camión, KOMATSU 980E-4	2	380 TN

Fuente: Área de operaciones mina

El mineral extraído del tajo abierto es transportado a la chancadora primaria ubicada en la parte Sur del tajo abierto, luego es llevado por un túnel a través de una faja transportadora hacia la planta

concentradora, obteniéndose como productos final concentrados de cobre, zinc, plomo y plata. El desmonte extraído de la mina tiene como destino final dos (2) botaderos donde se dispone finalmente en capas que varían sus dimensiones en base a diseños geotécnicos.

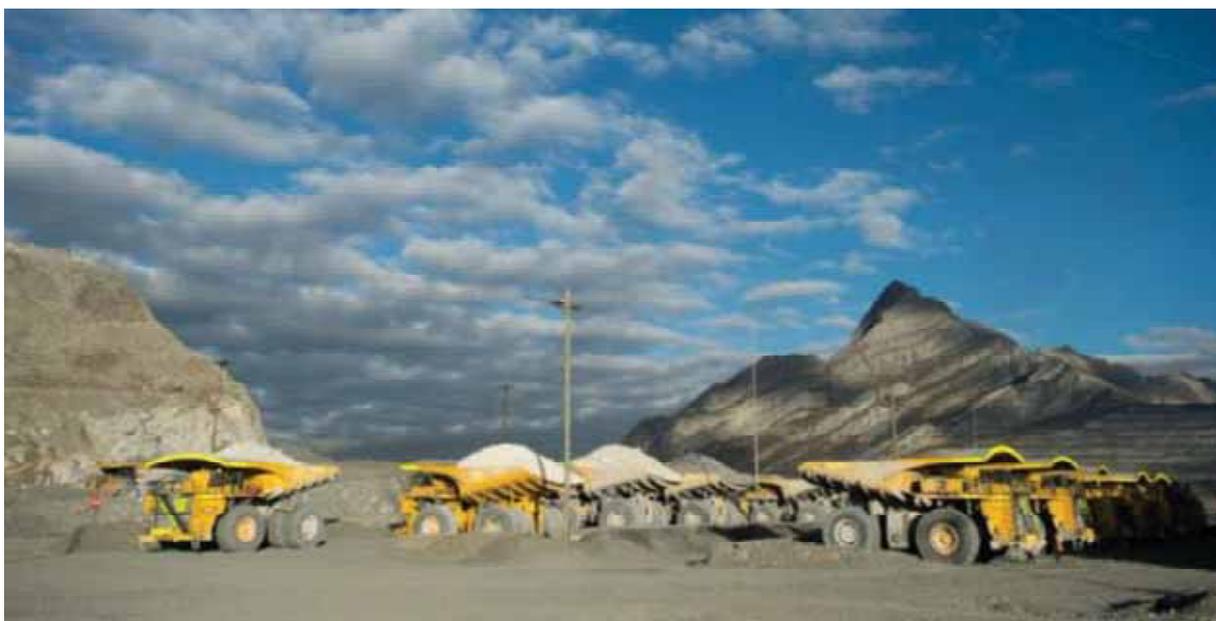


Figura 13. Camiones Komatsu 930E – (Operaciones mina Antamina).

2.4.2. LA CONCENTRADORA.

Actualmente la planta concentradora de Antamina posee una capacidad de procesamiento de 175 000 toneladas de mineral por día. La planta produce concentrados de cobre, zinc, plomo, plata y bismuto de acuerdo a la campaña.

Principalmente son dos los productos finales y son transportados en dos maneras: el primero se refiere a los concentrados de cobre y zinc que son enviados a través de un mineroducto de 302 km de longitud hacia el puerto de embarque ubicado en el Puerto Punta Lobitos, mientras que los concentrados de molibdeno, plata y Plomo son empacados en sacos sellados y transportados en camiones desde la mina hasta el puerto del Callao en Lima.

La planta concentradora de Antamina tiene una estructura compleja debido a los diferentes tipos de mineral que recibe para procesarlos por campañas; es decir, por periodos de acuerdo a las etapas del plan de minado. Sea cual fuese el mineral que se esté tratando, el proceso de producción de los concentrados podría explicarse en forma básica según la siguiente secuencia:

- El mineral extraído es transportado a la chancadora primaria ubicada en el mismo tajo.



Figura 14. Vista de la chancadora primaria en el tajo – (Operaciones mina Antamina).

- El material chancado es enviado a la planta concentradora mediante fajas transportadoras de 2.8 km de longitud instalada en un túnel de la misma longitud y fajas distribuidoras que descargan en tres (03) stock piles, los mismos que permiten el almacenamiento temporal de acuerdo al tipo de mineral abastecido.
- Ingreso del mineral al molino SAG y, posteriormente, a los tres molinos de bolas para reducir su tamaño de acuerdo a los requerimientos de la siguiente etapa de flotación.

- Paso de la pulpa (agua y mineral) a las celdas de flotación donde se recupera el cobre y/o zinc, según corresponda la campaña.
- Producción y recuperación de sub-productos como el molibdeno y plomo-bismuto.
- La pulpa es enviada a los espesadores para reducirles el agua y proporcionar un transporte económico y adecuado.
- Los concentrados son guardados en tanques de almacenamiento al exterior de la planta concentradora.
- Los concentrados son enviados a Huarmey a través del mineroducto de 302 kilómetros de largo, en un recorrido de aproximadamente 50 horas. (Compañía Minera Antamina S.A, s.f.)



Figura 15. Vista de la planta concentradora y los stoke's pile – (Antamina).

2.4.3. EL MINERODUCTO.

Después de la presentación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) inicial en marzo de 1998, se realizó una reevaluación de las diversas alternativas para el transporte de los concentrados de cobre y zinc de Antamina. Se optó por la construcción de un mineroducto que uniera la mina con el puerto “Punta Lobitos”, desde donde se exportan hacia el mundo. La ruta del mineroducto se diseñó cuidando de no ingresar al parque nacional del Huascarán.

Se trata de una tubería reforzada de 302 km que corre bajo el suelo y que es monitoreada en toda su trayectoria. El mineroducto ha sido diseñado con el uso de la tecnología más avanzada, que incluye una red de fibra óptica entre la mina y Huarney.

En su construcción se utilizó por primera vez en el Perú el Mechanized Ultrasonic Testing (ensayo mecanizado ultrasónico), método de comprobación de la calidad de los empalmes y las tuberías. Este mineroducto consta de una estación de cuatro bombas de alta presión y cuatro estaciones de válvulas con estranguladores de agua y pulpa, para reducir la excesiva presión producida en la caída de gradiente hacia la estación terminal del puerto “Punta Lobitos”.

Buscando preservar el ambiente con el menor impacto posible, el mineroducto de Antamina ofrece las siguientes ventajas con relación al traslado del mineral por tierra:

- Menos impactos negativos en el medio ambiente.
- Mayor seguridad.
- Menos impactos sociales.
- Mayor facilidad de acceso para la construcción, funcionamiento y mantenimiento.
- Menor costo operativo de transporte de concentrado. El mineroducto tiene las siguientes características:

- Longitud total: 302 km.
- Longitud de cada tubería: 12 m.
- Diámetro de cada tubería: 8 a 10 pulgadas (21 a 25 cm.)
- Espesor de la cubierta de polipropileno: 7mm.
- Material de la tubería: acero revestido interna y externamente.
- Resistencia de la tubería: recibe una presión de 70 Bar, pero puede soportar 200 Bar.
- Tiempo de vida de la tubería: 30 años.
- Tipo de unión entre tuberías: soldadura eléctrica.
- Profundidad promedio de las zanjas: 1,30 a 1,50m.
- Resistencia a sismos: hasta grado VIII en la escala de Mercalli modificada. (Avila, s.f.)

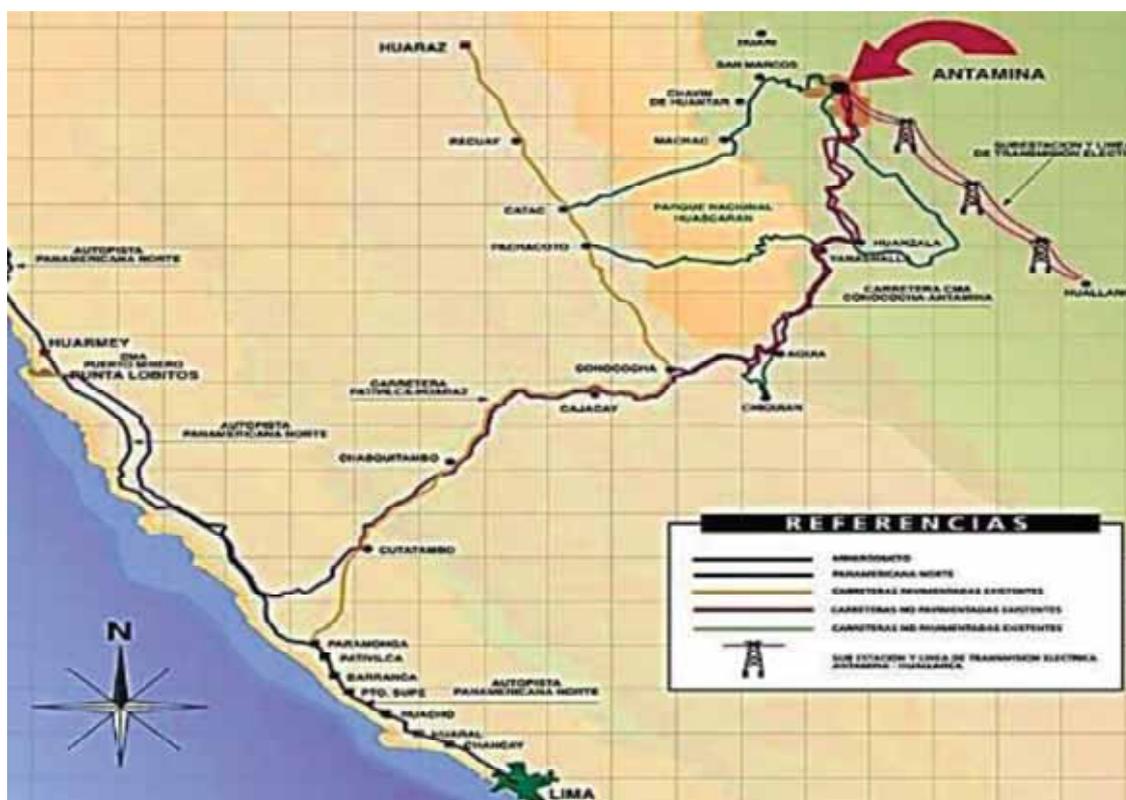


Figura 16. Recorrido del mineroducto – (Antamina).

El mineroducto incluye un tendido paralelo de fibra óptica que envía información sobre el recorrido del mineral a través de la tubería y que está interconectado digitalmente con todas las sedes de la compañía.

2.5. BASES TEÓRICAS

2.5.1. EXPLOSIVOS COMERCIALES.

Los explosivos son sustancias químicas, con la propiedad de modificarse a un estado más estable, por medio de una reacción química exotérmica de forma instantánea, desprendiendo toda la energía que contienen en forma de gases, sonido y calor de una manera violenta. Parte de esta energía liberada es empleado en la fragmentación de roca, especialmente la producción de gases a gran presión y temperatura. En la industria minera, la voladura es el método más provechoso para la excavación en roca dura. Existe una diversidad de clasificaciones para los explosivos en base a sus distintas características o aplicaciones. En la figura 17 se muestra una clasificación de los explosivos de uso industrial, que son aplicados en la actividad minera.

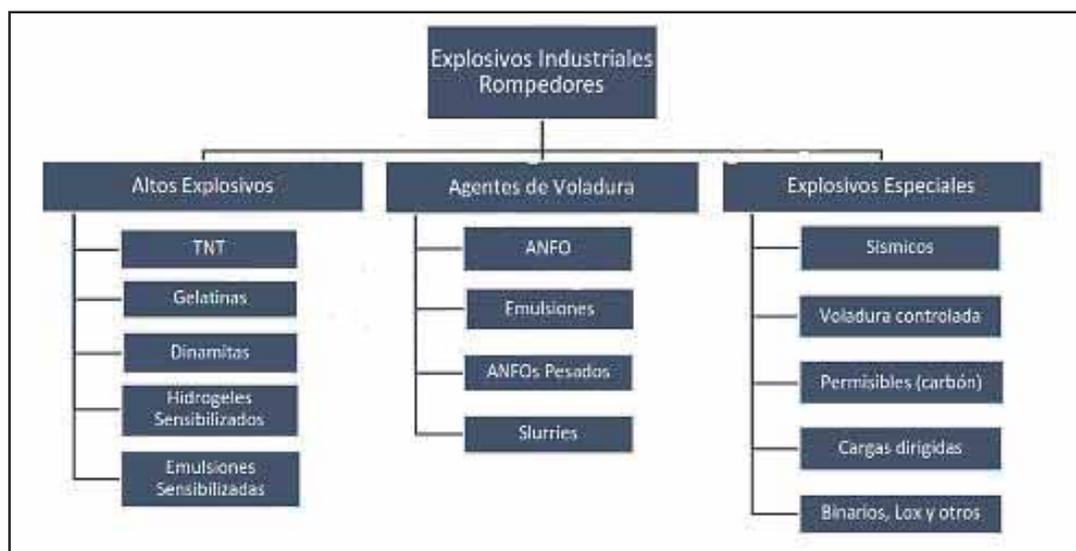


Figura 17. Clasificación de los explosivos industriales (EXSA)

2.5.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DE LOS EXPLOSIVOS.

2.5.2.1. Potencia.

Es la medida del “contenido de energía” del explosivo y del trabajo que puede desarrollar para producir efectos mecánicos. No existe un criterio de medición que se utilice para todo los fabricantes, existen muchos métodos como son: Prueba balística de mortero, prueba de trauzl, craterización, método de potencia sísmica.

Se expresa como potencia absoluta por volumen (ABS) y potencia absoluta por peso (AWS). También se puede expresar como una comparación de la energía de un explosivo referente al ANFO, el cual es tomado como el 100%, obteniéndose la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen. Entonces, es un valor relativo cuyo propósito es comparar los explosivos entre ellos.

La siguiente figura muestra la variación de la potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión.

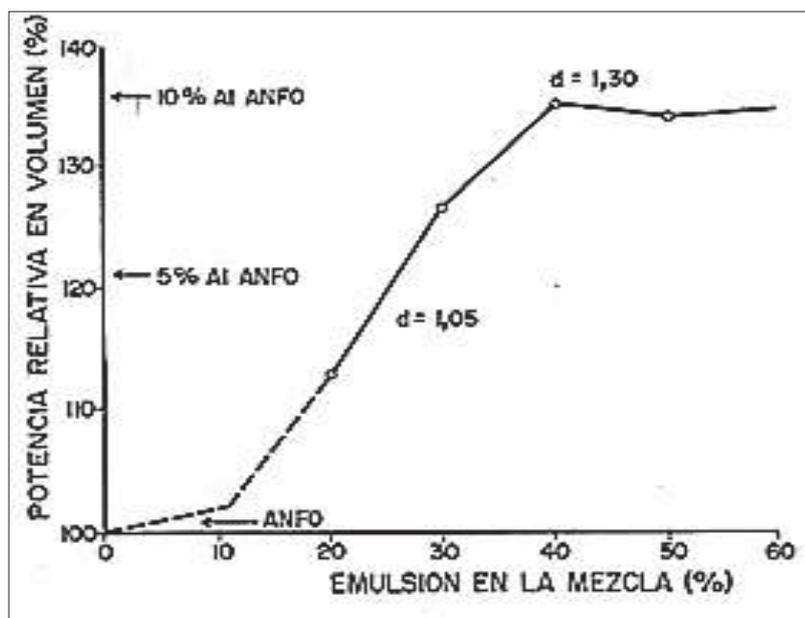


Figura 18. Variación de la potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión (Bamfield & Morrey, 1984)

En la figura 18, se puede observar que encima del 40% y 50 % de emulsión en la mezcla de un ANFO pesado, la potencia alcanza un límite y empieza a disminuir, esto debido a que la separación de las partículas de ANFO resulta elevada para que estas actúen eficientemente como puntos calientes y propagadores de la onda de choque.

2.5.2.2. Brisance o poder rompedor.

Se llama así al efecto “demoledor” que aplica el explosivo sobre la roca para iniciar su rompimiento. Como factor dinámico de trabajo es consecuencia de la onda de choque y está vinculado a la densidad y a la velocidad de detonación que muchas veces se utiliza como base comparativa.

Cabe recalcar que brisance es el efecto de impacto que tritura la roca y potencia el efecto de expansión y empuje del material roto, para desplazarlo y conformar la pila de escombros. Ambos se conjugan en la voladura.

2.5.2.3. Velocidad de detonación.

Es la velocidad a la cual la reacción que la onda de detonación se propaga a lo largo de la columna explosiva, y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía.

Los factores que la afectan son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento, la iniciación y el envejecimiento. Para los tres primeros, conforme aumentan dichos parámetros la velocidad de detonación resultante crece significativamente. (Lopez Jimeno, 2004, pág. 142)

Ver Figura 19.

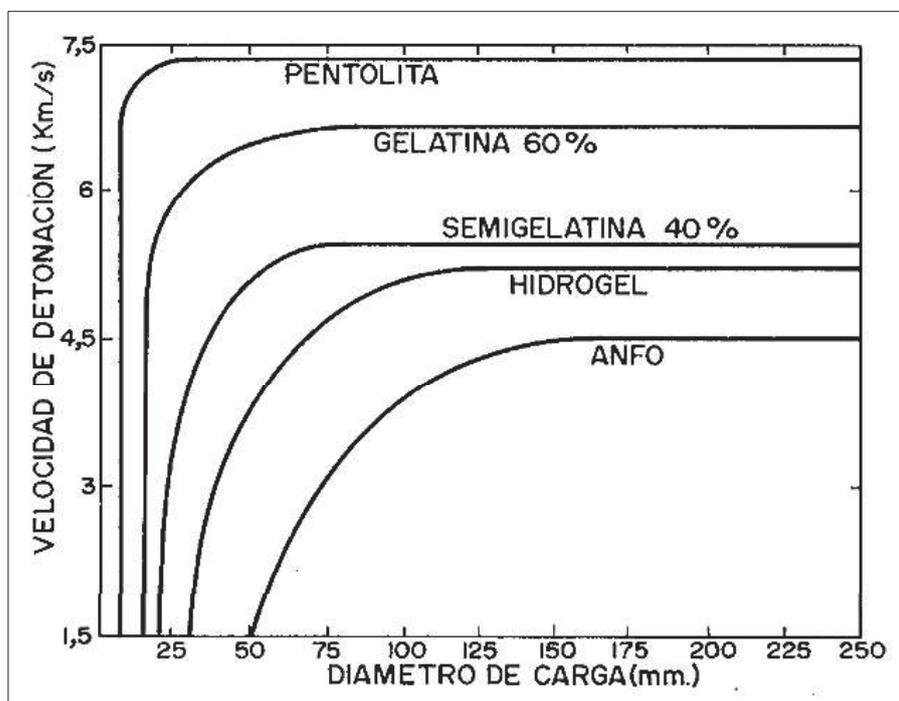


Figura 19. Influencia del diámetro sobre el VOD (Ash, 1977)

2.5.2.4. Resistencia al agua.

Es capacidad de un producto para resistir la penetración del agua sin perder sus características. La unidad de medida empleada es la de “horas”. A pesar de que no existe una escala numérica reconocida internacionalmente para evaluar la resistencia al agua de un producto, ésta generalmente se determina por el tiempo en el que el explosivo puede permanecer sumergido y después del cual aún puede ser detonado manteniendo sus performances originales.

2.5.2.5. Categoría de humos / balance de oxígeno.

La detonación de todo explosivo comercial produce polvo, óxidos de nitrógeno (NO-NO₂), vapor de agua (H₂O), óxidos de carbono (CO-CO₂) y eventualmente gases sulfurosos (H₂S, SO₃ y AlO₂) si contenía azufre o aluminio. Entre los gases inocuos generados hay siempre cierto porcentaje de productos irritantes tóxicos o letales llamados en conjunto “humos”, como el

monóxido de carbono y el bióxido de nitrógeno. De acuerdo a la proporción contenida de estos gases tóxicos se ha establecido escalas de clasificación por grado de toxicidad para la exposición del personal trabajador después del disparo. Ver figura 20.

CATEGORÍA	VOLUMEN DE GASES NOCIVOS (CO, NO ₂)
1 ^{ra}	de 0 a 0,16 pie ³
2 ^{da}	de 0,16 a 0,33 pie ³
3 ^{ra}	de 0,33 a 0,67 pie ³
Cuya equivalencia métrica según el ISO es:	
CATEGORÍA	VOLUMEN DE GASES NOCIVOS (CO, NO ₂)
1 ^{ra}	de 0 a 4,53 dm ³
2 ^{da}	de 4,53 a 9,34 dm ³
3 ^{ra}	de 9,34 a 18,96 dm ³

Figura 20. Categoría de gases nocivos post voladura (EEUU, Institute of makers of explosives).

