

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ANFO PESADO A BASE DE EMULSIÓN GASIFICABLE EN MINERA YANACOCHA

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero de Minas**, que presenta el bachiller:

Wilson Paúl Vilela Sangay

ASESOR: Ing. Elmer Vidal Sánchez

Lima, diciembre del 2014

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica, económica y operativa de un nuevo tipo de emulsión, componente principal del ANFO Pesado que se usa comúnmente en el proceso de voladura en Minera Yanacocha.

Este nuevo producto es una emulsión gasificable de mejor calidad y mayor costo en comparación con la emulsión matriz que se utiliza actualmente. La principal ventaja y motivo de investigación es su capacidad de gasificar por la adición de un agente químico. Ello permite variar su densidad y como consecuencia variar la velocidad de detonación, poder rompedor y otras propiedades, dependiendo de las características del material.

Con este propósito, en el área de Perforación & Voladura se diseñó un plan para determinar y cuantificar las posibles ventajas que presenta el nuevo producto. Se inició con la instalación de los equipos para gasificar en los camiones fábrica, posteriormente se transportó la emulsión gasificable a la mina y finalmente se hicieron las pruebas in situ para medir sus parámetros antes, durante y después de la voladura. Estas pruebas son motivo del presente estudio.

El parámetro que se midió antes de la voladura fue la densidad, un aspecto crítico para determinar los costos y la calidad del explosivo. Durante la voladura, se midió la velocidad de detonación que es el mejor parámetro que representa la calidad del explosivo en cuanto a poder rompedor. Finalmente, post voladura se analizó la fragmentación del material, presencia de humos y lo más importante el dig-rate (tasa de excavación) de los equipos de minado.

Tras realizar las pruebas mencionadas, se hizo el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista económico y operativo. Se logró un ahorro importante sin afectar el dig-rate de los equipos de minado, además de eliminar la generación de gases nitrosos. En base a estos resultados, se implementó el uso de emulsión gasificable para la fabricación de ANFO Pesado en Minera Yanacocha. Sin embargo, también se concluyó que no es viable el reemplazo total de la emulsión gasificable por la emulsión matriz, debido a que en una mezcla en particular resulta más económico el uso de la emulsión matriz obteniendo los mismos resultados en la fragmentación del material.

ABSTRACT

This project aims to analyze the technical, operative and economic feasibility of a new type of emulsion, which is the main component for the fabrication of Heavy ANFO and is commonly used in the blasting process at Minera Yanacocha.

This product being introduced to the operation is a chemical gassed emulsion which consists of a new type of emulsion of better quality and higher cost in comparison with the matrix emulsion (currently used). Among the various advantages provided by the new emulsion is the capacity to be sensitized by adding a gassing solution, which is the main reason for this investigation. With this quality, we are able to vary its density, and therefore modify its velocity of detonation and breaking power, depending on the requirements needed for the material.

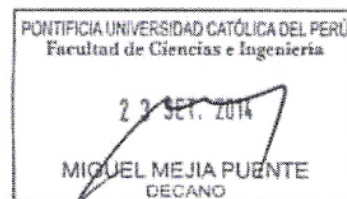
For this investigation, the Drilling & Blasting department designed a plan to determine and quantify the possible advantages of the new product. This plan consisted in the installation of the equipment to gasify the emulsion in the trucks, bringing the new emulsion to the operation and running in-situ testing to measure its parameters before, during and after the blasting. This study is based on these tests.

The parameters that were measured before blasting were mainly densities, critical to determine costs later on and the quality of the explosive. During the blasting, velocity of detonation was measured, which is the best parameter to represent an explosive's quality in a matter of power factor. After the blasting, material fragmentation, presence of toxic gases (orange-red colored fumes) and dig-rates from the mining machines were measured. The latter of which is of critical importance and cannot be altered negatively.

Finally, after performing the mentioned tests, we were able to demonstrate the advantages of this new product, in both an economic and operative manner, achieving important savings without affecting the performance of mining equipment, which supports our investigation and the use of the product from now on at Minera Yanacocha. However, it was also determined that the total replacement of the matrix emulsion with the new chemical gassed emulsion is not viable, because in some mixes of heavy ANFO it is cheaper to use the matrix emulsion while obtaining the same results in the material fragmentation.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero de Minas
ALUMNO : Wilson Paúl Vilela Sangay
CÓDIGO : 20095572
PROPUESTO POR : Ing. Adolfo Pillihuaman Zambrano
ASESOR : Ing. Elmer Vidal Sánchez
TEMA : Análisis de factibilidad para el uso de Anfo Pesado a base de Emulsión Gasificable en Minera Yanacocha
No. TEMA : 116
FECHA : 18 de Setiembre del 2014
OBJETIVOS :



OBJETIVO GENERAL

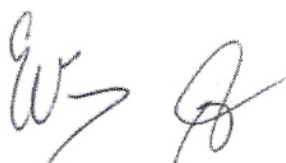
Determinar las ventajas económicas, técnicas y operativas que puede aportar la utilización de la Emulsión Gasificable en comparación con la Emulsión matriz, como componentes en la fabricación de Anfo Pesado en el proceso de voladura en Minera Yanacocha.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Estudiar la posibilidad del reemplazo de Emulsión matriz (que se utiliza actualmente en la operación) por Emulsión Gasificable, como componente en la fabricación de Anfo Pesado.
- Disminuir el costo por metro lineal y por taladro usando anfo pesado a base de Emulsión Gasificable sin afectar de manera negativa la productividad de los equipos de minado.
- Lograr la fragmentación actual o mejorarla usando anfo pesado a base de la nueva Emulsión Gasificable.
- Eliminar la generación de gases nitrosos y por ende mejorar las prácticas medioambientales y de seguridad.
- Identificar puntos críticos y establecer controles de calidad para asegurar el desempeño del nuevo producto a lo largo de su implementación y posterior aplicación.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:

El presente estudio trata acerca de una investigación para determinar las ventajas que presenta la utilización de emulsión gasificable para la fabricación de anfo pesado, frente al anfo pesado a base de



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Av. Universitaria 1801, San Miguel
Lima 32 - Perú
T: 626 2000 anexos 5000, 5001
F: 626 2852

www.pucp.edu.pe/secc/minas

emulsión matriz que es usado común e históricamente en el proceso de fragmentación de la roca en Minera Yanacocha.

La fragmentación de la roca, hoy en día debido a los elevados costos de energía eléctrica, así como el incremento de precios de las materias primas como el petróleo, nos obliga a que sea un punto crítico del ciclo minero. Asimismo, el incremento de los costos en minería y la caída de precio de los minerales metálicos nos exige aprovechar al máximo los recursos con los que contamos. En este sentido, Minera Yanacocha es una empresa comprometida con la innovación, eficiencia y competitividad, y en esta búsqueda, se decidió investigar acerca de la emulsión gasificable, la cual puede traer diversos beneficios tanto económicos como operativos a la operación, así como abrir un futuro de posibilidades para la investigación en este campo.


El estudio tuvo lugar en el Complejo de Minera Yanacocha, en Cajamarca, durante los meses de Febrero a Junio del presente año, periodo en el cual se recopiló información y se realizaron las pruebas para determinar el performance de la nueva mezcla explosiva. Es así, que en base a algunos parámetros principales medidos, como velocidad de detonación, densidades, fragmentación y Dig Rate, se comparó el desempeño de los anfos pesados, fabricados con cada tipo de emulsión.

Analizando la data obtenida mediante las pruebas en campo y recopilando la información histórica, se arribó a conclusiones muy interesantes, tanto del lado técnico como económico. Finalmente, la presente investigación también brinda algunas recomendaciones para el manejo eficiente de la nueva emulsión, enfocado en los puntos críticos que hay que controlar para obtener el máximo rendimiento de la nueva mezcla explosiva.


PLAN DE TRABAJO:

- Recopilación de información histórica para tener una línea base acerca del performance de los explosivos usados en la operación, especialmente los anfos pesados a base de emulsión matriz en sus diferentes mezclas.
- Planificación de método de pruebas para ensayar el nuevo explosivo en el área de Perforación & Voladura.
- Realización de pruebas enfocadas en medir diversos parámetros como velocidad de detonación, fragmentación, densidades y Dig Rate.
- Análisis de resultados obtenidos de las pruebas del nuevo explosivo, contrastándolos con la línea base previamente establecida con información histórica de la operación.
- Planes de control y recomendaciones para la correcta implementación de la emulsión gasificable como componente del anfo pesado.
- Comentarios y Conclusiones.

Máximo: 100 páginas


Ing. Adolfo Pillihuaman Zambrano
Coordinador
Especialidad de Ingeniería de Minas




Ing. Elmer Vidal Sánchez
Asesor

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Av. Universitaria 1801, San Miguel
Lima 32 - Perú
T: 626 2000 anexos 5000, 5001
F: 626 2852

www.pucp.edu.pe/secc/minas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera expresar mi sincero agradecimiento a Minera Yanacocha por haberme permitido realizar esta investigación, teniendo el total respaldo de sus colaboradores y todos sus recursos a disposición.

En especial, al ingeniero Marco Jáuregui, por sus enseñanzas, tiempo y asesoramiento a lo largo de todo el proyecto; al ingeniero Jesús Paz por el constante soporte y al área de Perforación & Voladura, liderada por el ingeniero Martín Mendoza.

Al ingeniero Elmer Vidal, no solo por el papel tan importante de asesor, sino también por los consejos y guía durante la realización de este trabajo.

Asimismo a aquellas personas que hicieron valiosos aportes: Dra. Lina López (Universidad Politécnica de Madrid), Dra. Silvia Rosas (PUCP), Ing. Jair Díaz (Colorado School of Mines) e Ing. Yorhinio León (Yanacocha).

Finalmente quiero agradecer al ingeniero Oscar Silva y a Mr. Lee Langston, por todo su apoyo, consejos y orientación a lo largo de mi formación profesional.

DEDICATORIA

*A mis queridos padres Orfelinda y Wilson,
quienes con su esfuerzo y dedicación,
me motivan a seguir adelante cada día.*

*A mi hermana Ana Rosa
por su apoyo, cariño y
ser mi guía de toda la vida.*

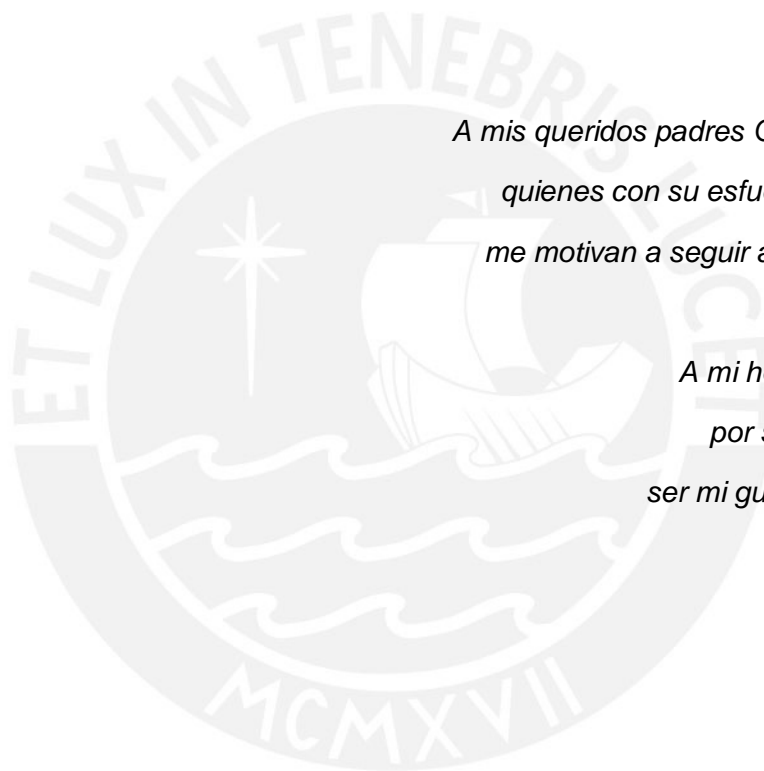


TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
1 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Hipótesis	1
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Plan de trabajo	2
2 GENERALIDADES - MINERA YANACOCCHA SRL	4
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 Ubicación.....	5
2.3 Acceso.....	6
2.4 Geología.....	6
2.5 Producción.....	12
2.6 Procesos de producción del oro	13
2.7 Método de explotación.....	18
2.8 Procesos operativos de minado.....	18
3 MARCO TEÓRICO	24
3.1 Explosivos	24
3.2 Agentes de voladura.	25
3.3 Características de desempeño de los explosivos	34

4	MÉTODOS DE MEDICIÓN	37
4.1	Velocidad de detonación.....	37
4.2	Densidad	39
4.3	Fragmentación	41
4.4	Dig-rate	42
5	RESULTADOS	44
5.1	Línea Base - ANFO Pesado a base de emulsión matriz.....	44
5.2	Resultado de pruebas - ANFO Pesado 73 gasificado.....	46
6	ANÁLISIS.....	52
6.1	Velocidad de detonación y densidad.....	52
6.2	Dig-rate.....	55
6.3	Análisis económico	57
7	IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL.....	63
7.1	Impacto económico de mejoras.....	63
7.2	Gestión de Stakeholders.....	67
7.3	Control	69
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
8.1	Conclusiones.....	71
8.2	Recomendaciones.....	72
9	BIBLIOGRAFÍA.....	73

1 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Hoy en día, la operación minera utiliza agentes de voladura a granel, como el ANFO y ANFO Pesado a base de emulsión matriz para el arranque de la roca. Dependiendo de las condiciones medioambientales y la dureza del material, se diseñan las cargas explosivas en los taladros con ANFO o diferentes mezclas de ANFO Pesado.

Estudios realizados tanto en laboratorio como en otras operaciones mineras, han demostrado que la emulsión gasificable (como componente del ANFO Pesado) tiene ventajas frente a la emulsión matriz (no gasificable) la cual se utiliza actualmente en la operación.

En el área de Perforación y Voladura (P&V) de Minera Yanacocha, se busca hacer todas las mejoras posibles, logrando reducir costos o mejorar los procesos operativos, sin alterar la productividad de los equipos de minado.

Para ello, durante los primeros meses del año 2014 se formó un equipo de investigación con el objetivo de determinar las ventajas que este nuevo producto podría ofrecer y evaluar su implementación en la operación minera.

1.2 Hipótesis

Se plantea la hipótesis de que la utilización de la emulsión gasificable tenga la capacidad de lograr los mismos o mejores resultados que la emulsión matriz la cual se utiliza actualmente para la fabricación de ANFO Pesado añadiendo un valor agregado a la operación en cuanto a reducción costos, ventajas operativas, de seguridad y/o cuidado medioambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

Determinar las ventajas técnicas, operativas y económicas que puede aportar la utilización de la emulsión gasificable en comparación con la emulsión matriz, para la fabricación de ANFO Pesado en el proceso de voladura en Minera Yanacocha.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar la posibilidad de reemplazar la emulsión matriz que se utiliza actualmente en la operación por la nueva emulsión gasificable, para la fabricación de ANFO Pesado.
- Eliminar la generación de gases nitrosos y por ende mejorar las prácticas de seguridad y medioambientales.
- Obtener la fragmentación actual o mejorarla usando ANFO Pesado a base de la nueva emulsión gasificada.
- Disminuir el costo por metro lineal, por taladro y por tonelada usando ANFO Pesado a base de Emulsión gasificada sin afectar de manera negativa la productividad de los equipos de minado.
- Identificar puntos críticos y establecer procedimientos y controles de calidad en el caso se realice la implementación de la emulsión gasificable.

1.4 Plan de trabajo

El método de investigación bajo el cual se planteó el presente estudio es la herramienta de mejora DMAIC, la cual se basa en una mejora continua a partir de la recolección de datos. Este proceso DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar por sus siglas en inglés) ha definido la estructura de la investigación. Primero se definió el problema identificando un punto débil o a mejorar. Posteriormente se dio la medición, donde se elaboró una línea base con información histórica y se realizaron pruebas en campo con el nuevo producto en estudio. A continuación, se analizaron los resultados obtenidos y finalmente, tras haber decidido qué mejoras se realizarían, se procedió a tomar las medidas de control necesarias para que el estudio perdure en el tiempo dando los resultados esperados y propuestos.

A continuación se presenta la formulación del plan de trabajo, el cual se realizó en coordinación con el área de Perforación & Voladura y el área de Business Excellence.

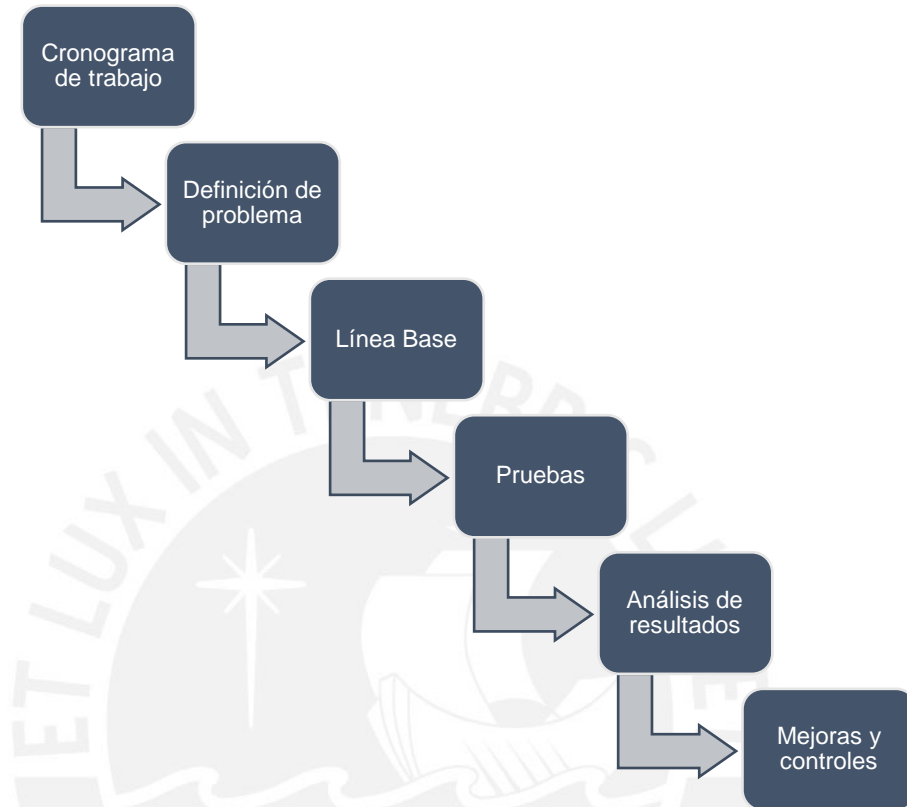


Figura 1-1. Plan de trabajo

Finalmente, es importante mencionar que esta investigación y su publicación se han realizado con la autorización de Minera Yanacocha.

2 GENERALIDADES - MINERA YANACOCHA SRL

2.1 Antecedentes

Minera Yanacocha S.R.L. (en adelante "Minera Yanacocha") es la mina de oro más grande de Sudamérica, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca, a 800 kilómetros al noreste de Lima, dedicada a la extracción de oro y plata por métodos de gran minería a tajo abierto.

Sus operaciones se encuentran a 45 kilómetros al norte del distrito de Cajamarca, dentro de cuatro cuencas: Quebrada Honda, Río Chonta, Río Porcón y Río Rejo.

El yacimiento fue descubierto en 1985 y posteriormente en 1990 se llevaron a cabo los estudios de factibilidad en una planta piloto de lixiviación en pilas.

En 1992 fue constituida legalmente la empresa Minera Yanacocha S.R.L., llegando a producir la primera barra de doré el 7 de agosto de 1993 proveniente del tajo Carachugo. La empresa está conformada por los siguientes accionistas:

- Newmont Mining Corporation – 51.35%
- Compañía de Minas Buenaventura – 43.65%
- International Finance Corporation – 5.00%

Actualmente la mina opera los yacimientos de oro Tapado Oeste, La Quinoa Sur, Chaquicocha y Yanacocha. Además, el programa de cierre de mina en los tajos Carachugo y Maqui-Maqui ha sido completado. En la Figura 2-1 se observan los diversos componentes principales de la mina.

La producción de oro en 2012 fue de 1.345.992 onzas y la producción de plata fue 553.092 onzas. Asimismo el Gold Mill procesó 6.328 millones TMS con una ley de 4,235 gramos/TMS y una recuperación de oro de 86,4%. Gracias al mayor tonelaje tratado y a la mejor ley del mineral, la producción de oro del Gold Mill en 2012 fue de 745.055 onzas (Minera Yanacocha SRL, 2013).

El mineral que produce Yanacocha se vende en su totalidad en el mercado spot, a refinerías de clase mundial y bajo estándares internacionales de calidad, seguridad y protección del medio ambiente (Minera Yanacocha SRL, 2013).

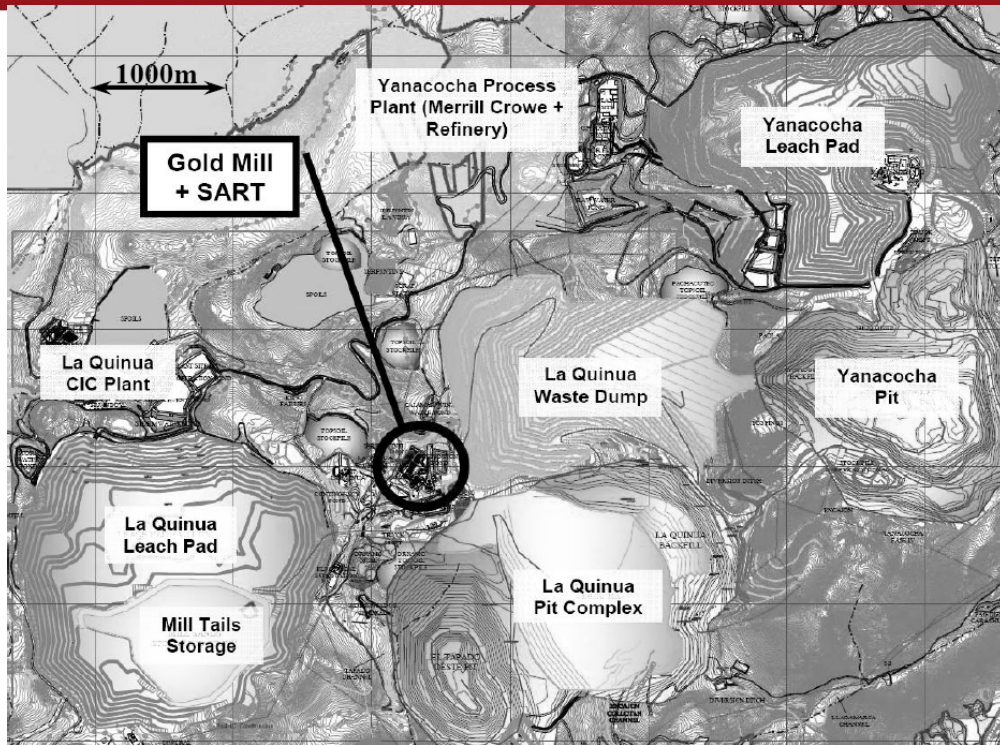


Figura 2-1. Principales componentes de Minera Yanacocha (Burger et al., 2011)

2.2 Ubicación

Minera Yanacocha está ubicada en el distrito de Yanacocha, al noreste del Perú, aproximadamente a 20 Km al norte de la ciudad de Cajamarca (Figura 2-2), entre los 3500 y 4100 metros sobre el nivel del mar.

El centro geográfico del complejo minero tiene aproximadamente las siguientes coordenadas UTM: 774 260m E y 9 227 050m S, o 6° 59' S latitud, 78° 31' O longitud.

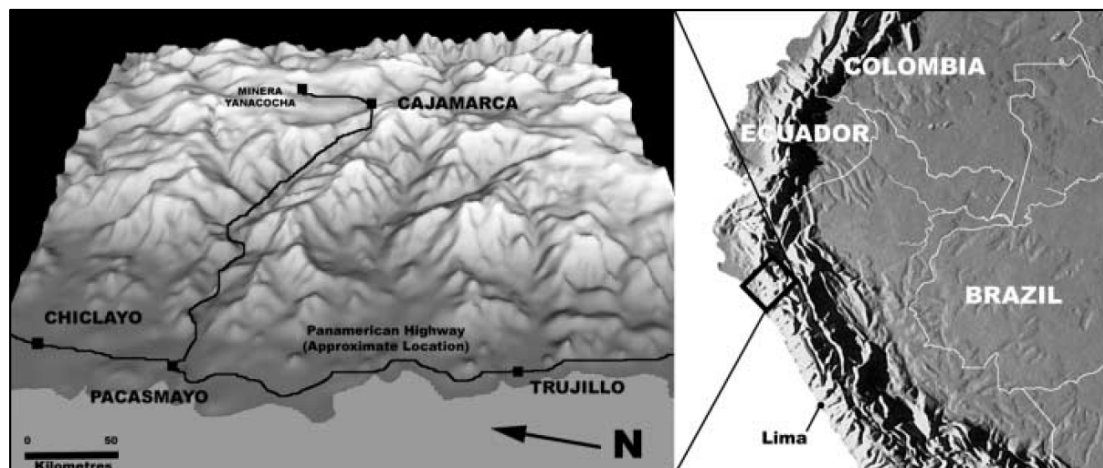


Figura 2-2. Ubicación del complejo Minera Yanacocha (Bury, 2004)

2.3 Acceso

El acceso a Minera Yanacocha, desde la ciudad de Cajamarca está a 48 km a través de la carretera pública Cajamarca-Bambamarca, a base de asfalto en todo su trayecto y toma aproximadamente 60 minutos de viaje. La ruta de Cajamarca a Lima, capital del Perú, es a través de una autopista de 191 Km hacia el oeste hasta la costa en Pacasmayo y posteriormente 694 Km hacia el sur a través de la vía Panamericana 1N hasta Lima (Figura 2-2), donde también está ubicado el principal puerto del país en el Callao y el aeropuerto de la capital. El trayecto de Cajamarca a Lima y viceversa por tierra tarda aproximadamente 14 horas.

El puerto de gran tamaño más cercano a la operación es el puerto de Salaverry, a 250 Km por autopista, cercano a la ciudad de Trujillo; y el puerto de Pimentel, cercano a la ciudad de Chiclayo, a 310 Km de la mina por autopista.

La ciudad de Cajamarca cuenta con el aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias, el cual ofrece vuelos comerciales diarios hacia la ciudad de Lima y viceversa, tomando un tiempo de viaje de 60 minutos.

En la mina se cuenta con helipuertos los cuales ocasionalmente se utilizan para el traslado de personal de Cajamarca hacia la mina y viceversa. Están ubicados en la zona de Yanacocha norte, La Quinoa y las oficinas administrativas en el Km. 24.

2.4 Geología

La geología de la formación del Complejo Yanacocha es desarrollada de manera Regional y Local, describiendo los eventos volcánicos, sedimentarios y tectónicos que permitieron la formación de uno de los distritos mineros de oro más grandes del mundo.

2.4.1 Geología Regional

La litología del basamento de la región de Yanacocha está caracterizada por una secuencia deformada de sedimentos de edad cretácica, los cuales fueron erosionados hasta lograr una superficie de bajo relieve, antes de la deposición del Complejo Volcánico Yanacocha del Mioceno medio.

El Complejo Volcánico Yanacocha (CVY: 11-12.5 Ma) ha sido subdividido en una serie de cinco ciclos magmáticos eruptivo/intrusivos. El CVY se encuentra generalmente confinado dentro de una depresión volcano-tectónica alargada (24 km de diámetro), con tendencia NE-SW. El distrito Minero de Yanacocha se ubica en la intersección de fallas regionales andinas, con dirección NW-SE, y el corredor estructural Transandino Chicama – Yanacocha que tiene tendencia NE-SW, como se puede observar en la siguiente figura.

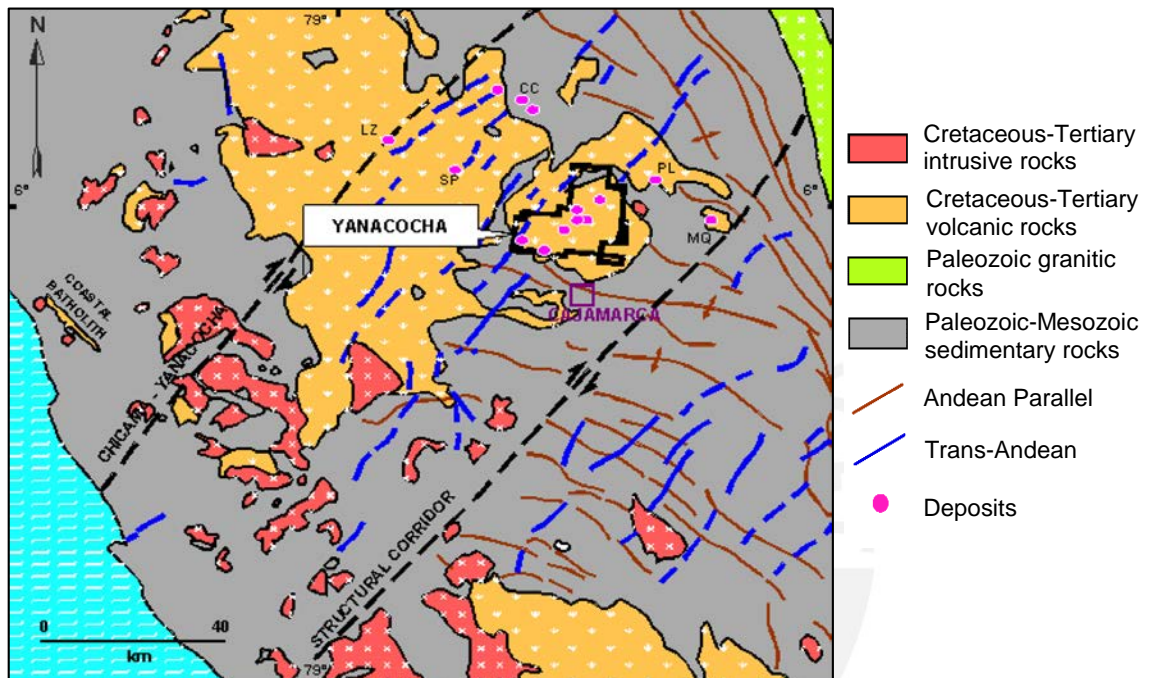


Figura 2-3. Mapa Geológico Regional (Modificado de Merino, 2005)

La Secuencia Basal Andesítica inferior del CVY envuelve una serie de lavas andesíticas y complejos de domos de flujo andesítico con menos cantidades de flujos piroclásticos intercalados. Luego de una fase inicial de volcanismo ocurrió un periodo de reposo, sin erupciones, durante el cual se produce actividad hidrotermal ácida temprana alterando la Secuencia Basal Andesítica antes mencionada. La sedimentación durante este periodo estuvo caracterizada por ocurrencias locales de sílice coloidal bandeada, la cual fue depositada en lagos ácidos que se formaron en ligeras depresiones topográficas o cráteres, asociados a la actividad hidrotermal temprana y a chimeneas volcánicas.

El periodo de reposo fue seguido por una intensa actividad de explosiones volcánicas, las cuales resultaron en la deposición extensa de flujos ignimbríticos pobremente cristalizados con componentes andesíticos ricos en cuarzo

perteneciente a la Secuencia Piroclástica Superior. Esta litología fragmental incluye clastos de rocas volcánicas previamente alteradas, lo que hace suponer que la fase inicial de alteración tipo “High Sulfidation” y la silicificación ocurrieron antes de la erupción.

Algunos domos dacíticos del siguiente ciclo magmático fueron emplazados dentro de la Secuencia Piroclástica Superior. Cristales de cuarzo y piroclastos líticos están espacialmente asociados con estos domos dacíticos. Esta etapa magmática se superpone a un segundo periodo de alteración tipo “High Sulfidation” y silicificación en las litologías del CVY.

El ciclo magmático final del CVY fue caracterizado por erupciones freáticas violentas en múltiples etapas, las cuales produjeron brechas heterolíticas que cortaron a través de todas las litologías y alteraciones previas. Posteriormente, en varias etapas, diques fluidizados de baja y alta pendiente cortaron las primeras etapas de brechas freáticas. En la etapa final, una fase volcánica resurgente concluyó con el emplazamiento de diatremas andesítico-latíticas y complejos de domos de flujos de textura porfírica ricos en feldespatos.

Tobas formadas por flujos de cenizas post-mineralización de la Formación Huambos (8.4 – 9.9 Ma), se encuentran expuestas alrededor del perímetro exterior del CVY estando también representadas por cuerpos menores intrusivos riodacíticos contemporáneos en el área de la Laguna Yanacocha. Finalmente la actividad glacial ha erosionado especialmente a las rocas débilmente argilizadas, así como también a las alteraciones de cuarzo granular compacto, mientras que litologías silicificadas masivamente y la “vuggy silica” (Figura 2-7) se han preservado como elevaciones topográficas. Extensas morrenas han sido construidas exclusivamente en base a derrubios por alteración tipo “High Sulfidation”, provenientes del CVY.

La siguiente Figura 2-4 muestra una columna estratigráfica generalizada para el distrito Yanacocha.

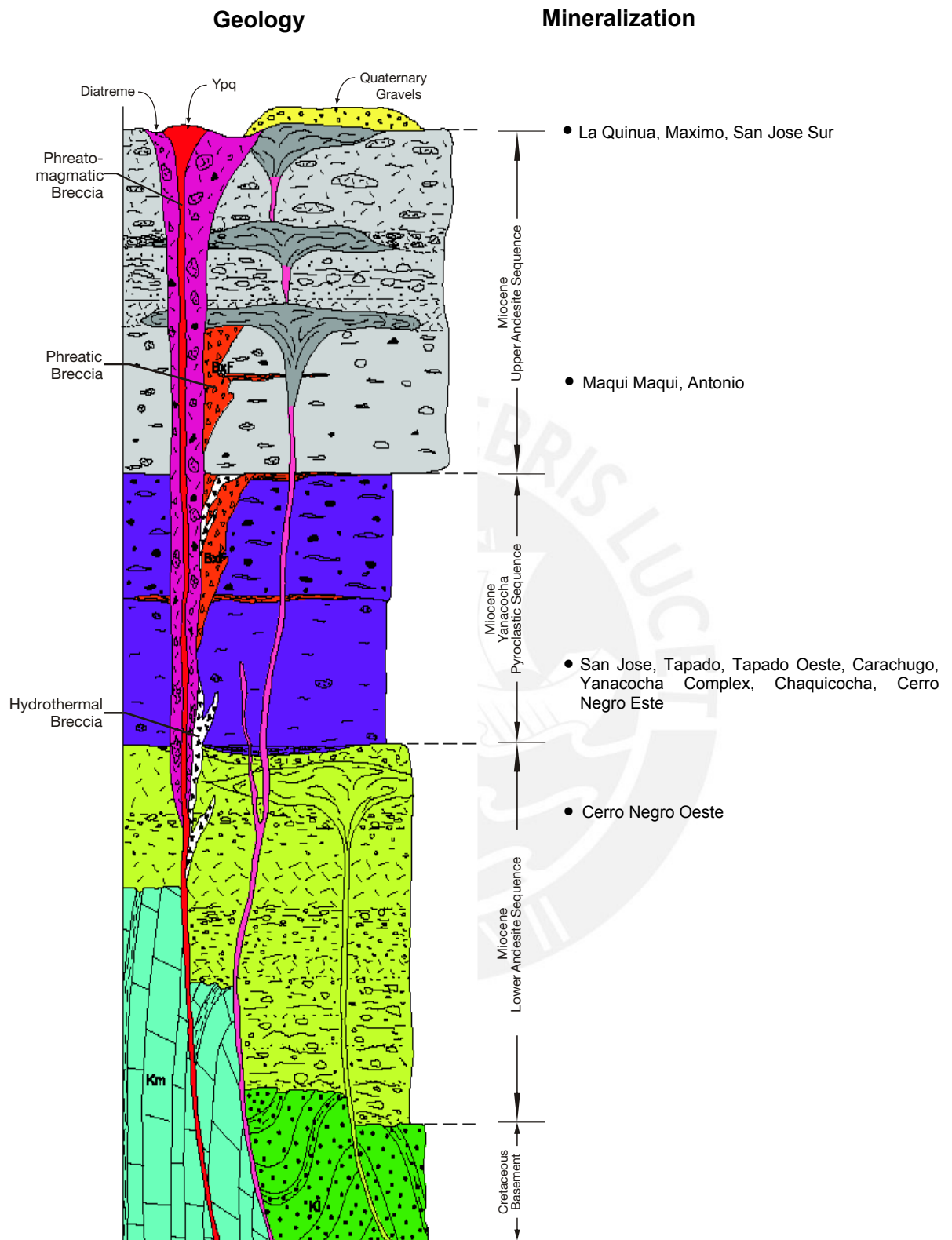


Figura 2-4. Columna estratigráfica generalizada para el distrito Yanacocha
(Modificado de Teal & Benavides, 2010)

2.4.2 Geología Local

La mena en el distrito minero de Yanacocha está alojada dentro de las secuencias piroclásticas superiores y andesíticas inferiores pertenecientes al Complejo Volcánico Yanacocha (CVY: 11-12.5 Ma). La mineralización de alta ley de oro en Yanacocha ocurrió dentro de zonas permeables desarrolladas durante estados tempranos de alteración tipo “High Sulfidation”, zonas de fallas, y en brechas tanto hidrotermales como freáticas. La mineralización ocurre de modo posterior a erupciones freáticas en múltiples fases, y está relacionada local y espacialmente con emplazamientos de diatremas y diques de textura porfirítica ricos en feldespatos que son asociados con la fase de resurgimiento tardío de complejos de domos de flujos de andesita y latita (Figura 2-5).

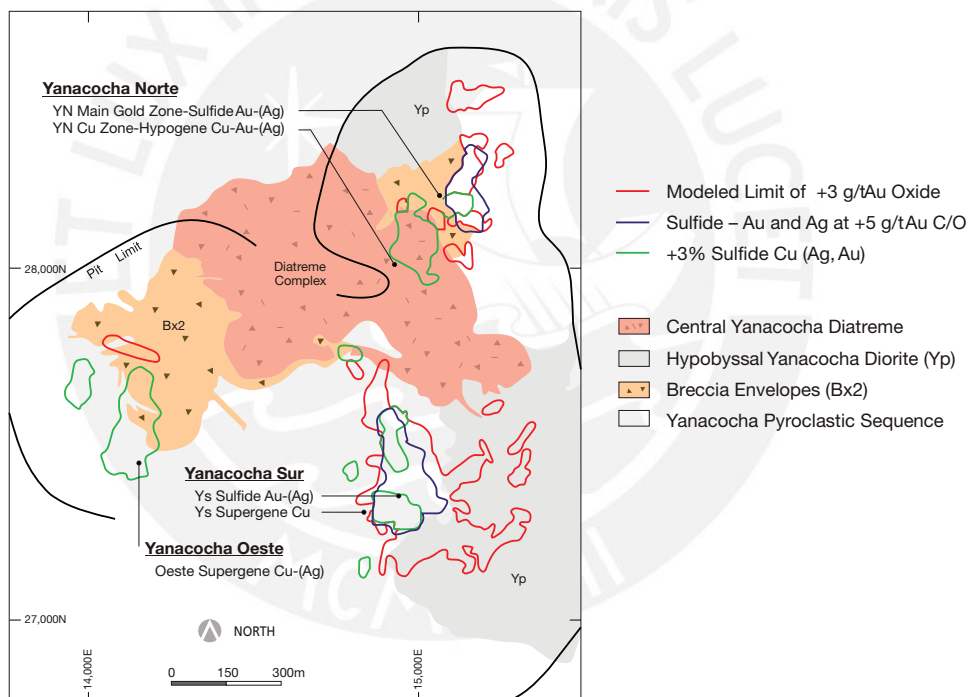


Figura 2-5. Depósito Yanacocha mostrando la huella de la diatrema central (Teal & Benavides, 2010)

Los cuerpos minerales auríferos en Yanacocha ocurren como cuerpos tabulares a sub-verticales en los cuales la mineralización de alta ley (>1 g/t Au) está controlada por estructuras alimentadoras de gran inclinación y por brechas hidrotermales, rodeadas por halos semi-estratiformes de baja ley (~0.15 g/t Au). La deposición ocurrió principalmente en las zonas de tipo “vuggy silica” y sílice granular más permeables, así como también de sílice masiva fracturada o brechada.

La alteración tipo “High Sulfidation” en Yanacocha dio lugar a la formación de grandes volúmenes de sílice residual (áreas superficiales > 10 Km²), con menores cantidades de alteración argílica avanzada a argílica (Figura 2-6). La alteración inicial ocurrió a consecuencia de lixiviación ácida y destrucción de minerales como feldespatos, piroxenos y biotitas. Esto creó una roca tipo “vuggy silica” (Figura 2-7) en donde el principal componente es sílice remanente. Una alteración secundaria de sílice masiva se superpone a la “vuggy silica” anterior. Hacia la parte exterior de esta silicificación, se forma una zona de alteración argílica avanzada, caracterizada por la presencia de alunita y cuarzo, además de arcillas. Ésta transiciona hacia el exterior a alteración argílica, que típicamente consiste de caolinita, dickita y otras arcillas. La franja más externa del halo de alteración consiste de una asociación propilítica de clorita, pirita y calcita.

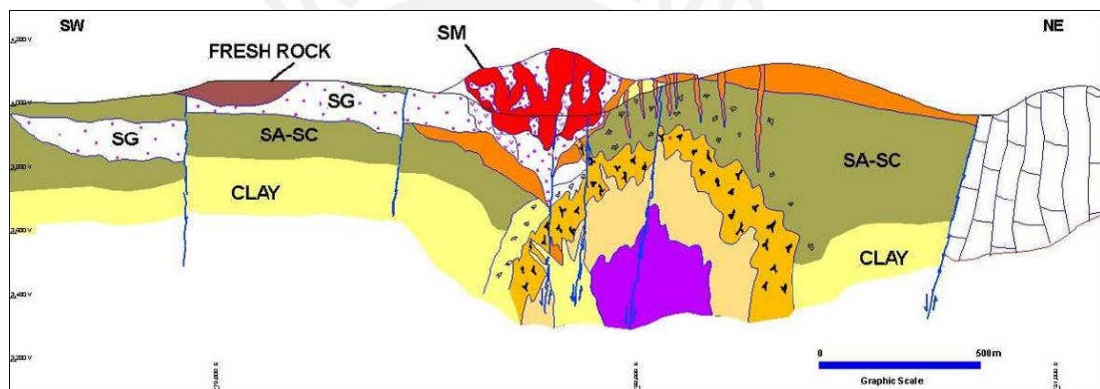


Figura 2-6. Sección transversal mostrando alteraciones

Leyenda: SM: Silica Masiva, ~100% Si, alta temperatura, textura destructiva, compacto y duro; SG: Silica Granular, ~100% Si, temperatura moderada a alta, textura destructiva, poroso; SA: Silica Alunita, minerales sulfatados, menor temperatura, transición a alteración argílica; SC: Silica Clay, mezcla de arcillas y sílice, menor temperatura; C: Clay, arcillas de caolinita, textura conservada, baja temperatura, volumen más grande; PROP: Propilítico, feldespatos a minerales de Magnesio, clorita, baja temperatura, más distante.