Es fundamental en la formulación de la mezcla explosiva asegurar una completa combustión con la máxima potencia y mínima producción de gases tóxicos, siendo necesario controlar la proporción de oxígeno suministrado a los componentes combustibles (añadirlo o restarlo según convenga) para que logren su mayor nivel de oxidación.

2.5.2.6. Densidad.

La densidad se expresa normalmente como gravedad específica la cual es la relación de la densidad del explosivo con la densidad del agua, esta propiedad determina el peso de explosivo que puede cargarse dentro de un diámetro específico de taladro. La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0.8 y 1.6 g/cm³ (Ver Tabla 01). Generalmente, cuanto más denso sea un explosivo, proporcionará mayor poder rompedor.

Tabla 6.
Densidades según tipo de explosivo

TIPO DE EXPLOSIVO	DENSIDAD (g/cc)
Emulsión a granel	1.1 – 1.6
ANFO cargado neumáticamente	0.8 – 1
ANFO vaciado	0.8 – 0.9
ANFO encartuchado	1.1 – 1.2
ANFO pesado	1.1 – 1.4
Dinamitas	1.05 – 1.5
Hidrogeles	1.15 – 1.30

Fuente: Konya & Albarrán, 1998

Los explosivos tienen cada cual sus límites superior e inferior de densidad; cuando por cualquier razón queden fuera de estos límites se dice que su densidad es “crítica” o “de muerte”, porque perderán sus características al momento de la detonación, llegando incluso a no reaccionar.

En los agentes de voladura granulares la densidad puede ser un factor crítico en el interior, pues si es muy baja se vuelven sensibles al cordón detonante axial, que los comienza a iniciar en régimen de deflagración antes que arranque el cebo o booster, o de lo contrario si es muy alta no detonan (es el caso de insensibilidad por incremento de la densidad bajo presión).

2.5.3. AGENTES DE VOLADURA.

Los agentes de voladura son explosivos lentos o deflagrantes y no son sensibles al fulminante N° 6 y 8, por lo que es necesario un potenciador o cebo reforzado (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 la fragmentación de roca.

2.5.3.1. Anfo.

El ANFO es una mezcla explosiva industrial, su composición es de 94% nitrato de amonio y 6% combustible. El nitrato de amonio es una sal inorgánica, no explosiva, siendo de utilización en minería aquella que se fabrica como partículas esféricas o prills porosos.

El inconveniente 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.

2.5.3.2. ANFO Pesado.

El ANFO Pesado es la mezcla de dos agentes explosivos, el ANFO y la emulsión matriz en diferentes proporciones, donde la emulsión envuelve los prills de ANFO (Ver Figura 21), formando una matriz energética con propiedades específicas.

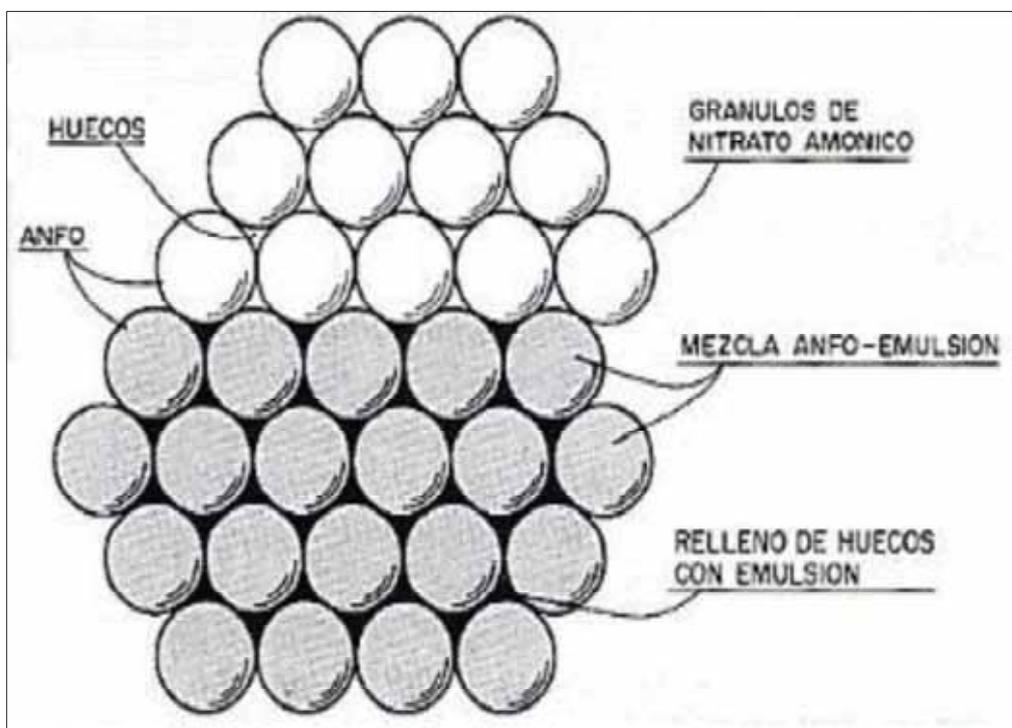


Figura 21. Estructura del ANFO pesado (Du pont, 1986)

Existen diversas mezclas de ANFO Pesado, las cuales poseen diferentes características. La siguiente figura muestra la variación de estas características incluyendo su capacidad de resistencia al agua, densidad, así como la velocidad de detonación.



Figura 22. Características de diferentes mezclas de ANFO Pesado (Du pont, 1986)

Tabla 7.
Principales propiedades de mezclas explosivas

TIPO DE EXPLOSIVO	DENSIDAD (g/cc)	VOD (m/s)
ANFO	0.80 ± 0.01	3800 – 4450
HA 28	0.92 ± 0.01	4350 – 4600
HA 37	1.08 ± 0.01	4700 – 4900
HA 46	1.23 ± 0.01	4800 – 5300
HA 55	1.27 ± 0.01	5100 – 5400
HA 64	1.29 ± 0.01	4800 – 5200
HA 73	1.31 ± 0.01	4300 – 5100
Emulsión estándar	1.33 ± 0.01	5350 – 5550

Fuente: Famesa/Enaex

2.5.3.3. Emulsión.

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, comúnmente diésel 2.

El tamaño de los componentes de esta mezcla (oxidante y combustible) tiene influencia directa en la velocidad de detonación y en general en el performance del explosivo. El proceso de fabricación de los explosivos ha llevado a una reducción gradual 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. (Lopez Jimeno, 2004, pág. 155)

Tabla 8.
Tamaño de partícula de los explosivos.

EXPLOSIVO	TAMANO (mm)	ESTADO	VOD (km/s)
ANFO	2	Solido	3,2
Dinamita	0.2	Solido	4
Hidrogel	0.2	Solido/liquido	3.3
Emulsión	0.001	Liquido	5 – 6

Fuente: Bampfield & Morrey, 1984.

La emulsión pura no es un explosivo que pueda detonar, debido a que no es sensible ni por lo menos al booster ya que su densidad es considerablemente alta. Para sensibilizarla, se puede emplear un mecanismo físico como la generación de burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas adiabáticamente se comportan como puntos calientes o hot spots, favoreciendo tanto la iniciación como la propagación de la detonación. Estos agentes gasificantes pueden ser poliestireno expandido o microesferas de vidrio. A la vez, se puede usar la sensibilización química a través de una solución gasificante como es el nitrito de sodio.

2.5.4. EMULSIÓN GASIFICABLE.

Explosivo basado en emulsión que se sensibiliza mediante un aditivo químico (gasificante); el cual desarrolla su sensibilidad en el interior del taladro de voladura. Químicamente, está formulada para reaccionar con nitrito de sodio, que es el agente gasificante.

El producto de la sensibilización es una mezcla explosiva de menor y variable densidad que depende de la mayor o menor adición del gasificante. El esponjamiento obtenido dentro del taladro por efecto de la sensibilización hace que se requiera una menor carga de explosivo en el taladro y se obtenga la misma altura de carga de diseño.

En la Figura 23, se muestra la gasificación que ocurre dentro de un taladro cargado con emulsión gasificable frente a otro cargado con ANFO Pesado a base de emulsión matriz, cuya carga lineal no varía debido a que su densidad es constante.

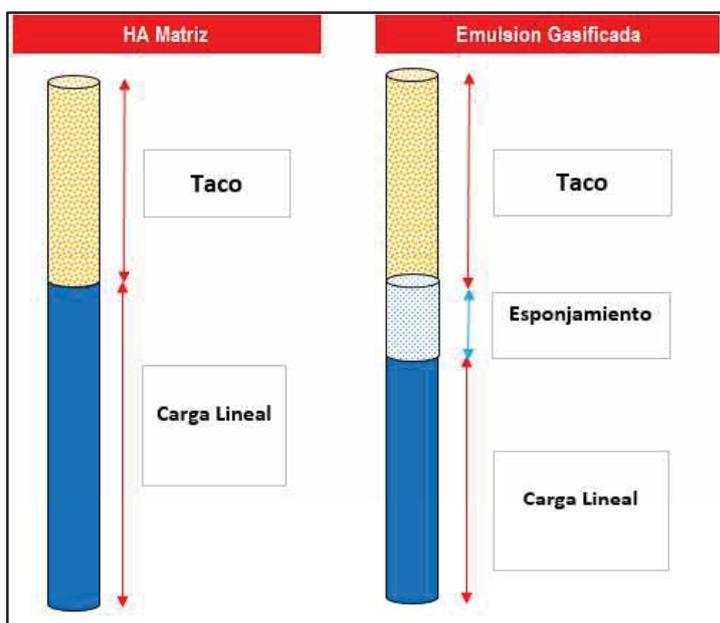


Figura 23. Diseño de carga con ANFO pesado y emulsión gasificable (Elaboración propia)

Los aspectos más relevantes de la emulsión gasificada SAN-G APU en comparación con el ANFO y ANFO Pesado son:

- Alta velocidad de detonación, del orden de 5600 m/s aproximadamente.
- Amplio rango de densidad, desde 0.80 hasta 1.20 g/cm³.
- Alto grado de resistencia al agua.
- Homogeneidad de la sustancia dentro del taladro.
- Adecuado balance de oxígeno y no producción de gases nitrosos de detonación.
- Apropiado acoplamiento en el taladro por su alta viscosidad.

2.5.4.1. Características Técnicas De La Emulsión SAN-G APU.

La emulsión SANG APU es una emulsión gasificable formada por una solución microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un emulsificante. Las características técnicas de este explosivo se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9.
Características técnicas de la emulsión SANG APU

EMULSION G	UNIDAD	VALOR
Densidad inicial	g/cc	1.32 ± 3%
Densidad sensibilizada	g/cc	0.80 a 1.20
Viscosidad en condiciones normales (*)	Cp	Min. 12000
VOD de la emulsión sensibilizada (**)	m/s	4800 a 5800
Presión de detonación	Kbar	51 a 98
Energía	Kcal/kg	805
Volumen normal de gases	L/kg	1025
Potencia relativa en peso (***)	%	90
Potencia relativa en volumen (***)	%	152
Resistencia al agua		Excelente
Categoría de humos		Primera
Diámetro crítico	mm	76
Tiempo de permanencia en el taladro	días	7

Fuente: Famesa

2.5.4.2. Sensibilización y proceso de gasificación de la emulsión.

La sensibilización de la mezcla a base de emulsión se produce mediante la producción de burbujas de gas por el aditamento de un agente gasificante, siendo en este caso el nitrito de sodio (NaNO_2). Este componente químico reacciona con el nitrato de amonio (NH_4NO_3), creando pequeñas burbujas de gas nitrógeno. A continuación se muestra la reacción química que ocurre:

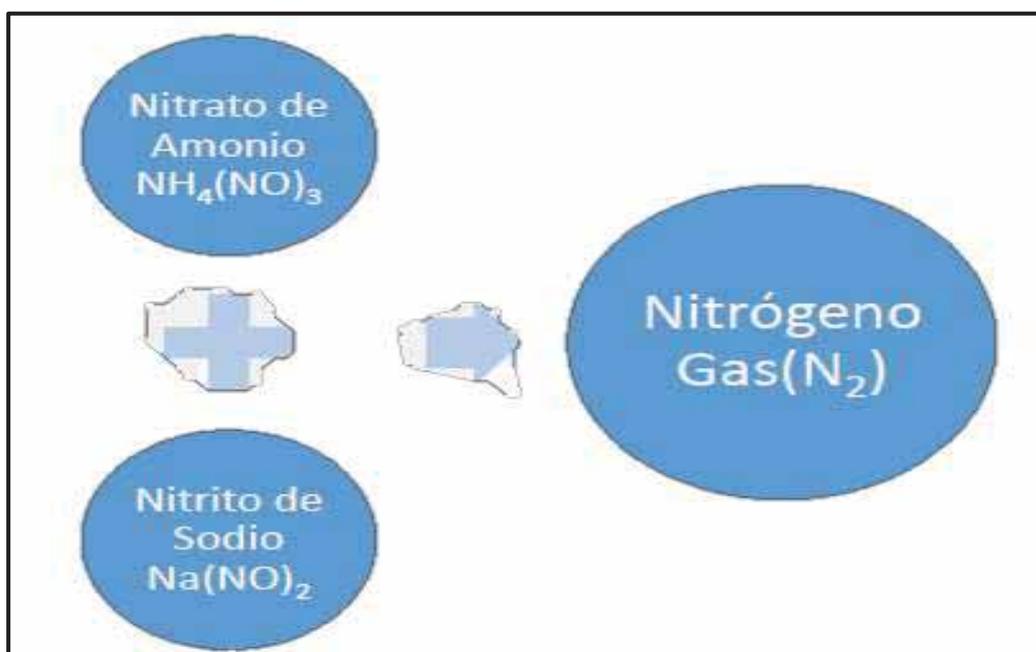
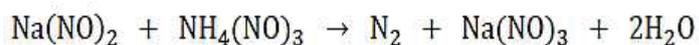


Figura 24. Reacción de gasificación de la emulsión gasificable (Vilela, 2014)

2.5.4.3. Solución gasificante.

Es un agente sensibilizante constituido por una solución acuosa de sales oxidantes químicamente balanceada de naturaleza iónica, es inerte sin capacidad de detonar; que se mezcla in situ en diferentes proporciones con la emulsión gasificable antes de su carguío en los taladros

produciendo una mezcla explosiva homogénea de menor densidad. (Famesa Explosivos S.A.C, 2016)

Tabla 10.
Características de la solución gasificante

	ASPECTO	DENSIDAD	Ph
Solución gasificante	Líquido acuoso	1.12 gr/cc	4.5

Fuente: Famesa



Figura 25. Presentación de solución gasificante – (Famesa)

2.5.4.4. Factores que afectan la gasificación.

a) Cantidad de solución gasificante.

La mayor o menor adición de la solución gasificante hará que la gasificación varíe y por ende la densidad. A mayor inyección el esponjamiento obtenido será mayor pero las propiedades de energía y velocidad de detonación disminuirán proporcionalmente.

b) Temperatura de emulsión.

La temperatura es un factor que influencia directamente a la gasificación. A mayor temperatura se necesitara menor inyección de solución gasificante para obtener la densidad deseada y esto ocurre inversamente a menor temperatura.

2.5.4.5. Fabricación de la emulsión gasificada en campo.

La emulsión gasificable es cargada por camiones fábrica que a diferencia de las unidades convencionales que cargan ANFO pesado, también poseen un compartimiento para la solución gasificante y están provistos de un sistema de gasificación de la emulsión. El producto puede ser cargado al taladro mediante gravedad o por bombeo.

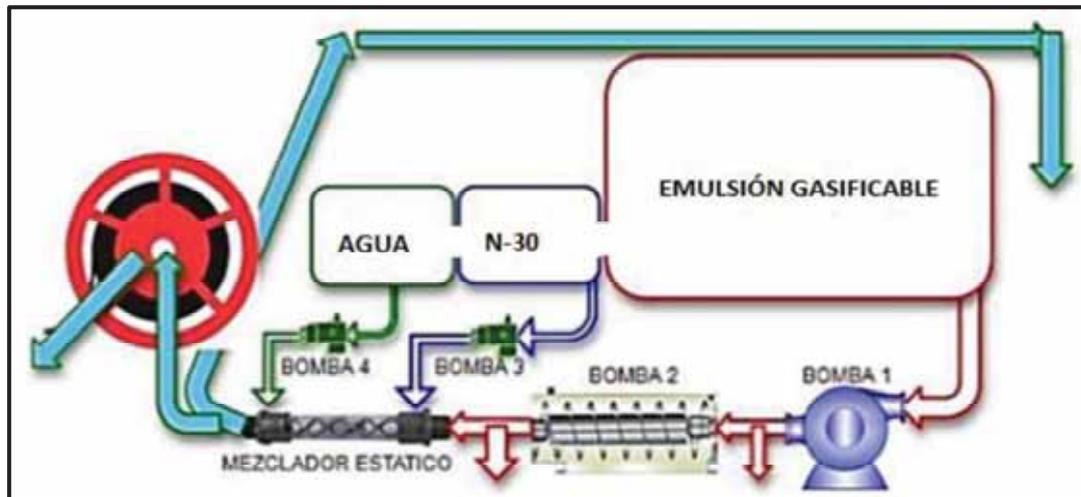


Figura 26. Fabricación de emulsión gasificada en camión Fábrica – (Famesa)

Como se muestra en la Figura 26, la emulsión gasificable es bombeada desde su compartimiento hasta un mezclador estático donde se dosifica la solución gasificante y se

combinan homogéneamente. Luego se procede a agregar un porcentaje de agua con el fin de liberar presión en la última bomba que bombea el producto hacia el taladro.

2.5.4.6. ANFO pesado gasificable.

El proceso de gasificación del ANFO Pesado consiste en sustituir en su composición la emulsión matriz por una emulsión gasificable, y la adición de la solución gasificante para formar pequeñas burbujas las cuales actúan en forma de hot spots (puntos calientes) adicionales a los que proporcionan los prills del ANFO. Esta gasificación hace que las propiedades referidas a VOD, potencia y energía se vean incrementado en comparación a un ANFO pesado 73 convencional.

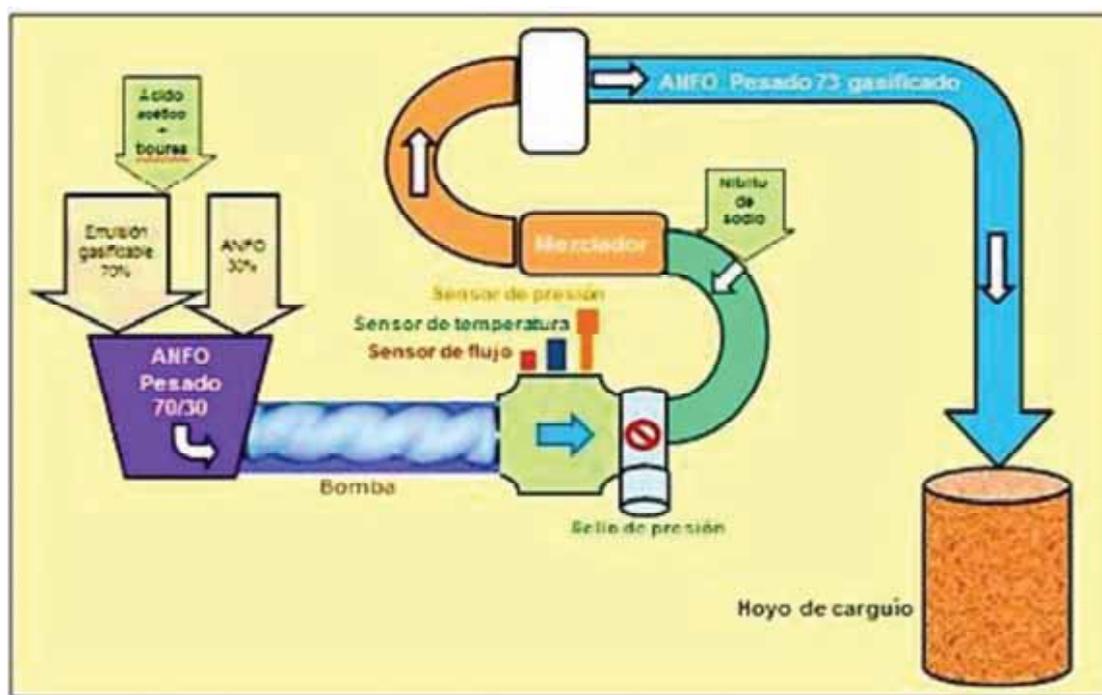


Figura 27. Proceso de fabricación de ANFO pesado 73 Gasificable – (Famesa)

En la Figura 27 se muestra el proceso de fabricación del ANFO pesado 73 gasificable en el camión fabrica, donde primero se realiza la fabricación del ANFO pesado 73 a base de emulsión

gasificable para luego agregar la solución gasificable, los cuales pasan por un mezclador que da como resultado un producto homogéneo que va directo al taladro.

2.5.5. VARIABLES EN EL PROCESO DE TRITURACION DE ROCAS.

2.5.5.1. Variables no controlables.

Generalmente son las propiedades físico-químicas del macizo rocoso.