La glaciación en el Pleistoceno permitió la erosión de las rocas volcánicas del Mioceno, la alteración asociada y la mena de tipo “high sulfidation”, así como la deposición de sedimentos glaciares, fluviales y lacustres en todo el distrito. Estructuras tipo horst y graben formadas por movimiento a lo largo de gran cantidad de fallas con tendencia NW-SE se asocian a la alteración tipo “high sulfidation” y a la mineralización, creando además cuencas paleo-topográficas las cuales fueron posteriormente rellenas con sedimentos de origen glacial. En los alrededores de los depósitos de tipo “high sulfidation”, la mena de oro fue erosionada y depositada en las depresiones paleo-topográficas formando depósitos de gravas mineralizadas de hasta 300 metros de grosor.

La mena de oro ocurre tanto como granos finos aislados, así como granos finos dentro de guijarros de rocas volcánicas silicificadas ubicadas en diatremas. La mena en los depósitos de gravas se encuentra diseminada y no muestra el enriquecimiento local en paleo-canales, lo cual es típico para depósitos tipo placer. En algunos casos, los depósitos transportados se superponen sin relación alguna a depósitos epitermales de tipo “high sulfidation” alojados en roca firme.



Figura 2-7. Roca de sílice tipo vuggy en Yanacocha (Curso de Geología de Yacimientos Minerales – PUCP, 2012)

2.5 Producción

Yanacocha es la mina de oro más grande de Sudamérica, habiendo producido desde su inicio hasta la fecha más de 35 millones de onzas. Durante los años 2004 y 2005 se alcanzó la producción anual máxima, superando los 3 millones de onzas por año. Actualmente, como se muestra en la Figura 2-8, la producción ha venido decreciendo gradualmente, debido al agotamiento de la reservas de oro.

En la actualidad, la operación posee un ratio de remoción de material promedio de 360 mil toneladas diarias, operando las 24 horas del día y los 365 días del año.

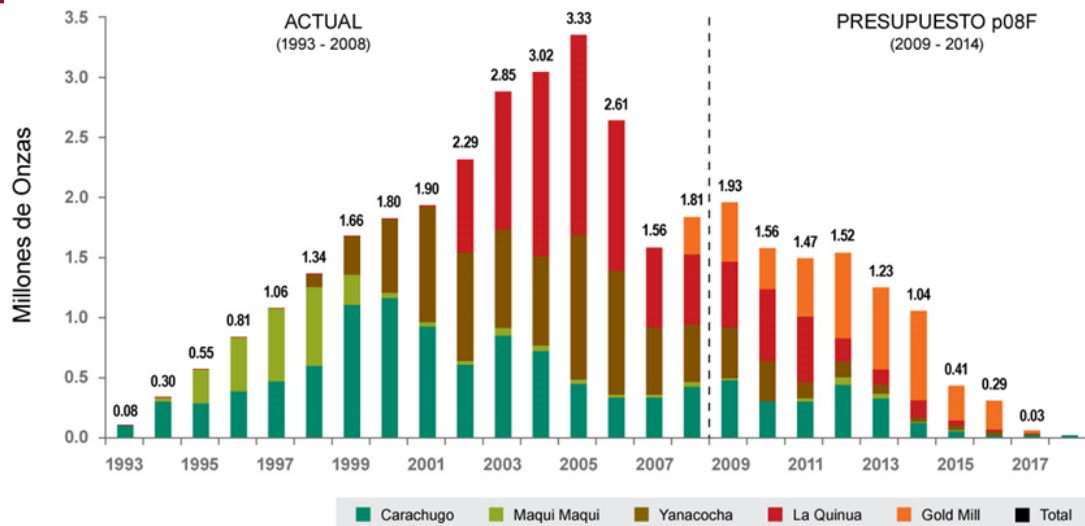


Figura 2-8. Producción de Oro de Minera Yanacocha 1993-2017 (Minera Yanacocha SRL, 2014)

2.6 Procesos de producción del oro

2.6.1 Gold Mill

El Gold Mill es un molino SAG construido en Minera Yanacocha para el procesamiento de minerales con contenido de oro más complejos que se encontraban a medida que se profundizaban los tajos, los cuales no podían ser tratados en los pads de lixiviación.

La producción comercial inició el primero de abril del 2008. Ello le da a la operación una mayor flexibilidad en el tratamiento de minerales, mejora la recuperación de oro (75-85% para oro, 60-75% para plata) y además disminuye el tiempo de recuperación, de 70 días a 24 horas. Por este motivo, en el Gold Mill se procesa minerales alta ley de oro con contenidos de plata y cobre, para obtener su máxima recuperación.

La planta está ubicada próxima al tajo La Quinua, siendo éste el yacimiento principal de donde se alimenta al molino, el cual tiene una capacidad de procesamiento de 6 millones de toneladas por año. En la Figura 2-8 se muestra la contribución del Gold Mill a la producción total de la compañía desde su inicio de operación (barras color naranja).



Figura 2-9. Molino SAG de Minera Yanacocha

El proceso inicia en el chancado primario con una chancadora de mandíbulas, el cual es alimentado directamente por los camiones con mineral de mina o proveniente de los stocks. Esta chancadora primaria reduce el tamaño del material, de 80 cm de tamaño de entrada a 5"- 6" de tamaño de salida y se almacena en un stock pile con capacidad para 35 mil toneladas, de donde se alimenta al molino SAG de 32' x 32' mediante alimentadores de placas.

El molino SAG como su nombre lo indica es accionado por un motor sin engranaje de 16.5 MW, el cual opera en una etapa simple con un nido de hidrociclones de donde el underflow retorna junto a los pebbles al molino en circuito cerrado y el overflow va hacia un espesador de pre-lixiviación, donde se añade cianuro de sodio para pasar a la siguiente etapa de lixiviación en tanques. Una vez finalizado el ciclo de lixiviación, la pulpa va hacia un circuito de espesadores, de donde se obtienen dos productos: una pulpa pobre con 60% de sólidos y una solución enriquecida con metales de oro, plata y cobre. La pulpa pobre es enviada al depósito de relaves ubicado en el pad de lixiviación La Quinoa, mientras que la solución enriquecida, si proviene de mineral oxidado y sólo contiene oro y plata pasa a la planta de carbón activado. De lo contrario si es mineral transicional y contiene además de oro cobre, primero pasa por el circuito SART (sulfidización, acidificación, recirculación y espesamiento) de donde se extrae el cobre y la plata, y finalmente a las columnas de carbón para la extracción del oro (Vente et al.,2011).

2.6.2 Pilas de lixiviación

Las pilas de lixiviación son grandes estructuras de forma piramidal escalonada, también llamados pads, donde se deposita el mineral de baja ley para su tratamiento y recuperación de metales preciosos. El mineral es lavado con una solución cianurada para recuperar el oro y la plata. En Yanacocha se riega por goteo con una solución de cianuro de sodio de baja concentración de aproximadamente 50 gramos por cada 1000 litros de agua. (Minera Yanacocha SRL, 2014).



Figura 2-10. Lixiviación en pilas por goteo

El goteo de solución cianurada se realiza en la parte superior de la pila, mientras que por la parte inferior se obtiene la solución rica (cianuro con oro y plata en disolución). Esta solución mediante tuberías colectoras se deposita en pozas, ubicadas en las cercanías de los pads. Posteriormente, la solución rica es bombeada hacia la planta de procesos de columnas de carbón para continuar con la extracción del oro.

2.6.3 Columnas de carbón y Merrill Crowe

2.6.3.1 Columnas de carbón

El proceso en las columnas de carbón permite concentrar la cantidad de oro que hay en la solución rica proveniente de la lixiviación, eliminar impurezas y se da en dos etapas: adsorción y desorción. La primera consiste en hacer circular la solución rica a través de las columnas que contienen carbón activado (el cual atrapa el oro en su superficie) dejando una solución pobre, sin oro ni plata. La segunda etapa, de desorción, consiste en hacer circular una solución cianurada por las columnas la cual disuelve nuevamente el oro atrapado en los poros del carbón. Esta solución pasa al siguiente proceso de Merrill Crowe.



Figura 2-11. Columnas de Carbón (Minera Yanacocha SRL, 2014)

2.6.3.2 Merrill Crowe

La solución enriquecida proveniente de las columnas de carbón es filtrada, posteriormente se elimina el oxígeno que contiene y se le añade polvo de zinc el cual hace que precipite el metal (oro y plata). Este precipitado pasa posteriormente al proceso de refinación.

La solución pobre que queda junto al precipitado que ya no contiene metales valiosos, también llamada Barren, pasa por un tanque donde se le agrega el cianuro que ha sido consumido en el proceso y es enviada nuevamente a los pads de lixiviación. Con esto se completa un circuito cerrado, donde la solución nunca sale al medio ambiente.



Figura 2-12. Merrill Crowe (Minera Yanacocha SRL, 2014)

2.6.4 Refinería

El precipitado proveniente de la planta de Merrill Crowe es sometido a un secado en hornos de retortas a 650°C y posteriormente el producto obtenido pasa a la fundición en horno de arco eléctrico a $1\ 200^{\circ}\text{C}$, de donde se obtiene el producto final: Doré. Estas son barras de oro y plata de aproximadamente 22 Kg cada una, cuya composición es de 40% oro y 58% plata (Minera Yanacocha SRL, 2014).



Figura 2-13. Proceso de Fundición

2.7 Método de explotación

Los depósitos minerales del complejo Yanacocha son del tipo epitermal de alta sulfuración. Se explotan mediante el método de tajo abierto, también llamado open pit, usando equipos gigantes para los procesos operativos que se describirán posteriormente. Las dimensiones de los bancos en cada tajo varían, siendo de 10 y 12 metros de altura.

2.8 Procesos operativos de minado

El proceso operativo de minado en el complejo Yanacocha se describe básicamente en cuatro etapas, en torno a las cuales gira toda la operación de extracción. Éstas son: Perforación, Voladura, Carguío y Acarreo (Figura 2-14). Actualmente se minan tres tajos mediante este proceso: El Tapado Oeste, Yanacocha y Chaquicocha.

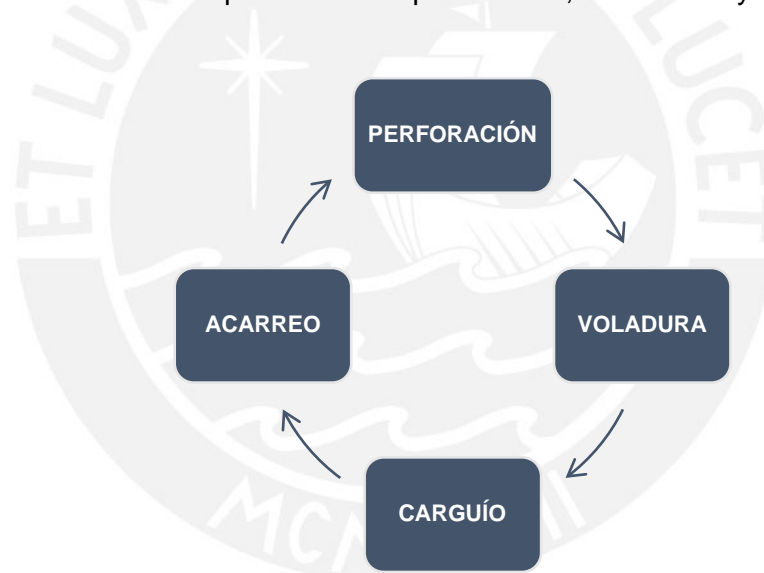


Figura 2-14. Ciclo de minado

El proceso inicia con la perforación de taladros en el área a explotar, posteriormente se cargan con explosivos a granel como ANFO o mezclas de ANFO con emulsión, también llamado ANFO Pesado; para luego realizar la voladura o disparo.

Con el material fragmentado, se procede al carguío, mediante palas y excavadoras. Estos cargan el material en camiones, los cuales transportan el material a los diferentes destinos como pads de lixiviación, Gold Mill, depósitos de desmonte o stock piles.

Cabe precisar que en Minera Yanacocha, debido al tipo de roca mineralizada no se realiza chancado previo a la lixiviación en pilas, debido a que la porosidad del material permite una buena percolación y un ciclo de lixiviación relativamente corto (70 días).

2.8.1 Perforación

La perforación es la parte inicial del ciclo de minado, en la cual se hacen los taladros de la altura del banco a minar, para posteriormente cargarlos con explosivo. Junto con la voladura, su principal función es obtener un material óptimamente fracturado para la mayor productividad posible de las siguientes etapas del ciclo y menores costos en chancado y molienda.

Una vez que Operaciones-Mina entrega el área a Perforación y Voladura (P&V) para perforar y cargar taladros, se procede a verificar el cumplimiento de las medidas de seguridad establecidas, como la berma de 2 metros de altura en toda el área a perforar y 2 letreros en la zona de ingreso, identificando el área de perforación y restringiendo el paso a personal no autorizado.

Cuando se cumplen éstos requisitos, ingresan los equipos de perforación detallados en la Tabla 2-1.

2.8.1.1 Equipos de perforación

Los equipos cuentan con un sistema de comunicación conectado al servidor, mediante el cual son capaces de cargar desde cualquier ubicación las mallas de perforación que son diseñadas en las oficinas administrativas. Las perforadoras cuentan con sistema de alta precisión (HPGPS por sus siglas en inglés), las cuales de manera satelital pueden perforar los taladros según las coordenadas del diseño con ± 15 cm de desviación.

Tabla 2-1. Equipos de perforación

Flota de Equipos de Perforación	# Unidades	Diámetro de Brocas (pulg)
Pit Viper AC PV271	4	10 5/8 - 9 7/8
IR DML	2	7 7/8
IR Rock Drill L8	2	5 & 6

2.8.1.2 Mallas de perforación y tipos de taladros

Las mallas de perforación son diseñadas por el equipo de Diseño P&V, que utilizan parámetros geológicos y geotécnicos para determinar el tipo de material, y asignar el burden, espaciamiento, sobreperforación y tipo de carga para cada malla y sus respectivos taladros. Toda la información de diseño es registrada para poder evaluar y realizar mejoras posteriores en el área.

En Minera Yanacocha se tiene 3 tipos de diseño de taladros, los cuales tienen diferentes funciones según las necesidades y fases de la mina. Estos son: Precorte, Procedimiento y Producción. A continuación se describen sus principales funciones (Figura 2-15), así como se presenta una tabla indicando las características de diseño para cada uno (Tabla 2-2).

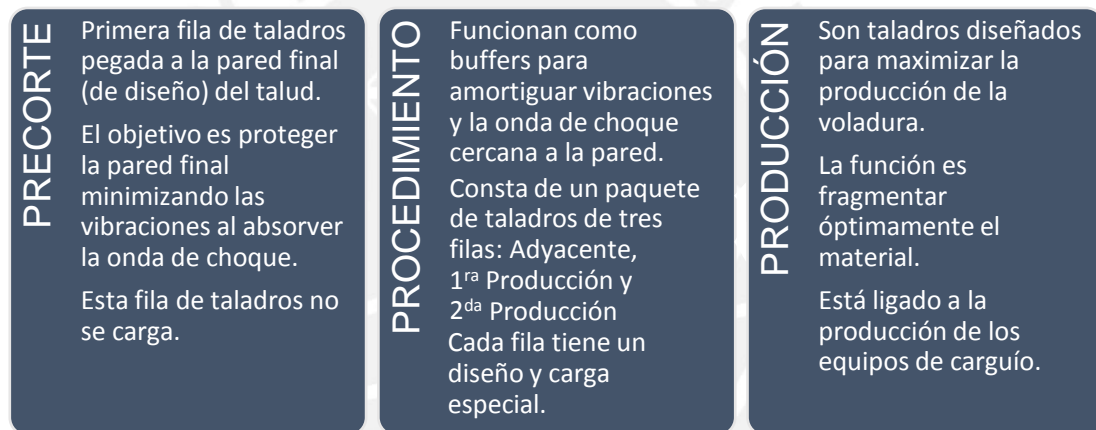


Figura 2-15. Tipos de diseño de taladros

Tabla 2-2. Detalles de cada tipo de diseño de taladros

Tipo de diseño	Diámetro (pulg)	Equipo de Perforación	Carga Explosiva	Espaciamiento (m)
Precorte	5	Rock Drill L8	No	1.8
Procedim.	7 7/8 – 9 7/8	IR DML	Si - Diseño especial	5-6
Producción	10 5/8	PV 271	Si - Carga normal	7-8

2.8.2 Voladura

Las voladuras están a cargo del área de Perforación & Voladura, tanto el diseño de mallas y cargas, así como para dirigir el procedimiento del disparo. La información de diseño es almacenada en los servidores de la compañía para su posterior revisión, corrección y/o mejora de los procesos de voladura. Además, se realiza un reporte diario, donde se detalla lo ocurrido en las voladuras del día, en cuanto a generación de humos, tiros cortados, demoras operativas y otros eventos fortuitos. Además para cada voladura se realizan las siguientes mediciones y registros por parte de personal del área de P&V:

- Filmación de disparo
- Fotografías del proyecto antes y después del disparo
- Medición de vibraciones
- Análisis de fragmentación
- Medición de velocidad de detonación en un taladro del proyecto

Actualmente, se realizan disparos cada día, usualmente a las 08:00 horas si las condiciones lo permiten, donde se aprovecha el cambio de guardia del personal de Operaciones-mina.

El reto principal del área de Perforación & Voladura, es obtener un material óptimamente fragmentado y además mantener un stock mínimo de material fragmentado para que los equipos de Carguío y Acarreo no se detengan.

2.8.2.1 Agentes de voladura (explosivos)

En Minera Yanacocha se utilizan agentes de voladura a granel, los cuales se emplean comúnmente en las operaciones de gran minería debido a su bajo costo, seguridad en el transporte y carguío, además de poseer un gran poder rompedor. Es así que debido al tipo de material, tipo de procesamiento posterior del mineral y las condiciones del medio ambiente donde se opera, se utiliza tanto ANFO como ANFO Pesado (mezcla de ANFO y emulsión).

A continuación se muestra una tabla la cual contiene los distintos tipos y mezclas de agentes que se utilizan actualmente en la operación, según las condiciones climáticas y posterior destino del material.

Tabla 2-3. Características de los agentes de voladura utilizados en la operación (EXSA Asistencia Técnica - Yanacocha, 2014)

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
ANFO	0	100	0.78 (± 0.01)	3800 - 4300	Nula
HA-37	30	70	1.05 (± 0.01)	4800 - 5000	Nula
HA-46	40	60	1.15 (± 0.01)	5000 - 5200	Baja
HA-55	50	50	1.27 (± 0.01)	5200 - 5400	Buena
HA-64	60	40	1.29 (± 0.01)	4500 - 4800	Excelente

Nota:

- Tipo de Emulsión: emulsión matriz para todas las mezclas de la tabla
- VOD: Los rangos de VOD son para taladros de 10 5/8" de diámetro
- HA = Heavy ANFO

2.8.2.2 Accesorios de voladura

Los accesorios tienen diversas funciones, tales como iniciar la columna explosiva, conectar taladros, retardos, etc. Los principales y sus respectivas aplicaciones están detallados en la siguiente tabla.

Tabla 2-4. Accesorios de Voladura y sus aplicaciones

Accesorio	Aplicación
Booster	Iniciador de la detonación en la columna explosiva
Detonador Electrónico	Iniciar el booster.
Nonel de fondo	Iniciar el booster en el caso falle el detonador electrónico y éste no active el booster.
Taponex	Artículo en forma de platillo que permite generar una cámara de aire en la columna para ahorrar explosivo.
Cono retenedor	Retiene el taco (detrito) impidiendo que la energía escape
Booster Lock	Fijar el Booster a una altura ideal (0.8-1.0 m de la base del taladro)

2.8.3 Carguío

Después de realizar la voladura y la disipación de los gases, se procede al carguío y acarreo de material. Para esto Yanacocha cuenta actualmente con una flota de equipos de carguío (Tabla 2-5), de los cuales destacan por su mayor tamaño las 04 palas hidráulicas Hitachi EX5500.

Los equipos de carguío cuentan con modernos sistemas de control y comunicación, tanto para su producción (dig-rate, consumo de combustible, precisión de minado, etc.) así como su ubicación. Tienen un sistema de posicionamiento global de alta precisión (HPGPS por sus siglas en inglés) que permite conocer sus ubicaciones exactas en la operación. Además, Yanacocha cuenta con el sistema de gestión de flotas Dispatch, el cual permite maximizar la producción y eficiencia de los equipos de carguío y acarreo.

Tabla 2-5. Flota equipos de Carguío para el minado de material

Flota de equipos	# Unidades	Capacidad cucharón (m ³)
Hitachi EX5500 Pala	4	29.0 – 30.6
Hitachi EX2500 Excavadora	4	17.0
Cat 994 Cargador sobre ruedas	1	14.0 – 36.0
Cat 992 Cargador sobre ruedas	2	10.7 – 12.3

2.8.4 Acarreo – Transporte

El material fragmentado es minado por las palas y cargadores y es transportado a los diferentes puntos de destino mediante camiones Caterpillar. Casi toda la flota de equipo de acarreo está compuesta por camiones Cat 793, con capacidad de 240 toneladas métricas, los cuales transportan el material a las pilas de lixiviación, depósitos de desmonte, Gold Mill o hacia stock piles.

Al igual que la flota de equipos de carguío y de perforación, los camiones cuentan con modernos sistemas de comunicación y ubicación, lo cual permite conocer su ubicación en tiempo real e información operativa como: Payload, consumo combustible, velocidad, KPI's, etc.

Además, todos los camiones tienen incorporado un sistema de navegación, el cual le permite al operador conocer la ruta a seguir según la asignación del Dispatch.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Explosivos

Los explosivos son sustancias o mezclas químicas, con la propiedad de cambiar a un estado más estable, mediante una reacción química exotérmica en un instante de tiempo, liberando toda la energía que contienen en forma de gases, sonido y calor de una manera violenta.

Parte de esta energía liberada es utilizada 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 productivo para la excavación en roca dura.

Existe una variedad de clasificaciones para los explosivos en base a sus distintas características o aplicaciones. Para esta investigación se presenta en el siguiente diagrama una clasificación de los explosivos de uso industrial, los cuales son aplicados en minería.

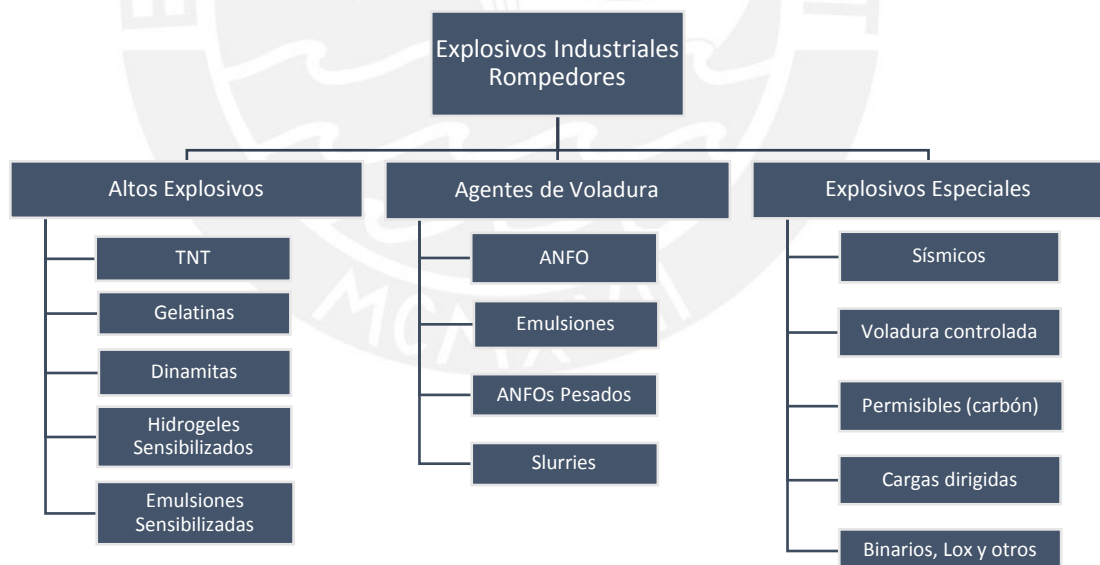


Figura 3-1. Clasificación general de los explosivos industriales (EXSA)

Debido al tema de la presente investigación, se describirá en detalle únicamente los agentes de voladura que están involucrados y son objeto de estudio, los cuales a su vez son más extensamente utilizados hoy en día en la minería a tajo abierto en todo el mundo.

3.2 Agentes de voladura

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

3.2.1 ANFO

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

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

Las propiedades explosivas del ANFO están ligadas a su densidad. A medida que ésta aumenta, también aumenta su velocidad de detonación. Sin embargo, este aumento de densidad dificulta su iniciación, volviéndose inerte a una densidad por encima de 1.20 gr/cc, no pudiendo detonar o solamente en el área inmediata al iniciador (López Jimeno, 2003). Por este motivo es imperante tener un nitrato de amonio grado explosivo (poroso) para tener la densidad ideal.

El diámetro de diseño de taladro también es un parámetro fundamental en la velocidad de detonación, lo cual se ve representado en el siguiente gráfico, teniendo una proporción directa.

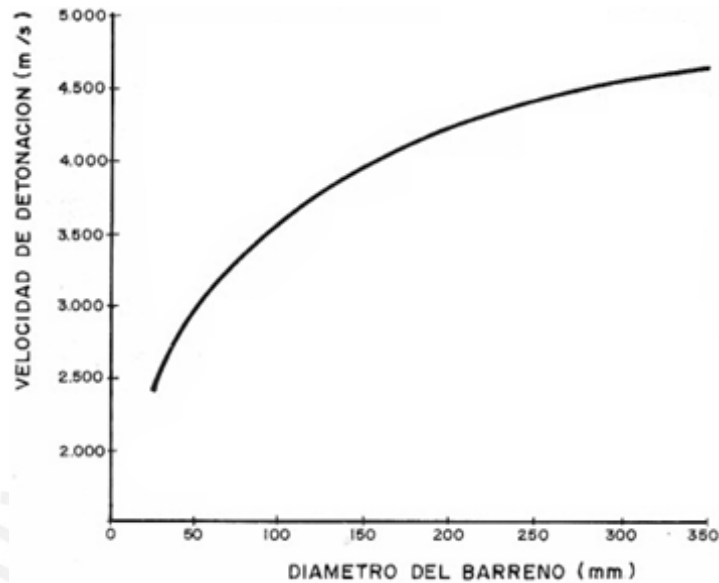


Figura 3-2. Influencia del diámetro del taladro en la velocidad de detonación (López Jimeno, 2003)

3.2.2 ANFO Aluminizado

Debido a que el ANFO tiene una baja densidad, también lo es su energía, velocidad de detonación, poder rompedor y demás características. Para elevar esta energía y poder aplicar el explosivo en rocas más competentes, se le puede agregar aluminio en forma de polvo o granalla, por lo general entre 5-10% en peso, obteniendo una mezcla llamada ANFO aluminizado, también conocido como ALANFO.

El aluminio es un combustible altamente energético que incrementa la liberación de energía, en forma de presión y temperatura de detonación. Hay una menor producción de gases debido a que la reacción del aluminio forma como productos óxidos sólidos. Sin embargo, hay una mayor presión y temperatura, aspectos críticos para la fragmentación de la roca (Ames & León, 2007). En el siguiente gráfico se aprecia el efecto de una carga de ANFO Aluminizado frente a una carga de únicamente ANFO, en base a la energía desarrollada.

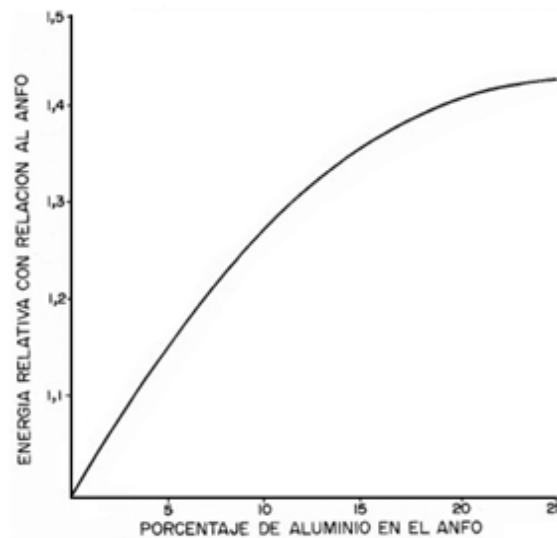


Figura 3-3. Efecto de la adición de aluminio sobre la energía (López Jimeno, 2003)

3.2.3 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. Según López Jimeno (2003), “el desarrollo de los explosivos ha llevado aparejado una reducción progresiva del tamaño de las partículas, pasando desde los sólidos a las soluciones salinas con sólidos y, por último, a las microgotas de una emulsión explosiva” (pág. 155). Esto se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 3-1. Dimensiones de los oxidantes en los explosivos y su efecto en la velocidad de detonación para un diámetro dado de taladro (Bampffield & Morrey, 1984)

Explosivo	Tamaño (mm)	Estado	VOD (km/s)
ANFO	2.0	Sólido	3.2
Dinamita	0.2	Sólido	4.0
Hidrogel	0.2	Sólido/Líquido	3.3
Emulsión	0.001	Líquido	5.0 - 6.0

La emulsión pura no es un agente de voladura, debido a que no es sensible ni siquiera al booster porque su densidad es muy alta. Para sensibilizarla, se puede utilizar 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 (López Jimeno, 2003). A la vez, se puede aplicar la sensibilización química a través de un agente gasificante.

3.2.4 ANFO Pesado

El ANFO Pesado es la mezcla de dos agentes explosivos, el ANFO y la emulsión en diferentes proporciones, donde la emulsión envuelve los prills de ANFO, formando una matriz energética con propiedades específicas, como se muestra en la siguiente figura.

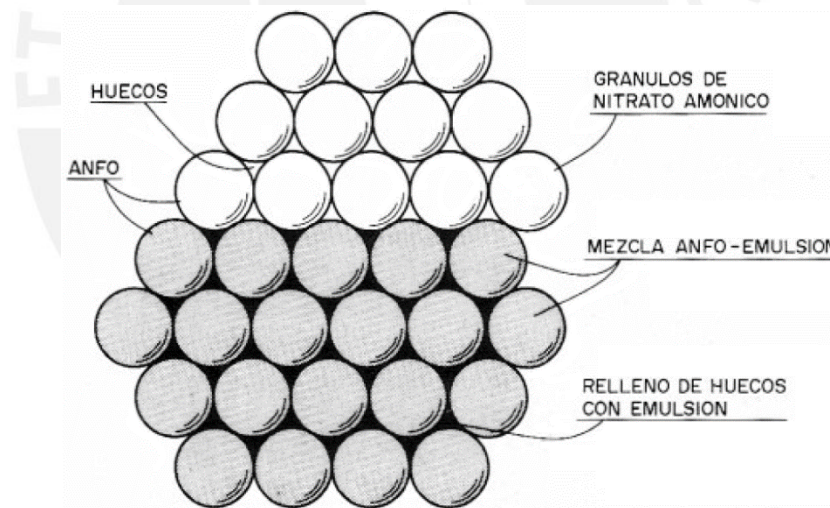


Figura 3-4. Estructura del ANFO Pesado (López Jimeno, 2003)

Existen diversas mezclas de ANFO Pesado, teniendo las principales en la siguiente tabla, incluyendo su capacidad de resistencia al agua, densidad, así como VOD.

Tabla 3-2. Características principales de diferentes mezclas de ANFO Pesado (EXSA - Asistencia Técnica Yanacocha, 2014)

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
HA-37	30	70	1.05 (± 0.01)	4800 - 5000	Nula
HA-46	40	60	1.15 (± 0.01)	5000 - 5200	Baja
HA-55	50	50	1.27 (± 0.01)	5200 - 5400	Buena
HA-64	60	40	1.29 (± 0.01)	4500 - 4800	Excelente

Nota:

- Tipo de Emulsión: emulsión matriz para todas las mezclas de la tabla
- VOD: Los rangos de VOD son para taladros de 10 5/8" de diámetro
- HA = Heavy ANFO

En la siguiente figura se muestra el efecto que tienen, en cuanto a Potencia Relativa en Volumen (ANFO = 100), diferentes mezclas de ANFO Pesado en función al porcentaje de emulsión. Se aprecia que se llega a un nivel (40% emulsión, densidad ~1.30 g/cc) en donde la potencia deja de aumentar e inclusive disminuye ligeramente. Esto ocurre debido a que a mayor porcentaje de emulsión, mayor es la separación entre partículas de ANFO, y son estos elementos quienes actúan como puntos calientes y propagadores de la onda de choque.

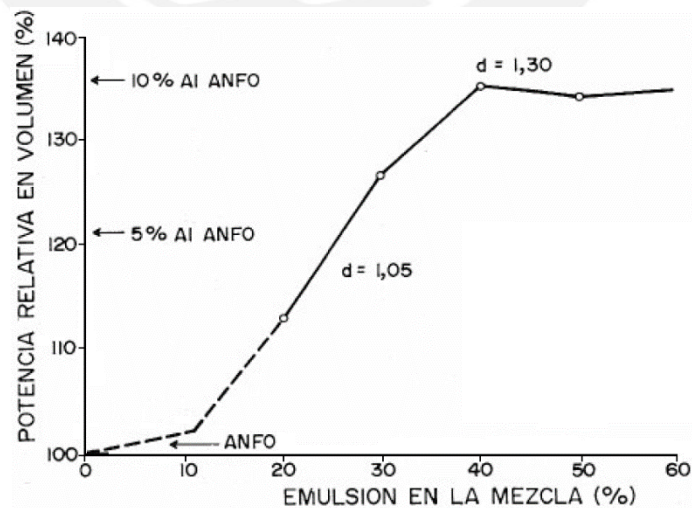


Figura 3-5. Variación de la potencia y densidad de un ANFO Pesado en base al porcentaje de emulsión (Bampfield & Morrey, 1984)

3.2.5 ANFO Pesado gasificado

El proceso de gasificación del ANFO Pesado consiste en formar pequeñas burbujas en la matriz, las cuales actúan en forma de hot spots. Ello permite variar su densidad y sus demás características, según la cantidad del agente gasificante que se dosifique.

Esta investigación se enfoca en un ANFO Pesado 73 gasificable (70% Emulsión, 30% ANFO), llevado a diferentes densidades con tal de conseguir (tanto en costos como fragmentación) resultados similares o mejores a los obtenidos con las mezclas explosivas utilizadas hasta la fecha: ANFOs Pesados a base de emulsión matriz.

A continuación, se muestra la gasificación que ocurre en un taladro cargado con ANFO Pesado 73 a base de 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.

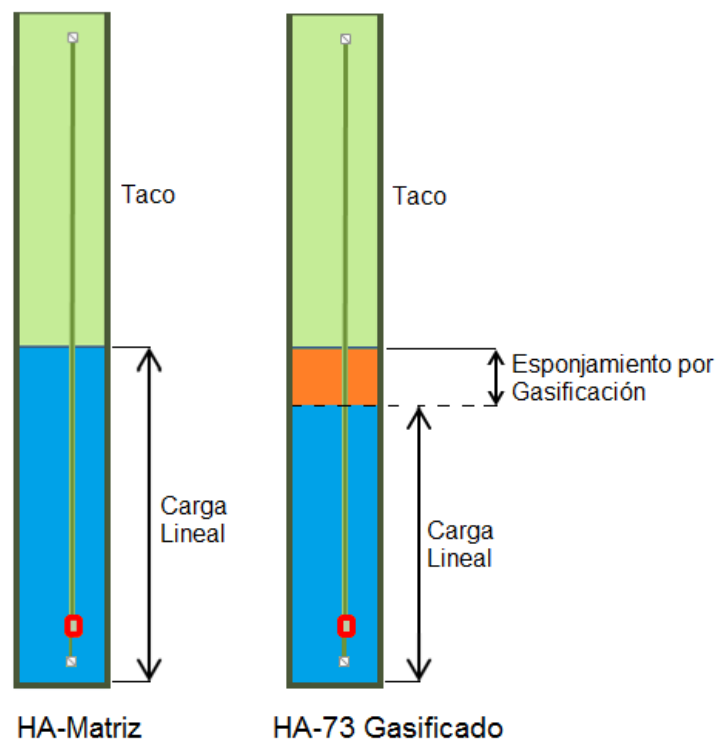


Figura 3-6. Diseño de carga de taladros con ANFO Pesado matriz y ANFO Pesado 73 gasificado

La emulsión que compone el ANFO Pesado gasificable es básicamente la emulsión matriz, con la adición de ciertos catalizadores que producen la gasificación. Estos le dan propiedades específicas, como alterando su pH, haciéndola una emulsión ácida.

3.2.5.1 Sensibilización de la emulsión

Este estudio se enfoca en la sensibilización de la mezcla mediante la generación de burbujas de aire por la adición de un agente gasificante, siendo en este caso el nitrito de sodio (NaNO_2). Esta sustancia química reacciona con el nitrato de amonio (NH_4NO_3), generando pequeñas burbujas de gas nitrógeno. A continuación se muestra la reacción química que ocurre.

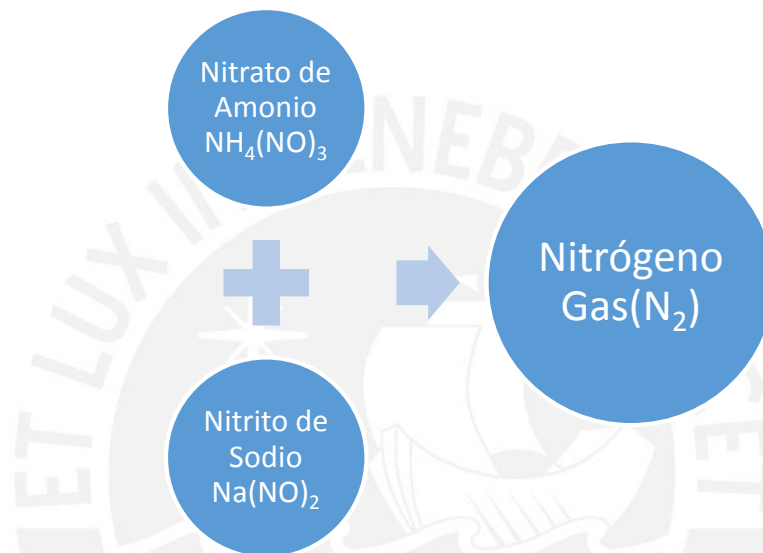
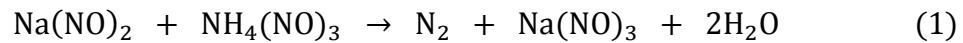


Figura 3-7. Sensibilización química por la generación de burbujas de nitrógeno

La reacción (1) se lleva a cabo de manera muy lenta y con la finalidad de acelerar el proceso de gasificación se agrega ácido acético, el cual se encarga de romper algunas microgotas de emulsión y liberar al nitrato de amonio en su interior para que reaccione con el nitrito de sodio. También es necesario agregar el catalizador tiourea, el cual se encarga de acelerar aún más el proceso de gasificación.

La adición del ácido acético le da un carácter ácido a la emulsión. Asimismo, la cantidad de adición, junto con la tiourea, se determina durante las pruebas del explosivo, debido a que son solamente catalizadores y no intervienen en la reacción de formación del gas nitrógeno.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de nitrito de sodio que es agregado a la mezcla de HA-73 gasificable para lograr la densidad final deseada, partiendo de una densidad inicial de 1.345 g/cc. Cabe indicar que el tiempo que dura el proceso de gasificación de un taladro es de 15-20 minutos, por lo que se tiene que esperar este tiempo antes de tapar el taladro.

Tabla 3-3. Flujo de Nitrito de Sodio para gasificar el ANFO Pesado 73 según el flujo de descarga de la mezcla explosiva (EXSA - Asistencia Técnica Yanacocha, 2014)

Densidad Final (g/cc)	Nitrito de Sodio (%)	Flujo de Explosivo (Kg/min)			
		350	300	250	200
1.20	0.22	0.770	0.660	0.550	0.440
1.15	0.29	0.998	0.855	0.713	0.570
1.10	0.37	1.295	1.110	0.925	0.740
1.05	0.45	1.575	1.350	1.125	0.900
1.00	0.52	1.820	1.560	1.300	1.040
0.95	0.60	2.100	1.800	1.500	1.200

3.2.5.2 *Fabricación del ANFO Pesado 73 gasificable*

El proceso de fabricación del ANFO Pesado 73 gasificable se muestra en el siguiente gráfico, donde se observa que la nitrificación ocurre en la etapa final de la mezcla, justo antes de descargar en el taladro.

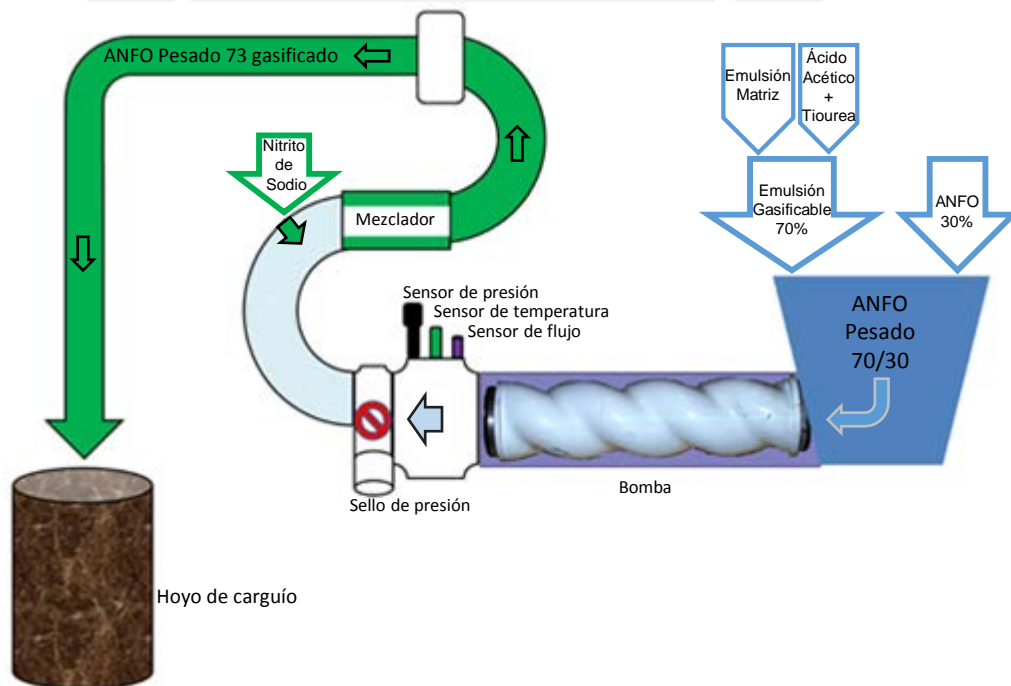


Figura 3-8. Proceso de gasificación del ANFO Pesado 73 (Modificado de Exsa – Asistencia Técnica Yanacocha, 2014)



Figura 3-9. Camión-fábrica descargando HA-73 gasificado

En la siguiente tabla se puede clasificar de manera cualitativa la calidad del proceso de fabricación in-situ, lo cual depende de la calibración de los equipos (camión-fábrica), capacidad del operador y la calidad de los componentes. Se muestran tres diferentes calidades de mezclas de HA-73; teniendo a la izquierda una mezcla deficiente donde se puede ver la separación de las fases inmiscibles, mientras que a la derecha se aprecia una mezcla homogénea en óptimas condiciones.

Tabla 3-4. Determinación cualitativa de calidad de mezcla de HA-73 gasificado (EXSA - Asistencia Técnica Yanacocha, 2014)

Calidad de Mezcla		
Deficiente	Regular	Óptima
		

3.3 Características de desempeño de los explosivos

Por objeto del presente estudio, las características que serán desarrolladas son aquellas que han podido ser medidas en la operación y afectan directamente la calidad de la fragmentación, lo que a su vez se relaciona con la productividad de los equipos de minado, los cuales no pueden ser afectados de manera negativa.