- Resistencia compresiva (S_c).
- Resistencia tensional (S_t).
- La hidrología y las condiciones climáticas.
- La geología local, regional y estructural.
- Las fallas, contactos, discontinuidades, las caracterizaciones geomecánicas (RQD, RMR, Q, etc.).
- Las constantes elásticas del macizo rocoso: Relación de Poisson (μ), el módulo de elasticidad de Young (E), el módulo de rigidez (G), la constante de Lamé (λ), etc.

2.5.5.2. Variables controlables.

- Variables geométricas: Entre ellas se tienen:
 - a) Burden (B)
 - b) Diámetro de taladro.
 - c) Espaciamiento (S)
 - d) Longitud de carga.
 - e) Sobre perforación.
 - f) Taco, Altura de banco.
 - g) Profundidad de taladro, etc.

1.5.5.2.1. Aplicación del modelo matemático de R.L ASH para la determinación de parámetros geométricos de perforación y voladura.

- Datos geológicos.
 - Tipo de roca: andesita – granito (media-dura).
 - Estructura: fracturamiento de 0.6-0.8 m.
 - Condición del terreno: seco-húmedo.
 - Resistencia a la compresión: 100-170 Mpa.
 - Dirección de estratos: contrario al talud.
- Datos de perforación.
 - Diámetro de taladro: 12 ¼ pulgadas.
 - Altura de banco H = 15 m.
- Datos del explosivo.
 - Emulsión gasificable (densidad = 1.31 g/cc).
 - Booster, electrónico, fanel, cordón detonante y otros accesorios de voladura.

1. Cálculo de burden (B).

$$B = \frac{Kb}{12} * De$$

Donde:

B: burden (pies)

De: diámetro de la carga explosiva (pulg.)

Kb: factor utilizado de tablas según tipo de roca y tipo de explosivo

Clase de explosivo	Densidad del Explosivo	Clase de Roca		
		Roca Blanda	Roca Media	Roca Dura
Baja Densidad	0.8-0.9 g/cm ³	30	25	20
Mediana Densidad	1.0 - 1.2 g/cm ³	35	30	25
Alta Densidad	1.3 - 1.6 g/cm ³	40	35	30

$$B = \frac{30}{12} * 12.25 = 30.625 \text{ pies} \approx 9.5 \text{ m.}$$

2. Cálculo de espaciamiento (S).

$$S = 1.15 * B = 1.15 * 9.5 \approx 11.0 \text{ m.}$$

3. Calculo de taco (T).

$$T = K_t * B \text{ Donde } K_t = \text{relación de taco.}(0.7 - 1.0)$$

$$T = 0.7 * 9.5 \approx 7 \text{ m.}$$

- **Variables físico-químicas:**

- Tipo de mezcla explosiva
- Densidad de la mezcla explosiva.
- Parámetros del explosivo.

- **Variables de tiempo:** Tipos y tiempos de retardo, tipos y secuencia de salida.
- **Variables operativas:** Fragmentación requerida en el diseño.

2.5.6. FRAGMENTACIÓN DE ROCA POR VOLADURA.

La fragmentación de roca por voladura es un indicador que se usa para evaluar el resultado de las voladuras. Según Scott (1996) los fragmentos en la pila de material roto tienen 3 fuentes:

- Fragmentos formados por nuevas fracturas creadas por la detonación de la carga explosiva.
- Los bloques insitu que han sido simplemente liberados del macizo rocoso sin más rotura.
- Los fragmentos formados por la extensión de las fracturas insitu en combinación con las nuevas fracturas.

En las voladuras la onda de choque y la presión de gas colaboran significativamente a la fragmentación de la roca.

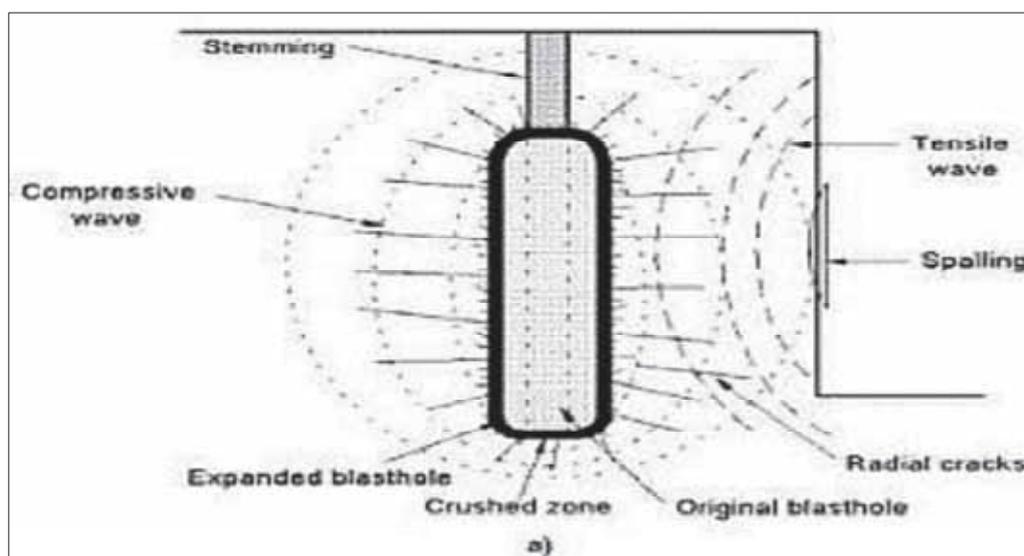


Figura 28. Propagación de la onda de choque – (Manual de voladura Enaex)

La detonación de una carga explosiva en el taladro genera una onda de choque inicial muy fuerte que se va disgregando en ondas de esfuerzo, ondas P y S, en el macizo rocoso circundante. En un plano normal a el eje del taladro, la onda de esfuerzo puede ser considerada que tiene un componente radial y tangencial de esfuerzos. Inicialmente, cerca del taladro, los esfuerzos radiales y tangenciales son compresivos, (scott, 1996). La alta presión a la que está expuesta la roca rompe la zona alrededor del taladro, zona de Trituración. El trituramiento continúa hasta que el esfuerzo haya sido atenuado por debajo de la resistencia a la compresión dinámica de la roca. Al poco tiempo el esfuerzo tangencial cerca del taladro, inducido por la onda compresiva radial, se convierte en tensión. Si el esfuerzo de tensión tangencial excede la resistencia dinámica a tensión se forma las fracturas radiales.

2.5.6.1. Efecto de las discontinuidades sobre la fragmentación por voladura.

Las propiedades de la roca son variables, no controlables, en el diseño de voladura. El rendimiento de una voladura es influenciado por la estructura geológica y la resistencia de la roca. En casi todas las operaciones mineras las rocas están lejos de ser homogéneas. Existen juntas, planos de estratificación, rellenos, etc. los cuales tiene una gran influencia sobre la voladura. Estos se definen como planos de debilidad dentro del macizo rocoso los cuales no han tenido un movimiento visible. Habrá una diferente transmisión de la onda de esfuerzo a través de las juntas dependiendo de si las juntas están cerradas, abiertas o rellenadas. Las juntas cerradas no afectan la transmisión de la onda de esfuerzo mientras que las juntas abiertas y rellenadas introducen una discordancia de la impedancia y refleja la onda de esfuerzos. Si la onda reflejada tiene la suficiente fuerza entonces la rotura toma lugar. Las grietas radiales los cuales se han formado por la onda principal en roca continua se interrumpen prematuramente por la junta.

2.5.6.2. Efecto de los parámetros controlables de voladura sobre la fragmentación.

Más de veinte factores influyen en la fragmentación de una voladura. La influencia de la interacción de las variables de diseño de una voladura sobre la fragmentación ha sido estudiada por muchos investigadores. Estas variables son: factor de potencia, malla de perforación, diámetro del taladro, tiempos de retardo e inexactitud de la perforación.

2.5.6.2.1. Perforación.

Si la cantidad de explosivo por taladro es tal que el radio que afecta al macizo rocoso es pequeño, la desalineación de la perforación entregará una mala fragmentación. Cuando los taladros se disparan independientemente, habrá un cilindro roto de macizo rocoso alrededor de cada taladro. En una sección horizontal a través del banco, cada cilindro puede representarse como un círculo. Para la fractura de todo el macizo rocoso durante la voladura cada punto debe estar al menos dentro de uno de estos círculos.

2.5.6.2.2. Secuencia de salida del Disparo.

El diseño de la secuencia de salida del disparo proporciona la ruta para la onda de detonación, de iniciación, para el explosivo cargado en los taladros. Un requerimiento principal es que con el progreso de la voladura siempre se forme la cara libre. La cara libre proporciona una superficie de reflexión para la onda de choque, el cual es necesario para la fragmentación del macizo rocoso. Sin la cara libre, el resultado de las voladuras sería muy pobre. Hacia este fin, el diseño de la secuencia de salida del disparo decide el movimiento y dirección de la roca para la creación de la cara libre para los posteriores taladros y filas.

Varios diseños de salida tales como de fila a fila, diagonal, tipo V se usan en los proyectos de voladura. La adecuada selección de la secuencia de salida puede proporcionar un resultado óptimo de la voladura en términos de fragmentación, desplazamiento, control de los taludes, etc. Esto es

en gran parte atribuido a la importancia del burden efectivo en cualquier voladura. Al cambiar el diseño de la secuencia de salida de la voladura, el burden efectivo y por lo tanto el ratio de espaciamiento a burden también cambia.

2.5.6.2.3. Selección de retardo.

La correcta elección del intervalo de retardo es una de las tareas más difíciles en el diseño de voladura. El retardo tiene la capacidad de afectar cada aspecto de la voladura, como la fragmentación, estabilidad, excavabilidad, impacto ambiental y sobre quiebre.

Los taladros pueden retardarse por las siguientes razones:

- Mejorar la fragmentación de la pila de material.
- Mayor control sobre el desplazamiento de la pila.
- Reducir el sobre quiebre y los niveles de vibración.

a) Detonadores no eléctricos.

Estos sistemas se caracterizan por producir una onda de choque de baja velocidad (aprox. 2000 m/s) que se transmite a través de un tubo de plástico en cuyo interior contiene una película delgada de explosivo, el cual conduce hacia el detonador. La reacción no es violenta, es relativamente silenciosa y no causa interrupción ni al explosivo ni al taco.

La exactitud de un detonador se refiere a qué tan dispersos están los tiempos de retardo referente a la media de una serie de detonadores del mismo periodo. Estadísticamente, la precisión está dada por el coeficiente de dispersión (cociente entre la dispersión y la Media).

b) Detonadores electrónicos.

La necesidad de optimizar resultados en los procesos de voladuras y reforzar el control de vibraciones ha forzado, en las últimas décadas, dar importancia a la precisión de los detonadores existentes. La última generación de alta precisión es de los detonadores electrónicos, los cuales contienen un circuito integrado en un chip, en lugar del componente de retardo pirotécnico. Estos accesorios permiten, por su gran precisión, un extraordinario control del proceso de fragmentación, así como de las vibraciones y proyecciones.

2.5.6.2.4. Taco (Stemming).

El stemming es el material colocado en la parte superior de la columna de explosivo en el interior del taladro, cuyo propósito es retardar la liberación de los gases logrando con ello un mejor aprovechamiento de la energía en la rotura de la roca. El stemming ofrece algunas ventajas significativas en el resultado de la fragmentación siempre y cuando sea usada con un criterio adecuado. Consecuencia del taco sobre el rendimiento de las mezclas explosivas.

- a) El efecto del confinamiento sobre la velocidad de detonación.*
- b) El efecto del confinamiento sobre la presión de gas.*
- c) El efecto del stemming sobre la onda de esfuerzo.*
- d) Longitud del stemming.*

2.5.7. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN.

El estudio granulométrico es el modo de determinar el tamaño de las partículas y su distribución, en una muestra de material fragmentado conformada por granos de diversos tamaños, las distintas proporciones separadas indican el grado de finura de dicha muestra, tal grado esta expresado como porcentaje en peso retenido en determinada malla.

2.5.7.1. Modelos de predicción de fragmentación.

Existen muchas teorías y modelos matemáticos que se utilizan con el fin de predecir el tamaño del fragmento que deseamos obtener en las voladuras de material, tanto para mineral y desmonte en los proyectos dentro del tajo.

2.5.7.1.1. Modelo de Larsson.

Este modelo se propuso por Larsson (1973) para la determinación de K_{50} o la abertura de malla cuadrada por la que pasa el 50% del material volado; utiliza igual que la de Kusnetsov parámetros de diseño de voladura, propiedades del explosivo, así también las características del macizo rocoso se muestran en la ecuación.

$$K_{50} = s * e^{(0.58 * \ln(B) - 0.45 * \ln(\frac{S}{B}) - 1.18 * \ln(\frac{C_e}{C}) - 0.82)}$$

Donde:

K_{50} : La abertura de una malla cuadrada

B: Burden (m)

S/B: Relación Espaciamiento/Burden.

CE: Consumo específico del explosivo (kg/m^3).

C: Constante de roca. Equivale al consumo específico del explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca, normalmente varía entre 0.3 y 0.5 kg/m^3 .

S: constante de volabilidad, es un factor que tiene en cuenta la heterogeneidad y discontinuidad del macizo rocoso.

Roca muy fisurada y diaclasas muy próximas.....S=0.60

Roca diaclasada.....S=0.55

Roca Normal con algunas grietas.....S=0.50

Roca Relativamente Homogenea.....S=0.45

Roca Homogenea.....S=0.40

En base a esta ecuación se han determinado ábacos que permiten estimar el y curvas granulométricas teóricas del material tronado en base a los parámetros de diseño de la tronadura y también permiten proceder en sentido inverso y determinar parámetros de diseño en base a una distribución granulométrica deseada.

2.5.7.1.2. *Modelo de SveDefo.*

A diferencia de la ecuación de Larsson, la presentada por SveDefo en la ecuación considera el efecto de la altura del banco y la longitud del retacado en el cálculo del tamaño medio de fragmentación.

$$X_{50} = S * \left[1 + 4.67 * \left(\frac{T}{L} \right)^{2.5} \right] * e^{\{0.29 * Ln \left[\frac{CE}{C} \right]^{-0.82} \}}$$

Las nuevas variables son:

T = Longitud de retacado (m)

L = Profundidad del barreno (m)

2.5.7.1.3. *Modelo Kuz Ram.*

Este modelo ha sido desarrollado por claudie Cunningham (1983), de la AECI de sudáfrica, a partir de la curva de distribucion Granulométrica de Rosin-Rammler y la formula empirica del tamaño de los fragmentos procedentes de las voladuras dada por V.M. Kusnetsov.

La mayor parte de la informcion ha sido adaptada de las publicaciones de Cunningham (1983,1987).

Una relacion entre el tamaño medio del fragmento y la energia aplicada a la voladura por unidad de volumen de la roca (carga especifica) ha sido desarrollada por Kusnetsov (1973) en funcion del tipo de roca. Su ecuacion es la siguiente.

Modelo Kusnetsov

$$T_b = F_r * \left[\frac{VR_o}{Q} \right]^{0,8} * Q^{1/6}$$

Donde:

T_b : Tamaño medio de los fragmentos de voladura (cm)

F_r : Factor de roca

Rocas muy blandas..... $F_r=3$ ($f=3$ a 5);(f = factor de Protodiakonov)

Rocas blandas..... $F_r=5$ ($f=5$ a 8)

Rocas medias..... $F_r=7$ ($f=8$ a 10)

Rocas duras, fisuradas..... $F_r=10$ ($f=10$ a 14)

Rocas duras, homogéneas..... $F_r=13$ ($f=12$ a 16)

VR_o : Volumen de roca fragmentada por barreno (m^3)

Q : Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por barreno (kg)

2.5.7.1.4. *Modelo de Rosin-Rammler.*

$$PC = e - \left(\frac{T_b}{T_{bc}} \right)^n$$

Donde:

PC: Proporción de material retenido para una abertura de malla “ T_b ”

T_b : Abertura de malla

T_{bc} : Tamaño característico

n : Índice de uniformidad, (varia entre 0,8 – 2,2).

Como la formula de Kusnetsov da el valor medio de “ T_b ”, entonces $PC = 0,5$ al reemplazar se tiene:

$$0.5 = e - \left(\frac{T_b}{T_{bc}}\right)^n \quad \text{entonces} \quad T_{bc} = \frac{T_b}{(0,693)^{1/n}}$$

De estos algoritmos utilizados para el calculo del tamaño medio se consideran las características de diseño, así como las características de la roca a tronar definido por A para la ecuacion de Kusnetsov y S para las ecuaciones de Larsson y Svedefo.

2.5.7.1.5. Estimacion de factor de roca.

Tal vez el parámetro más importante para determinar un modelo de prediccion de fragmentacion es el factor de roca (A), actualmente existen varias propuestas para conservar su valor.

- Factor de roca (Cunningham).

El factor de roca al igual que el índice de uniformidad corresponde a uno de los parámetros más importantes en el modelo de Kuz-Ram. Este factor se determina a partir de una modificación al índice de volabilidad de Lilly, dándole Cunningham una mayor importancia a la dureza de la roca. El factor de roca de Cunningham, se deduce de datos geológicos del macizo rocoso usando la siguiente ecuacion.

$$A = 0.06 * (RMR + JPS + RDI + HF)$$

Donde:

RMR : Descriptor de la masa rocosa

JPS : Espaciamiento de las diaclasas verticales

JPA: Angulo del plano de la diaclasa

RDI : Influencia de la densidad

HF : Factor de dureza

2.5.7.1.6. Modelo de Kusnetsov.

Kuznetsov realizó estudios en fragmentación y publicó sus resultados en 1973. El trabajo de kuznetsov se refiere al tamaño medio de la fragmentación, al factor de carga de TNT y a la estructura geológica. El trabajo de Kuznetsov fue muy importante, ya que mostró que había una relación particular con el tipo de roca. Su trabajo, sin embargo, no fue suficiente, aunque el tamaño medio de la fragmentación podía ser predicho, no decía nada acerca de la cantidad de finos producidos o de la cantidad de rocas grandes. Lo que se necesitaba entonces era una manera de determinar la distribución real de tamaños, no sólo el tamaño promedio. La distribución real de los tamaños está en función de la malla de perforación, la manera en la que el explosivo es aplicado geométricamente al manto rocoso.

$$T_b = F_r * \left[\frac{VR_o}{Q} \right]^{0,8} * Q^{1/6}$$

Donde:

T_b : Tamaño medio de los fragmentos de voladura (cm)

F_r : Factor de roca

Rocas muy blandas..... $F_r=3$ ($f=3$ a 5);($f=$ factor de Protodiakonov)

Rocas blandas..... $F_r=5$ ($f=5$ a 8)

Rocas medias..... $F_r=7$ ($f=8$ a 10)

Rocas duras, fisuradas..... $F_r=10$ ($f=10$ a 14)

Rocas duras, homogéneas..... $F_r=13$ ($f=12$ a 16)

VR_o : Volumen de roca fragmentada por barreno (m^3)

Q : Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por barreno (kg)

2.5.7.1.7. Modelos de utilización de otros explosivos.

Un desarrollo posterior que permitía el uso de otros explosivos diferentes al TNT fue incorporado, por Cunningham a la ecuación de Kuznetsov. La ecuación final para determinar el tamaño promedio de la fragmentación utilizando cualquier explosivo se muestra a continuación:

Si la potencia relativa en peso de este explosivo. Supongamos se tiene ANFO = 100 y TNT = 115 la relación será:

$$X = A \left(\frac{VO}{Q_e} \right)^{0,8} Q_e^{1/6} \left(\frac{E}{115} \right)^{-19/30}$$

Donde:

Q_e : Masa del explosivo en kilogramo por taladro a cargar.

E : potencia relativa por peso del explosivo a usar. Los valores están disponibles en la hoja técnica del fabricante.

VO : Volumen estimado de roca fragmentada por taladro en metros cúbicos.

X : Tamaño del fragmento medio que se quiere obtener en cm.

A : Factor de roca calculado en base al índice de volabilidad

Ya que:

$$\frac{V_o}{Q_e} = \frac{1}{K}$$

Donde:

K : Factor Triturante (carga específica);kg/m³

La ecuacion se puede escribir como:

$$X = A(K)^{-0,8} Q_e^{0,167} \left(\frac{115}{E} \right)^{0,633}$$

La ecuación se puede utilizar ahora, para calcular la fragmentacion media (X) para un factor triturante dado.

Solucionando la solucion para K tenemos:

$$K = \left[\frac{A}{X} Q_e^{0,167} \left(\frac{115}{E} \right)^{0,633} \right]^{1,25}$$

Uno puede calcular el factor triturante (carga específica) requerido para obtener la fragmentación media deseada.

Con el uso de la fórmula original de Kuznetsov y las modificaciones aplicadas por Cunningham, se puede determinar el tamaño medio de la fragmentación con cualquier explosivo y también el índice de uniformidad. Con esta información, se puede ejecutar una proyección Rosin Rammler de la distribución de los tamaños.

2.5.7.2. Distribución del tamaño.

2.5.7.2.1. Modelo de Rosin Rammler.

Cunningham, en Sudáfrica, se dió cuenta que la curva de Rosin Rammler había sido conocida generalmente cómo una descripción razonable de la fragmentación de la roca, tanto la explotada como la triturada. Un punto en esa curva, el tamaño medio, podría ser determinado utilizando la ecuación de Kuznetsov.

$$R = e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n}$$

Donde:

X : El tamaño de la malla.