En este sentido, es importante mencionar que los agentes de voladura descritos previamente son fabricados y sensibilizados in-situ por medio de camiones fábrica, por lo que su calidad está ligada a la calibración de los equipos, calidad de componentes y capacidad del operador. Asimismo, los explosivos pueden ser afectados directamente por el medio ambiente que contiene los taladros, como flujos de agua, acidez del agua, fracturamiento de la roca, altas temperaturas, etc. En estos casos no se puede asumir al explosivo como puro con características uniformes debido a que su performance, sensibilidad y otras características propias pueden ser afectadas (Ames & León, 2007).

Ames & León (2007) describen el Poder Rompedor o Brisance como la capacidad para fracturar y el efecto destructivo ejercido sobre la roca, por resultado de la descomposición instantánea del explosivo. A su vez, considera que esto es proporcional a la densidad de carga y velocidad de detonación. Estos son los factores analizados en el presente estudio.

3.3.1 Velocidad de detonación (VOD)

López Jimeno (2003), describe la velocidad de detonación como: “la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía” (pág. 142). La liberación de energía mencionada, en forma de sonido, calor y gases en un instante de tiempo, es la que se aprovecha para la fragmentación de la roca.

El trabajo útil que puede brindar cada explosivo, también entendido como efecto triturador, está ligado a la onda de choque durante la detonación, y ésta a su vez a la densidad y velocidad de detonación. Por este motivo, se puede utilizar la velocidad de detonación para determinar la eficiencia de una reacción explosiva (Konya & Albarrán, 1998). De tener un valor menor a lo especificado, significa que el explosivo no está cumpliendo las especificaciones técnicas y por ende su performance está siendo afectado.

Debido a ello es se considera la velocidad de detonación un factor crítico que determinará el rendimiento de un explosivo y que a su vez posee un método de medición sencillo. Por otro lado, hay diversos factores que afectan la velocidad de detonación como la densidad de carga, diámetro, confinamiento, iniciación y tiempo de espera dentro del taladro (López Jimeno, 2003).

En la siguiente tabla de detalla valores aproximados de velocidad de detonación para diferentes agentes de voladura.

Tabla 3-5. Velocidades de detonación para diferentes agentes de voladura (Konya & Albarrán, 1998)

Agente de Voladura	VOD (m/s) para taladros de diámetro:		
	32 mm	76 mm	229 mm
Emulsión a Granel	4000 - 4600	4300 - 4900	3700 - 5800
ANFO Cargado Neumáticamente	2100 - 3000	3700 - 4300	4300 - 4600
ANFO Vaciado	1800 - 2100	3000 - 3400	4300 - 4600
ANFO Encartuchado	-	3000 - 3700	4300 - 4600
ANFO Pesado	-	-	3400 - 5800

3.3.2 Densidad

La densidad es un parámetro crítico en los explosivos, debido a que de éste dependen muchas importantes características como resistencia al agua, velocidad de detonación, poder rompedor, entre otras. Además, los explosivos se compran, almacenan y utilizan en base a su peso (Konya & Albarrán, 1998). Por tal motivo, la cantidad de explosivo que se diseña para cada taladro está basada en la densidad y por ende sus características para las cuales se diseñó dependen de la calidad del carguío.

La calidad para los agentes de voladura es un factor crítico debido a que si la densidad es muy baja, la columna explosiva se vuelve muy sensible y puede ser iniciada por el cordón detonante, antes de que el booster inicie la detonación desde el fondo del taladro. Por otro lado, si la densidad es muy alta, el agente de voladura pierde la sensibilidad al booster y no inicia (López Jimeno, 2003).

En la siguiente tabla se muestran algunas densidades referenciales para agentes de voladura, las cuales varían entre 0.8 y 1.6 gr/cc. Similarmente a la velocidad de detonación, a mayor densidad incrementa el poder rompedor del explosivo.

Tabla 3-6. Densidades para diferentes agentes de voladura (Konya & Albarrán, 1998)

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



4 MÉTODOS DE MEDICIÓN

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

- Velocidad de detonación (VOD)
- Densidad
- Fragmentación
- Dig-rate

Cada parámetro ha tenido un procedimiento de medición específico para que los ensayos sean representativos y fiables. A continuación se describe el proceso que se siguió para cada prueba, los equipos utilizados y otros recursos que se requirieron.

4.1 Velocidad de detonación

Se utilizó el equipo MicroTrap para medir la velocidad de detonación (VOD) en taladros. Este permite medir la VOD de un taladro por proyecto de voladura por el método de corto circuito. Es posible medir dos o más taladros, pero da la posibilidad de cortes y fallas en la medición.

El método 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 (Figura 4-2) 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 voltaje en comparación con el tiempo. El software convierte los datos registrados en un gráfico de distancia versus tiempo, como se muestra en la Figura 4-3. La gradiente de este gráfico es la velocidad de detonación.

En taladros con agua pese a que se hermetiza el corto circuito, mínimas filtraciones de agua dañan la medición y no es posible obtener la velocidad de detonación.

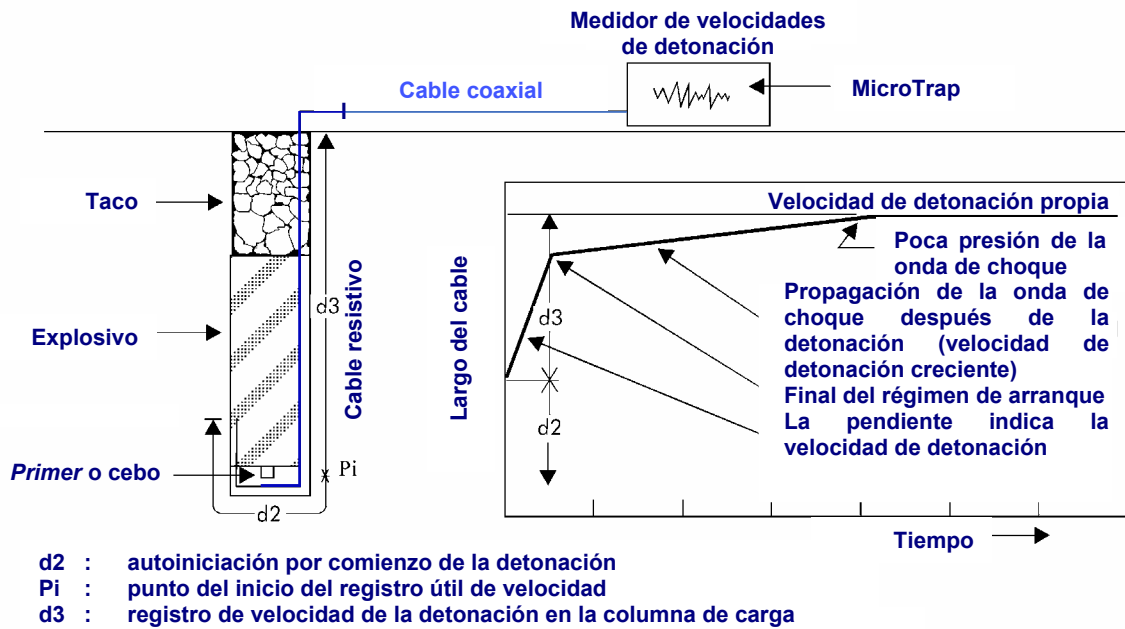


Figura 4-1. Método de medición de velocidad de detonación (Modificado de EXSA)

La figura 4-1 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 figura 4-2 se aprecia la unión del cable resistivo (color verde) al booster, el cual posteriormente se coloca en la base del taladro.



Figura 4-2. Instalación de cable resistivo (verde) junto al booster y tubo de choque

En el siguiente gráfico se muestra el resultado brindado por el MicroTrap de una prueba de medición de VOD.

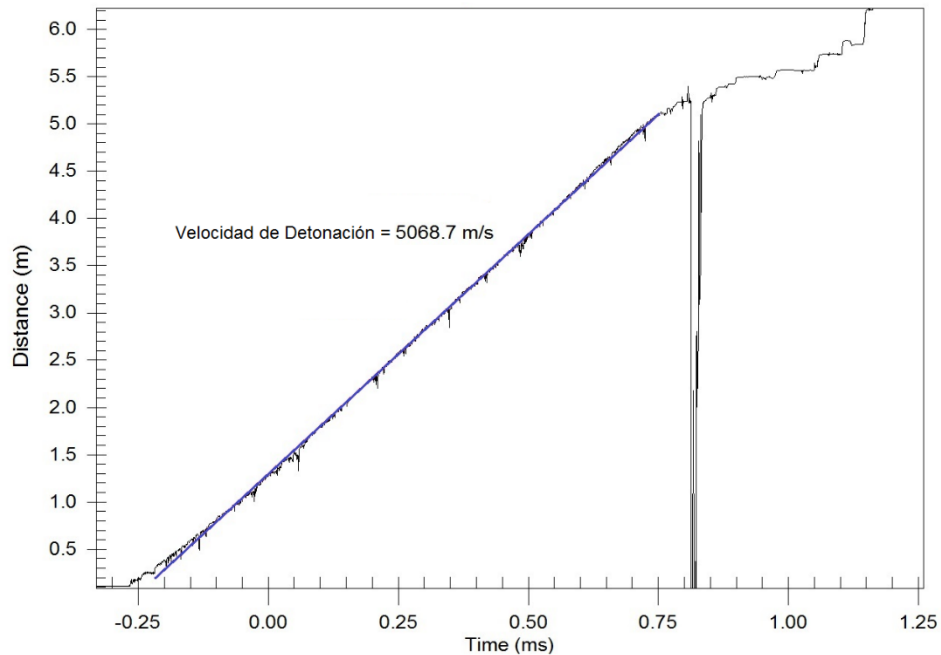


Figura 4-3. Resultados de una medición de VOD (P&V – Minera Yanacocha SRL)

4.2 Densidad

Esta propiedad se determinó midiendo la masa dentro de un volumen conocido. En el caso de un explosivo que no gasifica, su densidad es constante y basta con tomar una muestra durante la descarga al taladro.

Para el caso del ANFO Pesado gasificado, es importante medir la densidad inicial y la final (tras 20 minutos de esponjamiento). Primero, se toma una muestra en el vaso volumétrico directamente de la manga de descarga, rápidamente se limpia el material que quede fuera del depósito y se pesa. Se controla veinte minutos, se elimina el material que rebalsa el vaso volumétrico (producto de la gasificación) y se vuelve a pesar. Se recomienda medir la densidad cada 5 minutos para cuantificar el proceso de esponjamiento.

A continuación se presentan los materiales necesarios para realizar la medición, los cuales forman parte de un kit obligatorio que tiene que tener cada camión-fábrica:

- Balanza
- Vaso volumétrico de 1 litro
- Trapos y espátula para limpieza

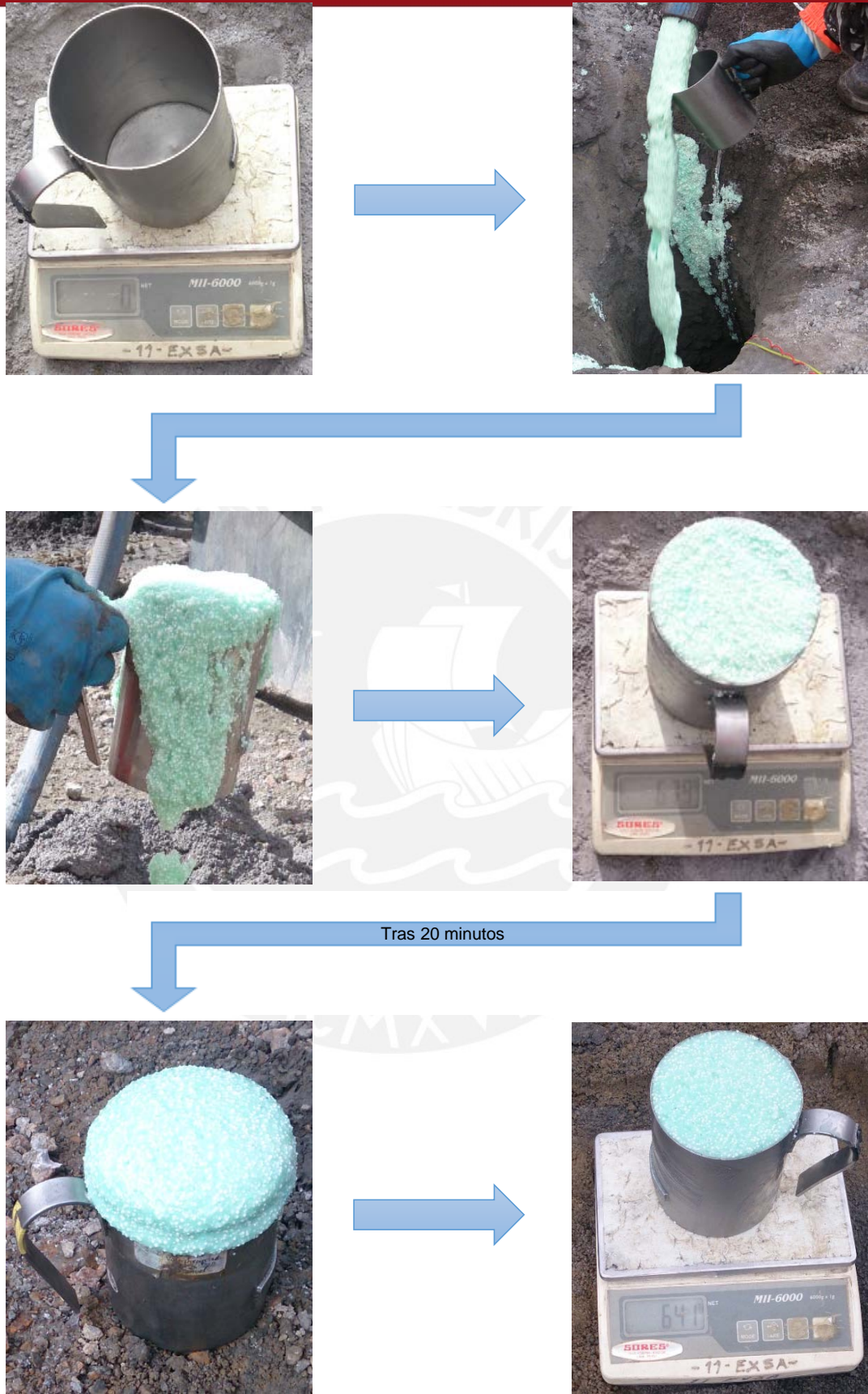


Figura 4-4. Proceso de medición de densidad en campo

4.3 Fragmentación

Se utilizó el software WipFrag, el cual en base a una fotografía del material y un punto de referencia dentro de la misma (Figura 4-5), es capaz de determinar la fragmentación, brindando el pasante 80 como se muestra en la Figura 4-6.

Por otro lado, es importante indicar que mediante este método no fue posible determinar la fragmentación de material fino, apelmazado y lodos. Este último particularmente debido a las constantes precipitaciones que se daban en la zona por ser temporada de lluvia. En esta situación se registraba la fragmentación de manera cualitativa y se le daba mayor relevancia al dig-rate (tasa de excavación).

Se decidió relacionar la calidad de la fragmentación con el dig-rate, debido a que este argumento es respaldado por la investigación realizada por Segarra, Sanchidrián, López & Querol (2010) donde se concluye que el dig-rate de los equipos de minado es un indicador representativo del performance de la voladura y la calidad de la fragmentación. Asimismo, indican que la forma de medición de dig-rate es sencilla ya sea manualmente o por información del Dispatch. Para este caso la información fue brindada por Dispatch.



Figura 4-5. Fotos para análisis de fragmentación (P&V – Minera Yanacocha SRL)

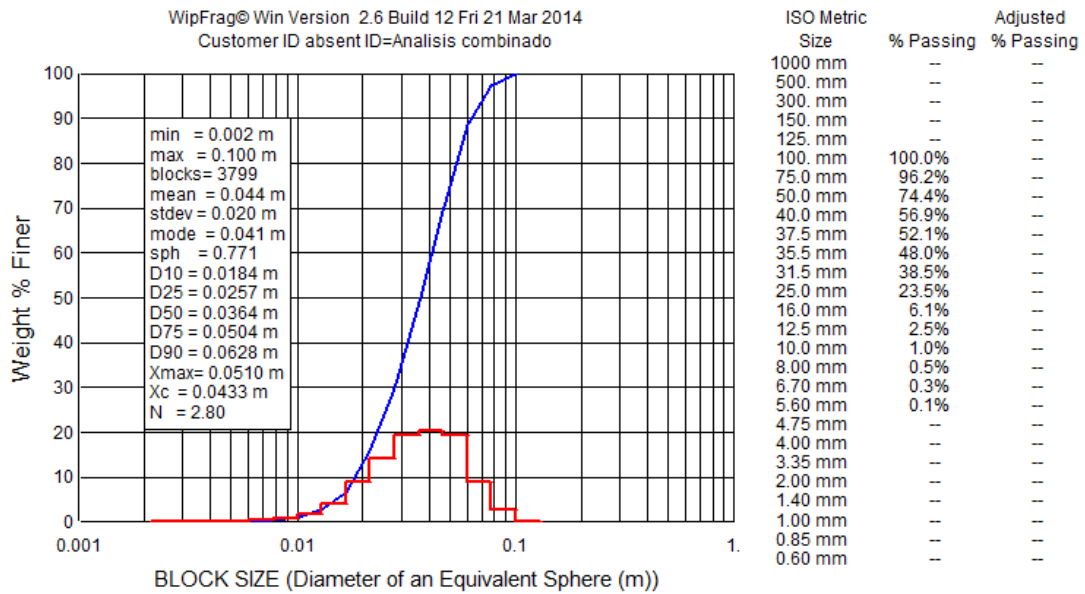


Figura 4-6. Resultados de análisis de fragmentación (P&V – Minera Yanacocha SRL)

4.4 Dig-rate

Para evaluar el dig-rate (tasa de excavación) de los equipos de carguío, se debe tener en cuenta que un factor influyente son los elementos externos al minado, como son: las condiciones climáticas, disponibilidad de equipos, calidad de material volado, condiciones de seguridad, entre otros.

En este sentido, comparar un dig-rate histórico, de un tipo de material y condición específica, no hubiera sido adecuado. Para caso del presente estudio se decidió evaluar la productividad de los equipos no con data histórica, sino con los dig-rates que alcanzaron los equipos durante el momento de las pruebas con ANFO Pesado a base de la nueva emulsión gasificable.

Para tener una data que posteriormente pueda ser comparable con los resultados del dig-rate de una voladura a base de HA-73 gasificado, se obtuvieron los dig-rates de polígonos adyacentes a los polígonos volados con el nuevo explosivo en etapa de prueba. Aparte de la cercanía de los proyectos de voladura, se consideró que ambos tengan el mismo diseño de malla (espaciamiento y burden), de carga y principalmente que sea el mismo material. Esto se logró gracias a que el software de la compañía permite cargar las mallas de perforación, los polígonos y los geosegmentos respectivos de cada banco, como se puede apreciar en la siguiente figura.

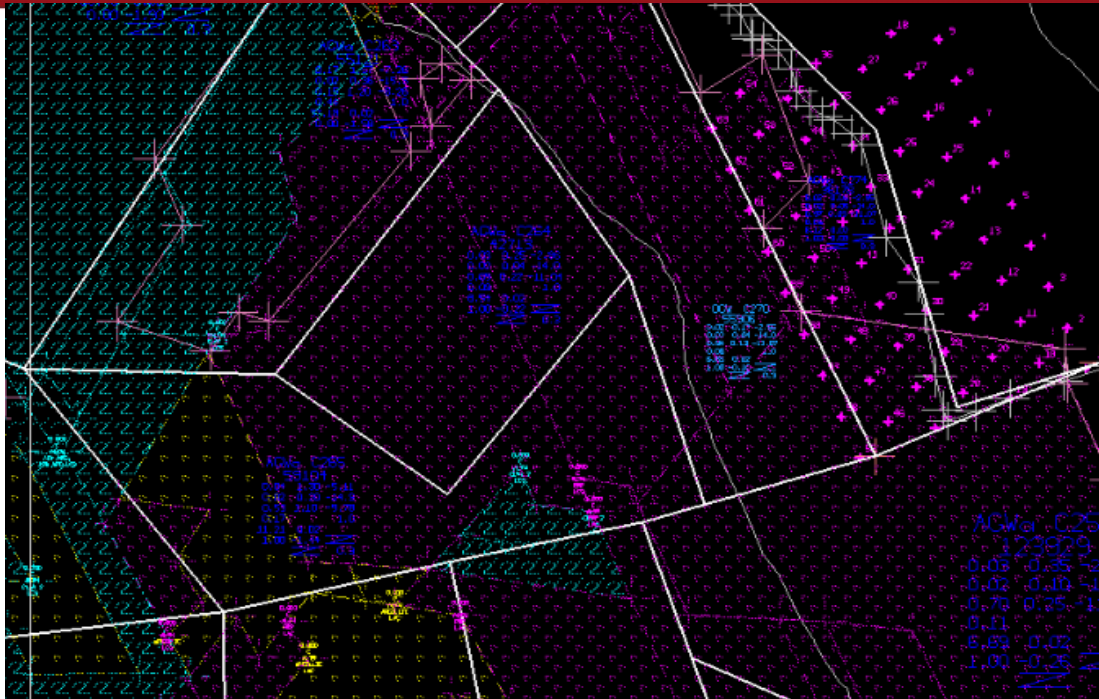


Figura 4-7. Banco donde se muestran los polígonos, mallas y geosegmentos (Minera Yanacocha SRL)

De esta forma, puede asumir que se están dando las mismas condiciones para el minado, tanto de proyectos detonados con HA a base de emulsión matriz, como aquellos cargados con HA a base de emulsión gasificable.