X_c : El tamaño característico.

R : Proporción del material retenido en la malla, nos da una descripción razonable de la fragmentación en la voladura de rocas.

n : índice de uniformidad.

El tamaño característico X_c es simplemente un factor de escala. Es el tamaño a través del cual el 63.2 % de las partículas pasaron. Si conocemos el tamaño característico y el índice de uniformidad (n) entonces una curva típica de fragmentación, como esta graficada en la figura puede ser trazada.

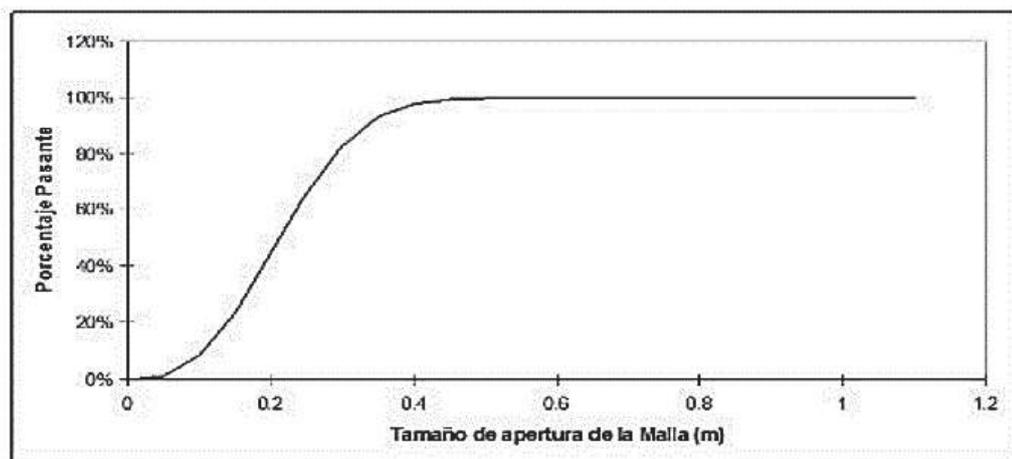


Figura 29. Curva de fragmentación – Rosin- Rammler

Curva de fragmentación típica donde se puede observar el porcentaje pasante como función de la apertura de la malla.

La ecuación de Rammler puede ser reacomodada para obtener la siguiente expresión para el tamaño característico.

$$R = e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n} \quad \Rightarrow \quad X_c = \frac{X}{\left[\ln\frac{1}{R}\right]^{1/n}}$$

Ya que la fórmula de Kuznetsov permite hallar el tamaño \bar{X} de la malla por el cual el 50% del material pasa, sustituimos este valor de :

$$\bar{X} = X$$

$$R = 0.5$$

En la ecuación, encontrando:

$$X_c = \frac{\bar{X}}{(0,693)^{1/n}}$$

Ahora nos faltara conocer el índice de uniformidad (n)

2.5.7.3. Índice de uniformidad (n).

Para obtener este valor, Cunningham, (1987) utilizó datos de campo y un analisis de regresion de los parámetros del campo que fueron estudiados previamente y asi obtuvo “n” en términos de:

- Precisión de la perforación.
- Relacion del burden con el diametro de taladro.
- Plantilla de perforacion cuadrada o alternada.
- Relacion espaciamento / buerden.

La expresion para “n” desarrollada por Cunningham, (1987) a partir de pruebas de campo es:

$$n = \left[2, 2 - 14 \frac{D}{B} \right] * \left[\left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{0,5} \right] * \left[1 - \frac{W}{B} \right] * \frac{L}{H}$$

Donde:

D : Diametro del barreno (mm).

B: Burden (m).

S: Espaciamento (m).

L: Longitud total de carga (m).

H: Altura de banco (m).

W: Desviacion estandar (mm), de la precision de perforacion (m).

Los valores del burden (B) y el espaciamento utilizados en la ecuacion pertenecen al modelo de perforacion y no al modelo de sincronizacion.

Cuando hay dos diferentes explosivos en el taladro (carga de fondo y carga de columna) la ecuación se modifica en:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right]^{0.5} \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left[\frac{\text{abs}(BCL - CCL)}{L}\right]^{0.1} \left(\frac{L}{H}\right)$$

Donde:

BCL : Longitud de la carga de fondo (m).

CCL : Longitud de la carga de columna (m)

ABS : Valor absoluto.

Estas ecuaciones son aplicadas a un patrón de perforación (en línea) cuadrado. Si se emplea un patrón de perforación escalonado, “n” aumenta en 10%. El valor de “n” determina la forma de la curva de Rosin-Rammler. Valores altos indican tamaños uniformes. Por otra parte, valores bajos sugieren un amplio rango de tamaños incluyendo fragmentos grandes y finos. El efecto de los diferentes parámetros de voladura en “n” se indica en la siguiente tabla.

Tabla 11.
Comportamiento de “n”

Parámetro	“n” se incrementa tal como el parámetro
Burden/diámetro del taladro	Disminuye
Precisión de perforación	Aumenta
Longitud de carga/altura de banco	Aumenta
Espaciamiento/burden	Aumenta

Fuente: Rosin - Rammler

Normalmente se desea tener la fragmentación uniforme por eso es que altos valores de “n” son preferidos.

2.5.7.4. Índice de volabilidad (I_v).

Cunningham (1983) indica que en su experiencia el límite más bajo para “A” incluso en tipos de roca muy débiles es $A=8$. Y el límite superior es: $A=12$. En una tentativa de cuantificar mejor la selección de “A”, el índice de volabilidad propuesto inicialmente por Lilly (1986) se ha adaptado para esta aplicación (Cunningham 1987). La ecuación es:

$$I_v = 0,5 * (RMD + JF + RDI + HF)$$

Donde los diversos factores se definen en la siguiente tabla:

Tabla 12.
Factor “A” de Cunningham

Símbolo	Descripción	Valores
<i>A</i>	Factor de roca	8 a 12
<i>RMD</i>	Descripción de la masa rocosa	
	- Desmenuzable / friable	10
	- Verticalmente fracturado	<i>JF</i>
	- Masivo	50
<i>JF</i>	<i>JPS+JPA</i>	
<i>JPS</i>	Espaciamiento de la fracturas verticales	
	- < 0.1m	10
	- 0.1 a <i>MS</i>	20
	- <i>MS</i> a <i>DP</i>	50
<i>MS</i>	Muy grande (m)	
<i>DP</i>	Tamaño (m) del diseño de perforación asumido	
	<i>DP</i> > <i>MS</i>	
<i>JPA</i>	Angulo del plano de las fracturas	
	- Buzamiento hacia fuera de la cara	20
	- perpendicular a la cara	30
	- Buzamiento hacia dentro de la cara	40
<i>RDI</i>	Índice de densidad de la roca	$25 \times RD - 50$
<i>RD</i>	Densidad (t/m^3)	
<i>HF</i>	Factor de dureza	
	- sí y < 50 GPa	$HF = y/3$
	- sí y > 50 GPa	$HF = UCS/5$
<i>Y</i>	Módulo de Young (GPa)	
<i>UCS</i>	Fuerza compresiva no confinada (MPa)	

Fuente: BARTON, manual de mecánica de rocas.

2.5.8. DEFINICIÓN DE TERMINOS.

a) Acoplamiento.

Se refiere al grado de contacto entre el explosivo en un pozo y la roca que lo rodea. Cuando el diámetro del explosivo es menor que el del pozo, se dice que la carga está desacoplada, y la razón de desacople definido como la relación entre el volumen de la carga al volumen del pozo. Los explosivos cargados a granel tienen un factor de acoplamiento igual a 1. Algunos autores definen la razón de acoplamiento como la razón de diámetro de carga a la del pozo. (ENAEX S.A, 2014, pág. 1)

b) Angulo de fricción.

Es la pendiente del esfuerzo de corte relacionado con el esfuerzo normal. El ángulo de fricción φ , y la cohesión c se relacionan al esfuerzo normal σ , y fuerza de corte, τ ; por la ecuación:

$$\tau = c + \sigma * \text{Tan}\varphi.$$

c) Balance de Oxígeno

Ésta es la cantidad de oxígeno, expresada en por ciento del peso, liberada como un resultado de la conversión completa del material explosivo a CO_2 , H_2O , SO_2 , AlO_2 (balance de oxígeno “positivo”). Si hay oxígeno insuficiente para la reacción completa de la oxidación se dice que el compuesto tiene un balance de oxígeno negativo. Los explosivos comerciales deben tener un balance de oxígeno cercano a cero para minimizar la cantidad de gases tóxicos, particularmente monóxido de carbono y gases nitrosos que están presentes en los humos. (ENAEX S.A, 2014, pág. 2)

d) Burden

El Burden se refiere a la distancia más cercana entre el taladro y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de pozos que constituyen una fila. El término Burden

generalmente, se refiere al Burden perforado, y la dimensión lineal a la cara libre existente del banco. (ENAEX S.A, 2014, pág. 3)

e) 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. (EXSA S.A, 2012, pág. 174)

f) Concentración de carga lineal

La concentración de explosivo, medida en kg/m, a lo largo de un pozo de tronadura. El término puede ser independiente de diámetro del pozo (por explosivos desacoplados), o dependiente del diámetro (explosivos totalmente acoplados). (ENAEX S.A, 2014, pág. 3)

g) Diámetro crítico

Es el diámetro mínimo mediante el cual puede detonar una carga explosiva. Agregando gas finamente disperso se reduce considerablemente el diámetro crítico de un explosivo. Este diámetro crítico puede ser bastante grande (aprox. 125 mm) para muchas emulsiones y acuageles a granel. (EXSA S.A, 2012, pág. 4)

h) Factor de carga.

Mediante este término se describe la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca. El factor de carga se indica mediante unidades de kg/m³.

Algunos también consideran la potencia en peso de explosivo para expresarlo como equivalente a la potencia en peso equivalente al ANFO, o sea, $W_{teff} = W_t \cdot \text{potencia en peso relativa}$. Otros usuarios prefieren usar un término inverso del factor de carga, para describir el peso de roca quebrada por unidad de peso de explosivo (ton/kg). (ENAEX S.A, 2014, pág. 7)

CAPITULO III

METODOLOGIA DE INVESTIGACION

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACION

La metodología empleada para la elaboración de este trabajo, se organizó considerando como tema fundamental la optimización de la voladura en términos de fragmentación, velocidad de detonación, costos con el uso de una mezcla explosiva más con mayor poder energético.

El tipo de investigación es experimental-aplicada, pues se experimentó el remplazo de la mezcla explosiva usada actualmente en las operaciones, por una emulsión gasificable pura, para lo cual se hicieron 3 voladuras de prueba usando este nuevo explosivo.

El diseño de investigación es descriptiva-comparativa, pues se elaboró una línea base a partir de los datos históricos describiendo los resultados obtenidos con la mezcla explosiva utilizada en la operación minera. Después de ejecutar las pruebas se realizó el mismo diseño descriptivo con los resultados obtenidos para poder realizar un análisis de comparación entre ambas mezclas.

3.2. POBLACION Y MUESTRA

3.2.1. POBLACION.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en unidad minera Antamina, donde se realizaron pruebas con emulsión gasificable SANG APU.

3.2.2. MUESTRA.

Las 03 pruebas se realizaron en material estéril correspondientes a la fase 09 del tajo.

3.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCION DE DATOS.

Se establecieron tres parámetros de medición que fueron comparados con los históricos de la línea base, y con ello se determinó la calidad del explosivo y performance de la voladura en general.

- Fragmentación (P80).
- Velocidad de detonación (m/s).
- Factor de carga (kg/m³).

A continuación se describe el proceso que se siguió para determinación de cada uno de los parámetros y los equipos utilizados:

3.3.1. VELOCIDAD DE DETONACION (VOD).

Para la medición de velocidad de detonación (VOD) de las mezclas explosivas en taladros de producción Se utilizó el equipo MicroTrap.

Ésta prueba consiste en medir la disminución de la resistencia de un circuito, a medida que el frente de detonación consume un cable resistivo. Esto se logra mediante la instalación de un cable de resistencia continuo (cable resistivo) cuya resistencia lineal es conocida (para este caso 10,8 ohm/m). El cable se adhiere al Booster o iniciador y se extiende a lo largo de la columna explosiva. A medida que el frente de detonación del explosivo consume el cable resistivo, la resistencia del corto circuito disminuirá en proporción a la reducción del largo del cable. De esta manera el MicroTrap registra la disminución resultante del ohmiaje en comparación con el tiempo. El software convierte los datos registrados en un gráfico de distancia versus tiempo, como se muestra en la Figura 43 La gradiente de este gráfico es la velocidad de detonación.

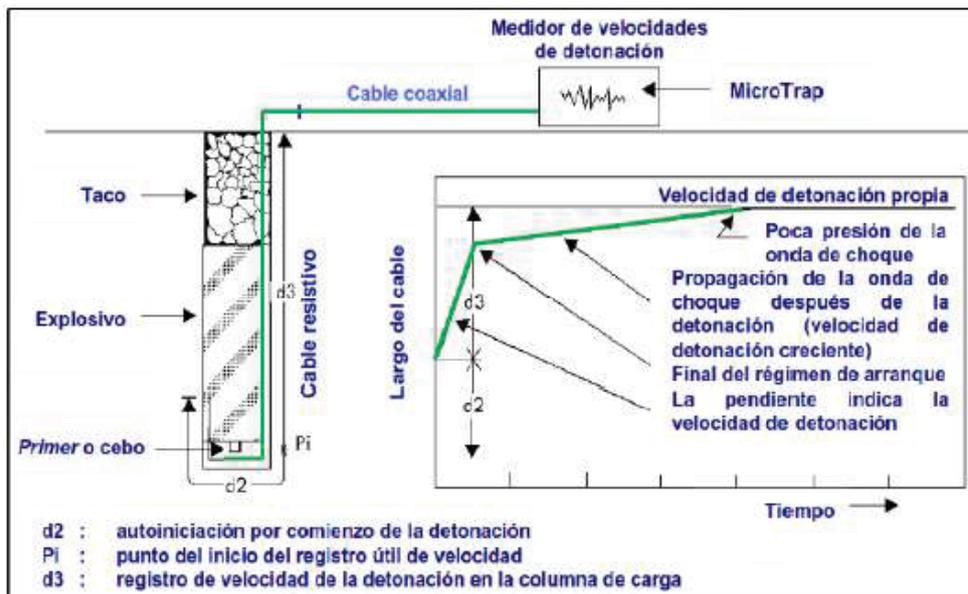


Figura 30. Medición de velocidad de detonación – (Manual de voladura Exsa).

La figura 43 muestra un esquema general del método de medición, donde el cable resistivo (en corto circuito) se coloca junto al Booster y posteriormente se conecta al cable coaxial, el cual finalmente se conecta con el MicroTrap.

En la siguiente figura se muestra el registro de medición de velocidad de detonación.

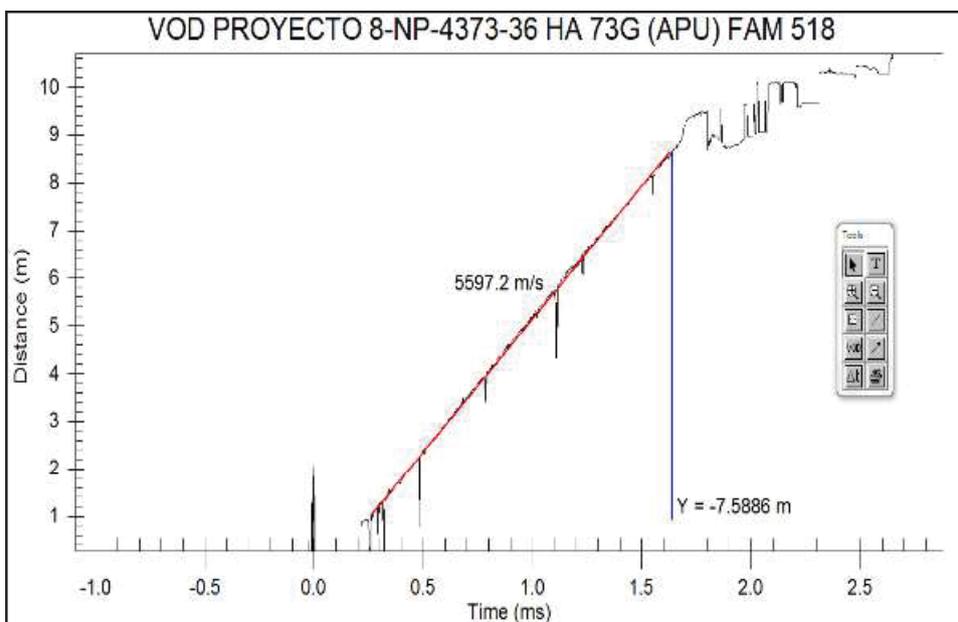


Figura 31. Registro de velocidad de detonación – (Asistencia técnica Famesa).

3.3.2. FRAGMENTACIÒN.

Se utilizó el equipo “PortaMetrics”, que es una tableta robusta para apuntar y disparar que proporciona un análisis de fragmentación casi instantáneo de la escena deseada sin la necesidad de ningún objeto de escala de referencia.

Con tres cámaras de alta resolución compiladas en un paquete industrial robusto y completo con una pantalla táctil amigable con los guantes, PortaMetrics es capaz de capturar y procesar imágenes en cualquier entorno de minería. Los usuarios pueden seleccionar fácilmente su región de interés, capturar una imagen y mostrar los resultados al instante en una interfaz gráfica de usuario intuitiva. Este dispositivo de apuntar y disparar incluye capacidades de corrección manual para ajustar las imágenes y realizar ajustes si es necesario.



Figura 32. Portametrics – (google).

Mueve la seguridad a la vanguardia de las operaciones al calcular con precisión la fragmentación de la roca desde la distancia. El personal de la mina ya no necesita acercarse a la superficie del banco o escalarla para colocar un objeto de escala. Genera informes al instante para incluir gráficos de distribución de tamaño de roca, estadísticas de rango de tamaño, mediciones de pendiente y más.

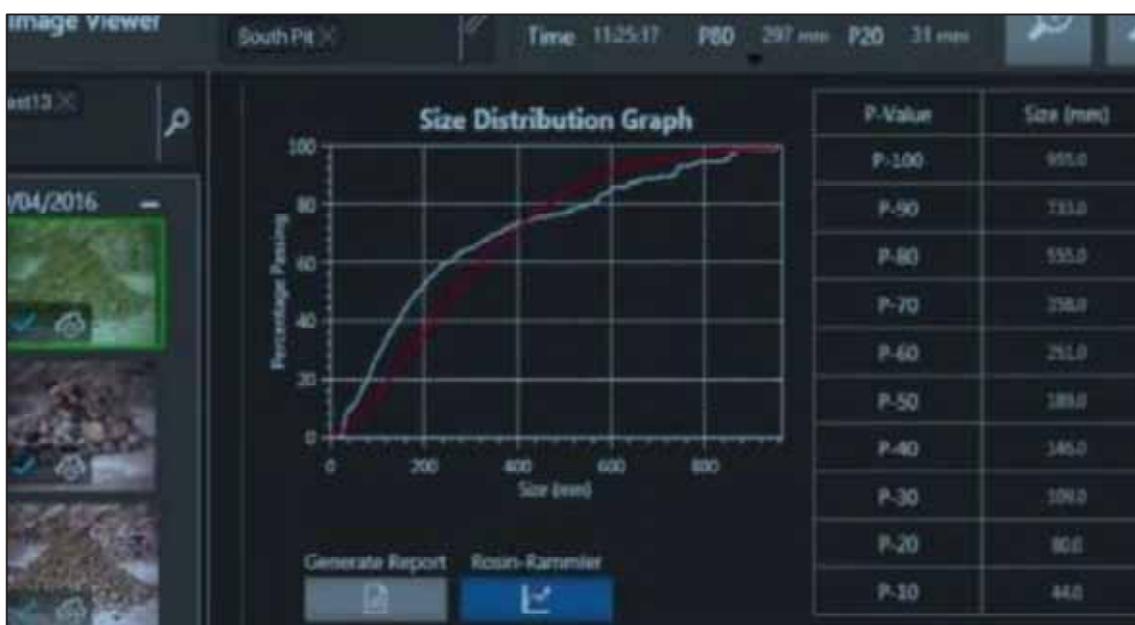


Figura 33. Análisis de fragmentación con Portometrics – (Asistencia técnica Famesa).

3.3.3. FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA.

Para hallar el factor de carga se utilizó la densidad de carga lineal de cada mezcla explosiva, tanto del ANFO pesado 73 gasificado como de la emulsión gasificable SANG APU. Para ello se empleó la siguiente fórmula: $DL = \rho \varepsilon \times \varnothing^2 \times 0.507$

Donde:

$\rho \varepsilon$: Densidad del explosivo (g/cc)

\varnothing : Diámetro del taladro (pulgadas)

Una vez hallado la densidad lineal se multiplica por la altura de la columna explosiva y se obtendrá la cantidad de explosivo utilizado para cargar un taladro. Después se procedió a dividir esta cantidad entre el material roto por taladro con lo cual nos da como resultado el factor de carga.