La información en cuanto a dig-rate fue solicitada al área de Operaciones-Mina, quienes brindaron data histórica la cual fue depurada y resumida para los polígonos cargados con los explosivos en estudio.

El dig-rate o tasa de excavación se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Dig rate} \left(\frac{tm}{h} \right) = \frac{\text{tonelaje nominal}}{\text{tiempo de carguío}}$$

Siendo el tonelaje nominal de los camiones 240 toneladas métricas y el tiempo de carguío aproximadamente 2.6 minutos, obtenemos el siguiente resultado:

$$\text{Dig rate} \left(\frac{tm}{h} \right) = \frac{240}{2.6/60} = 5538.5 \frac{tm}{h} \approx 5500 \frac{tm}{h}$$

Cabe mencionar que este valor depende directamente de la densidad y cohesión del material, calidad de la voladura, habilidad del operador, entre otros factores que afectan el dig-rate de los equipos.

5 RESULTADOS

Los resultados del performance de los explosivos se han dividido en dos secciones. Primero se tiene la línea base, que consistió en la recolección de información respecto a eventos pasados y actuales de ANFO Pesado a base de emulsión matriz en todas sus mezclas utilizadas en la operación (37, 46, 64). La segunda parte consistió en los resultados de las pruebas del nuevo producto: ANFO Pesado 73 gasificable.

5.1 Línea Base - ANFO Pesado a base de emulsión matriz

Utilizando la información histórica que tiene el área de Perforación & Voladura, principalmente del año 2013 (debido a que la empresa proveedora de explosivos en este año ingresó a la operación con sus productos), se tiene una fuente de datos con información relevante que será utilizada para elaborar la línea base, cuya medición se hizo aplicando los métodos descritos en la sección 4.

5.1.1 Densidad y velocidad de detonación

Debido a que los ANFOs Pesados a base de emulsión matriz no se gasifican, estos no varían de densidad, la cual es constante en todo momento. Por tal motivo no se indica si es final o inicial. Estos resultados se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Resultado de pruebas para ANFO Pesado a base de emulsión matriz de densidad y VOD para taladros con diámetro de 10 5/8”:

Tipo de Mezcla de HA matriz y # de Prueba	Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	
		Teórico	Real
HA-37 matriz			
Prueba 1	1.05		4980.7
Prueba 2	1.05		4860.7
Prueba 3	1.05	4800-5000	4726.1
Prueba 4	1.05		4847.8
Prueba 5	1.05		5028.9
HA-46 matriz			
Prueba 1	1.18		5100.2
Prueba 2	1.16	5000-5200	5166.0
Prueba 3	1.15		5140.5
HA-64 matriz			
Prueba 1	1.29		4688.7
Prueba 2	1.25	4500-4800	4858.9
Prueba 3	1.28		4549.0

5.1.2 Fragmentación

Durante el estudio, se pudo encontrar información histórica en cuanto a pruebas de densidad y de velocidad de detonación. Sin embargo, esta información no contenía su respectivo análisis de fragmentación, por lo que no es posible colocar la fragmentación para las voladuras detalladas en la Tabla 5-1.

Por este motivo se asume al dig-rate de los equipos de carguío como representante de la calidad de la fragmentación según el explosivo utilizado. Este argumento es respaldado por la investigación de Segarra, Sanchidrián, López & Querol (2010) en donde se concluye que la tasa de excavación es un útil indicador del performance de la voladura.

5.1.3 Dig-rate

Los resultados del dig-rate de los equipos de minado (cuyo método de medición se describe en la sección 4.4) se muestran en la siguiente Tabla 5-2. Estos mismos resultados serán comparados y analizados posteriormente en la sección 6.

Tabla 5-2. Resultados de dig-rate de polígonos detonados con ANFO Pesado a base de emulsión matriz

Mina	Equipo de Carguío	Dig-rate (tph)
Tapado Oeste	EX5500	5268.1
Tapado Oeste	EX5500	4501.6
Tapado Oeste	EX5500	5182.0
Tapado Oeste	EX5500	5182.0
Tapado Oeste	EX5500	5182.0
Tapado Oeste	EX2500	3055.9
Tapado Oeste	Ex2500	3084.1
Tapado Oeste	EX5500	5420.3
Yanacocha	LD992	2327.6

Nota. La información real en cuanto a dig-rate no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

En referencia a los equipos de carguío de la tabla, se cuenta con las palas Hitachi EX5500 y EX2500, así como un cargador frontal CAT 992.

5.2 Resultado de pruebas - ANFO Pesado 73 gasificado

Con la línea base establecida, se procedió a realizar las pruebas con la nueva emulsión gasificable para determinar sus cualidades y características como componente del ANFO Pesado 73 (HA-73 Gas).

Este nuevo agente explosivo se comparará con las mezclas de ANFO Pesado a base de emulsión matriz que se utilizan actualmente en la operación. Por lo tanto, se ha tenido que establecer un mecanismo de comparación de estas dos distintas emulsiones que son la base y diferencia principal entre los dos ANFOs Pesados a estudiar. Es así que la empresa proveedora de explosivos, mediante pruebas de laboratorio y en campo realizadas en Yanacocha, ha preparado la Tabla 5-3 acerca de las distintas densidades a las cuales se puede llevar el HA-73 gasificado. También

indica el equivalente de cada densidad final en ANFO Pesado a base de emulsión matriz. Estos equivalentes consisten en la similitud de velocidades de detonación.

Cabe recordar que la variación de la densidad final del ANFO Pesado 73 gasificable, depende de la cantidad del agente gasificante que es inyectado durante la descarga.

Tabla 5-3. Cuadro de densidades del HA-73 gasificado y sus similares en HA matriz (similitud en base a su VOD):

	Densidad (gr/cc) de HA-73 Gasificado en el tiempo		Su equivalente en HA matriz según VOD es:
	Inicial	Final (a 20 min.)	
HA-73	1.345	1.03	HA-37
HA-73	1.345	1.10	HA-46
HA-73	1.345	1.13	HA-55
HA-73	1.345	1.15	HA-64

Esta tabla describe las equivalencias en cuanto a velocidad de detonación comparando las diferentes densidades finales del HA-73 gasificado frente a los diferentes ANFOs pesados a base de emulsión matriz.

Se observa que el HA-73 gasificado con una densidad final de 1.03 gr/cc, es equivalente a un HA-37 (matriz) en términos de velocidad de detonación. Del mismo modo, un HA-73 gasificado con densidad final de 1.15 gr/cc es equivalente al HA-64 (matriz).

A continuación se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron con el ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable.

5.2.1 Densidad y velocidad de detonación

Los resultados obtenidos de las pruebas con ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable en cuanto a densidades y velocidades de detonación están detallados en las siguientes tablas (Tabla 5-4 y Tabla 5-5 respectivamente). Cada prueba de densidad corresponde al mismo taladro con el cual se hace la medición de velocidad de detonación.

Tabla 5-4. Resultado de pruebas de densidad para taladros cargados con HA-73 gasificado:

Equivalente en HA matriz y número de prueba	Densidad (gr/cc)	
	Inicial	Final
A similitud de un HA-37 matriz		
Prueba 1	1.35	0.98
Prueba 2	1.34	1.03
A similitud de un HA-46 matriz		
Prueba 1	1.35	1.11
Prueba 2	1.34	1.09
A similitud de un HA-55 matriz		
Prueba 1	1.35	1.13
Prueba 2	1.34	1.14
A similitud de un HA-64 matriz		
Prueba 1	1.35	1.14
Prueba 2	1.35	1.12

Nota. El nivel de gasificación varía según la cantidad de nitrato de sodio inyectado. A la vez, se deja gasificar la mezcla 20 minutos antes de tapar el taladro.

Tabla 5-5. Resultado de pruebas de velocidad de detonación para taladros con diámetro de 10 5/8" cargados con HA-73 gasificado:

Equivalente en HA matriz y número de prueba	VOD (m/s)	
	Teórico	Real
A similitud de un HA-37 matriz		
Prueba 1	4800-5000	5069.0
Prueba 2		5019.0
A similitud de un HA-46 matriz		
Prueba 1	5000-5200	5405.2
Prueba 2		5143.0
A similitud de un HA-55 matriz		
Prueba 1	5200-5400	5587.9
Prueba 2		5373.0
A similitud de un HA-64 matriz		
Prueba 1	4500-4800	4980.2
Prueba 2		4662.0

5.2.2 Fragmentación y dig-rate

Para estudiar la fragmentación y el dig-rate se analizaron proyectos de voladura (mallas completas o grandes porciones) cargados con el explosivo a probar, variando su densidad según los requerimientos del material (dureza, tipo, presencia de agua y grado de fragmentación deseado).

5.2.2.1 Fragmentación

Después de la voladura, se realizó el análisis de fragmentación, usando el software WipFrag el cual realiza un foto-análisis en base a un punto referencial.

Para medir la fragmentación del ANFO Pesado 73 gasificable, se realizaron cuatro pruebas de proyectos completos de voladura, cuya información general es detallada en la siguiente tabla.

Tabla 5-6. Datos generales de los proyectos de voladura realizados

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Dureza Material	Duro	Suave	Duro	Medio
Resistencia Compresión uniaxial (Mpa)	50-100	<25	50-100	25-50
# Taladros	104	161	65	218
Explosivo usado	HA-73 gasificado	HA-73 gasificado	HA-73 gasificado	HA-73 gasificado
Similar a	HA-46 matriz	HA-37 matriz	HA-46 matriz	HA-37 matriz
Gases nitrosos	0%	0%	0%	0.9% 2 Taladros

En la siguiente tabla se muestran los resultados de fragmentación de las pruebas mencionadas en la Tabla 5-6.

Tabla 5-7. Resultados de fragmentación

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
	HA-73	HA-73	HA-73	HA-73
Explosivo	gasificado	gasificado	gasificado	gasificado
Fragmentación P80 (pulg)	4.4	10	8.2	5.5
Fragmentación Cualitativa	Muy Buena	Buena	Buena	Muy Buena

5.2.2.2 Dig-rate

Como se detalló en la sección 4.4, el dig-rate se analizó de manera especial, probando los dos explosivos en estudio en polígonos contiguos. Es así que se han obtenido los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5-8, para los polígonos fragmentados con ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable.

Tabla 5-8. Resultados del dig-rate de polígonos detonados con ANFO Pesado 73 gasificado

Mina	Equipo de Carguío	Dig-rate (tph)
Tapado Oeste	EX5500	6092.7
Tapado Oeste	EX5500	4637.2
Tapado Oeste	EX5500	5509.6
Tapado Oeste	EX5500	4750.6
Tapado Oeste	EX5500	4993.6
Tapado Oeste	EX2500	3430.7
Tapado Oeste	EX2500	2715.8
Tapado Oeste	EX5500	5852.5
Yanacocha	LD992	2867.9

Nota. La información real en cuanto a dig-rate no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

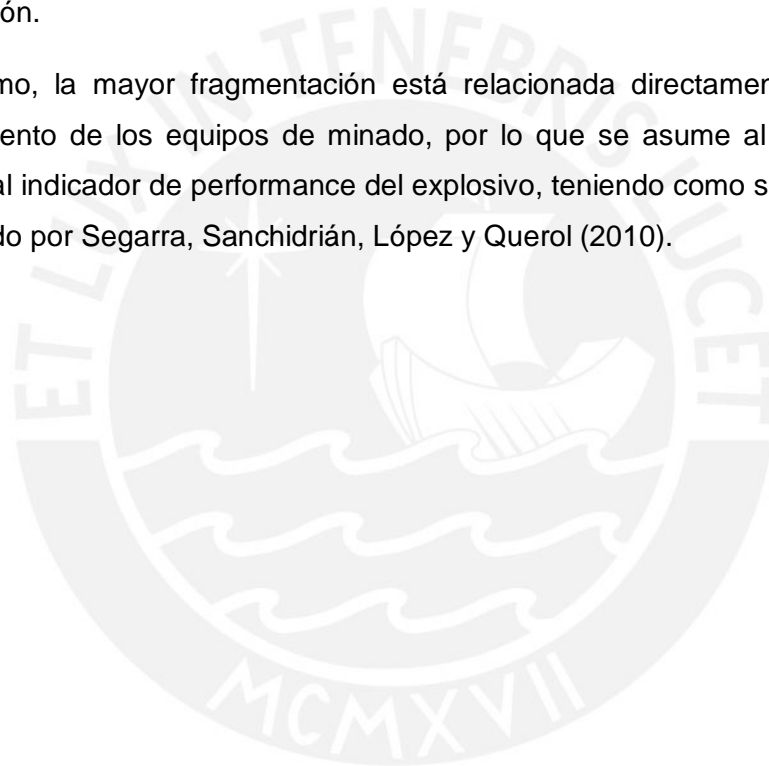
En referencia a los equipos de carguío de la tabla, se cuenta con las palas Hitachi EX5500 y EX2500, así como un cargador frontal CAT 992.

El dig-rate ideal de las palas EX5500 es 5500 toneladas por hora. Sin embargo no siempre se cumple por factores externos como clima, condiciones de suelo, apoyo

El dig-rate ideal de las palas EX5500 es 5500 toneladas por hora. Sin embargo no siempre se cumple por factores externos como clima, condiciones de suelo, apoyo auxiliar a la pala, calidad de voladura, etc. Pese a esto, se observa que en algunos casos la productividad de los equipos es mucho mayor al dig-rate ideal, lo que da buenos indicios del poder rompedor del HA-73 gasificado. Más adelante en la sección 6 se discutirá en detalle estos rendimientos.

Finalmente, es importante mencionar que para temas de esta investigación, el principal parámetro que definirá el rendimiento y finalmente la aceptación o no del nuevo producto es el dig-rate de los equipos de minado, cuya productividad no se puede ver afectada de manera negativa, debido al alto costo que representa su operación.

Asimismo, la mayor fragmentación está relacionada directamente con el mayor rendimiento de los equipos de minado, por lo que se asume al dig-rate como el principal indicador de performance del explosivo, teniendo como sustento el estudio realizado por Segarra, Sanchidrián, López y Querol (2010).



6 ANÁLISIS

En esta sección se discuten las diferencias y similitudes que se encontraron en el desempeño de los explosivos en evaluación. Se analizó la información recopilada en la línea base y en la etapa de pruebas donde se experimentó con el nuevo explosivo a base de emulsión gasificable. Los puntos centrales de comparación son: velocidad de detonación, densidad y dig-rate.

Es preciso indicar que todas las pruebas, incluyendo los resultados de la línea base, se realizaron con el mismo tipo de nitrato de amonio, principal componente del ANFO.

En la parte final de este capítulo, se ha hecho un análisis económico donde se compara el ANFO Pesado 73 gasificado llevado a diferentes densidades finales versus las diferentes mezclas de ANFO Pesado a base de emulsión matriz, según los costos de combustible, nitrato, emulsiones y dimensiones del taladro.

De esta manera se logra hacer un análisis integral, tanto del lado técnico y operativo como del económico, llegando a conclusiones importantes las cuales serán discutidas más adelante.

6.1 Velocidad de detonación y densidad

La velocidad de detonación está ligada a la densidad del explosivo, como se describió en el Marco Teórico. Asimismo, debido a que las pruebas de densidad corresponden al mismo taladro donde se midió la velocidad de detonación, se ha analizado estas dos características de manera conjunta. Estos resultados obtenidos en la línea base y las pruebas realizadas para el ANFO Pesado 73 gasificado, se muestran en los siguientes gráficos (Figura 6-1 a Figura 6-3).

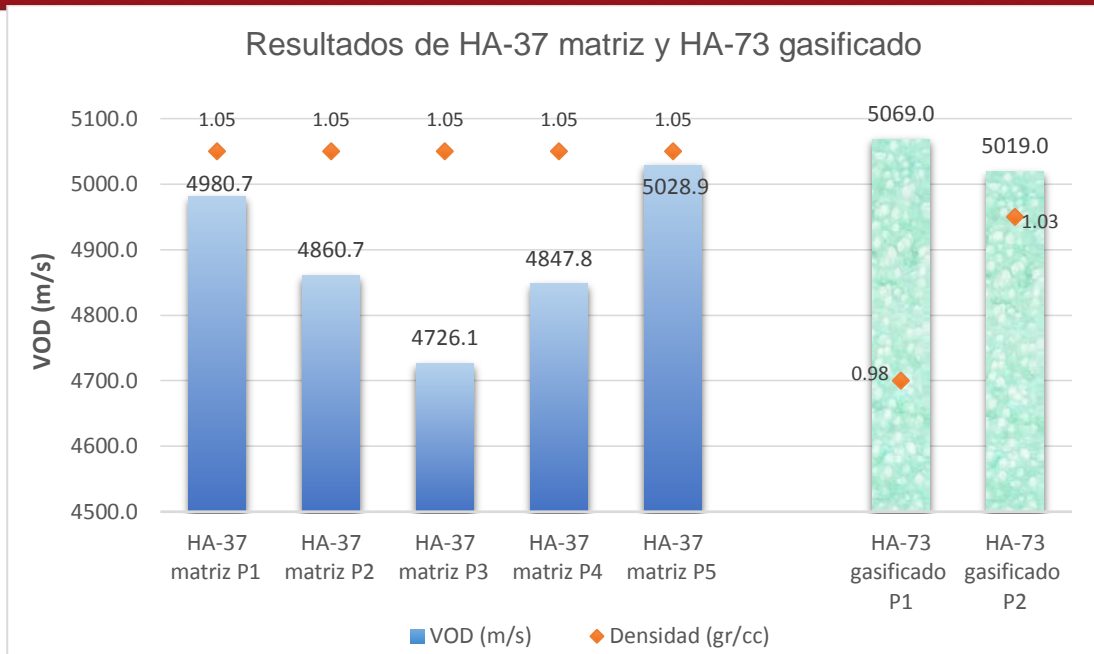


Figura 6-1. Pruebas de VOD y densidad para HA-37 y HA-73 Gasificado

A la izquierda de la Figura 6-1 se muestra los resultados para las pruebas del HA-37 matriz y la derecha las pruebas para el HA-73 gasificado. Se observa que el HA-73 gasificado ha tenido un buen desempeño en VOD, superando el rango teórico (4800-5000 m/s) e inclusive superando casi todas las pruebas del HA-37 matriz. Asimismo la densidad del HA-73 gasificado en las dos pruebas ha sido menor que en las pruebas del HA-37 matriz.

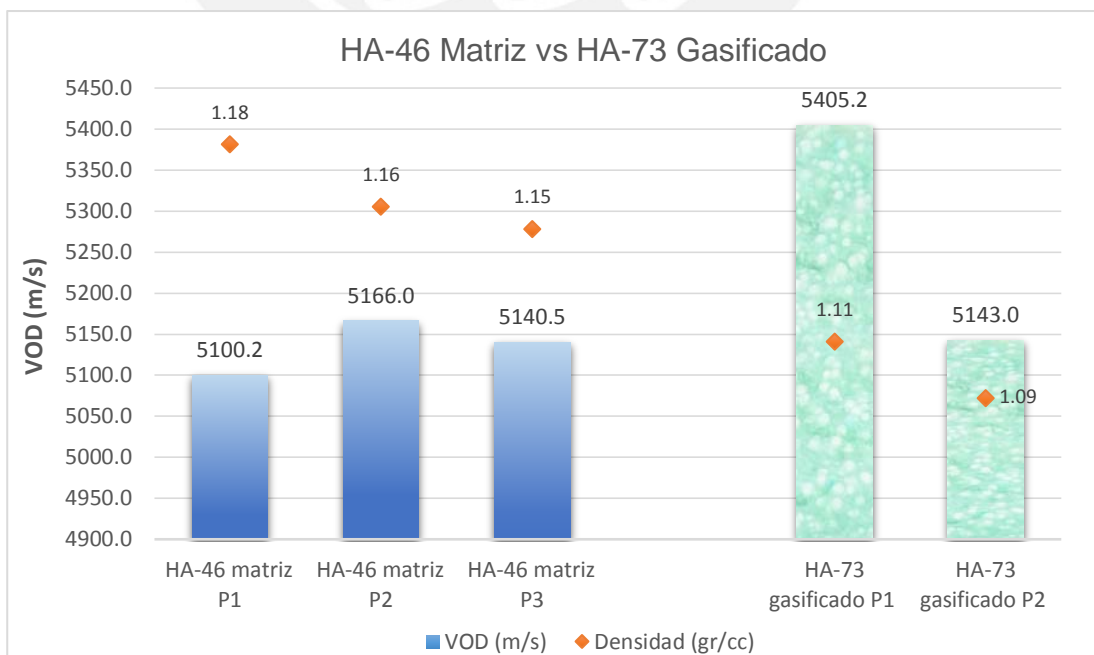


Figura 6-2. Pruebas de VOD y densidad para HA-46 y HA-73 Gasificado

En Figura 6-2 se muestra a la izquierda los resultados para las pruebas del HA-46 matriz y a la derecha para el HA-73 gasificado. Se observa un buen desempeño en cuanto a VOD para la primera prueba de HA-73 gasificado, así como un resultado moderado para la segunda, ambos dentro del rango teórico (5000-5200 m/s). En cuanto a las pruebas para el HA-46 matriz, se aprecia resultados de VOD también dentro del margen teórico, sin embargo la densidad es mayor para las tres pruebas, en comparación con el HA-73 gasificado cuyas densidades son menores.