El factor de potencia es el resultado de dividir el factor de carga por la densidad del material.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El sector donde se hicieron con SANG gasificable APU se encuentra en la zona norte del tajo Antamina conocido como fase 09, esta zona entrega material estéril.

Normalmente se utiliza ANFO pesado gasificable a base de emulsión estándar en las voladuras primarias de este sector.

Tabla 13.
Características técnicas de mezclas explosivas

PRODUCTO	DENSIDAD INICIAL(gr/cc)	VOD TEÓRICO(m/s)	DENSIDAD LINEAL(kg/m)
HA 73 gasificado	1.30 ± 0.01	5400 – 5600	97.38
SANG gasificable APU	1.31 ± 0.01	5500 - 5800	99.67

Fuente: Asistencia técnica Famesa.

Tabla 14.
Parámetros de perforación y voladura Fase 09

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Burden x espaciamento	metros	9.5 x 11
Altura de perforación	metros	15
Sobreperforacion	metros	2
Diámetro de taladro	pulgadas	12 ¼
Altura de carga	metros	10
Altura de taco	metros	7
Densidad del material	Kg/m ³	2.7
Accesorios	-	Booster de 2 lb, detonador electrónico y pirotécnico

Fuente: Área de perforación y voladura Antamina.

El performance de los explosivos a comparar se analizara en dos secciones, la primera consta del estudio histórico del uso de HA 73 gasificado a base de emulsión estándar. La segunda parte consistió en los resultados de las pruebas del nuevo producto SANG gasificable APU.

4.2. LINEA BASE HISTÓRICA - USO DE ANFO PESADO 73 GASIFICABLE

En este caso se mantuvieron los parámetros de perforación y voladura, por lo que con la información histórica de los resultados obtenidos de la utilización del ANFO pesado 73 gasificado, se elaboró la línea base. Esta mezcla explosiva tiene una densidad inicial en campo promedio de 1.30 g/cc y un densidad final controlada de 1.10 g/cc después de 20 minutos donde el explosivo tiene su mejor performance en términos de energía y VOD.

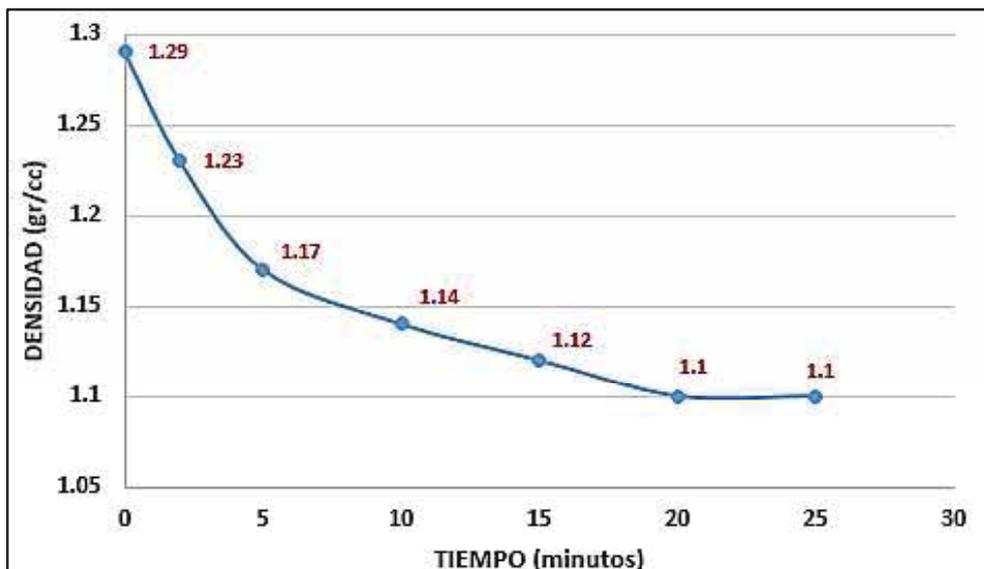


Figura 34. Curva de gasificación del ANFO pesado 73 gasificado – Asistencia técnica Famesa.

El esponjamiento promedio del ANFO pesado 73 gasificado es de 50 cm, lo que equivale al 5% de la longitud de carga según el diseño dado por el área de voladura.

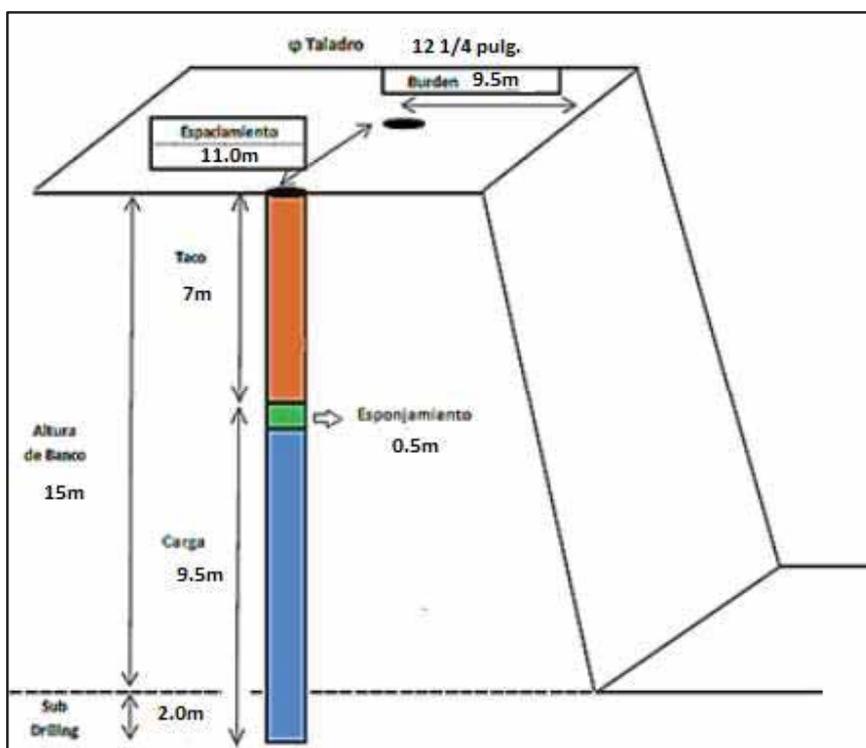


Figura 35. Diseño de banco – (voladura Antamina).

4.2.1. RESULTADOS DE VELOCIDAD DE DETONACION.

En base a la data histórica del monitoreo de la velocidad de detonación, realizados con el equipo MicroTrap en taladros de producción de 12 ¼”, se obtuvo un promedio de este que se presenta en el siguiente cuadro:

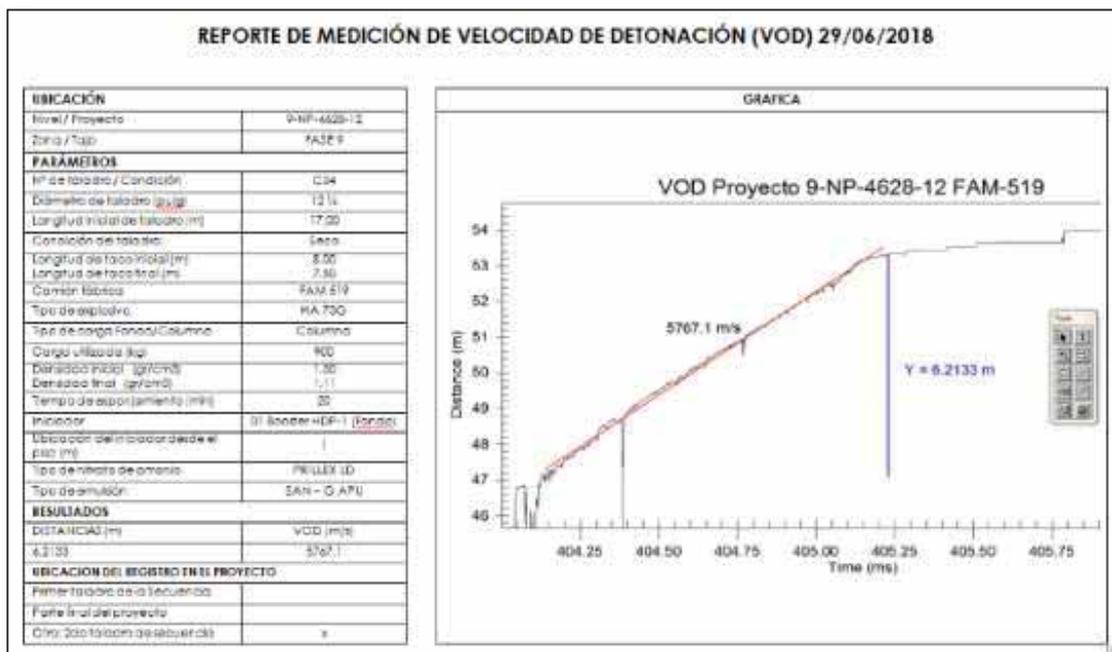


Figura 36. Medición de velocidad de detonación PY_9-NP-4628-12 – (Asistencia técnica Famesa).

Tabla 15.
Velocidad de detonación con HA 73 Gasificado

FASE	PROYECTO	DIÁMETRO (Pulg)	DENSIDA D g/cc	HA-73 Gasificado	VOD Teórico
9	9-NP-4628-12	12 ¼	1.11	5,767.1	5400-5600
9	9-NP-4628-17	12 ¼	1.10	5,539.3	
PROMEDIO				5653.2	

Fuente: Asistencia Técnica – (Famesa).

4.2.2. RESULTADOS DE FRAGMENTACION.

Tabla 16.
Fragmentación con HA 73 gasificado

PROYECTO	MEZCLA	BxE (m)	VOD	D50 (cm.)	D80 (cm.)	D90 (cm.)
			MONITOREADO (m/s)			
9-NP-4643-18	HA 73 Gasificado	9.5 x 11.0	-	21.77	38.60	39.4
9-NP-4628-12			5767.1	14.70	23.20	30.60
9-NP-4628-17			5539.3	13.90	20.50	23.40
PROMEDIO				16.79	27.4	31.1

Fuente: Asistencia Técnica – (Famesa).

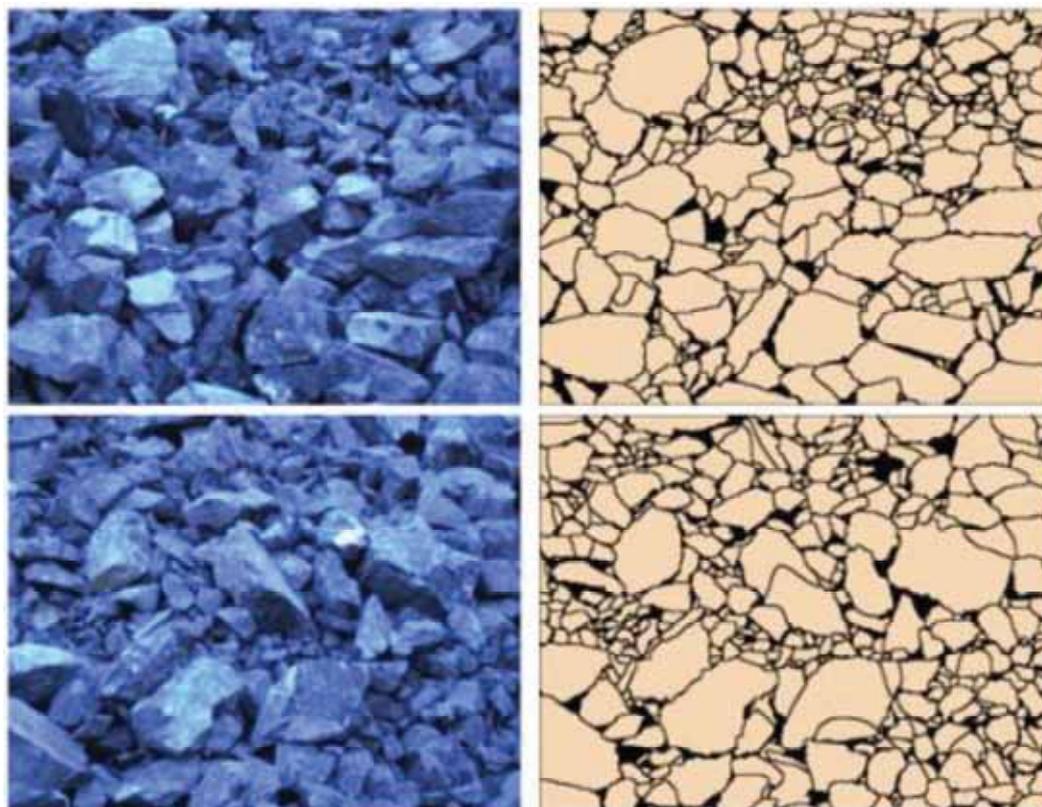


Figura 37. Fotos analizadas del proyecto 9-NP-4643-17 – (Famesa).

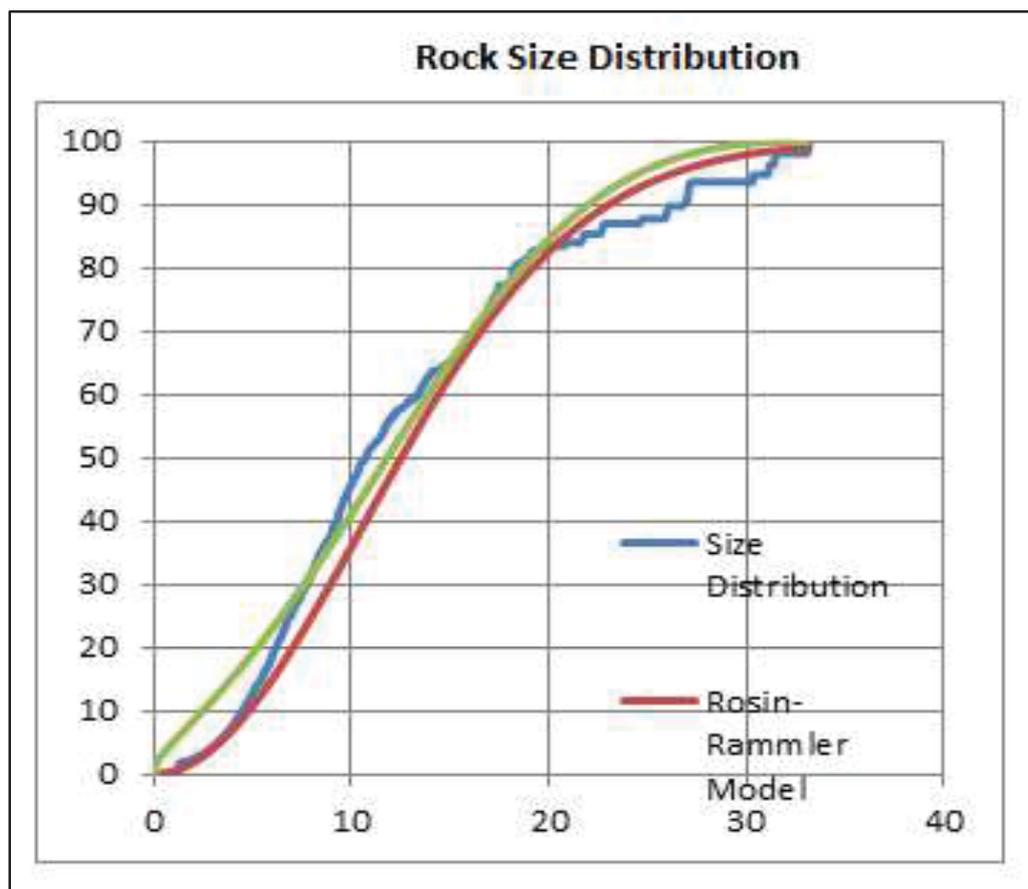


Figura 38. Resultado de análisis de fragmentación del proyecto 9-NP-4643-17 – (Famesa).

4.2.3. CALCULO DE FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA.

Los disparos en la fase 09 se realizan según los parámetros dados por el área de “Diseño”, estos se muestran en la tabla 18 los cuales fueron usados para calcular el factor de carga y factor de potencia teóricos de esta mezcla.

Tabla 17.
Parámetros de perforación y voladura para material estéril Fase 09

DISEÑO DE PERFORACION		
PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Altura de perforación	Metros	15
Sobreperforación	Metros	2
Diámetro de taladro	Pulgadas	12 ¼
Malla	-	Triangular
Burden	Metros	9.5
Espaciamiento	Metros	11
Densidad del material	kg/ton	2.7
DISEÑO DE CARGA		
Altura de carga final	Metros	10
Altura de carga inicial	Metros	9.5
Altura de taco	Metros	7
Densidad de mezcla inicial	g/cc	1.31
Densidad de mezcla final	g/cc	1.1
Tiempo de esponjamiento	Minutos	20
Altura de esponjamiento	Metros	0.5
Carga lineal	kg/m	97.38
Carga por taladro	kg/tal	925.11
FACTORES		
Tonelaje por taladro	ton.	4232.25
Factor de carga	kg. Explo/m3	0.59
Factor de potencia	kg. Explo/ton.	0.22

Fuente: Elaboración propia

4.3. PRUEBAS UTILIZANDO SANG GASIFICABLE APU

Con la línea base establecida, se procedió a realizar las pruebas con la nueva emulsión gasificable SANG APU, para poder demostrar las ventajas que ofrece y así optimizar el proceso de voladura.

Este nuevo agente explosivo elimina el uso de ANFO comparada con la mezcla que se utiliza en la operación. La densidad inicial de la emulsión gasificable SANG APU en campo es de 1.31 g/cc y su densidad final controlada después de 20 minutos es de 1.10 g/cc (densidad a la cual se obtiene mayor régimen de VOD) al igual que el ANFO pesado 73 gasificado.

Cabe recordar que la variación de la densidad final de la mezcla explosiva ANFO pesado 73 gasificado y de la emulsión gasificable SANG APU, depende de la cantidad de solución gasificante que es inyectada en proporción inversa a la temperatura.

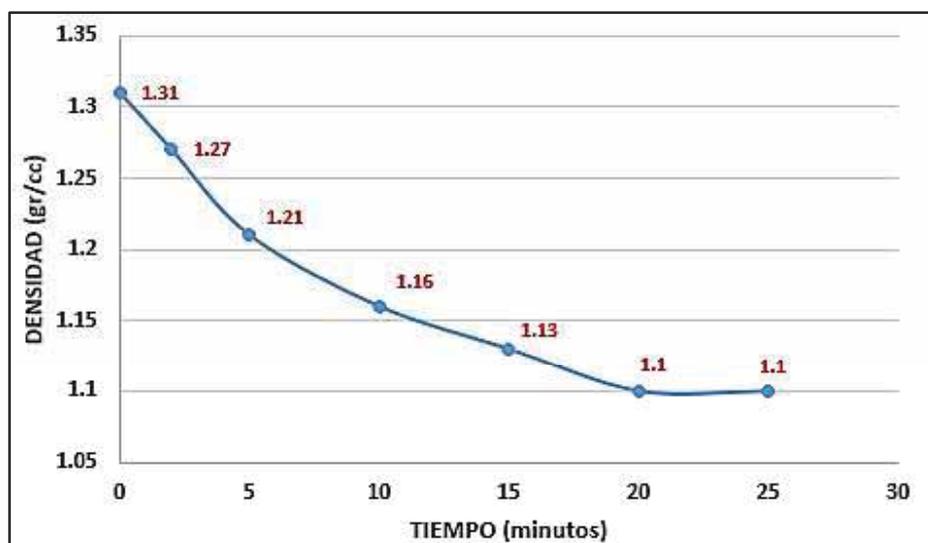


Figura 39. Curva de gasificación de emulsión gasificable SANG APU – (Famesa).

La toma y control de densidades se realiza con el kit de densidades Famesa (contiene vasos calibrados, espátula, balanza, cronometro y tabla de densidades) al igual que para la mezcla de Anfo pesado gasificable 73.



Figura 40. Muestra de SANG APU en campo y laboratorio – (Asistencia técnica Famesa).

El esponjamiento de la emulsión gasificable SANG APU es en promedio 90 cm para una longitud de carga de 10 metros, representa el 9 % de la longitud total de carga.

4.3.1. DISPARO DEL PROYECTO 9-NP-4628-04 FASE 09 ANTAMINA.

Está conformado por 264 taladros cargados con emulsión gasificable SANG APU.

4.3.1.1. Parámetros de diseño.

Densidad de roca = 2.7 g/cc.

En la siguiente Figura se muestra los parámetros de diseño de carguío con SANG APU .

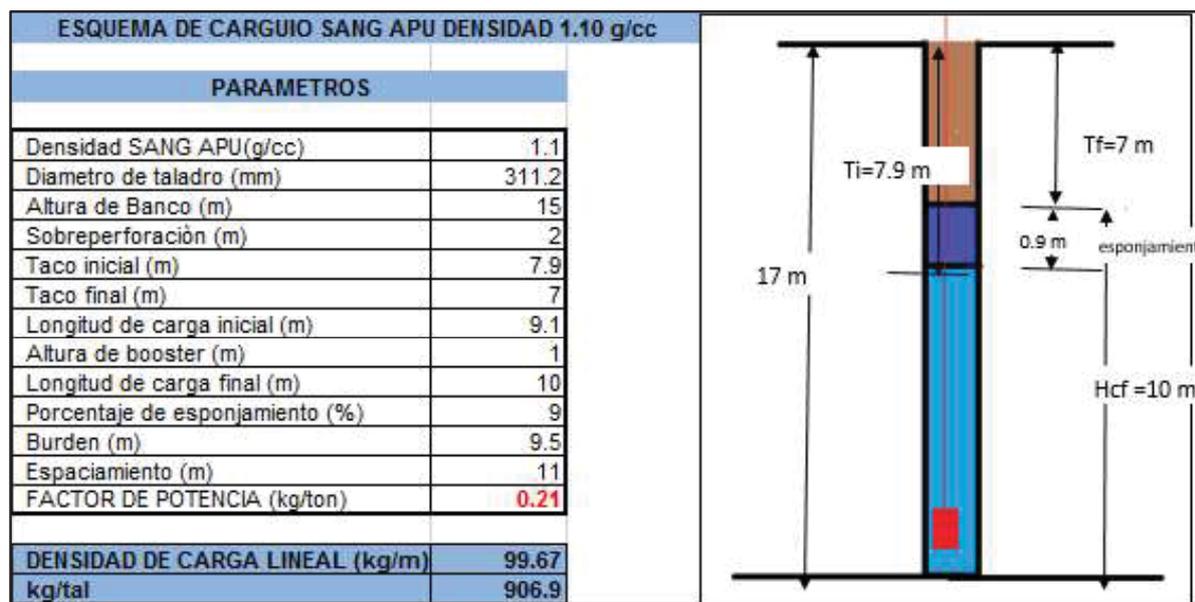


Figura 41. Diseño de carga de taladros de producción SANG APU – (Voladura Antamina).



Figura 42. Disparo fase 09 proyecto 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).

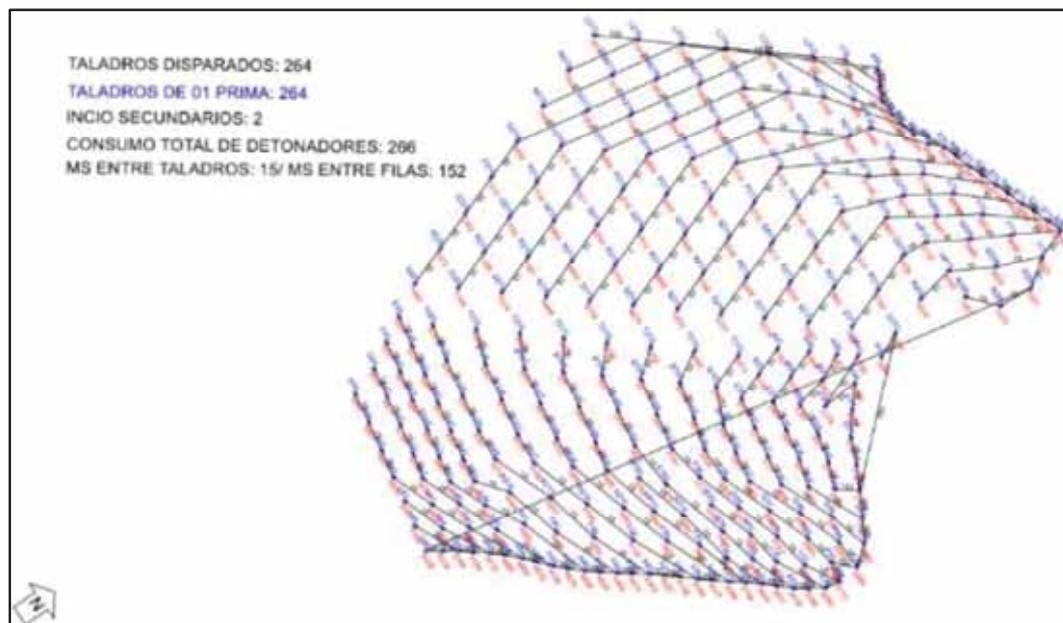


Figura 43. Secuencia de salida proyecto 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).



Figura 44. Fotografías post voladura proyecto 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.1.2. Registro De Velocidad De Detonacion (VOD).

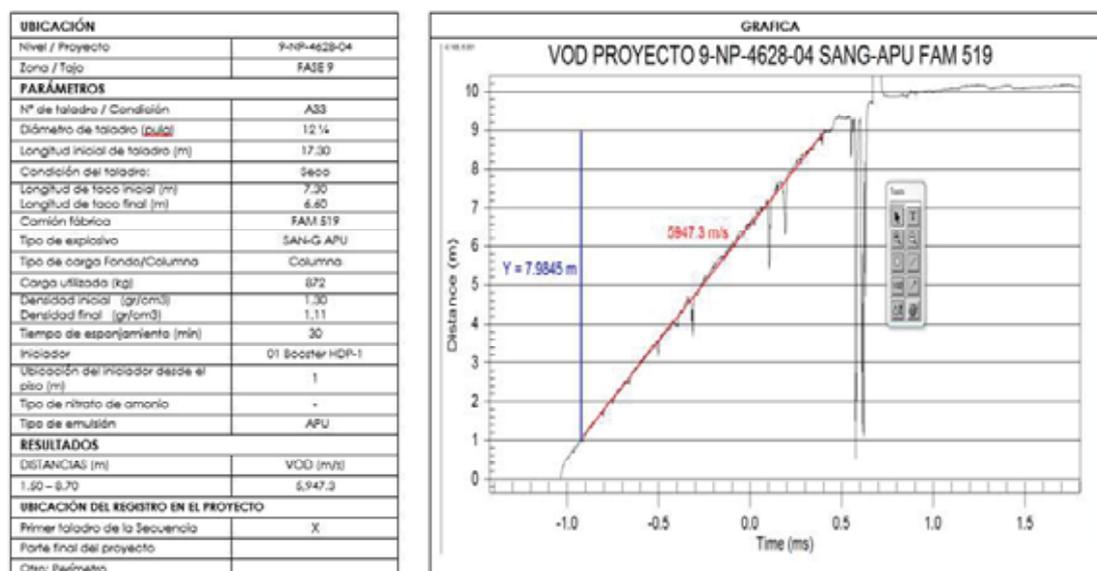


Figura 45. Medición de VOD 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.1.3. Fragmentacion.

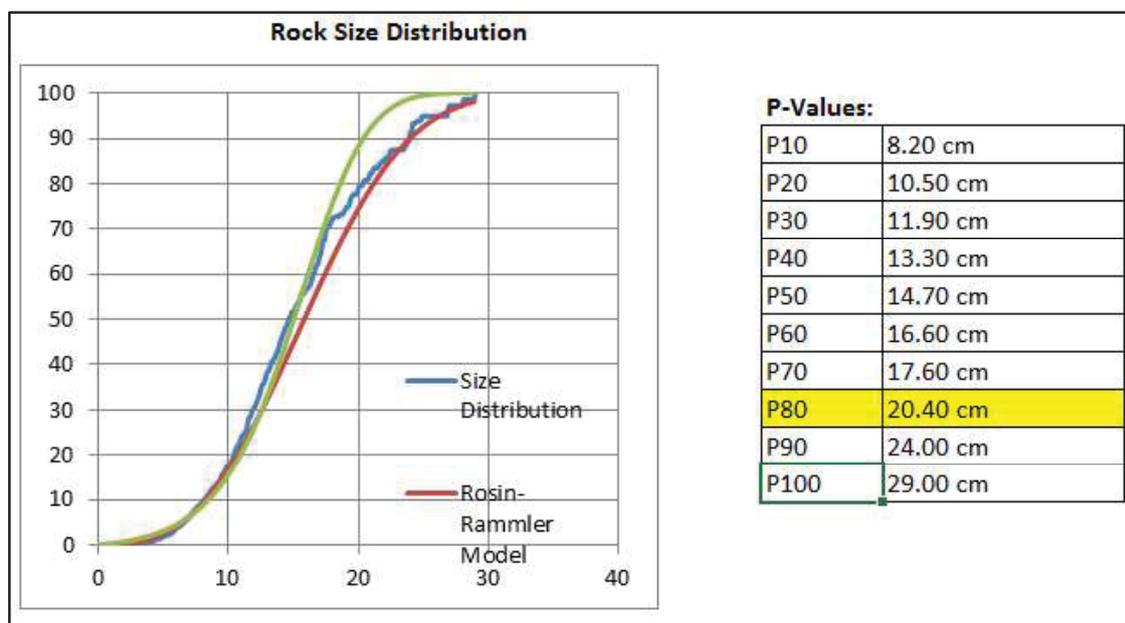


Figura 46. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).

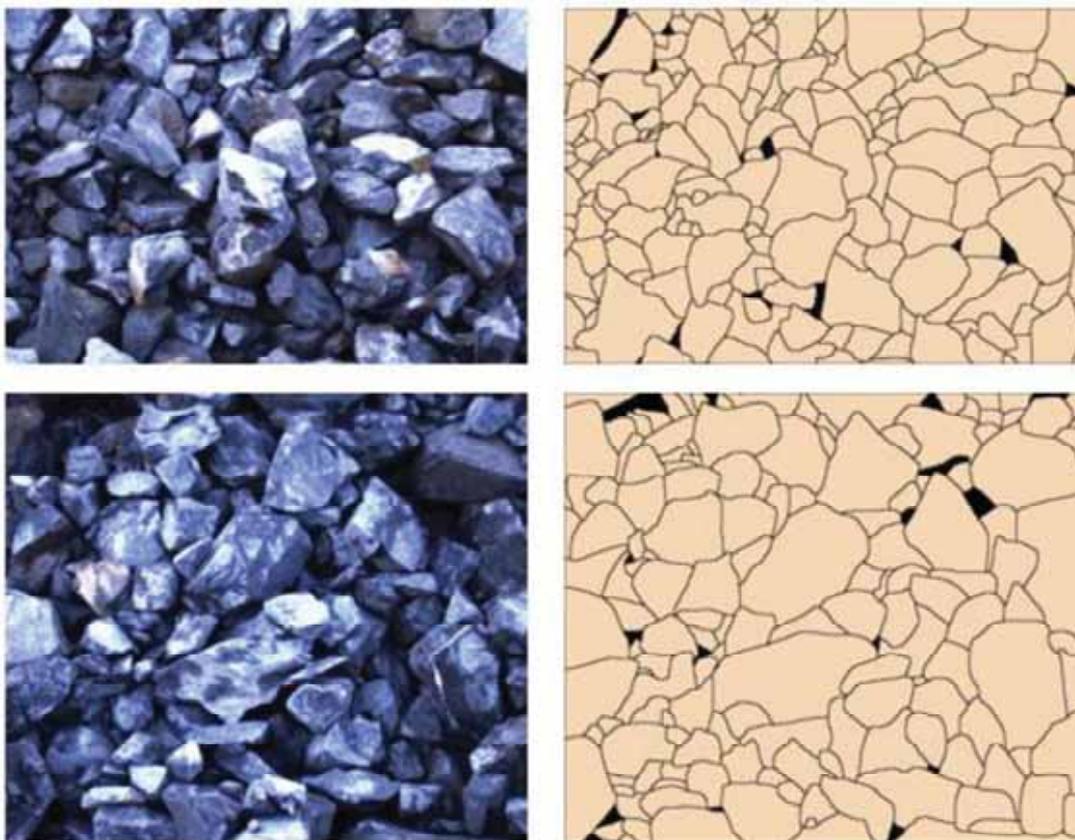


Figura 47. Reporte de fragmentación - (Asistencia técnica Famesa).

FECHA	FASE	MALLA	MATERIAL	B (m.)	S (m.)	D20 (cm.)	D50 (cm.)	D80 (cm.)	E90 (cm.)	Xmax (cm.)	Xc (cm.)	n	TIPO DE EXPLORATIVO	ZONA DE FOTOGRAFIA	EQUIPO	TONELAJE	P. FACTOR
20-mar	9	9-NP-4628-04	A	9.5	10.90	12.50	14.75	20.40	24.00	29.02	17.97	2.89	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
21-mar	9	9-NP-4628-04	A	9.5	10.90	9.30	17.75	27.20	32.70	41.85	21.49	2.601	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
23-mar	9	9-NP-4628-04	C	9.5	10.90	8.10	15.02	25.00	29.70	47.32	20.46	2.05	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
24-mar	9	9-NP-4628-04	A	9.5	10.90	13.40	21.82	29.80	32.20	37.75	24.24	2.321	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
29-mar	9	9-NP-4628-04	A	8.8	7.90	3.50	8.20	9.90	12.70	22.82	8.67	2.09	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
30-mar	9	9-NP-4628-04	A	6.8	7.90	1.80	2.30	5.20	7.30	19.82	5.38	1.637	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
30-mar	9	9-NP-4628-04	A	8.4	9.70	2.90	5.10	10.40	14.00	26.42	8.72	1.81	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
31-mar	9	9-NP-4628-04	A	8.4	9.70	2.60	4.80	9.30	12.30	25.52	7.94	1.740	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
13-abr	9	9-NP-4628-04	M46	6.8	7.90	3.00	5.30	9.10	11.90	22.25	8.04	1.99	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	896.601	0.32
PROMEDIO								16.21									

Figura 48. Fragmentación 9-NP-4628-04 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.2. DISPARO DEL PROYECTO 9-4613-01 FASE 09 ANTAMINA.

Está conformado por 216 taladros cargados con emulsión gasificable SANG APU.

4.3.2.1. Parámetros de diseño.

Densidad de roca = 2.7 g/cc.

Se mantiene el diseño de carga y se trabaja con los mismos parámetros que la prueba anterior.

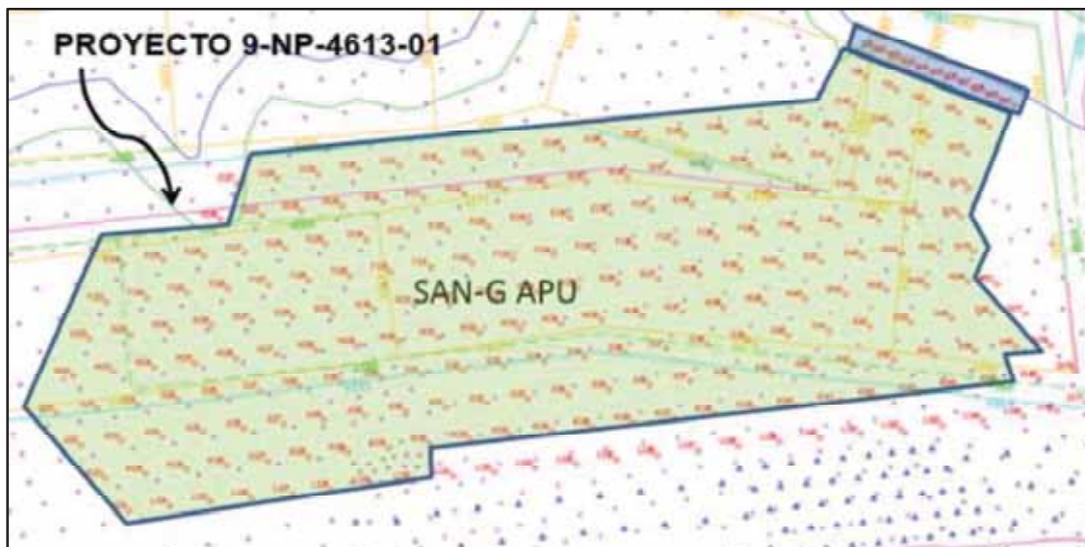


Figura 49. Delimitación de proyecto de voladura 9-NP-4613-01 – (Asistencia técnica Famesa).

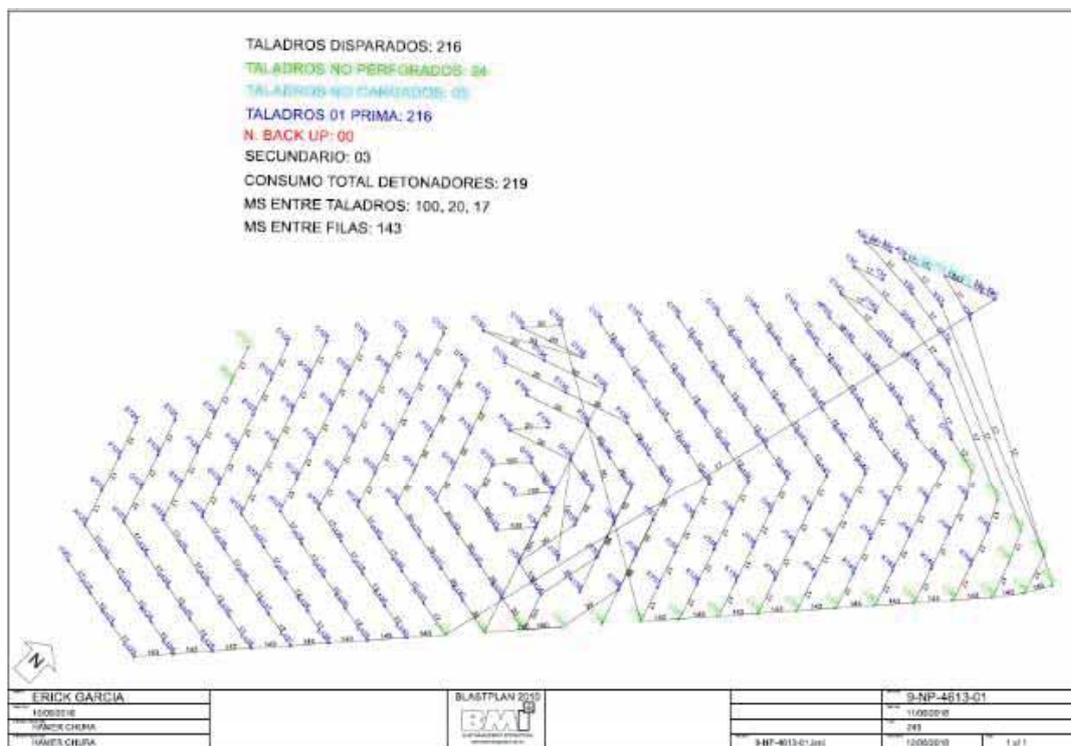


Figura 50. Secuencia de salida proyecto 9-N-4613-01 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.2.2. Medición De Velocidad De Detonación (VOD).

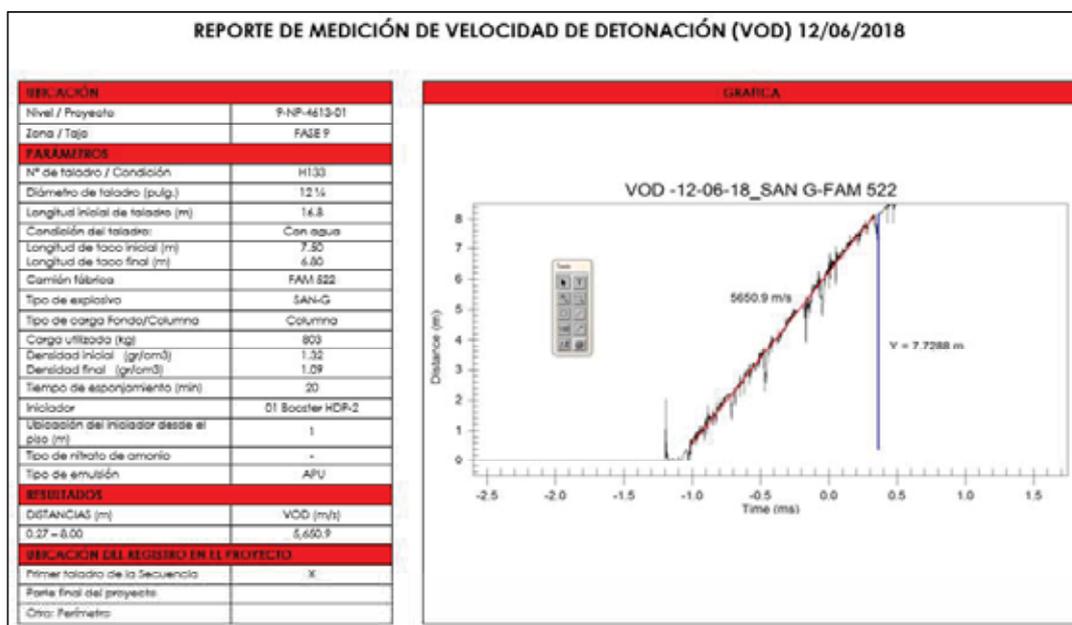


Figura 51. Medición de VOD 9-NP-4613-01 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.2.3. Fragmentación.