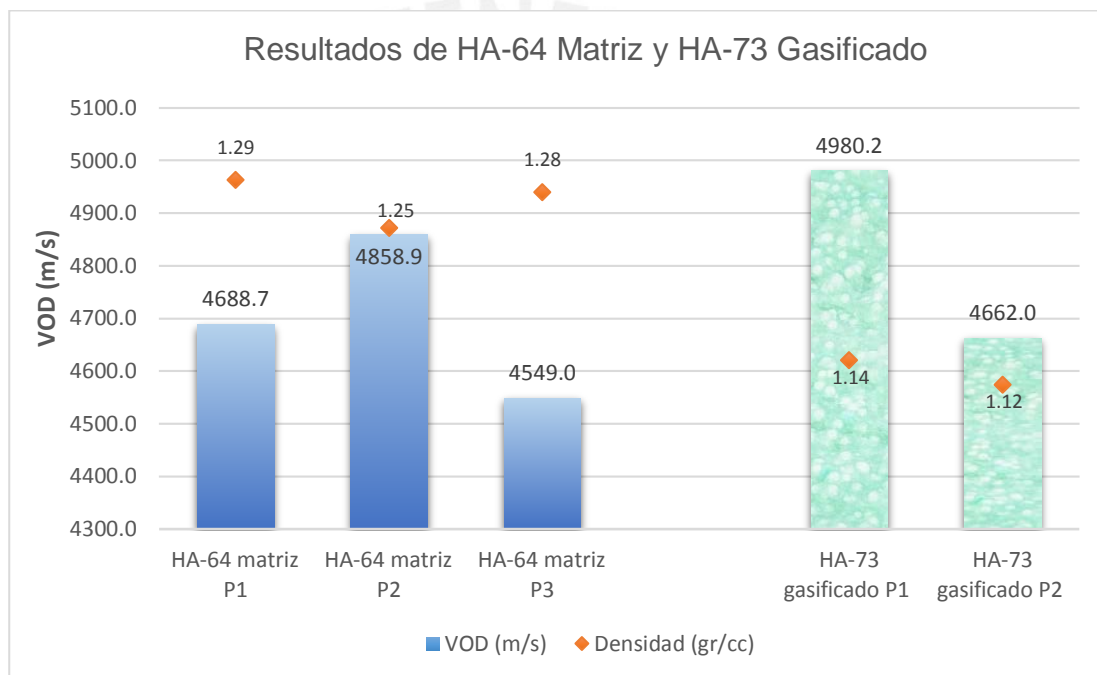


Figura 6-3. Pruebas de VOD y densidad para HA-64 y HA-73 Gasificado

En la Figura 6-3 se muestra a la derecha los resultados para las pruebas de HA-64 a base de emulsión matriz y a la izquierda para el HA-73 a base de emulsión gasificable. Se puede apreciar un buen desempeño para ambas mezclas en cuanto a velocidad de detonación, pues están dentro del rango teórico (4500-4800 m/s). Además, se puede observar que la densidad por las pruebas de HA-64 matriz son mayores a la densidad de las pruebas del HA-73 gasificado.

6.2 Dig-rate

Como se ha descrito previamente, el dig-rate se ha analizado de una manera específica con el objetivo de que las condiciones de minado sean las más similares posibles. Es así que en base a los geosegmentos y otros parámetros se ha ensayado con ambos explosivos por separado, en uno o más polígonos contiguos, obteniendo la siguiente tabla de dig-rate.

Tabla 6-1. Comparación del dig-rate en polígonos contiguos fragmentados con diferentes mezclas explosivas:

Mina	Dig-rates (tph)	
	HA matriz	HA-73 gasificado
Tapado Oeste	5268.1	6092.7
Tapado Oeste	4501.6	4637.2
Tapado Oeste	5182.0	5509.6
Tapado Oeste	5182.0	4750.6
Tapado Oeste	5182.0	4993.6
Tapado Oeste	3055.9	3430.7
Tapado Oeste	3084.1	2715.8
Tapado Oeste	5420.3	5852.5
Yanacocha	2327.6	2867.9

Nota. La información real en cuanto a dig-rate no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

La tabla no especifica el tipo de mezcla (37, 46 o 64) para el HA matriz o la densidad final para HA-73 gasificado en ninguna comparación de dig-rate. Esto debido a que ambos polígonos en comparación fueron del mismo material y tuvieron la misma condición operativa, por lo que se asume que la carga diseñada para su voladura es la misma (ver sección 4.4). Esto implica que si el material es duro y se requería un HA-64 matriz, el polígono contiguo se cargó con HA-73 gasificado llevado a una densidad similar del HA-64 matriz (densidad final de 1.15 g/cc para este caso).

La compañía se ha reservado el derecho de publicar los dig-rates reales por ser de carácter confidencial. Por este motivo se está presentando data que ha sido modificada de manera proporcional. Esto impide comparar los datos reales puesto que no son exactos. Sin embargo es posible compararlos a manera de porcentajes, debido a que la modificación proporcional no afecta la diferencia porcentual.

Por lo tanto, se presenta la siguiente Tabla 6-2 donde se muestra la diferencia porcentual en los valores de dig-rate de la Tabla 6-1, estableciendo como base el dig-rate de material fragmentado con ANFO Pesado a base de emulsión matriz. De esta manera se llega a representar el efecto que tuvo el uso de HA-73 gasificado en la productividad de los equipos de minado.

Tabla 6-2. Diferencia de dig-rate presentado en porcentajes:

Mina	Diferencia de dig-rate en porcentaje (%)
Tapado Oeste	15.7
Tapado Oeste	3.0
Tapado Oeste	6.3
Tapado Oeste	-8.3
Tapado Oeste	-3.6
Tapado Oeste	12.3
Tapado Oeste	-11.9
Tapado Oeste	8.0
Yanacocha	23.2

Los resultados de la tabla son presentados gráficamente a continuación.

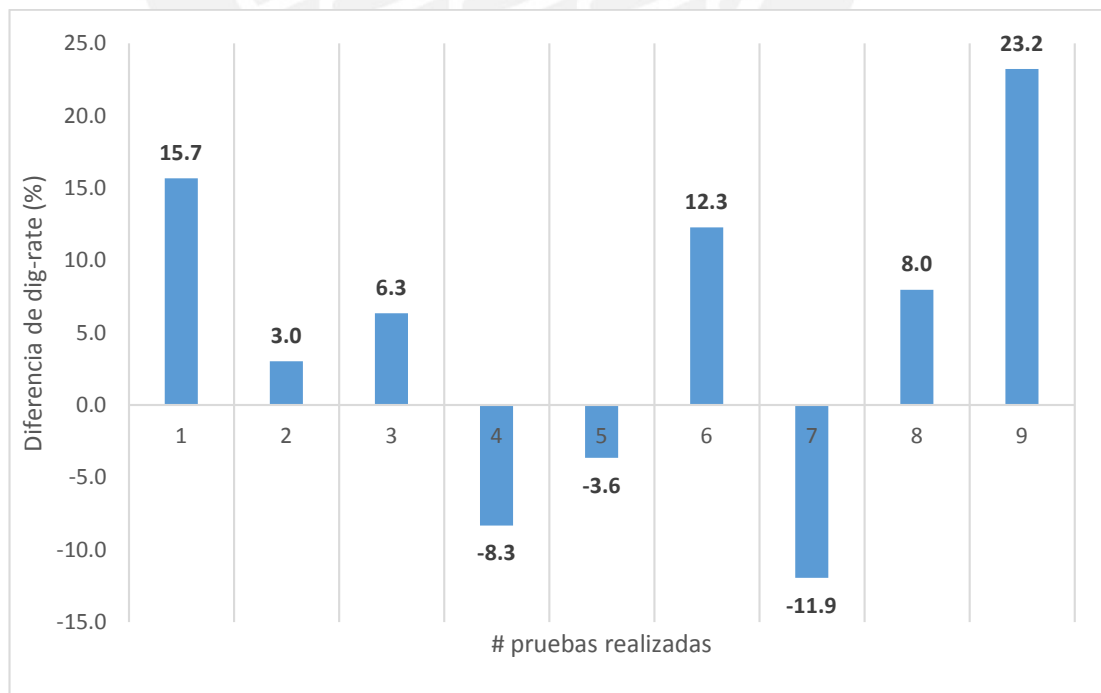


Figura 6-4. Diferencia de dig-rate en porcentaje

El gráfico muestra la diferencia (en porcentaje) del dig-rate que obtuvieron los equipos de carguío mientras minaban polígonos contiguos, pertenecientes al mismo geosegmento (lo que representa misma dureza, tipo de material, cohesión y otras características propias), pero que fueron detonados con diferentes explosivos. Uno fue con ANFO Pesado a base de emulsión matriz, mientras que el otro polígono con ANFO Pesado a base de emulsión gasificable. Se compararon nueve casos.

Para hacer la comparación en porcentaje se tomó como punto base la producción realizada por los equipos que minaron polígonos cargados con ANFO Pesado a base de emulsión matriz. La diferencia en porcentaje de dig-rate de los equipos que minaron material fragmentado con ANFO Pesado a base de emulsión gasificable es lo que se está mostrando en el gráfico.

Se puede apreciar que en la mayoría de los casos, el dig-rate de los equipos de minado ha sido superior, superando el 15% en dos ocasiones (caso 1 y 9). Esto representa que la utilización del ANFO Pesado a base de emulsión gasificable ha permitido el aumento de la tasa de excavación de los equipos, debido a la buena fragmentación del macizo rocoso.

Asimismo, ocurrieron tres eventos (4, 5 y 7) donde el dig-rate de los equipos que minaban polígonos detonados con ANFO Pesado gasificado fue menor a su par volado con ANFO Pesado matriz. Esto se puede atribuir a diversos factores, incluyendo los errores iniciales que se cometieron durante la implementación del nuevo producto, lo cual influyó en la calidad de los taladros cargados y su posterior desempeño al fragmentar la roca. Estos errores formaron parte de la experiencia adquirida durante la investigación y fueron motivo para proponer soluciones de tal modo que no ocurran nuevamente.

6.3 Análisis Económico

Tras realizar el análisis operativo y comparar las dos diferentes mezclas, a continuación se estudiará las ventajas económicas que puede brindar el nuevo producto a la operación. Este análisis se ha realizado asumiendo condiciones ideales, en base a los precios de las materias primas (diésel, nitrato de amonio), dimensiones del taladro, grado de esponjamiento de la mezcla, entre otros factores, para poder comparar ambos explosivos desde un punto de vista económico, lo cual será uno de los factores principales para tomar alguna decisión.

Minera Yanacocha se ha reservado el derecho de publicar la información por ser de carácter confidencial, debido a esto todos los datos reales en cuanto a costos se han modificado por un único factor, con tal de mantener una proporción y se represente el ahorro que verdaderamente se logró en el estudio.

En este análisis se ha podido determinar el costo por metro lineal, costo por taladro, costo por tonelada volada y factor de carga para cada explosivo.

En primer lugar, es importante indicar que un análisis económico basado en la cantidad de explosivo alojado dentro de un taladro depende directamente de sus dimensiones geométricas (altura y diámetro). Estas variables definen el volumen y por ende la cantidad de explosivo que puede contener. Por tal motivo, este aspecto fue considerado y se hizo un cálculo para cada tipo de taladro de cada mina.

Este cálculo se realizó en base al "Cook Book", documento perteneciente al área de Perforación & Voladura el cual contiene información acerca de la geometría de los taladros y sus respectivas cargas según el material a volar, permitiendo identificar las características para cada mina. Esto se verificó debido a que la altura y diámetro de taladros no son los mismos para todos los tajos de la operación. En la siguiente tabla se muestran los diferentes tajos y las dimensiones de sus taladros de producción, en base a las cuales se ha realizado el análisis económico:

Tabla 6-3. Dimensiones de taladros por minas

MINA	Dimensiones	
	Altura (m)	Diámetro (pulg)
Tapado Oeste	12	10 5/8
Yanacocha	10	10 5/8
Chaquicocha	10	10 5/8
Maqui Maqui	12	9 7/8
Cerro Negro	10	9 7/8

El análisis económico involucró la utilización de otros parámetros además de las características geométricas de cada taladro de cada mina, los cuales son agrupados en tres categorías: carga explosiva, costos y diseño de taladro.

Se analizaron los cinco escenarios detallados en la Tabla 6-3, de los cuales, uno de ellos es mostrado de manera integral en la Tabla 6-4, donde se comparan las diferentes mezclas de ANFO Pesado matriz versus el ANFO Pesado 73 gasificado llevado a diferentes densidades. Este análisis detallado se realizó para taladros del Tapado Oeste, el cual es el más representativo en términos de producción.

Tabla 6-4. Comparación económica entre HA-73 Gasificado llevado a diferentes densidades versus distintas mezclas de HA Matriz para taladros del Tapado Oeste

PARÁMETROS		Comparando con HA-37 Matriz		Comparando con HA-46 Matriz		Comparando con HA-55 Matriz		Comparando con HA-64 Matriz	
1. Carga Explosiva									
Tipo		HA-73 Gasif.	HA-37 Matriz	HA-73 Gasif.	HA-46 Matriz	HA-73 Gasif.	HA-55 Matriz	HA-73 Gasif.	HA-64 Matriz
Densidad Real	Inicial (g/cc)	1.345	1.00	1.345	1.15	1.345	1.27	1.345	1.29
	Final (g/cc)	1.03	1.00	1.10	1.15	1.13	1.27	1.15	1.29
Altura de carga (m)		6.0	6.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.0	6.0
Altura de carga sin esp(m)		4.6	6.0	5.7	7.0	5.9	7.0	5.1	6.0
Esponjamiento (m)		1.4	0.0	1.3	0.0	1.1	0.0	0.9	0.0
Factor de Carga		0.231	0.224	0.397	0.416	0.408	0.459	0.294	0.330
Cantidad Lineal Expl. (Kg/m)		58.95	57.24	62.96	65.82	64.68	72.69	65.82	73.83
Cantidad Explosivo (kg)		353.72	343.41	440.71	460.75	452.73	508.82	394.93	443.00
2. Costos*									
Costo/metro lineal (\$/m)		43.51	42.35	46.47	47.69	47.74	51.55	48.58	51.23
Diferencia de costo (\$/m)		-1.163		1.222		3.816		2.650	
Costo/taladro (\$/Tal)		261.08	254.11	325.30	333.86	334.17	360.88	291.50	307.40
Diferencia de costo (\$/Tal)		-6.976		8.557		26.712		15.898	
Costo por Tonelada (\$/TM)		0.171	0.166	0.293	0.301	0.301	0.325	0.217	0.229
Diferencia de costo/ton (\$/TM)		-0.005		0.008		0.024		0.012	
3. Diseño de Taladro									
Diámetro (pulg)		10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8
Altura taladro (m)		12.0	12.0	13.0	13.0	13.0	13.0	12.0	12.0
Taco (m)		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Sobreperforación (m)		0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
Burden (m)		7.5	7.5	6.0	6.0	6.0	6.0	7.0	7.0
Espaciamiento (m)		8.5	8.5	7.0	7.0	7.0	7.0	8.0	8.0
Densidad Roca (g/cc)		2.0	2.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	2.0
Altura de Banco (m)		12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Volumen a romper (BCM)		765	765	504	504	504	504	672	672
Tonelaje a romper (Tn/m3)		1530.0	1530.0	1108.8	1108.8	1108.8	1108.8	1344.0	1344.0

* La información real en cuanto a costos no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

El análisis realizado para el caso de los taladros pertenecientes al Tapado Oeste, descrito en la Tabla 6-4 brinda resultados interesantes en cuanto a costos, mostrados en el siguiente gráfico:

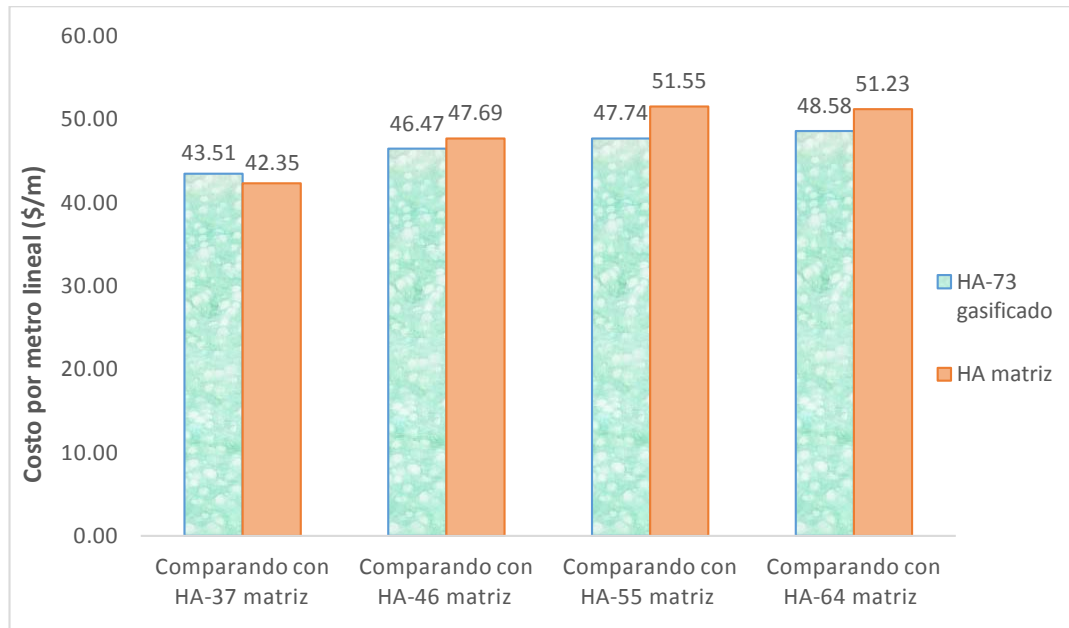


Figura 6-5. Costo por metro lineal (\$/m) para taladros del tajo Tapado Oeste

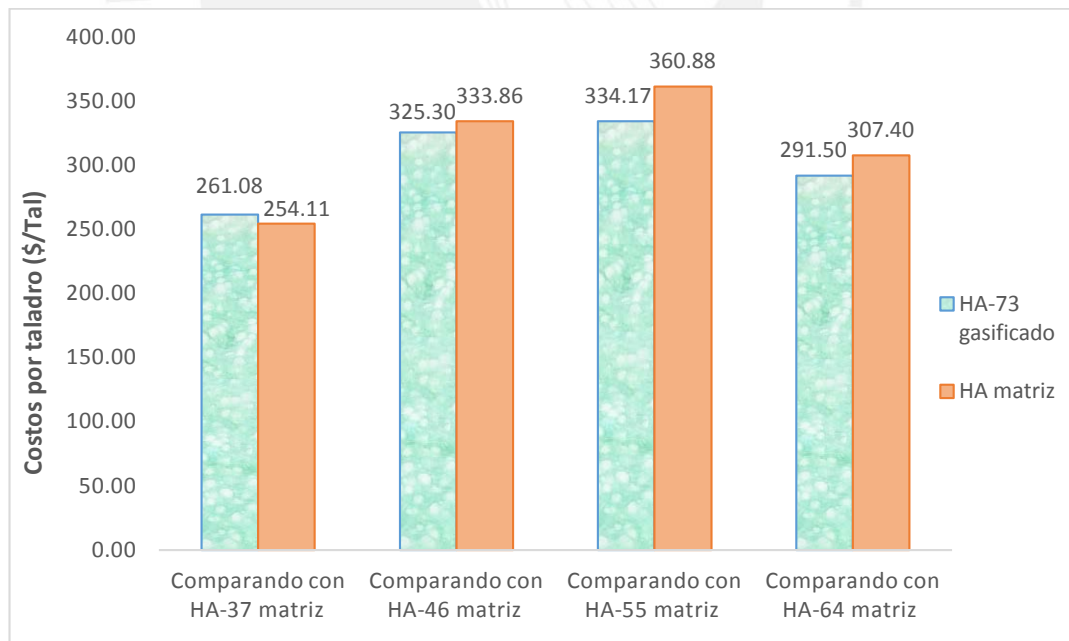


Figura 6-6. Costo por taladro (\$/tal) para el tajo Tapado Oeste

En las figuras 6-5 y 6-6, se observa que el HA-73 gasificado es más barato en costo por taladro y en costo por metro lineal en todos los casos, a excepción del HA-37 matriz, el cual resulta ser más económico.

El mismo análisis se realizó para los demás tajos, cuyo diseño de taladros es único para cada uno como se indica en la Tabla 6-3 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6-5. Ahorro determinado por taladro tras análisis económico para cada mina

Mina	Ahorro (\$) al comparar HA-73 gasificado con:			
	HA-37 matriz	HA-46 matriz	HA-55 matriz	HA-64 matriz
Tapado Oeste	-6.98	8.56	26.71	15.90
Yanacocha	-4.65	6.72	20.99	10.60
Chaquicocha	-4.65	6.72	20.99	10.60
Maqui Maqui	-6.03	7.39	23.07	13.73
Cerro Negro	-5.02	5.28	16.48	11.44

Nota. La información real en cuanto a costos no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

En la primera fila de la Tabla 6-5, se muestran los resultados obtenidos del análisis económico realizado para el tajo el Tapado Oeste (Tabla 6-4). De esta misma manera se procedió a analizar los cuatro escenarios restantes, para los tajos Yanacocha, Chaquicocha, Maqui Maqui y Cerro Negro respectivamente, cuyos resultados son mostrados en las posteriores filas de la tabla.

Como se puede apreciar en la Tabla 6-5, el HA-37 matriz es más económico que el HA-73 gasificado puesto que el ahorro muestra un valor negativo. Sin embargo, para los demás casos se observa un ahorro para cada mezcla, siendo el principal en el caso del reemplazo de HA-55 matriz por HA-73 gasificado. En base a estos resultados, Minera Yanacocha decidió reemplazar el HA-46 matriz y el HA-64 matriz, para material duro y para taladros con agua respectivamente, por el HA-73 gasificado.

Pese a que hay un mayor ahorro en el reemplazo del HA-55 matriz, el material en todo el complejo minero no requiere un explosivo tan energético y su uso se ha prescindido, por lo que se ha venido utilizando únicamente el HA-46 matriz para material duro o muy duro.

Finalmente se muestra la Tabla 6-6 la cual resume las dos mezclas que se ha decidido reemplazar por el nuevo ANFO Pesado a base de emulsión gasificable, indicando el ahorro que implica para cada tajo.