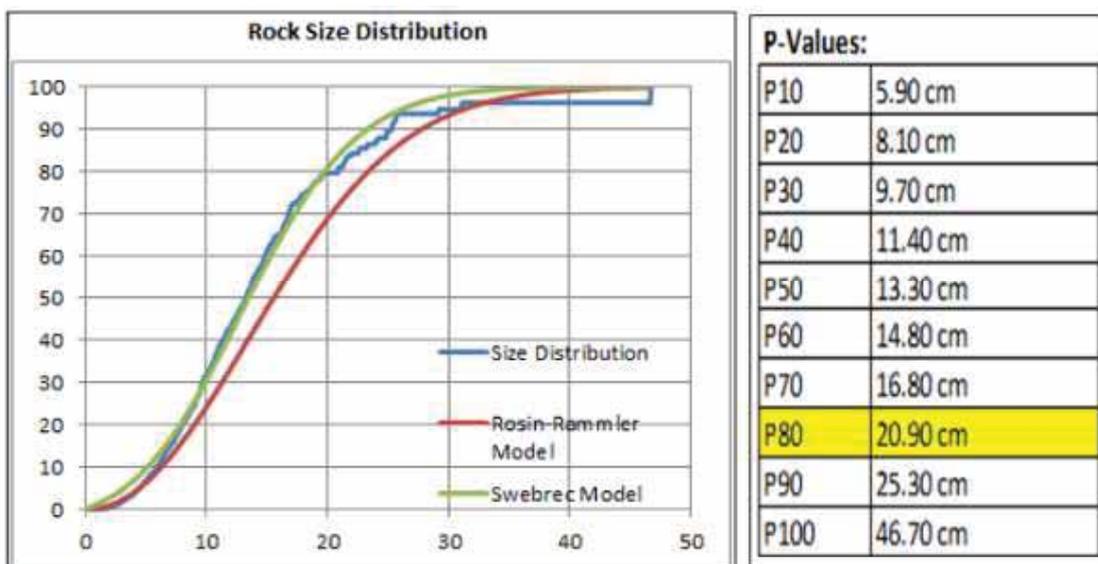


Figura 52. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4613-01 – (Asistencia técnica Famesa).

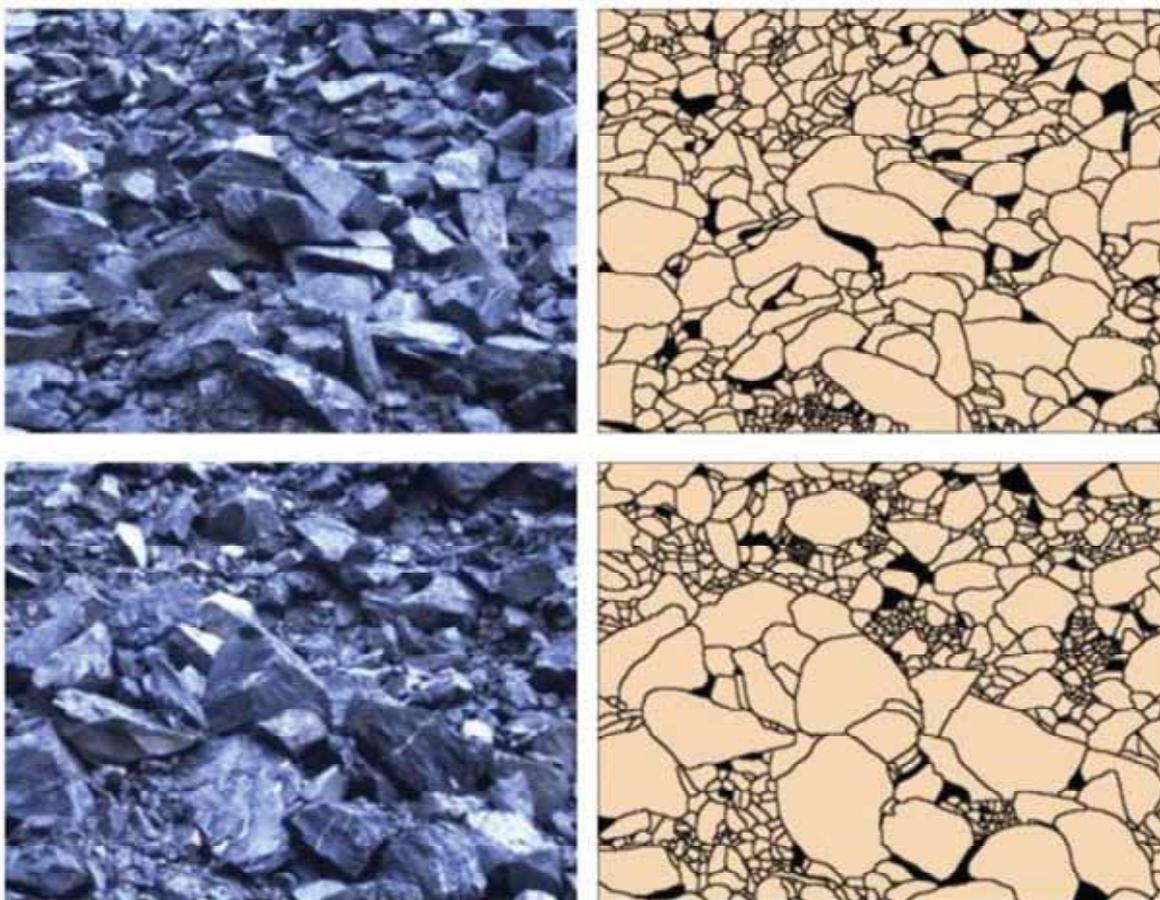


Figura 53. Reporte de fragmentación - (Asistencia técnica Famesa).

FECHA	FASE	MALLA	MATERIAL	B (m.)	S (m.)	D20 (cm.)	D50 (cm.)	D80 (cm.)	D90 (cm.)	Xmax. (cm.)	Xc (cm.)	n	TIPO DE EXPLOSIVO	ZONA DE FOTOGRAFIA	EQUIPO	TONELAJE	P. FACTOR
26-jun	9	9-NP-4613-01	A	9.5	11.00	8.10	13.30	20.90	25.30	46.60	18.15	2.071	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	820.871	0.25
27-jun	9	9-NP-4613-01	A	9.5	11.00	6.90	11.00	16.50	20.30	29.70	14.13	2.468	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	820.871	0.25
02-jul	9	9-NP-4613-01	A	9.5	11.00	5.80	8.60	12.60	14.70	22.60	10.62	2.44	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 13	820.871	0.25
PROMEDIO								16.67									

Figura 54. Fragmentación proyecto 9-NP-4613-01 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.3. DISPARO DEL PROYECTO 9-4613-03 FASE 09 ANTAMINA.

Está conformado por 87 taladros cargados con emulsión gasificable SANG APU.

4.3.3.1. Parámetros de diseño.

Densidad de roca = 2.7 g/cc.

Se mantiene el diseño de carga y se trabaja con los mismos parámetros que la prueba anterior.

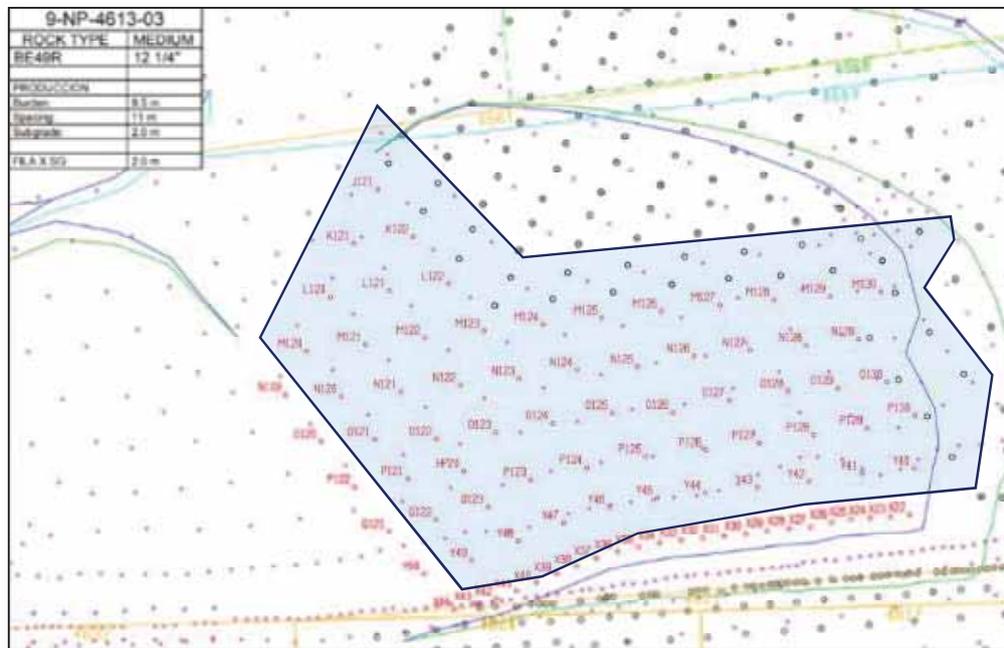


Figura 55. Polígono proyecto 9-NP-4613-03 – (Asistencia técnica Famesa).

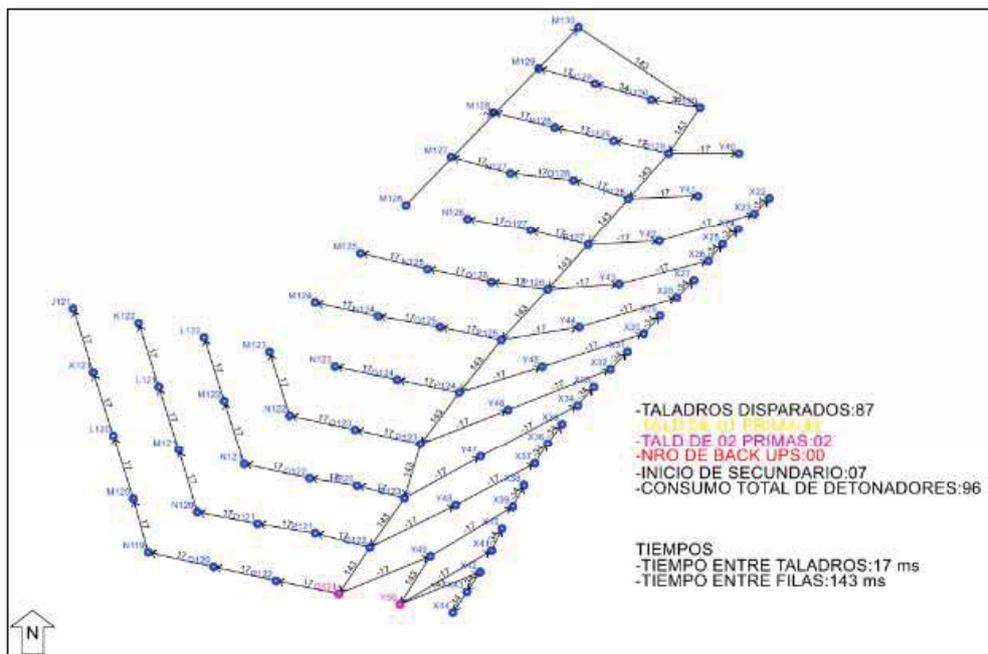


Figura 56. Secuencia de salida proyecto 9-NP-4613-03 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.3.2. Velocidad De Detonación.

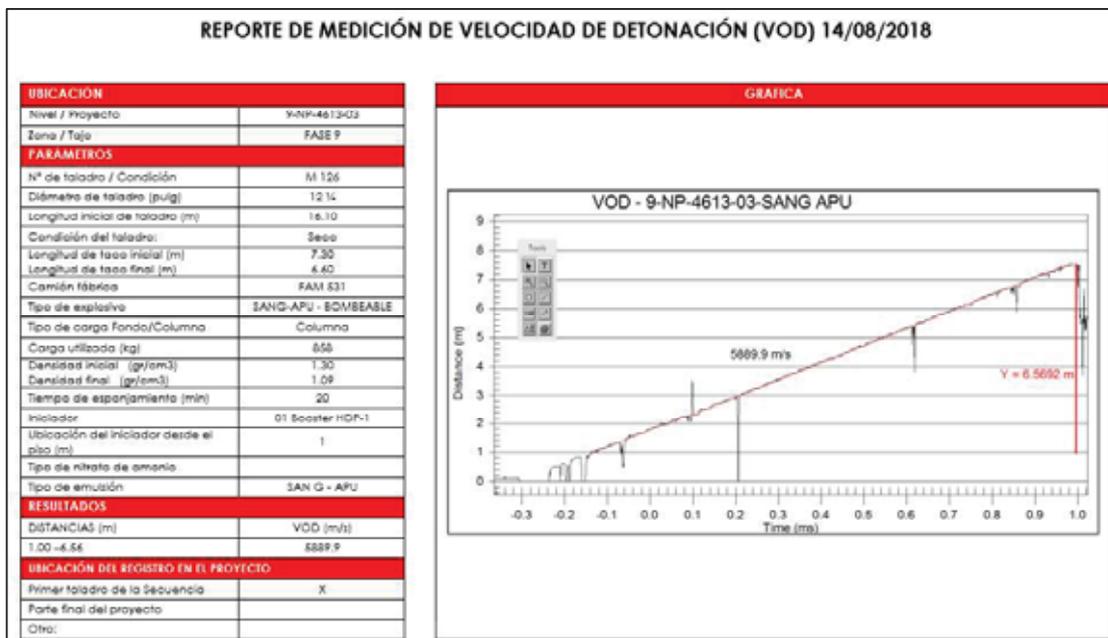


Figura 57. Medición de VOD proyecto 9-NP-4613-03 – (Asistencia técnica Famesa).

4.3.3.3. Fragmentación.

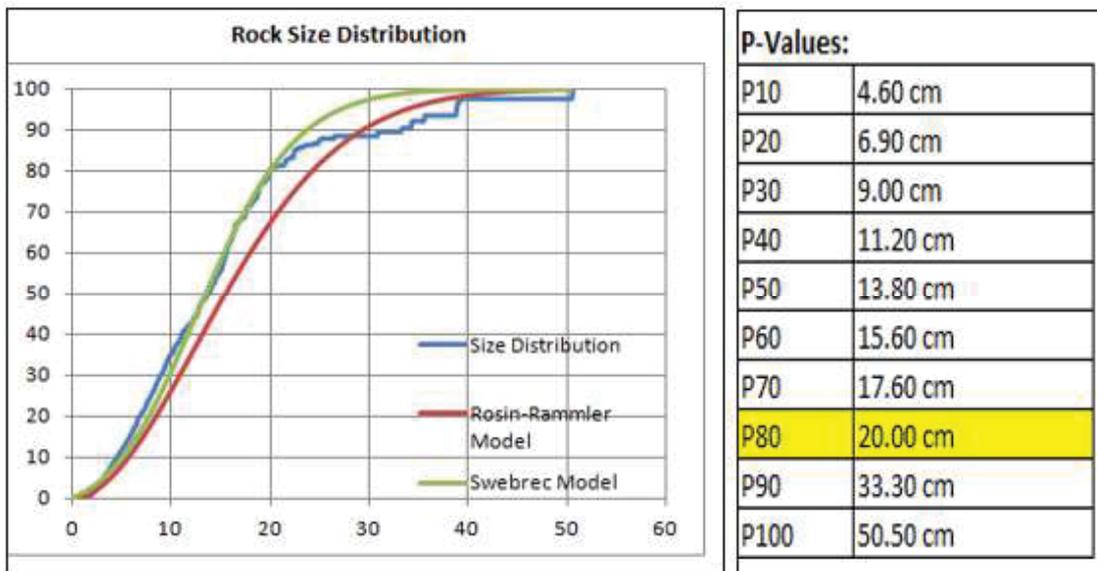


Figura 58. Curva de distribución granulométrica 9-NP-4613-03 – (Asistencia técnica Famesa).



Figura 59. Reporte de fragmentación - (Asistencia técnica Famesa).

FECHA	FASE	MALLA	MATERIAL	B (m.)	S (m.)	D20 (cm.)	D50 (cm.)	D80 (cm.)	D90 (cm.)	Xmax. (cm.)	Xc (cm.)	n	TIPO DE EXPLOSIVO	ZONA DE FOTOGRAFIA	EQUIPO	TONELAJE	P. FACTOR
15-ago	9	9-NP-4613-03	A	9.5	11.00	6.90	13.80	20.00	33.30	50.50	18.83	1.872	SANG-APU	PRODUCCION	PALA 08	259,646	0.30
28-ago	9	9-NP-4313-03	A	9.5	11.00	7.50	14.40	23.70	30.90	47.40	19.50	2.15	SAN G (APU)	PRODUCCION	PALA 08	259,646	0.30
30-ago	9	9-NP-4313-03	C	9.5	11.00	3.40	13.50	27.90	37.00	97.80	24.20	1.57	SAN-G APU	PRODUCCION	PALA 08	259,646	0.30
PROMEDIO								23.87									

Figura 60. Fragmentación proyecto 9-NP-4613-03 – (Asistencia técnica Famesa).

4.4. ANALISIS DE RESULTADOS

En esta sección se discuten las diferencias y similitudes que se encontraron en el desempeño de las mezclas explosivas en evaluación. Se analizó la información recopilada en la línea base y en la etapa de pruebas donde se experimentó con la emulsión gasificable SANG APU. Los puntos de comparación son: velocidad de detonación, fragmentación, factor de potencia y costos. Es preciso indicar que todas las pruebas, incluyendo los resultados de la línea base, se realizaron en el mismo tipo de terreno, no se variaron los parámetros de perforación y voladura y se usó los mismos accesorios de voladura. En la parte final de este capítulo, se ha hecho un análisis económico donde se compara el costo de fabricación del ANFO Pesado 73 gasificado y la emulsión gasificable SANG APU, en términos de combustible, nitrato, emulsión; manteniendo constante el costo de perforación.

De esta manera se logra hacer un análisis integral, tanto del lado técnico, operativo y económico.

4.4.1. ANALISIS DE VELOCIDAD DE DETONACION

La velocidad de detonación (VOD) está directamente relacionada a la densidad de los explosivos, sabemos que la densidad del Anfo pesado gasificable 73 es menor a la de SANG APU, sin embargo ambas mezclas explosivas son controladas para trabajar con densidad de copa de 1.10 g/cc, lo que hace que sean comparativas ambas densidades en términos de VOD.

La comparación de la velocidad de detonación obtenida por los monitoreos se expone en el Tabla 18, Cabe resaltar que el resultado mostrado para el ANFO pesado 73 gasificado es el promedio de todos los monitoreos realizados antes de las pruebas en taladros de producción de 12 ¼” y para la emulsión gasificable SANG APU es el promedio obtenido de las 3 monitoreos realizados.

Tabla 18.
Velocidad de detonación HA 73 gasificado vs SANG APU

DISPARO	MEZCLA	VOD TEÒRICO (m/s)	VOD MONITOREADO (m/s)	PROMEDIO
-	HA 73 Gasificado	5400 – 5600	-	5653.2
Prueba 1	SANG – APU	5500 - 5800	5947.3	5829.4
Prueba 2			5650.9	
Prueba 3			5889.9	

Fuente: Elaboración propia

El VOD promedio obtenido con la emulsión gasificable SANG APU es un 3.1 % mayor comparado al resultado del ANFO pesado 73 gasificado. También se observa que el VOD desarrollado por la emulsión SANG APU en casi todos los casos es mayor que la línea base establecida. Este incremento es debido a la mayor potencia y energía que posee esta y que se verá reflejada en la fragmentación del macizo rocoso.

4.4.2. ANALISIS DE FRAGMENTACIÓN

El análisis granulométrico se hace en función de los históricos de HA 73 gasificable.

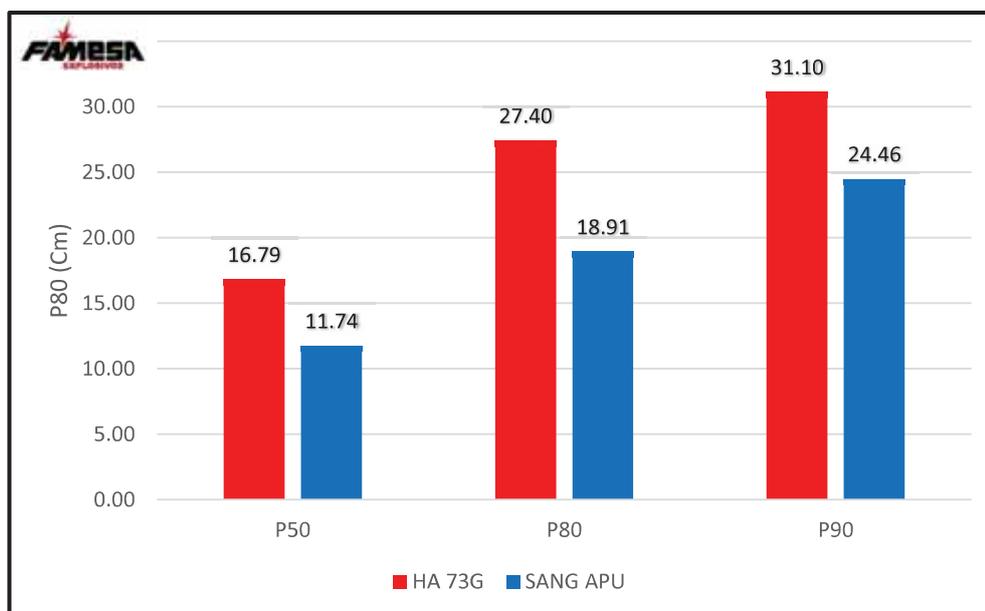


Figura 61. Fragmentación HA 73 gasificado vs SANG APU – Elaboración propia

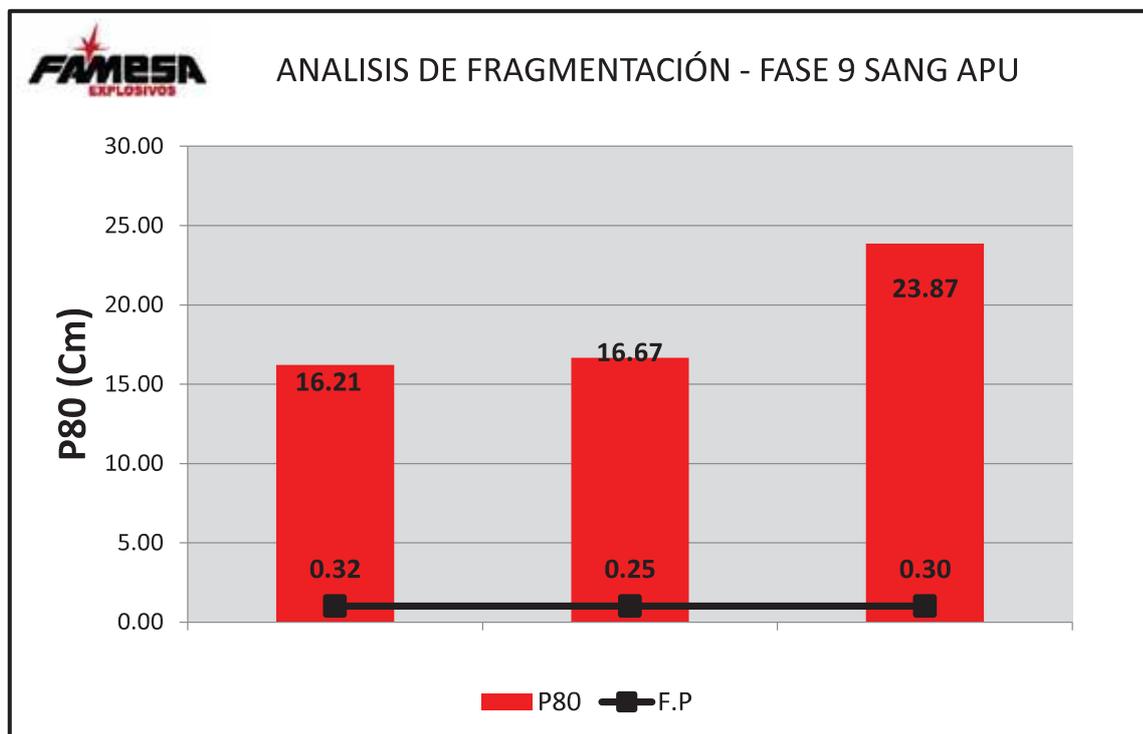


Figura 62. Análisis granulométrico de SANG APU y Factor de potencia – Elaboración propia.

4.4.3. ANÁLISIS DE FACTOR DE CARGA Y FACTOR DE POTENCIA

El análisis de factor de carga y potencia no tiene diferencia relevante debido a que se realizaron las pruebas y la línea base de HA 73 gasificado con los mismos parámetros de perforación y voladura. Sin embargo cabe resaltar que el porcentaje de esponjamiento con SANG APU alcanza casi el doble por lo que ingresa menor cantidad de carga en los taladros.

MEZCLA	DENSIDAD INICIAL (g/cc)	DENSIDAD FINAL (g/cc)	ESPONJAMIENTO (m)	ALTURA DE CARGA (m)	TONELAJE MATERIAL POR TALADRO	CARGA LINEAL (kg exp/m)	FC (kg exp./m ³)	FP (kg exp./ton)
HA 73G	1.3	1.1	0.5	9.5	4232.25	98.91	0.60	0.222
SANG APU	1.31	1.1	0.9	9.1	4232.25	99.67	0.58	0.214

La disminución del factor de potencia es de un 3.5 % utilizando la emulsión gasificable SANG APU en comparación al ANFO pesado 73 gasificado.

4.4.4. ANALISIS ECONOMICO

La evaluación económica será representada por el proceso de fabricación del explosivo usado para cada disparo contrastado a los resultados obtenidos.

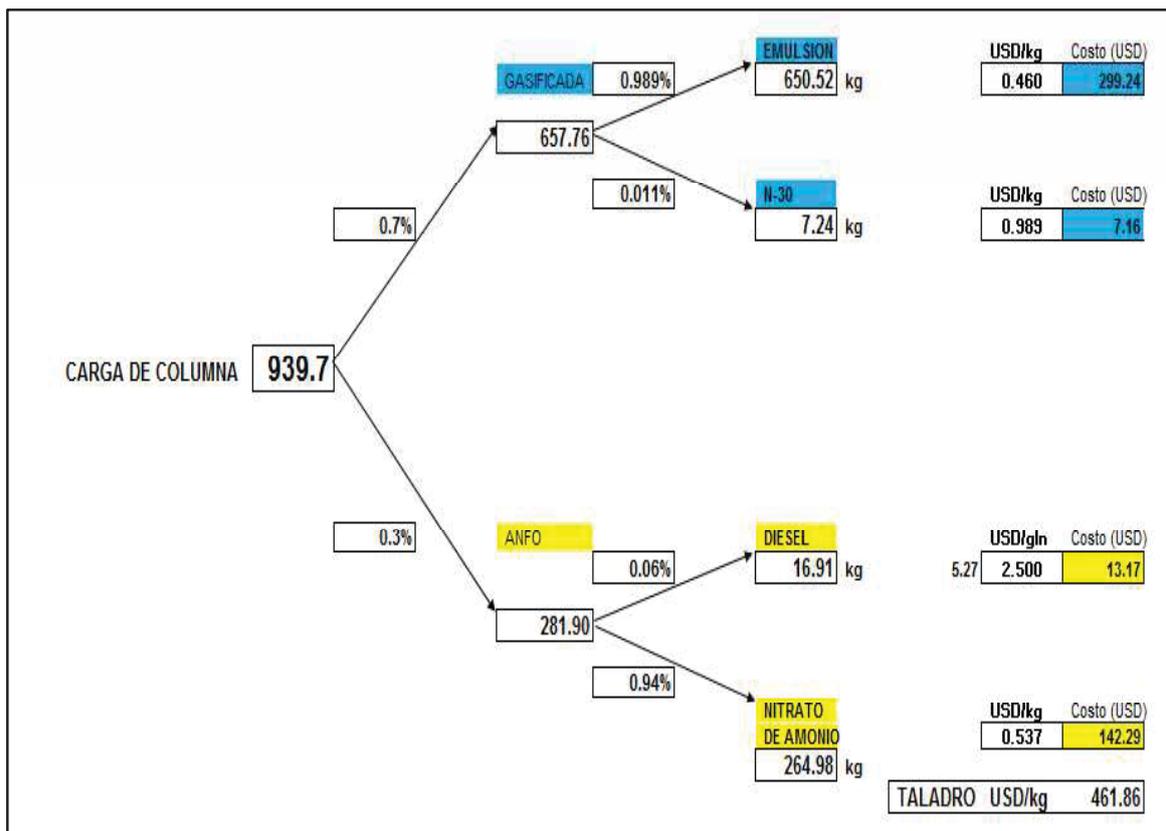


Figura 63. Análisis económico de HA 73 gasificado – Elaboración propia.

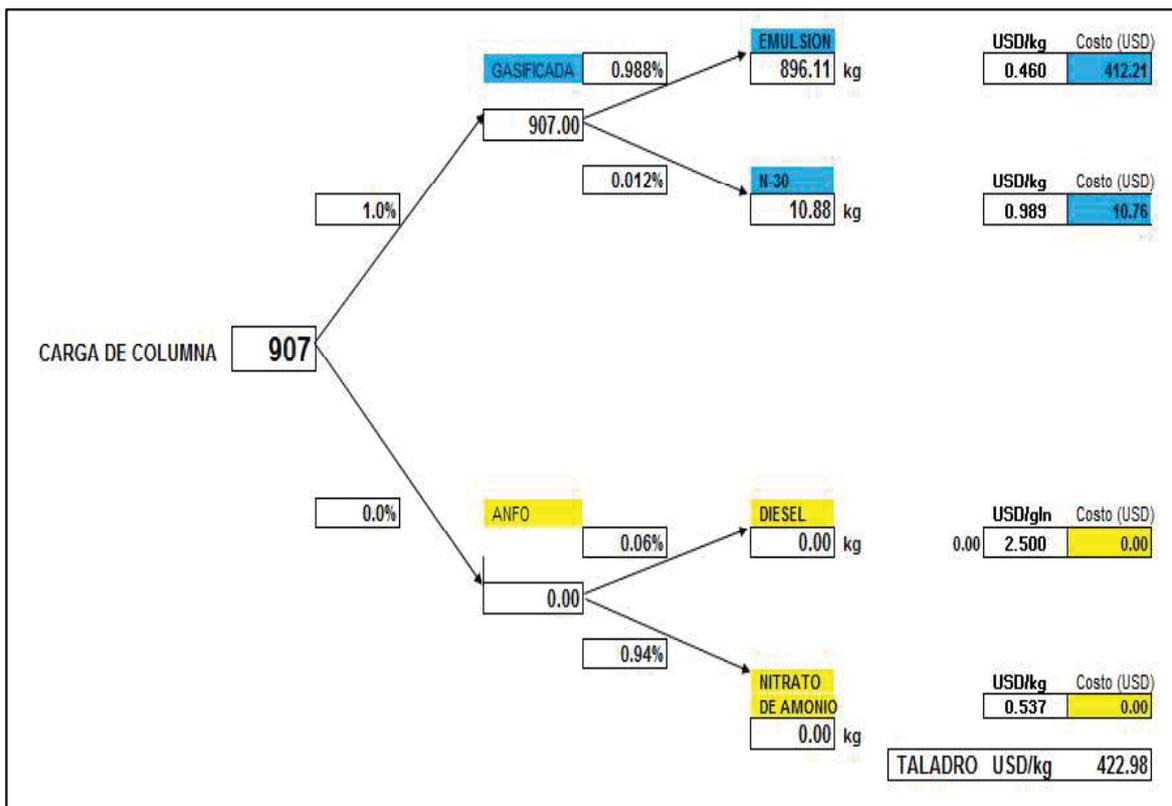


Figura 64. Análisis económico de SANG APU – Elaboración propia.

Debido a que se usaron los mismos accesorios para la iniciación se considera como constante para la evaluación económica, Según los cuadros anteriores se obtiene un ahorro de 38.88 USD por taladro y 0.009 USD por tonelada volada, el mismo que representa una reducción de 8.42 % , esta diferencia se debe primordialmente al ahorro en el costo de nitrato y diésel.

En fase 09 se dispara un aproximado de 2 500 000 toneladas al mes por lo que se ahorraría 22966.50 USD.

CONCLUSIONES

1. Refiriéndonos a la mezcla explosiva propuesta SANG APU quedo demostrado que obtuvo mejores resultados que el ANFO pesado 73 gasificable, Optimizando la Fragmentación, aspectos operativos y económico.
2. La emulsión gasificable SANG APU, presenta mejores resultados en velocidad de detonación compara al HA 73 gasificable siendo en promedio 3.1 % superior.
El análisis de fragmentación en las pruebas realizas se redujo en promedio de 27.40 cm a 18.91 cm, representa el 31% de reducción de P80.
El factor de carga con el uso de emulsión gasificable SANG APU se redujo en 3.5 %, debido al buen performance de la mezcla explosiva en esponjamiento de la columna.
3. Económicamente se demostró un ahorro de 0.009 USD por taladro respecto al ANFO pesado 73 gasificable. Básicamente por la eliminación de uso de nitrato de amonio y diésel en la preparación de ANFO. Esto representa una disminución de 8.42 %.

RECOMENDACIONES

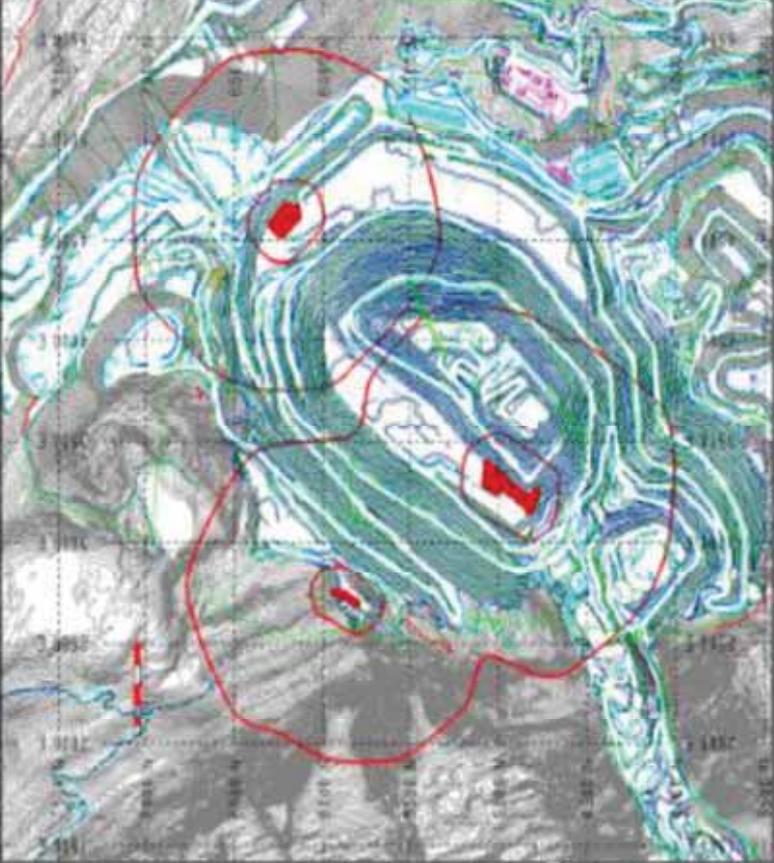
1. Para el uso de la emulsión SANG APU se deben realizar monitoreos constantemente como el control de densidad final, control de la inyección de nitrito de sodio, tiempo de esponjamiento y longitud de esponjamiento del explosivo.
2. Se debe realizar el control de calidad de los agentes de voladura cada vez que se tenga ingreso a los polvorines, para poder garantizar que éstas lleguen de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto.
3. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos con la utilización de la emulsión SANG APU, se recomienda a la compañía minera implementar esta nueva mezcla explosiva en sus operaciones, tanto en material estéril como en mineral.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

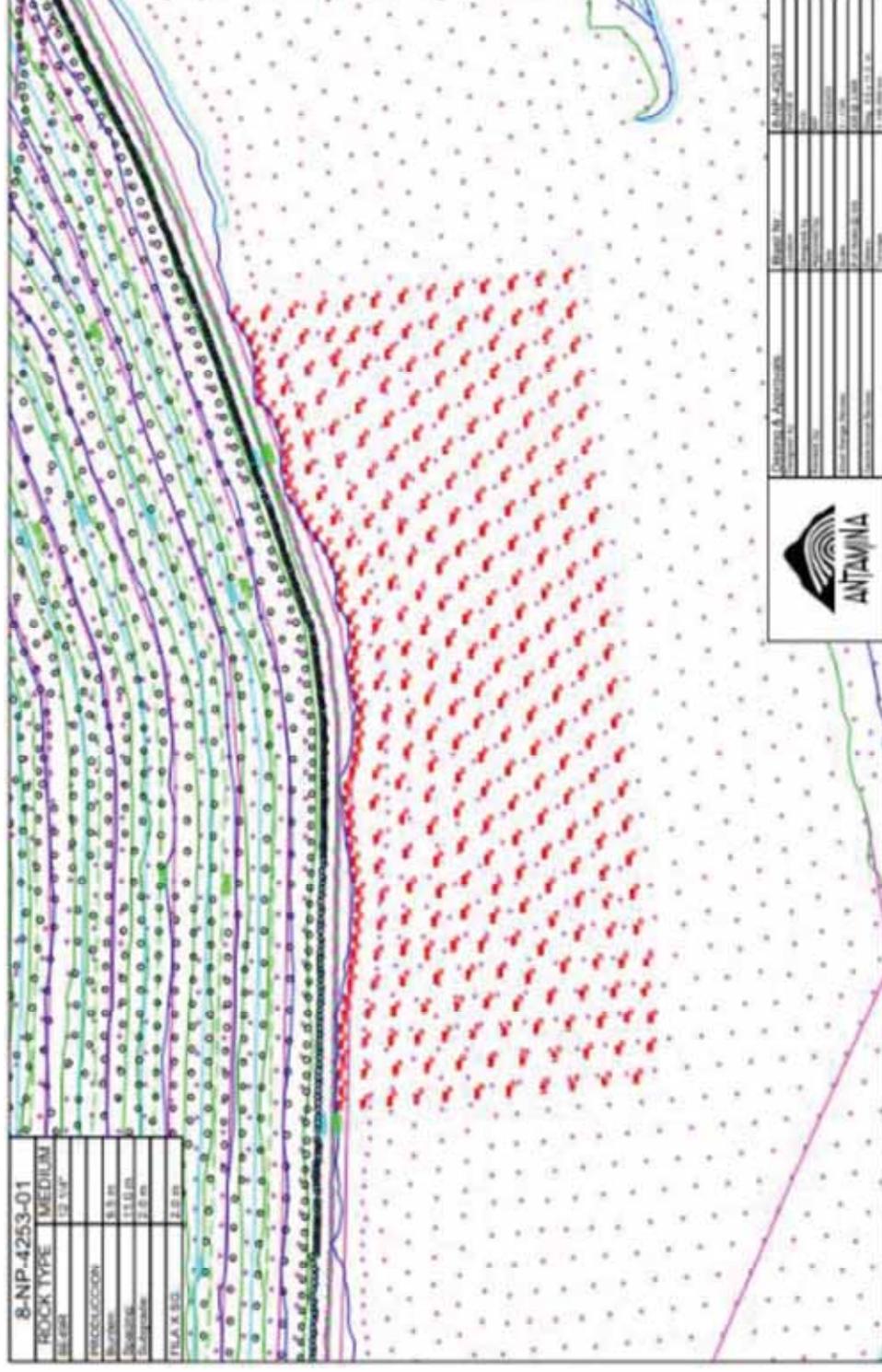
1. López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). “Manual de perforación y voladura de rocas”. Madrid, España.
2. Konya, C., & Albarrán, E. (1998). “Diseño De Voladuras”. México.
3. Cunningham, C. (1983). “The model for production of fragmentation from Blasting”.
4. Lopez, J. C. Y Fernandez, L. (1989). “La predicción de la fragmentación en voladuras. El modelo KUZ-RAM y sus aplicaciones. canteras y explotaciones”. Madrid, España.
5. Famesa explosivos S.A.C. (2018). “Compromiso eco-amigable para la gran minería, respuesta para los humos naranja”, Moquegua, Perú.
6. EXSA Soluciones. (2014). (1ra. ed.). “Manual práctico de voladura”. Lima, Perú.
7. ENAEX. (2014). “Manual de tronadura ENAEX S.A”. Santiago, Chile.
8. ISEE. (2008): “Manual del especialista en voladura”. Ohio, USA.
9. Hernandez Sampieri, R., Mendoza Torres, P. (2018): “Metodología de la investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta” México.
10. Carrasco S. (2006). (1era. Reimpresión). “Metodología de la investigación científica”, Editorial San Marcos, Lima, Perú.
11. www.famesa.com.pe
12. www.exsa.net (Explosivos).
13. www.enaex.cl (Explosivos).
14. www.antamina.com
15. www.es.scribd.com

ANEXOS

Anexo 1. Vista panorámica Tajo Antamina - (Operaciones Mina Antamina).

AVISO DE VOLADURA EN ANTAMINA ANTAMINA BLAST NOTICE		
UBICACION:	FASE 6, FASE 8 y FASE 9	
LOCATION:	PHASE 6, PHASE 8 & PHASE 9	
HORA:	13:30 hrs.	
TIME:	13:30 hrs.	
FECHA:	Domingo 25 de Marzo 2018	
DATE:	Sunday, 25th March 2018	
MILLA:	SMP-4343-3013, SMP-4343-4708 y SMP-4336-31	
PATRON:	SMP-4343-3013, SMP-4343-4708 y SMP-4336-31	
DISTRIBUTION LIST / LISTA DE DISTRIBUCION:		
NOMBRES DE DISTRIBUCION: DISTRIBUCION DE TALLERES Y ALMACEN PLANTAS DE COMBUSTIBLE PARA MAQUINARIA Y EQUIPO DE MAQUINARIA, OIL JACK COMPARTAMENTO DE PUERTAS PARA EL ALMACEN		
AREAS DE ACCESO RESTRICTO Y 100M ANTES DE LA VOLADURA AREAS OF RESTRICTED ACCESS & 100M PRIOR TO BLAST		
100 M CERCANIAS AL PERIMETRO DE LA VOLADURA 100 M RESTRICTED PERIMETER & EQUIPMENT		
NO INFLUYEN LOS EFECTOS DE LA VOLADURA EN LAS ACTIVIDADES DE LA VOLADURA		

Anexo 2. Plano de radio de influencia de voladura - (Voladura Antamina).



Anexo 3. Plano de malla de perforación - (Voladura Antamina).