Tabla 6-6. Ahorro por taladro para las dos mezclas a ser reemplazadas

MINA	Ahorro en el costo de explosivo por taladro (\$/Tal)	
	reemplazando HA-46 matriz	reemplazando HA-64 matriz
Tapado Oeste	8.56	15.90
Yanacocha	6.72	10.60
Chaquicocha	6.72	10.60
Maqui Maqui	-	13.73
Cerro Negro	-	11.44

Nota. La información real en cuanto a costos no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.



7 IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL

En el presente capítulo se analizará el impacto económico que tendrá la implementación de la emulsión gasificable en la operación, gestión de los Stakeholders y los controles necesarios para una correcta operación y manipulación del nuevo producto.

Es preciso recalcar que los cálculos mostrados a continuación han sido modificados de manera proporcional, debido a que la compañía se reserva el derecho de publicar la información por ser de carácter confidencial.

7.1 Impacto económico de mejoras

7.1.1 Análisis costo beneficio

En base al análisis discutido en el capítulo 6, se llega a las siguientes conclusiones costo-beneficio, donde se decide cual explosivo debe ser utilizado según sus ventajas y desventajas que presentaron durante el estudio.

- No es viable el reemplazo del ANFO Pesado 37 a base de emulsión matriz, debido a que tiene las siguientes ventajas:
 - Es más económico que el ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable (llevado a una densidad similar de un HA-37 matriz). Aproximadamente 7 dólares/taladro más barato para taladros del Tapado Oeste.
 - No genera humos nitrosos en condiciones estándar (taladros secos y equipos calibrados).

- Es viable el reemplazo de las mezclas de ANFO Pesado 46 y 64 a base de emulsión matriz por el ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable llevado a sus densidades similares, debido a las siguientes ventajas:
 - Se reduce sustancialmente la generación de humos nitrosos, inclusive en presencia de agua, siendo esta característica muy importante en términos de seguridad, medio ambiente y productividad.

- La mayor proporción de emulsión (70%) brinda mayor resistencia a flujos de agua dinámica que dañan físicamente el explosivo. Esta característica le permite permanecer hasta 72 horas en el taladro confinado.
 - Es más económico. En el reemplazo del HA-46 matriz hay un ahorro de \$6.7 a \$8.6 por taladro; y en el reemplazo del HA-64 matriz hay un ahorro de \$10.6 a \$15.9 por taladro.
 - Se observa un aumento en el dig-rate de los equipos de minado, en seis de los nueve casos estudiados.
- El reemplazo generará un ahorro importante al área de Perforación y Voladura, específicamente en las cargas diseñadas para material duro y aquellas diseñadas para la presencia de agua.

7.1.2 Proyección de ahorro

En base al análisis Costo-Beneficio y a las decisiones tomadas por los líderes del área, se ha hecho una proyección de ahorro para las dos mezclas que serán reemplazadas debido a que generan un beneficio económico (ANFO Pesado 46 y 64 a base de emulsión matriz).

Esta proyección se hizo en base a dos documentos del área de Perforación & Voladura, el "Forecast" y el "Cook Book". El primero brinda una proyección acerca de la cantidad, ubicación y presencia o ausencia de agua en taladros de cada mina al futuro; mientras que el segundo brinda las dimensiones de diseño y tipo de carga explosiva a utilizar para cada taladro en la mina respectiva. De esta manera se pudo identificar aquellos taladros en todos los tajos de la operación a ser cargados con ANFO Pesado 46 y 64 a base de emulsión matriz para el año 2014. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7-1. Número de taladros por mina para cada tipo de material, proyectados de abril a diciembre del 2014

MINA	Número de taladros (Unidades)	
	Para material duro	Presencia de agua
Tapado Oeste	6 554	10 275
Yanacocha	1 705	1 065
Chaquicocha	1 020	543
Maqui Maqui	-	3 891
Cerro Negro	-	1 800

Como se mencionó y analizó en la sección 6.3 del Análisis Económico, el costo y respectivo ahorro está ligado directamente con las dimensiones de los taladros. Por ese motivo se utiliza la tabla de la sección en mención (Tabla 6-6) para proyectar el ahorro.

A continuación se proyecta el ahorro de abril a diciembre del 2014.

Tabla 7-2. Ahorro por el reemplazo de HA-46 y HA-64 matriz por el HA-73 gasificado, de abril a diciembre del 2014 en todas las minas

MINA	Ahorro (\$) por el reemplazo de:		
	HA-46 matriz	HA-64 matriz	SUB TOTAL
Tapado Oeste	56 102.2	163 372.5	219 474.7
Yanacocha	11 457.6	11 289.0	22 746.6
Chaquicocha	6 854.4	5 755.8	12 610.2
Maqui Maqui	-	53 423.4	53 423.4
Cerro Negro	-	20 592.0	20 592.0
SUB TOTAL	74 414.4	254 432.7	328 847.0
		TOTAL	≈ 330 000 USD

Nota. La información real en cuanto a costos no es mostrada por motivos de confidencialidad de Minera Yanacocha SRL.

Estos datos son presentados de manera gráfica a continuación.

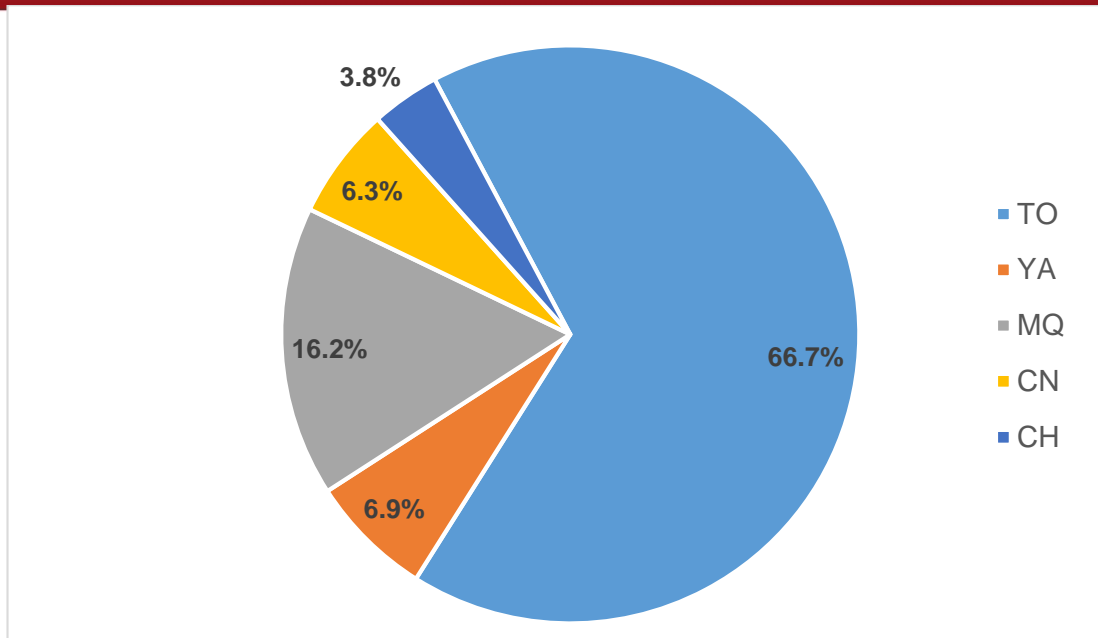


Figura 7-1. Distribución del ahorro total en porcentaje por cada mina del Complejo Yanacocha

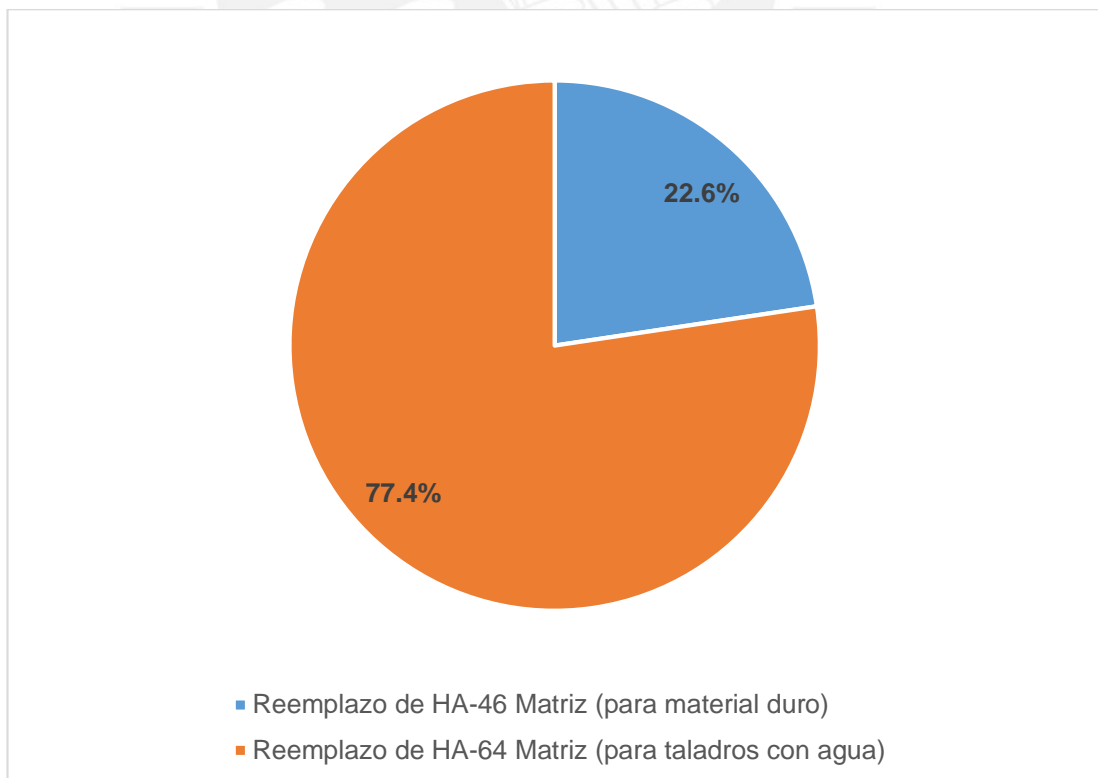


Figura 7-2. Distribución del ahorro total en porcentaje según el tipo de explosivo a ser reemplazado

La información de tablas 7-1 y 6-6 se resume en la siguiente tabla, para calcular el promedio ponderado del ahorro por taladro. Como se ha mencionado previamente, se reemplazará HA-46 matriz el cual se utiliza en material duro, así como el HA-64 que se aplica en taladros con presencia de agua.

Tabla 7-3. Resumen de taladros y cargas a reemplazar

MINA	Ahorro en el costo de explosivo por taladro (\$/Tal)		Número de taladros (Unidades)	
	reemplazando HA-46 matriz	reemplazando HA-64 matriz	Para material duro	Presencia de agua
Tapado Oeste	8.56	15.90	6 554	10 275
Yanacocha	6.72	10.60	1 705	1 065
Chaquicocha	6.72	10.60	1 020	543
Maqui Maqui	-	13.73	-	3 891
Cerro Negro	-	11.44	-	1 800
Total			9279	17574

Promedio de ahorro ponderado por taladro:

- Para el reemplazado de HA-46 matriz (material duro):

$$= \frac{8.56 \times 6554 + 6.72 \times 1705 + 6.72 \times 1020}{9279} = 8.02 \approx \mathbf{\$8.0 / taladro}$$

- Para el reemplazado de HA-64 matriz (presencia de agua):

$$= \frac{15.90 \times 10275 + 10.60 \times 1065 + 10.60 \times 543 + 13.73 \times 3891 + 11.44 \times 1800}{17574} = \mathbf{\$14.5 / taladro}$$

7.2 Gestión de Stakeholders

Para obtener todos los beneficios del nuevo producto, se tiene que realizar un trabajo conjunto en el área de Perforación & Voladura, debido que al ser algo novedoso no todos los involucrados están familiarizados con el producto y sus puntos críticos. Es así que se detalla en la Tabla 7-4 el plan de manejo y supervisión de los Stakeholders.

Tabla 7-4. Plan de manejo de Stakeholders

Stakeholder	Objetivo	Acciones a realizar
Operador Camión Fábrica	Comprometerlo en la importancia de su rol para el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Involucrar en el proyecto – Hacerlo sentir importante – Realizar capacitaciones y feedback – Mantener informado
Diseño y Supervisión P&V	Comprometer al área e involucrarlos en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Hacer el seguimiento a todo el proyecto – Dar feedback a los supervisores de campo – Hacer los ajustes necesarios en los procedimientos de carguío de taladros
Supervisor Campo Explosivos - MY	Comprometer a sus colaboradores en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Verificar el correcto carguío de taladros, pruebas en campo de densidad y tiempo de esponjamiento antes de tapar taladros – Notificar puntos a mejorar al supervisor de P&V
Residente - Contratista	Comprometer a sus colaboradores en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Cumplir las recomendaciones de los supervisores de MY – Comunicación constante – Programar reuniones semanales – Dar feedback a sus colaboradores
Asistencia Técnica - Contratista	Involucrarlos en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Brindar el soporte para medir los parámetros de desempeño del nuevo producto – Aportar sugerencias para mejorar los procedimientos
Supervisor de Campo Explosivos - Contratista	Comprometer a sus colaboradores en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Involucrar en el proyecto – Comunicación constante con supervisor de campo de MY – Hacerle saber los beneficios del nuevo producto – Incentivar por la obtención de buenos resultados de su equipo (guardia)
Personal Carguío de Taladros	Comprometerlos en el éxito del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> – Capacitación. – Incentivar por la obtención de buenos resultados

7.3 Control

Tras haber decidido implementar la utilización del nuevo producto para el reemplazo de dos mezclas de ANFO Pesado a base de emulsión matriz, se proponen medidas de control para que los beneficios sean sostenibles en el tiempo y permitan una mejora continua.

Estas medidas se basan en observaciones que se dieron durante la etapa de pruebas en campo. Básicamente, se enfocan al manejo adecuado de puntos críticos que tiene el nuevo explosivo, así como aspectos de supervisión importantes que no pueden ser descuidados.

Es así que se proponen dos planes de control a llevar a cabo durante la implementación y el posterior uso del nuevo producto gasificable; uno enfocado en el proceso de fabricación (carguío de taladros con explosivo) y otro enfocado en el producto (roca fragmentada).

7.3.1 Aseguramiento de la calidad

Son las actividades enfocadas asegurar la calidad del proceso de fabricación de un producto. En este caso involucran el carguío de taladros, desde la perforación hasta el tapado con detrito.

Ello permitirá obtener resultados ideales que se traducen en una óptima fragmentación. Esto a su vez está ligado a una buena productividad de los equipos de minado, menores costos en chancado y molienda, influyendo en todo el ciclo de producción de mineral.

También es importante mencionar que el objetivo de este control es mejorar los procesos y eliminar las fuentes de error. Para lograrlo, es necesario tener al personal motivado e involucrado en el proyecto. Cada uno forma parte del proceso de fabricación y su labor está directamente ligado al aseguramiento de la calidad. Las acciones para lograrlo están detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 7-5. Parámetros a controlar en el Aseguramiento de la Calidad

Actividad	Parámetro	Medidas de Control
Perforación	Calidad de taladros perforados	<ul style="list-style-type: none"> – Verificar la calidad de paredes y altura – Comunicar al área de supervisión para tomar las medidas correctivas
	Calibración de camiones fábrica	<ul style="list-style-type: none"> – Programar pruebas constantes de calibración – Establecer un número máximo de taladros para calibración por descarga de camión
Carguío Taladros	Tapado de taladro	– Tiempo mínimo de esponjamiento (20 min.)
	Muestreo densidades para cada descarga de camión	<ul style="list-style-type: none"> – Notificar a la supervisión en caso no se logra la densidad deseada – Apuntar en la hoja de carguío resultados de muestreo
Explosivo	Calidad de Mezcla	– Verificación cualitativa de calidad de mezcla

7.3.2 Control de calidad

Estas actividades están enfocadas en asegurar la calidad de los productos, a través de la identificación de defectos en los mismos. Para el presente estudio, representan aquellos controles que se realizan principalmente después de la voladura y la velocidad de detonación que es medida durante el disparo.

Este control de calidad permitirá determinar con certeza la calidad de la voladura a través de diversos parámetros a medir. Cabe indicar que algunos de estos controles ya han sido implementados y son parte del procedimiento diario en la compañía.

Tabla 7-6. Parámetros a controlar en el Control de Calidad

Actividad	Parámetro	Medidas de Control
Equipos de Minado	Dig-rate	<ul style="list-style-type: none"> – Supervisar la productividad de los equipos – Tomar decisiones necesarias en caso se vea afectado negativamente
		Fragmentación
Voladura	Presencia de Humos	– Contrastar esta información con el dig-rate Verificar la generación (%) de humos nitrosos en cada voladura y mencionarla en el reporte

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- En conclusión, el uso de ANFO Pesado 73 gasificado logró mejores resultados que los ANFOs Pesados 46 y 64 a base de emulsión matriz en el aspecto operativo, medioambiental, de seguridad y económico.
- En el aspecto operativo se determinó un incremento en el dig-rate (tasa de excavación) de los equipos de minado en un rango de 3-23%, en seis de los nueve casos analizados con el uso de ANFO Pesado 73 gasificado.
- Desde el punto de vista medioambiental y en términos de seguridad, se redujo significativamente la generación de humos nitrosos, los cuales generaban demoras operativas y significaban un riesgo para los trabajadores.
- Económicamente se demostró un ahorro promedio de \$8.0 por taladro en el reemplazo de ANFO Pesado 46 a base de emulsión matriz aplicado para material duro; y un promedio de \$14.5 por taladro para el reemplazo de ANFO Pesado 64 a base de emulsión matriz usado en taladros con agua.
- Finalmente, Minera Yanacocha decidió implementar la utilización del ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable, para el reemplazo de las mezclas de ANFOs Pesados 46 y 64 a base de emulsión matriz.
- La aceptación del uso de emulsión gasificable en la operación abre un panorama para la investigación en más proyectos, tanto para el estudio de emulsión gasificable pura, así como el aprovechamiento de sus ventajas explosivas y energéticas, como el aumento de tamaño de mallas de perforación.

8.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que se sugieren, en base a lo aprendido y observado durante la investigación son las siguientes:

- Existen puntos críticos en el uso del ANFO Pesado 73 a base de emulsión gasificable, los cuales requieren constante monitoreo (control de densidades, tiempo de esponjamiento, inyección de nitrito de sodio y calibración de camiones-fábrica). Además, es importante contar con operadores altamente capacitados.
- Se recomienda establecer mecanismos de control y supervisión post implementación para lograr resultados exitosos constantemente y tener una mejora continua en cuanto a resultados de fragmentación, seguridad y medio ambiente. Uno de estos mecanismos es establecer calibraciones periódicas de camiones-fábrica.
- Por último, se sugiere la experimentación de otros agentes explosivos de buena calidad (en este caso fue la emulsión gasificable) cuyo manejo operativo sea más sencillo y con menos puntos críticos para evitar errores durante la fabricación in-situ, como por ejemplo, emulsión con microesferas de vidrio agregadas en fábrica.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Ames, V., & León, G. (2007). *Tecnología de Explosivos* (Segunda ed.). Lima.
- Bampffield, H. A., & Morrey, W. B. (1984). Emulsion explosives. *CIM Third Coal Operators' Conference*. Fernie, British Columbia, Canada, September, Paper No. 3.
- Burger, B., Vargas, L., Arevalo, H., Vicuna, S., Seidel, J., Valery, W., . . . Nozawa, E. (2011). Yanacocha Gold Single Stage SAG Mill Design, Operation and Optimization. *SAG Conference*. Vancouver.
- Bury, J. (2004). Livelihoods in transition: transnational gold mining operations and local change in Cajamarca, Peru. *The Geographical Journal*, Vol 170, No. 1, 78-91.
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook* (Third ed., Vol. 1). Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- EXSA. (s.f.). Manual Práctico de Voladura. Edición Especial.
- Konya, C., & Albarrán, E. (1998). *Diseño De Voladuras*. México D.F.: Ediciones Cuicatl.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: IGME.
- Manrique M., J. A. (2005). *Manejo de pilas de lixiviación de oro en Minera Yanacocha*. Informe Profesional, UNMSM, Lima.
- Merino, D. (2005). *Geología y controles de mineralización en el depósito Cerro Yanacocha, distrito de Yanacocha (Cajamarca - Perú)*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima.
- Minera Yanacocha SRL. (2013). *Reporte de Sostenibilidad Yanacocha 2012*. Lima: Toronja.
- Minera Yanacocha SRL. (2014). *Proceso del Oro*. Recuperado el Setiembre de 2014, de Minera Yanacocha: <http://www.yanacocha.com.pe/wp-content/uploads/Presentacion-Proceso-del-Oro.ppt>

- Morhard, R. C. (1987). *Explosives and rock blasting*. Dallas, TX: Atlas Power Company.
- Poma F., J. (2012). *Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill (Caso Minera Yanacocha)*. Tesis PUCP, Lima.
- Quiroz, A. (1997). El corredor estructural Chicama-Yanacocha y su importancia en la metalogenia del norte del Perú. *IX Congreso Peruano de Geología*, (págs. 149-154). Lima.
- Rosas, S. (2012). Curso de Geología de Yacimientos Minerales - PUCP.
- Segarra, P., Sanchidrián, J. A., López, L. M., & Querol, E. (2010). On the prediction of mucking rates in metal ore blasting. *Journal of Mining Science*, Vol. 46, No. 2.
- Stiehr, J. F. (2011). *ISEE blasters' handbook* (18th ed.). Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers.
- Teal, L., & Benavides, A. (November de 2010). History and Geologic Overview of the Yanacocha Mining District, Cajamarca, Peru. *Economic Geology*, Vol. 150, No.7, 1173-1190.
- Vente, L., Vicuna, S., Vargas, L., Valery, W., & Valle, R. (2011). Optimización del proceso Gold Mill en Minera Yanacocha. *PERUMIN, 30 Convención Minera*. Arequipa.